



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR AGROFORESTERIE

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE : 2024-2025

N° D'ORDRE :

132

CANDIDAT

Nom : KOUAME

Prénom : Tchrewa Stanislas

THESE DE DOCTORAT

Mention : Agriculture et Foresterie Tropicale

Spécialité : Génétique et Amélioration des plantes

Etude des mécanismes agro-morphologiques, physiologiques, biochimiques et génétiques de la résistance au déficit hydrique de familles d'hybrides de cacaoyers (*Theobroma cacao* L.) en cours de sélection en Côte d'Ivoire.

JURY

Président : M. BAKAYOKO Sidiky, Professeur Titulaire, Université Jean LOROUGNON GUEDE, Côte d'Ivoire

Directeur : M. AKAFFOU Doffou Sélastique, Professeur Titulaire, Université Jean LOROUGNON GUEDE, Côte d'Ivoire

Co-Directeur : M. TAHI Gnion Mathias, Directeur de Recherche, Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), Côte d'Ivoire

Rapporteur : M. DIARRASSOUBA Nafan, Professeur Titulaire, Université Péléforo GON COULIBALY, Côte d'Ivoire

Examineurs : M. KONAN Konan Jean Louis, Directeur de Recherche, Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), Côte d'Ivoire

Mme. TONESSIA Dolou Charlotte, Maître de Conférences, Université Jean LOROUGNON GUEDE, Côte d'Ivoire

**Soutenue publiquement :
le 10 Mai 2025**

TABLE DES MATIERES...	Pages
DEDICACE.....	xi
AVANT-PROPOS	xii
REMERCIEMENTS	xiii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	xvi
LISTE DES TABLEAUX.....	xviii
LISTE DES FIGURES.....	xxii
LISTE DES ANNEXES.....	xxiv
INTRODUCTION.....	2
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	5
1.1. GENERALITES SUR LE CACAOYER	6
1.1.1. Position Systématique.....	6
1.1.2. Morphologie et biologie	7
1.1.2.1. Système racinaire	7
1.1.2.2. Tronc	7
1.1.2.3. Feuilles	8
1.1.2.4. Fleurs.....	9
1.1.2.5. Fécondation et mécanisme d'incompatibilité.....	11
1.1.2.6. Fruit.....	12
1.1.2.7. Graines	13
1.1.3. Historique de la cacaoculture.....	14
1.1.4. Importance économique	16
1.1.5. Diversité génétique.....	17
1.1.6. Amélioration génétique du cacaoyer	19
1.1.6.1. Sélection clonale et générative	19
1.1.6.2. Sélection Récurrente Réciproque (SRR)	19
1.1.6.3. Principaux critères de sélection.....	21

1.1.6.3.1. Production et productivité	21
1.1.6.3.2. Résistance aux maladies et ravageurs	22
1.1.6.3.3. Qualités technologiques et sensorielles	22
1.1.6.3.4. Résistance et la tolérance à la sécheresse	23
1.1.7. Contraintes de la cacaoculture	23
1.1.7.1. Contraintes biotiques	23
1.1.7.1.1. Maladies fongiques	23
1.1.7.1.2. Maladies virales	24
1.1.7.2. Insectes et autres nuisibles	25
1.1.8. Contraintes abiotiques	25
1.1.8.1. Variabilité pluviométrique	25
1.1.8.2. Variabilité thermométrique	25
1.1.8.3. Impact cumulé des variations de la pluviométrie et de la température	27
1.2. NUTRITION MINERALE DES PLANTES ET MECANISMES D'ADAPTATION AU DEFICIT HYDRIQUE	27
1.2.1. Rôle de l'eau dans la nutrition de la plante	27
1.2.2. Résistance et/ou tolérance à la sécheresse.....	28
1.2.2.1. Notions de stress hydrique et de sécheresse.....	28
1.2.2.1.1. Notion de stress hydrique	28
1.2.2.1.2. Notion de sécheresse	28
1.2.2.2. Notion de la résistance à la sécheresse	29
1.2.3. Mécanismes d'adaptations de la résistance des plantes à la sécheresse	30
1.2.3.1. Mécanismes morpho-physiologiques de la résistance des plantes à la sécheresse	30
1.2.3.2. Mécanismes biochimiques de la résistance des plantes à la sécheresse.....	31
1.2.3.3. Notion de métabolites.....	32
1.2.3.4. Implication des métabolites dans la tolérance aux stress abiotiques.....	33
1.2.4. Métabolisme oxydatif et tolérance à la sècheresse	34

1.3. NOTIONS DE GENETIQUE QUANTITATIVE	35
1.3.1. Effets génétiques et environnementaux.....	35
1.3.2. Héritabilité des caractères	36
1.3.2.1. Héritabilité au sens strict	36
1.3.2.2. Héritabilité au sens large	36
1.3.3. Liaisons entre caractères.....	37
1.3.4. Aptitudes générales et spécifiques à la combinaison.....	38
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	39
2.1. Zones d'étude.....	40
2.1.1. Localisation des sites des parcelles	40
2.1.2. Caractéristiques pédoclimatiques des sites de l'étude	40
2.2. Matériel végétal.....	43
2.2.1. Matériel végétal évalué en serre	43
2.2.2. Matériel végétal évalué au champ.....	43
2.2.3. Matériels techniques utilisés.....	44
2.3. Méthodologies	46
2.3.1. Création des familles d'hybrides par pollinisation manuelle contrôlée.....	46
2.3.2. Préparation des familles d'hybrides en pépinière	46
2.3.3. Evaluation de l'influence du stress hydrique en serre	46
2.3.3.1. Dispositif expérimental	46
2.3.3.2. Détermination de la capacité au champ et apport en eau	48
2.3.3.3. Paramètres évalués en serre.....	48
2.3.3.3.1. Taux de mortalité	49
2.3.3.3.2. Paramètres Agro-morphologiques.....	49
2.3.3.4. Paramètres physiologiques	50
2.3.3.4.1. Couleur, aspect et indice de nécrose des feuilles des hybrides en serre.....	50
2.3.3.4.2. Teneur en eau des familles d'hybrides de cacaoyers	50

2.3.3.4.3. Teneur en eau des feuilles des familles d'hybrides de cacaoyers	51
2.3.3.4.4. Teneur relative en eau des feuilles des familles d'hybrides de cacaoyers	51
2.3.3.4.5. Perte en eau des feuilles des familles d'hybrides de cacaoyers	52
2.3.4. Etude du comportement des hybrides au champ	52
2.3.4.1. Dispositif expérimental	52
2.3.4.2. Entretien phytosanitaire des essais multi-locaux	53
2.3.4.3. Paramètres évalués au champ	53
2.3.4.3.1. Taux de mortalité	53
2.3.4.3.2. Paramètres agro-morphologiques	53
2.3.4.3.2.1. Diamètre à 10 cm du sol	54
2.3.4.3.2.2. Hauteur des plants et hauteur de la couronne	54
2.3.4.3.2.3. Section des cacaoyers	54
2.3.4.3.3. Morphologie des cabosses	54
2.3.4.3.3.1. Section des cabosses	54
2.3.4.3.3.2. Epaisseur et volume des cabosses	55
2.3.4.3.3.3. Forme et taille des cabosses	55
2.3.4.3.3.4. Nombre de fèves normales et de fèves plates par cabosse	55
2.3.4.3.4. Paramètres de production	55
2.3.4.3.4.1. Production réelle et totale par arbre	55
2.3.4.3.4.2. Masse moyenne d'une cabosse saine par arbre	56
2.3.4.3.4.3. Masse moyenne de fèves fraîches par cabosse	56
2.3.4.3.4.4. Masse moyenne de fèves sèches ou cacao marchand par cabosse	56
2.3.4.3.4.5. Taux de cabosses pourries	56
2.3.4.3.4.6. Rendement potentiel annuel	56
2.3.4.3.4.7. Rendement réel annuel	57
2.3.4.3.5. Paramètres technologiques	57
2.3.4.3.6. Paramètres physiologiques évalués au champ	57

2.3.4.3.7. Paramètres biochimiques impliqués dans la tolérance /résistance des cacaoyers. ..	58
2.3.4.3.7.1. Teneurs en chlorophylles a, b, c et totales.....	58
2.3.4.3.7.2. Teneurs en azotes foliaires	60
2.3.4.3.7.3. Teneurs en phénols totaux.....	60
2.3.4.3.7.4. Teneurs en protéines solubles	60
2.3.4.3.7.5. Teneurs en proline.....	61
2.3.5.Evaluation de composantes génétiques des paramètres impliqués dans la résistance/tolérance au déficit hydrique au champ	62
2.3.5.1. Estimation des variances génétiques	62
2.3.5.1.1. Variance phénotypique totale	62
2.3.5.1.2. Coefficients de variation génétique (CVG) et phénotypique (CVP)	63
2.3.5.2. Héritabilité des caractères	64
2.3.5.2.1. Héritabilité au sens strict	64
2.3.5.2.2. Héritabilité au sens large	64
2.3.5.3. Liaisons génétiques entre caractères	64
2.3.5.4. Aptitudes générales et spécifiques à la combinaison	64
2.3.6. Analyse statistique des données.....	65
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	68
3.1. RESULTATS	69
3.1.1.Evaluation du comportement des familles d’hybrides en serre et au champ (objectif spécifique 1)	69
3.1.1.1. Détermination du taux de mortalité et des paramètres agro-physiologiques impliqués dans la résistance au déficit hydrique des familles d’hybrides de cacaoyers en serre.....	69
3.1.1.1.1. Taux de mortalité des 31 familles d’hybrides évaluées en serre	69
3.1.1.1.2. Paramètres agro-morphologiques des 31 familles d’hybrides évaluées en serre	69
3.1.1.1.2.1. Diamètre au collet et hauteur des 31 familles d’hybrides	69
3.1.1.1.2.2. Nombre de feuilles fonctionnelles, surfaces foliaires totales et masse spécifique foliaire des familles d’hybrides en serre.....	71

3.1.1.1.2.3. Longueur, largeur racinaire et rapport de la masse racinaire par la masse de la tige des hybrides en serre	75
3.1.1.1.3. Variation physiologique en serre	77
3.1.1.1.3.1. Etat des feuilles sous les régimes hydriques	78
3.1.1.1.3.2. Teneurs en eau des cacaoyers et teneurs en eau foliaires des hybrides en serre	79
3.1.1.1.3.3. Teneur relative en eau des feuilles et perte en eau des feuilles des familles d'hybrides	80
3.1.1.1.4. Corrélations entre les variables agro physiologiques	82
3.1.1.1.5. Structuration des performances agro-morphologiques et physiologiques des familles d'hybrides de cacaoyers en serre	84
3.1.1.2. Comportement des plants des familles d'hybrides au champ	89
3.1.1.2.1. Effets des zones et de l'âge sur la mortalité des cacaoyers	89
3.1.1.2.2. Effets des zones sur la vigueur des cacaoyers à différents âges	89
3.1.1.2.2.1. Diamètres et hauteurs des familles d'hybrides à 3 ans.....	89
3.1.1.2.2.2. Diamètres et section des familles d'hybrides à 9 ans	92
3.1.1.2.3. Hauteur des plants et hauteur de couronnes des familles d'hybrides de cacaoyers à 9 ans.....	93
3.1.1.2.4. Nombre de feuilles fonctionnelles des familles d'hybrides de 3 ans.....	94
3.1.1.2.5. Surface foliaire et masse spécifique foliaire des hybrides à 3 ans et à 9 ans.....	96
3.1.1.2.5.1. Surface foliaire et masse spécifique foliaire des hybrides à 3 ans	96
3.1.1.2.5.2. Surface foliaire et masse spécifique foliaire des hybrides à 9 ans	98
3.1.1.3.2. Teneurs en eau des feuilles des jeunes hybrides (3 ans) et des hybrides âgés (9 ans)	100
3.1.1.3.2.1. Teneurs en eau des feuilles des jeunes hybrides de 3 ans	100
3.1.1.3.2.2. Teneurs en eau des feuilles des jeunes hybrides de 9 ans	101
3.1.1.4. Corrélation entre le taux de mortalité, les paramètres agro-physiologiques au champ	103

3.1.1.5. Structuration des performances agro-morphologiques et physiologiques des familles d'hybrides de cacaoyers de 9 ans au champ	104
3.1.1.5.1. Structuration des familles d'hybrides dans la zone à pluviométrie normale de Divo..	104
3.1.1.5.2. Structuration des familles d'hybrides dans la zone à pluviométrie déficitaire de Toumodi	108
3.1.1.6. Evaluation des paramètres morphologiques des cabosses et de production des familles d'hybrides de 9 ans au champ	111
3.1.1.6.1. Paramètres morphologiques des cabosses.....	111
3.1.1.6.2. Paramètres de production	113
3.1.1.6.2.1. Effet des années de récoltes sur les paramètres de production	113
3.1.1.6.2.2. Effet des années de récoltes sur les paramètres technologiques	114
3.1.1.6.3. Effet des zones sur le cumul des paramètres de production des 23 familles d'hybrides	114
3.1.1.6.3.1. Nombre de cabosses, masse moyenne de cabosse, taux de cabosses pourries de cabosses	114
3.1.1.6.3.2. Nombre de fèves normales, de fèves plates et rendements des familles d'hybrides dans les zones expérimentales	117
3.1.1.6.4. Effet des zones sur le cumul des paramètres technologiques des familles d'hybrides	119
3.1.1.6.4.1. Masse moyenne de fèves fraîches par cabosse, masse moyenne d'une fève sèche	119
3.1.1.6.4.2. Longueur et largeur moyennes des fèves sèches.....	119
3.1.1.7. Structuration morphologiques des cabosses, technologiques et de production des familles d'hybrides dans les différentes zones	121
3.1.1.7.1. Structuration des familles d'hybrides dans la zone de Divo	121
3.1.1.7.2. Structuration des familles d'hybrides dans la zone à pluviométrie déficitaire de Toumodi	124
3.1.2. Evaluation des paramètres biochimiques des familles d'hybrides après trois et neuf années de plantation dans les différentes zones.	128

3.1.2.1. Effet des zones sur la synthèse et l'accumulation des composés biochimiques.	128
3.1.2.2. Effet de l'âge des hybrides sur la synthèse et l'accumulation des composés biochimiques.....	128
3.1.2.3. Effet de l'âge des hybrides sur la synthèse et l'accumulation des composés biochimiques la zone à pluviométrie normale de Divo	129
3.1.2.4. Effet de l'âge des hybrides sur la synthèse et l'accumulation des composés biochimiques dans la zone à pluviométrie déficitaire de Toumodi	129
3.1.2.5. Synthèse des pigments chlorophylliens et accumulation des métabolites secondaires des familles d'hybrides de 3 ans.....	130
3.1.2.5.1. Synthèse des pigments chlorophylliens des familles d'hybrides de 3 ans.....	130
3.1.2.5.2. Accumulation des métabolites secondaires des familles d'hybrides de 3 ans.....	132
3.1.2.6. Synthèse des pigments chlorophylliens et accumulation des métabolites secondaires des familles d'hybrides de 9 ans.....	134
3.1.2.6.1. Synthèse des pigments chlorophylliens des familles d'hybrides de 9 ans.....	134
3.1.2.6.2. Accumulation des métabolites secondaires des familles d'hybrides de 9 ans.....	136
3.1.2.7. Structuration des performances biochimiques des familles d'hybrides de cacaoyers dans les différentes zones	138
3.1.2.7.1. Structuration des familles d'hybrides dans la zone de Divo.....	138
3.1.2.7.2. Structuration des familles d'hybrides en fonction des variables biochimiques dans la zone déficitaire de Toumodi	141
3.1.3. Etude des paramètres génétiques impliqués dans la résistance des familles d'hybrides au déficit hydrique.	145
3.1.3.1. Composantes de la variance, coefficients de variation génotypique et phénotypique	145
3.1.3.2. Coefficients de variation génétique et phénotypique et valeurs en croisement	149
3.1.3.3. Héritabilités des caractères dans les différentes zones.....	151
3.1.3.4. Aptitudes générales et spécifiques à la combinaison des géniteurs dans les différentes zones	151
3.1.3.4.1. Aptitudes générales à la combinaison des géniteurs dans les différentes zones....	151

3.1.3.4.2. Aptitudes spécifiques à la combinaison des croisements dans les différentes zones ..	155
3.1.3.4.2.1. Aptitude spécifique à la combinaison des croisements dans la zone de Divo	155
3.1.3.4.2.2. Aptitudes spécifiques à la combinaison des croisements dans la zone de Bongouanou.....	157
3.1.3.5. Dominance des caractères dans les différentes zones	161
3.1.3.6. Corrélations entre les caractères.....	161
3.1.3.6.1. Corrélations génétiques	161
3.1.3.6.2. Corrélations phénotypiques	163
3.2. DISCUSSION	165
3.2.1. Effet du déficit hydrique sur les paramètres agro-morphologiques des cacaoyers en serre et au champ.....	165
3.2.2 Effet du déficit hydrique sur la physiologie des familles d’hybrides évaluées en serre et au champ	166
3.2.3. Influence du déficit hydrique sur les paramètres de production et de rendements des familles d’hybrides	168
3.2.4. Influence de la variation de la pluviométrie sur la synthèse des pigments chlorophylliens et l’accumulation des métabolites secondaires des génotypes de cacaoyers	169
3.2.5. Etude des mécanismes génétiques de la résistance des familles d’hybrides au déficit hydrique	172
CONCLUSION GENERALE, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS.....	175
REFERENCES.....	180
ANNEXES	xxxiii
PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES.....	

DEDICACE

A

*Mon père, **KOUAMENAN KOUAME**,*

*Mon père adoptif **KOUADIO Ettien Afred***

*Mère **N'GANZA N'goran Viviane**,*

*Ma chère et tendre épouse « **Estelle Diane GNAPI** »*

*Mes enfants **Guelanin Marc Olivier, Miensa Miracle Eliel***

*Pour leur patience, encouragement et soutien sans faille qui m'ont aidé à surmonter toutes les
difficultés rencontrées au cours de cette thèse.*

AVANT-PROPOS

La baisse de pluviométrie due à la sécheresse dans les zones traditionnelles de culture de cacaoyer durant cette décennie, a eu un impact très négatif sur les productions agricoles et particulièrement sur la production cacaoyère en Côte d'Ivoire. Dans ce contexte de changement climatique, la création de nouvelles familles d'hybrides plus adaptée à ces conditions de production de cacao marchand est un impératif. C'est dans cette optique que nous avons entrepris les activités de recherche sur le thème « l'étude des mécanismes agro-physiologiques, biochimiques et génétiques de la résistance au déficit hydrique de familles d'hybrides de cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) » au stress hydrique induit et à la sécheresse.

Les travaux ont été réalisés en Côte d'Ivoire sur plusieurs sites : à la station de recherche du CNRA de Divo, à la serre expérimentale du CNRA de Soubré, à l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa (UJLoG), et en zones marginales, notamment à Djékanou, Toumodi, Yamoussoukro, Bouaflé et à Bongouanou. Les objectifs spécifiques de cette étude ont porté sur : 1) la détermination des paramètres agro-morphologiques et physiologiques de la résistance au stress hydrique induit en serre et au champ des familles d'hybrides, 2) la caractérisation des paramètres biochimiques impliqués dans la résistance des familles d'hybrides au déficit hydrique et 3) la recherche du déterminisme génétique des paramètres agro physiologiques et biochimiques impliqués dans la résistance des familles d'hybrides à la sécheresse.

Les différentes activités menées au cours de cette étude ont été réalisées grâce au financement du Conseil du Café et du Cacao (CCC) via le Fonds Interprofessionnel pour la Recherche et le Conseil Agricoles (FIRCA). Cette étude fait l'objet de notre mémoire de thèse de doctorat unique. Les manipulations en serre, au laboratoire ainsi que la mise en place des expérimentations au champ ont été très passionnantes avec la conviction profonde de contribuer à la résolution certaine d'un problème qui entrave l'économie ivoirienne. En effet, cette thèse permettrait d'obtenir une meilleure connaissance des mécanismes impliqués dans la résistance à la sécheresse et faciliter la création et la sélection de génotypes performants.

Les difficultés rencontrées dans la réalisation de cette étude ont porté sur le matériel végétal (familles d'hybrides) dont sa création nécessite un temps assez long. D'abord, la maturation des cabosses issues des différents croisements a duré en moyenne cinq à six mois. Ensuite, les familles d'hybrides ont passé six mois à la pépinière avant les différentes expérimentations.

En guise de conclusion, nous avons la satisfaction d'avoir atteint notre objectif afin que cette plante continue de jouer son rôle de moteur de l'économie ivoirienne.

REMERCIEMENTS

La réalisation des activités de cette thèse a été possible grâce au concours de plusieurs personnes et institutions que je souhaite remercier. Il s'agit notamment de :

Professeur ADOHI Krou Viviane, Professeur Titulaire en Physique-Chimie, Présidente de l'Université Jean Lorougnon GUEDE (UJLoG), pour les facilités administratives qu'elle m'a accordées en vue de mon inscription en thèse et les premiers rudiments de ma formation académique.

Professeur SANGARE Abdourahamane, Directeur Général du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), qui a autorisé mon stage pratique dans le cadre de cette thèse. Grâce à son concours, j'ai pu bénéficier de meilleures conditions pour réaliser mes travaux de recherche doctorale.

Professeur SORO Dognimeton, Professeur Titulaire en Agro-pédologie, Vice-Président chargé de la pédagogie et de la vie universitaire, de l'Université Jean Lorougnon GUEDE (UJLoG) pour la qualité de l'enseignement que nous avons reçue.

Professeur KONE Issiaka, Professeur Titulaire en Sociologie, Vice-président en charge de la Recherche, de l'innovation Technologique et des Relations Extérieures de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLog) pour les partenariats entre ladite institution et les structures de recherches en l'occurrence le Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) où cette thèse a été réalisée

Docteur KOUASSI Kouassi Clément, Maître de Conférences en Microbiologie et sécurité Alimentaire, Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) en Agroforesterie, pour mon intégration au sein de son unité.

Professeur AKAFFOU Douffou Sélastique, Professeur Titulaire en génétique et amélioration des plantes, Directeur scientifique de cette thèse, qui, plus qu'un père, est un modèle de réussite pour moi. La rigueur, le courage et la détermination dans le travail sont en outre des vertus que vous m'aviez inculqué durant mes stages de Master et de Doctorat. Merci Professeur pour tout le savoir et les valeurs que vous m'avez transmises.

Docteur TAHI Gnion Mathias, Directeur de recherche au CNRA, Coordinateur Scientifique de la direction régionale du CNRA de Gagnoa, Directeur de recherche au CNRA, Codirecteur de cette thèse. Travailleur infatigable, qui m'a permis de faire mes preuves tant dans les activités du laboratoire que dans les activités du terrain. Sa renommée mondiale est une boussole qui nous guide dans l'accomplissement de notre future carrière professionnelle.

J'exprime ma gratitude au Docteur AYOLIE Koutoua Constant, Professeur Titulaire en physiologie végétale, Directeur du Laboratoire d'Amélioration de la Production Agricole (LAPA) de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa d'avoir accepté de diriger la méthodologie des paramètres physiologiques de cette thèse. Qu'il trouve ici, l'expression de ma profonde reconnaissance, mon immense gratitude pour son savoir, sa confiance et ses encouragements.

Je ne saurais oublier les rapporteurs et les membres du jury qui ont contribué fortement à l'amélioration de ma thèse :

- Monsieur BAKAYOKO Sidiky Professeur Titulaire en Agro-pédologie à l'Université Jean Lorougnon Guédé, président du jury de cette thèse.

- Monsieur Nafan DIARRASSOUBA, Professeur Titulaire de génétique et Amélioration des plantes à Université Péléforo GON COULIBALY, rapporteur de cette thèse.

- Monsieur KONAN Konan Jean Louis, Directeur de Recherche en Génétique et Amélioration de plantes au Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), Examineur,

- Madame TONESSIA Dolou Charlotte, Maître de Conférences en Phytopathologie à Université Jean LOROUGNON GUEDE, Examineur.

Je tiens à témoigner ma profonde reconnaissance :

Au Professeur ANGAMAN Maxime, Professeur Titulaire de Biochimie à l'Université Jean Lorougnon GUEDE, pour avoir accepté de diriger le volet biochimique de cette thèse. Qu'il trouve ici, l'expression de mon immense gratitude et mon grand respect pour tous ses efforts, son savoir, ses idées, sa confiance et ses encouragements.

A Docteur GUIRAUD Brigitte, Chargée de recherche en Génétique au CNRA pour ses conseils tout le long de mon parcours au CNRA. Merci pour les échanges qui m'ont permis d'amorcer la recherche sur le cacaoyer.

A Docteur TREBISSOU Caudou, attaché de recherche en Génétique au CNRA avec qui j'ai commencé les premières missions en milieu paysan. Nos échanges sur le travail ont participé à l'évolution de mes connaissances sur la cacaoculture.

À Docteur KOUASSI Mahaman Ouattara, attaché de recherche en Génétique au CNRA qui m'a initié aux analyses diallèles pour les paramètres génétiques.

Je suis sincèrement reconnaissant aux chercheurs : aux Docteurs COULIBALY Klotioloma, Directeur de la station de recherche CNRA de Divo, N'GUESSAN Wallet, chef de programme

cacao de la station de recherche CNRA de Divo, KOUAME Norbert, KOTEX Jacques, ASSI Maryse, GOGBE Françoise et OUATTARA Yaya qui m'ont apporté conseils et encouragements.

Je suis redevable à monsieur Sékou AÏDARA, Chercheur en entomologie à la retraite. [Si le système fait la part belle aux diplômés, nous savons tous que vous méritez d'être un Professeur émérite]. Les dispositifs expérimentaux, la statistique, la rédaction scientifique et la vision scientifique n'ont pas de secret pour vous. Je vous serai à jamais reconnaissant pour la confiance que vous m'avez accordée et l'amour des statistiques que vous m'avez transmis.

Je ne saurais oublier Monsieur ADOU Brou dit Mahama Ouattara, Assistant plantation à la station CNRA de Divo, mon grand frère, pour son soutien infaillible au cours de cette thèse. Merci infiniment.

J'associe à ses remerciements :

- les Techniciens du laboratoire de génétique au CNRA de Divo, avec à leurs têtes les chefs des différentes opérations que sont Mounou Pierre KOUAME, Kouakou YOBOUE, Didier BAZEMO, et ABOLY Hilaire, pour leurs aides précieuses sur le terrain.

- mes amis stagiaires, membres du « Centre de Calculs » que sont Mathurin ATCHI, Bernadette OHOUO, Firmin GOURE BI, Sandrine MINAKOU, ASSI Pépin et KOFFI Stanislas.

- mes frères et soeurs Junior Fabrice, Silvère N'ganza, Prisca Tanoah, Inès Amah, Bonaventure Naka, Thérèse Amenan, Annicette Ablan et Mathieu krou qui m'ont soutenu par leurs prières et leurs conseils.

Enfin, que tous ceux que je n'ai pas cités trouvent ici l'expression de ma haute reconnaissance pour leurs apports importants qui ont permis l'aboutissement heureux de mon travail, merci infiniment à vous !

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ACP : Analyse en Composantes Principales

AGC : Aptitude Générale à la Combinaison.

ANOVA : *Analysis of Variance* (Analyse de variance)

ASC : Aptitude Spécifique à la Combinaison

BA-T_x : Population composite de Bas amazonien et de Trinitario du x^{ième} cycle

BA_x : Population de Bas amazoniens du x^{ième} cycle

CC : Capacité au champ

CCC : Conseil du Café-Cacao

Chla : Chlorophylle a

Chlb : Chlorophylle b

Chlc : Chlorophylle c

Chlt : Chlorophylles totales

CMLV : Cocoa Mottle-Leaf Virus (Virus de la mosaïque des feuilles du cacaoyer)

CNRA : Centre National de Recherche Agronomique

CSSV : Cocoa Swollen Shoot Virus (Virus du gonflement des tiges du cacaoyer)

DDL : Degré de liberté

ETP : Evapotranspiration potentielle

ETR : Evapotranspiration réelle

F1 : Hybride interspécifique de première génération

FAO : *Food and Agriculture Organization of the United Nations* / Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

FCB : Forme de Cabosse,

FIRCA : Fonds Interprofessionnel pour la Recherche et le Conseil Agricoles

Francs CFA : Francs de la Communauté Financière Africaine

HA_x : Population de Haut amazonien du x^{ième} cycle

ICCO: International cocoa organization

ICGD: International Cocoa Germplasm Database

IDEFOR-DCC : Institut Des Forêts-Département du Café et du Cacao

IFCC : Institut Français du Café et du Cacao

IRCC : Institut de Recherche sur le Café et le Cacao

MSF : Masse spécifique foliaire

NCABS : Production réelle

NFF : Nombre de fèves normales

NFN : Nombre de fèves normales par cabosse

PED : Perte en eau

PFF : Poids des fèves fraîches d'une cabosse

PIB : Produit Intérieur Brut

PMCAB : Poids moyen d'une cabosse

PMEG : *Phytophthora megakarya*

PMFF : Poids moyen de fèves fraîches

PMFS : Poids de fèves sèches

POX : Peroxydase

RPA : Rendement potentiel annuel en cacao marchand

RPVIG : Rapport de la production sur la vigueur

RRR : Rendement réel annuel

SAS : *Statistical Analysis System* / Système d'analyse statistique

SEC : Section du tronc du cacaoyer

SOD : Superoxyde dismutase

SRFT : Surface foliaire totale

SRR : Sélection récurrente et réciproque

TCM : Taille Moyenne de cabosse,

TCP : Taux de cabosses pourries

TE : Teneur en eau

TOT : Nombre totale de cabosses produites

TRE : Teneur relative en eau

UJLoG : Université Jean Lorougnon Guédé

VC : volume de cabosse

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Stratégies de sélection en fonction des valeurs de variances d'aptitudes à la combinaison	38
Tableau II : Caractéristiques pédoclimatiques des zones expérimentales	42
Tableau III : Description du matériel végétal de cacaoyer évalué dans les différentes zones d'étude.....	45
Tableau IV : Dispositif expérimental en serre	47
Tableau V : Description des échantillons de feuilles des familles d'hybrides collectés dans les zones agro-écologiques et évalués au laboratoire	59
Tableau VI : Comparaison du taux de mortalité en fonction des différents régimes hydriques	69
Tableau VII : Taux de mortalité des plants des familles d'hybrides de cacaoyers sous les différents régimes hydriques.....	70
Tableau VIII : Comparaison du diamètre et de la hauteur dans les différents régimes hydriques	70
Tableau IX : Diamètre au collet et hauteur des familles d'hybrides de cacaoyers sous les différents régimes hydriques en serre	72
Tableau X : Comparaison du nombre de feuilles, de la surface foliaire totale et de la masse spécifique foliaire dans les différents régimes hydriques	73
Tableau XI : Nombre de feuilles fonctionnelles, surface foliaire et masse spécifique foliaire des familles sous régimes hydriques en serre	74
Tableau XII : Effet des régimes hydriques sur le système racinaire et sur le rapport entre masse fraîche de la racinaire et celle de la tige	75
Tableau XIII : Croissance et développement du système racinaire des familles d'hybrides sous régimes hydriques en serre	76
Tableau XIV : Comparaison de la teneur en eau des plants et de la teneur en eau des feuilles dans les différents régimes hydriques.....	79
Tableau XV : Teneur en eau, teneur en eau foliaire des hybrides sous régimes hydriques en serre.....	81
Tableau XVI : Comparaison de la teneur relative en eau des feuilles et de la perte en eau des feuilles dans les différents régimes hydriques	81
Tableau XVII : Teneur relative en eau foliaire et perte en eau foliaire des hybrides sous différents régimes hydriques en serre.....	83

Tableau XVIII : Matrice de corrélation de Pearson entre les variables agro-physiologiques et le taux de mortalité en serre	84
Tableau XIX : Valeur propre, variance exprimée et contribution des variables à la formation des composantes de l'analyse en composantes principales des hybrides dans le régime hydrique 20 % CC	85
Tableau XX : Comparaison des familles d'hybrides en fonction du taux de mortalité à différents âges	90
Tableau XXI : Comparaison des familles d'hybrides de cacaoyers en fonction du diamètre et de la hauteur à 3 ans dans les différentes zones	91
Tableau XXII : Comparaison des familles d'hybrides de 9 ans selon le diamètre et la section	93
Tableau XXIII : Hauteur et hauteur de couronne des familles d'hybrides de 9 ans	94
Tableau XXIV : Nombre de feuilles fonctionnelles des hybrides de 3 ans selon les zones agro écologiques	95
Tableau XXV : Surface foliaire totale et Masse spécifique foliaire des hybrides de 3 ans selon les différentes zones agro écologiques.....	97
Tableau XXVI : Surface foliaire totale et Masse spécifique foliaire des hybrides de 9 ans selon les différentes zones agro écologiques.....	99
Tableau XXVII : Comparaison des jeunes familles d'hybrides de 3 ans en fonction de la teneur en eau des feuilles dans les différentes zones.....	101
Tableau XXVIII: Teneur en eau des feuilles, teneur relative en eau et perte d'eau des feuilles des familles d'hybrides de 9 ans dans différentes zones.....	102
Tableau XXIX : Matrice de corrélation de Pearson entre les variables agro-physiologiques et le taux de mortalité au champ	104
Tableau XXX : Valeur propre, variance exprimée et contribution des variables à la formation des composantes de l'analyse en composantes principales des hybrides de 9 ans dans la zone de Divo.	105
Tableau XXXI : Valeur propre, variance exprimée et contribution des variables à la formation des composantes de l'analyse en composantes principales des hybrides de 9 ans dans la zone de Toumodi.....	108
Tableau XXXII : Comparaison des familles d'hybrides selon les paramètres morphologiques des cabosses dans les différentes zones.....	112
Tableau XXXIII : Influence des années de récoltes sur les paramètres de production.....	113
Tableau XXXIV : Influence des années de récoltes sur les paramètres Technologiques.....	114

Tableau XXXV : Cumul du nombre, de la masse moyenne et du taux de cabosses pourries des hybrides dans les zones expérimentales durant les quatre (04) années de récoltes	116
Tableau XXXVI: Nombre de fèves et rendements des familles d'hybrides dans les zones expérimentales.....	118
Tableau XXXVII : Cumul des paramètres technologiques des familles d'hybrides selon les zones expérimentales.....	120
Tableau XXXVIII : Valeur propre, variance exprimée et contribution des variables de production à la formation des composantes de l'analyse en composantes principales des hybrides dans la zone Divo	122
Tableau XXXIX: Valeur propre, variance exprimée et contribution des variables de production à la formation des composantes de l'analyse en composantes principales des hybrides dans la zone déficitaire de Toumodi.....	124
Tableau XL : Synthèse des pigments chlorophylliens des hybrides de 3 ans selon les zones expérimentales.....	131
Tableau XLI : Accumulation des métabolites secondaires des hybrides de 3 ans selon les zones expérimentales.....	133
Tableau XLII : Synthèse des pigments chlorophylliens des familles d'hybrides de 9 ans selon les zones expérimentales	135
Tableau XLIII : Accumulation des métabolites secondaires des hybrides de 9 ans selon les zones expérimentales.....	137
Tableau XLIV : Valeur propre, variance exprimée et contribution des variables biochimiques à la formation des composantes de l'analyse en composantes principales des hybrides dans la zone de Divo.....	138
Tableau XLV : Valeur propre, variance exprimée et contribution des variables biochimiques à la formation des composantes de l'analyse en composantes principales des hybrides dans la zone déficitaire de Toumodi.....	141
Tableau XLVI : Effets génétiques des caractères agro-physiologiques et biochimiques des hybrides issues de croisements diallèles 6x6 sans les autofécondations après transformation racine carrée des données dans les différentes zones.....	146
Tableau XLVII : Composantes de la variance des paramètres agro- physiologiques et biochimiques des hybrides dans les différentes zones	148
Tableau XLVIII : Coefficients de variation génétique et phénotypique des paramètres agro-physiologiques et biochimiques des hybrides dans les différentes zones	150

Tableau XLIX : Héritabilités au sens strict et au sens large des paramètres agro- physiologiques et biochimiques des hybrides dans les différentes zones	151
Tableau L : Aptitudes générales à la combinaison des géniteurs pour les caractères agro- physiologiques et biochimiques dans les différentes zones	152
Tableau LI : Aptitudes spécifiques à la combinaison des croisements pour les caractères agro- physiologiques et biochimiques dans la zone de Divo.....	156
Tableau LII : Aptitudes spécifiques à la combinaison des croisements pour les caractères agro- physiologiques et biochimiques dans la zone de Bongouanou	158
Tableau LIII : Aptitude spécifique à la combinaison des croisements pour les caractères agro- physiologiques et biochimiques dans la zone de Bouaflé	160
Tableau LIV : Variances d'aptitudes générales et spécifiques à la combinaison des cacaoyers et leurs rapports	162
Tableau LV : Corrélations génétiques entre les caractères des familles d'hybrides	163
Tableau LVI : Corrélations phénotypiques entre les caractères des hybrides	164

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Architecture générale d'un cacaoyer (A) et son schéma (B)	8
Figure 2 : Inflorescence et fleurs du cacaoyer	10
Figure 3 : Différentes formes de cabosses chez le cacaoyer <i>Theobroma cacao</i> L.	13
Figure 4 : Fèves de cacaoyer <i>Theobroma</i> L.	14
Figure 5 : Répartition des zones de production et des principales zones de consommation de cacao.....	15
Figure 6 : Production mondiale de cacao marchand par continent (A) et par les principaux pays producteurs (B)	16
Figure 7 : Diversité de la morphologie des fruits de certains génotypes de <i>Theobroma cacao</i> L. issus de 10 groupes génétiques.....	18
Figure 8 : Schéma de sélection récurrente et réciproque	20
Figure 9 : Hauteurs pluviométriques moyennes des régions au cours des 5 décennies 1950 – 1959 ; 1960 – 1969 ; 1970 – 1979 ; 1980 – 1989 et 1990 - 1999 en Côte d'Ivoire	26
Figure 10 : Cacaoyers asséchés par la sécheresse au champ à Bouaflé	26
Figure 11 : Vue schématique des principales voies de synthèse de métabolites secondaires et leurs interactions avec le métabolisme primaire	32
Figure 12 : Situation géographique des sites d'étude.....	41
Figure 13 : Différentes étapes de la pollinisation manuelle	47
Figure 14 : Apparence générale de famille d'hybrides (F12) sous régime hydrique en serre..	77
Figure 15 : Couleur des feuilles des familles d'hybrides sous régimes hydriques en serre. ...	78
Figure 16 : Aspect foliaire des familles d'hybrides sous régimes hydriques	78
Figure 17 : Nécrose foliaire des familles d'hybrides sous régimes hydriques	79
Figure 18 : Biplot de corrélation de l'analyse en composantes principales indiquant la relation entre les variables agro- physiologiques et les familles d'hybrides de cacaoyers évaluées en serre suivant les axes 1 et 2	87
Figure 19 : Structuration des familles d'hybrides de cacaoyers par groupe homogène selon les variables discriminantes dans les différents régimes hydriques en serre.	88
Figure 20 : Couleur, aspect et nécrose des feuilles des jeunes hybrides selon les zones.....	99
Figure 21 : Biplot de corrélation de l'analyse en composantes principales indiquant les relations entre les variables agro-physiologiques et les familles d'hybrides de cacaoyers de 9 ans dans la zone de Divo.....	106
Figure 22 : Structuration des familles d'hybrides de cacaoyers de cacaoyers de 9 ans par groupe homogène selon les variables agro-physiologiques évaluée dans la zone de Divo	107

Figure 23 : Biplot de corrélation de l'analyse en composantes principales indiquant les relations entre les variables et les familles d'hybrides de cacaoyers de 9 ans dans la zone de Toumodi.	109
Figure 24 : Structuration des familles d'hybrides de cacaoyers de 9 ans par groupe homogène selon les variables agro-physiologiques évaluée dans la zone de Toumodi.	110
Figure 25 : Biplot de corrélation de l'analyse en composantes principales indiquant les relations entre les variables de production et les hybrides dans la zone de Divo	122
Figure 26 : Structuration des familles d'hybrides de 9 ans par groupe homogène selon les variables de production dans la zone de Divo	123
Figure 27 : Biplot de corrélation de l'analyse en composantes principales indiquant les relations entre les variables de production et les hybrides dans la zone déficitaire de Toumodi	125
Figure 28 : Structuration des familles d'hybrides de 9 ans par groupe homogène selon les variables de production dans la zone déficitaire de Toumodi	126
Figure 29 : Variation des teneurs des composés biochimiques selon les zones	128
Figure 30 : Variation des teneurs des composés biochimiques selon l'âge des hybrides	129
Figure 31 : Variation des teneurs des composés biochimiques selon l'âge des familles d'hybrides dans la zone de Divo	129
Figure 32 : Variation des composés biochimiques en fonction de l'âge des parcelles en zone sèche	130
Figure 33 : Biplot de corrélation de l'analyse en composantes principales indiquant les relations entre les variables biochimiques et les hybrides dans la zone de Divo.	139
Figure 34 : Structuration des familles d'hybrides de 9 ans par groupe homogène selon les variables biochimiques évaluées dans la zone de Divo.	140
Figure 35 : Biplot de corrélation de l'analyse en composantes principales indiquant les relations entre les variables biochimiques et les hybrides dans la zone déficitaire de Toumodi.	142
Figure 36 : Structuration des familles d'hybrides de 9 ans par groupe homogène selon les variables biochimiques évaluées dans la zone déficitaire de Toumodi.	143

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Croisements entre les géniteurs pour la création des hybrides évalués en serre et au champ	xxxiv
Annexe 2 : Descendances issues du croisement diallèle 6 x 6 sans les autofécondations...	xxxv
Annexe 3 : Liste de matériels techniques et leur rôles en serre et au champ.....	xxxv
Annexe 4 : Images de principaux matériels techniques utilisés au champ et au laboratoire	xxxvi
Annexe 5 : Disposition des sachets remplis de terreaux (A) et germination des fèves après semis (B).....	xxxvii
Annexe 6 : Croissance et développement des plants à la pépinière pour l'évaluation en serre et au champ.	xxxvii
Annexe 7 : Disposition des plants en serre.....	xxxvii
Annexe 8 : Dispositif expérimental pour les essais issus du plan de croisement simple .	xxxviii
Annexe 9 : Dispositif expérimental pour les essais issus du plan de croisement diallèle 6x6 sans les autofécondations	xxxix
Annexe 10 : Processus de formation de des fèves fraîches	xl
Annexe 11 : séchage des fèves fermentées en plein soleil durant 7 jours	xl
Annexe 12 : Collecte d'échantillons de feuilles semi-aoutées depuis le champ jusqu'au laboratoire.....	xli
Annexe 13 : Courbe d'étalonnage de l'acide gallique pour la détermination des Phénols totaux	xlii
Annexe 14 : Courbe étalon du dosage de Protéines solubles	xlii

INTRODUCTION

Le cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) est une plante pérenne appartenant à la famille des Malvaceae. Il est cultivé pour ses fèves à l'origine du chocolat (Dorin, 2003). La production mondiale de cacao s'élevait à près de 4,5 millions tonnes. La Côte d'Ivoire fournit à elle seule, près de 1,8 millions tonnes de fèves de cacao marchand au cours de la campagne 2023-2024, soit 40 % de l'offre mondiale (CCO, 2024) et occupe depuis plus de quarante ans, le premier rang parmi la cinquantaine de pays producteurs. Cette production importante de fèves de cacao marchand contribue à hauteur de 15 % du Produit Intérieur Brut (PIB). Elle constitue la source principale de revenu d'environ 600 000 chefs d'exploitation et six millions de personnes qui animent le système de production en milieu rural (ICCO, 2024). Actuellement, le cacao représente à lui seul 40 % des produits d'exportations ivoiriens et apporte de ce fait un important soutien économique à l'état de Côte d'Ivoire (ICCO, 2024).

Toutefois, ces importants acquis socio-économiques ne doivent pas occulter les nombreuses contraintes de production du cacao en Côte d'Ivoire qui sont capables d'engendrer une baisse significative de la production ivoirienne et d'accentuer la pauvreté en milieu rural (Kouakou, 2014). Les principales contraintes relevées d'une façon générale, peuvent être classées en deux catégories selon leur nature. Il s'agit des facteurs biotiques et des facteurs abiotiques.

Les facteurs biotiques (première catégorie) sont liés aux fortes pressions parasitaires comme les mirides (*Sahlbergella singularis* Hagl.) (Miridae) (Kouamé *et al.*, 2015 ; Kouakou *et al.*, 2011), par certaines maladies telles que la pourriture brune des cabosses dont le principal agent causal en Côte d'Ivoire est *Phytophthora palmivora*. Aussi, la maladie du *cocoa swollen shoot virus* (CSSVD) dont la recrudescence a accentué la dégradation de l'état sanitaire du verger dans plusieurs zones de production du pays (Kébé & N'Guessan, 2003 ; Olunloyo, 2003). Ces facteurs favorisent le vieillissement du verger, voir dans les cas extrêmes à l'abandon des plantations (Assiri *et al.*, 2009 ; 2016 ; Koua *et al.*, 2018), du au faible niveau d'utilisation du matériel végétal amélioré pour la création des plantations (Tahi *et al.*, 2011; Koua *et al.*, 2018).

La deuxième catégorie est liée aux contraintes abiotiques caractérisées par le changement climatique dont la conséquence directe est la rareté des pluies due à la sécheresse. Ce phénomène est considéré comme l'un des facteurs les plus limitant pour la production de *Theobroma cacao* (Freud *et al.*, 2000 ; Dos Santos *et al.*, 2016).

En effet, pour la plupart des foyers de production de cacao en Côte d'Ivoire, le verger est entré dans sa phase de sénescence et nécessite d'être replanté (Aguilar *et al.*, 2003). De nombreuses tentatives de replantation ont été entreprises sans succès du fait de la dégradation des conditions

agro-écologiques pour la production du cacao (Ruf, 2000 ; Ruf & Allanbga, 2001). Plante ombrophile, le cacaoyer exige pour son développement des conditions climatiques humides avec des hauteurs de pluie annuelles comprises entre 1200 et 1500 mm, avec un nombre limité de jours secs pour une température moyenne de 28° C selon Brou *et al.* (2003). La recherche de telles conditions climatiques pour la cacaoculture a favorisé la dégradation considérable du couvert forestier ivoirien au cours de ces 25 dernières années avec un taux de conservation passant de 16 millions à 2,9 millions d'hectares (CICG, 2022). De plus, les zones de production sont marquées par une forte variabilité climatique (Brou *et al.*, 2005 ; Kassin *et al.*, 2008 ; Ehounou *et al.*, 2019) avec des pluviométries irrégulières dont les moyennes sont en dessous de 1200 mm de pluie (Brou *et al.*, 2005). Cette situation entraine des difficultés d'établissement de nouvelles cacaoyères dans ces zones, à cause de la mortalité élevée des jeunes plants, de la baisse des rendements due au flétrissement des cherelles, au dessèchement des cabosses, à l'accolement des fèves à l'intérieur des cabosses et, dans le meilleur des cas, à la diminution de la taille des fèves (Tahi *et al.*, 2012).

Pour pallier ce problème, le programme d'amélioration génétique du cacaoyer du CNRA a produit des variétés performantes (Tahi *et al.*, 2010). Si ces variétés tolèrent certains aléas biotiques tels que les maladies (Tahi *et al.*, 2012), leur comportement face à la sécheresse liée au changement climatique, n'est pas connu, la résistance à la sécheresse étant à l'époque considérée comme un critère secondaire.

Un programme important de recherche y a été consacré afin de produire non seulement du matériel végétal plus adapté, mais aussi, de comprendre les mécanismes de résistance à la sécheresse et d'envisager une sélection précoce.

Selon les études réalisées par Bogaert (1990) et Daymond *et al.* (2011), la sélection de génotypes tolérants à la sécheresse a montré qu'ils adoptent des stratégies d'adaptation. Ces stratégies diffèrent d'une espèce à une autre et d'un génotype à un autre au sein de la même espèce. De plus, les génotypes font intervenir plusieurs combinaisons au niveau anatomique, morphologique, physiologique, biochimique et génétique. Au niveau morphologique, les végétaux réagissent par la diminution de leurs tailles et du nombre de leurs feuilles. A l'échelle cellulaire, les plantes mettent en place des mécanismes d'ajustement osmotique pour la réabsorption de l'eau et la protection des structures les plus sensibles à une déshydratation létale (Mourid, 1988 ; Casals, 1996 ; Zhang *et al.*, 1999). Parallèlement, l'activation du métabolisme oxydatif chez les végétaux entrave la toxicité due à l'accumulation excessive des formes actives d'oxygène (Foyer & Noctor, 2000 ; Aroca *et al.*, 2003).

Ces travaux ont guidé notre étude dont l'objectif général est de contribuer à l'amélioration de la productivité du cacaoyer par la création et la sélection des familles d'hybrides résistantes au déficit hydrique.

Dans sa spécificité, cette étude vise à :

- déterminer les caractères agro-morphologiques et physiologiques impliqués dans la tolérance au stress hydrique des familles d'hybrides de cacaoyers ;
- caractériser les paramètres biochimiques impliqués dans la résistance des familles d'hybrides de cacaoyers au déficit hydrique ;
- déterminer les paramètres génétiques impliqués dans la résistance des familles d'hybrides de cacaoyers au déficit hydrique.

Les hypothèses de travail sont les suivantes :

1. les familles d'hybrides de cacaoyers présentent des caractéristiques agro-physiologiques pour résister au déficit hydrique ;
2. les familles d'hybrides de cacaoyers synthétisent et accumulent des composés biochimiques dans la résistance au déficit hydrique ;
3. les paramètres génétiques contrôlent les expressions des gènes responsables de la résistance au déficit hydrique ;

La présente thèse est organisée en trois grandes parties. Outre l'introduction, la première partie est une revue bibliographique portant sur les généralités sur le cacaoyer et la notion d'amélioration génétique. Le matériel étudié et les méthodes employées sont décrits dans la deuxième partie. Les résultats et la discussion qui en découlent sont respectivement exposés dans la troisième partie. Le manuscrit se termine par une conclusion générale qui synthétise les résultats obtenus et propose quelques perspectives de recherche et des recommandations.

.

PREMIERE PARTIE : GENERALITES

1.1. GENERALITES SUR LE CACAOYER

1.1.1. Position Systématique

Selon plusieurs auteurs, *Theobroma cacao*, est une espèce préférentiellement allogame, avec un fort taux d'auto-incompatibilité dû à un système gaméto-sporophytique (Cope, 1958 ; Lanaud, 1987 ; Royaert et *al.*, 2011). Espèce diploïde ($2n = 2x = 20$ chromosomes) de l'ordre des malvales. Anciennement classée dans la famille des Sterculiaceae (Cuatrecasas, 1964), l'espèce *Theobroma cacao* L., a été récemment reclassée dans la famille des Malvaceae suite à des études moléculaires d'Alverson et *al.* (1999). La taille de son génome initialement estimée à 380 Mpb (Figueira & Janick, 1993 ; Lanaud et *al.*, 1992) est aujourd'hui estimée à environ de 430 Mpb suite aux travaux d'assemblage des séquences sur environ 75,5 % du génome de la variété Criollo réalisés par Argout et *al.* (2011). Ce génome contient presque tous les gènes décrits dans les travaux précédents, dont 99 % sont ancrés sur les 10 chromosomes. La position systématique de l'espèce se présente comme suit :

Domaine : Biota

Règne : Plantae

Sous-Règne : Viridiplantae

Division : Magnoliophyta

Tribu : Byttneriées

Classe : Equisetopsida

Sous-classe : Magnoliidae

Super-Ordre : Rosanae

Ordre : Malvales

Famille : Malvaceae

Genre : *Theobroma*

Espèce : *T. cacao* L.

Le genre comprend six sections et 22 espèces dont l'aire géographique d'origine se situe entre le 18^e degré de latitude nord et le 15^e degré de latitude sud du continent américain. Seule l'espèce *Theobroma cacao* est cultivée pour ses fèves qui sont transformées en chocolat

essentiellement. Toutefois, d'autres espèces du genre sont cultivées pour d'autres usages (Cuatrecasas, 1964). C'est par exemple le cas de l'espèce *T. grandiflorum* dont la pulpe est utilisée dans la préparation des boissons rafraîchissantes.

1.1.2. Morphologie et biologie

Le cacaoyer (Figure 1 A), est une plante pérenne des étages inférieurs des forêts tropicales humides d'Amérique qui atteint 25 m de hauteur à l'âge adulte à l'état sauvage selon Carletto (1973) et Lachenaud *et al.* (1997). Mais en plantation, il dépasse rarement 5 à 7 m de hauteur à l'âge adulte (Lachenaud & Sallée, 1993). Son développement végétatif dépend de l'espace disponible. Il produit des fruits dès l'âge de 2 ans et atteint sa pleine production vers 5 ou 6 ans à l'âge adulte.

1.1.2.1. Système racinaire

Le système racinaire subit des transformations selon le type du matériel végétal (semenceau ou bouture). Chez le semenceau, il a une croissance rapide et verticale après germination et développe des racines secondaires à la base de l'hypocotyle.

Ce système racinaire est constitué d'un pivot de 30 à 40 cm dès l'âge de 6 mois et de 1 à 2 m de long à 10 ans. Il possède une couronne de racines latérales qui se répartissent dans les 50 cm de la couche superficielle du sol (Figure 1 B).

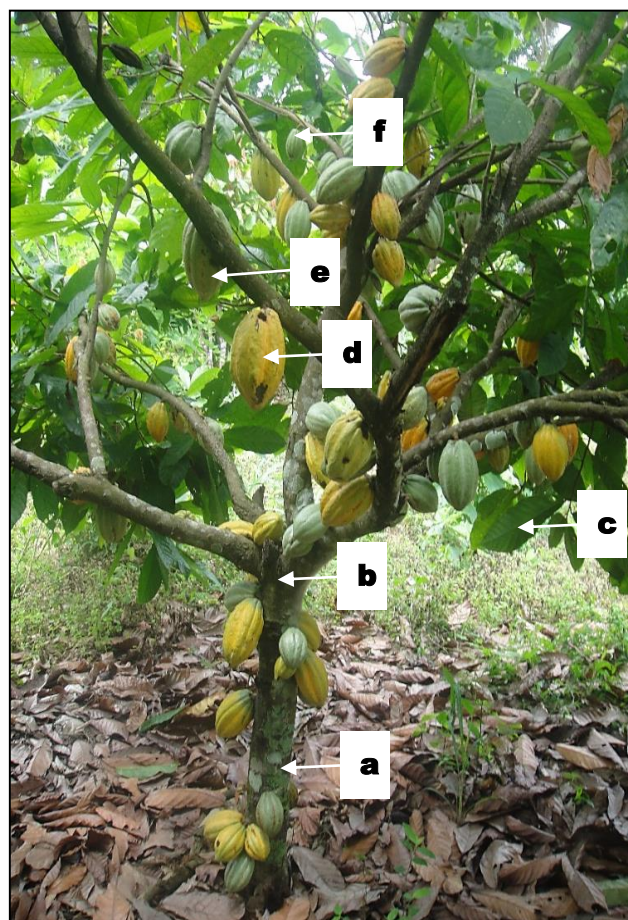
Quant aux racines principales, elles peuvent changer de direction selon les obstacles qu'elles rencontrent dans le sol (Mossu, 1990) et leur développement peut atteindre 5 à 6 m autour du cacaoyer. Cependant, les cacaoyers obtenus à partir de boutures n'émettent que des racines latérales. Ainsi, l'absence du pivot a pour conséquence le ralentissement de leur développement végétatif en les rendant aussi vulnérables à la sécheresse au cours de la première année de leur existence (Braudeau, 1969).

1.1.2.2. Tronc

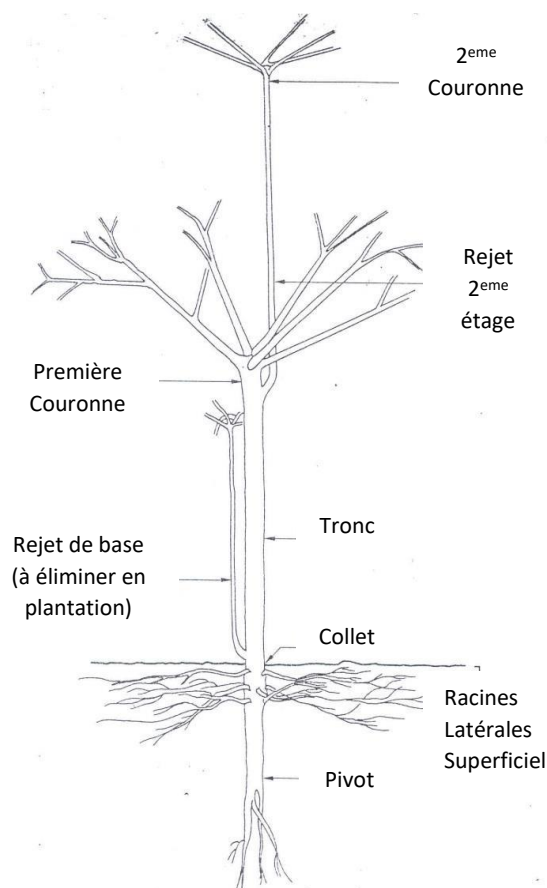
La croissance du jeune semenceau, d'abord orthotrope et discontinue vers l'âge de 18 mois, s'interrompt lorsque le tronc atteint une hauteur moyenne de 1,5 m. L'extrémité de la tige présente à ce stade un massif de cinq bourgeons axillaires disposés en verticille et dont le développement donne naissance en général à cinq branches plagiotropes (mais quelque fois 3 ou 4 branches) pour former une couronne.

Après dégénération du bourgeon terminal, d'autres bourgeons axillaires situés aux aisselles des feuilles ou des cicatrices foliaires se développent immédiatement en dessous des branches de la

couronne. Il s'ensuit alors de nouveaux axes orthotropes exactement comme la première tige dont le prolongement en hauteur aboutit à la formation d'autres couronnes. La succession de ce phénomène aboutit à un, deux voire trois étages au-dessus de la tige initiale selon Braudeau (1969).



A



B

Figure 1 : Architecture générale d'un cacaoyer (A) selon M'bo (2015) et son schéma (B) (Mossu 1990)

a = tronc du cacaoyer, b = jorquette ou couronne, c = feuille, d = cabosse mure, e = cabosse non mure, f = cherelles ;

1.1.2.3. Feuilles

Les feuilles de *Theobroma* L. sont simples, entières, penninervées, à phyllotaxie variables sur les tiges, mais distiques sur les branches. Elles sont grandes, alternes, oblongues, de couleur verte, à pétiole muni d'une articulation ou renflement moteur qui leur permet de s'orienter en fonction de l'intensité lumineuse. Les jeunes feuilles apparaissant à chaque poussée foliaire (flush) sont molles et pigmentées avec une coloration variant du violet foncé au vert pâle. A maturité, elles prennent une couleur vert foncé, acquièrent une rigidité et présentent un port

subhorizontal. Les feuilles sont portées par un pétiole dont la longueur varie de 7 à 9 cm sur les axes orthotropes et de 2 à 3 cm sur les rameaux plagiotropes.

A sa base, se trouvent deux stipules caduques. Le limbe est simple, papyracé et terminé par une pointe. Il a 20 à 30 cm de longueur et 7 à 12 cm de largeur. L'épiderme de la face supérieure est fortement cutinisée avec des tissus palissadiques comportant de grandes cavités intercellulaires, remplies de mucilage. La période de sénescence qui précède la chute de la feuille se situe entre quatre et six mois après des phases d'activités photosynthétiques maximales (Alvim, 1965 ; Mossu, 1990).

1.1.2.4. Fleurs

La fleur du cacaoyer est hermaphrodite, régulière, de type 5 et portée par un pédoncule de 1 à 3 cm de longueur (Figure 2). Les fleurs, pentamères sont constituées de cinq pétales et cinq sépales libres et dotées d'un ovaire contenant environ 30 à 60 ovules. L'ovaire, supère, à placentation axile, comprend 5 carpelles opposées aux pédicelles selon Aké-Assi (1984). L'androcée comprend 2 verticilles soudés à la base : l'un extrême, comporte 5 staminodes de couleur violacée opposés aux sépales. L'autre, interne, présente 5 étamines fertiles opposées aux pétales et dont les filets sont divisés en 2 ou 3 ramifications portant chacune une anthère biloculaire. Les pétales sont divisés en deux parties : la partie inférieure, ou cuculle, est érigée et renflée en forme de capuchon et la partie supérieure comprend les étamines, le filet et les anthères. Les pétales et les sépales sont plats, de formes variées (oblongue à elliptique ou discoïde) et de couleur également variée (jaune, rouge ou pourpre). Les filets sont incurvés et divisés en deux ou trois ramifications portant chacune une anthère biloculaire. Les anthères se trouvent cachées à l'intérieur de la cuculle du pétale (Aké-Assi, 1984). Le cacaoyer est dit cauliflore, ce qui veut dire que les inflorescences se situent sur le tronc et les branches de l'arbre. Les inflorescences apparaissent sur des massifs renflés appelés coussinets floraux. L'épanouissement du bouton floral débute l'après-midi lorsque les extrémités des sépales commencent à s'entrouvrir.

La déhiscence des anthères survient dès l'épanouissement de la fleur et le pollen est immédiatement fonctionnel. Les grains de pollen, de forme sphéroïde sont de petites dimensions (16 à 23 microns). Leur viabilité est de courte durée et ne dépasse pas 48 heures dans les conditions naturelles (Lachenaud, 2014). La première floraison peut se produire à l'âge de 14 à 18 mois pour les variétés précoces (Alvim, 1977). La floraison du cacaoyer est favorisée par des températures moyennes élevées et des pluies abondantes. En général, en zone ouest africaine, deux principales périodes de floraison sont observées. Une période allant d'avril à

juillet qui conduit à la principale période de récolte (septembre-janvier) et la période allant de novembre à janvier qui donne la récolte intermédiaire (avril à juillet).

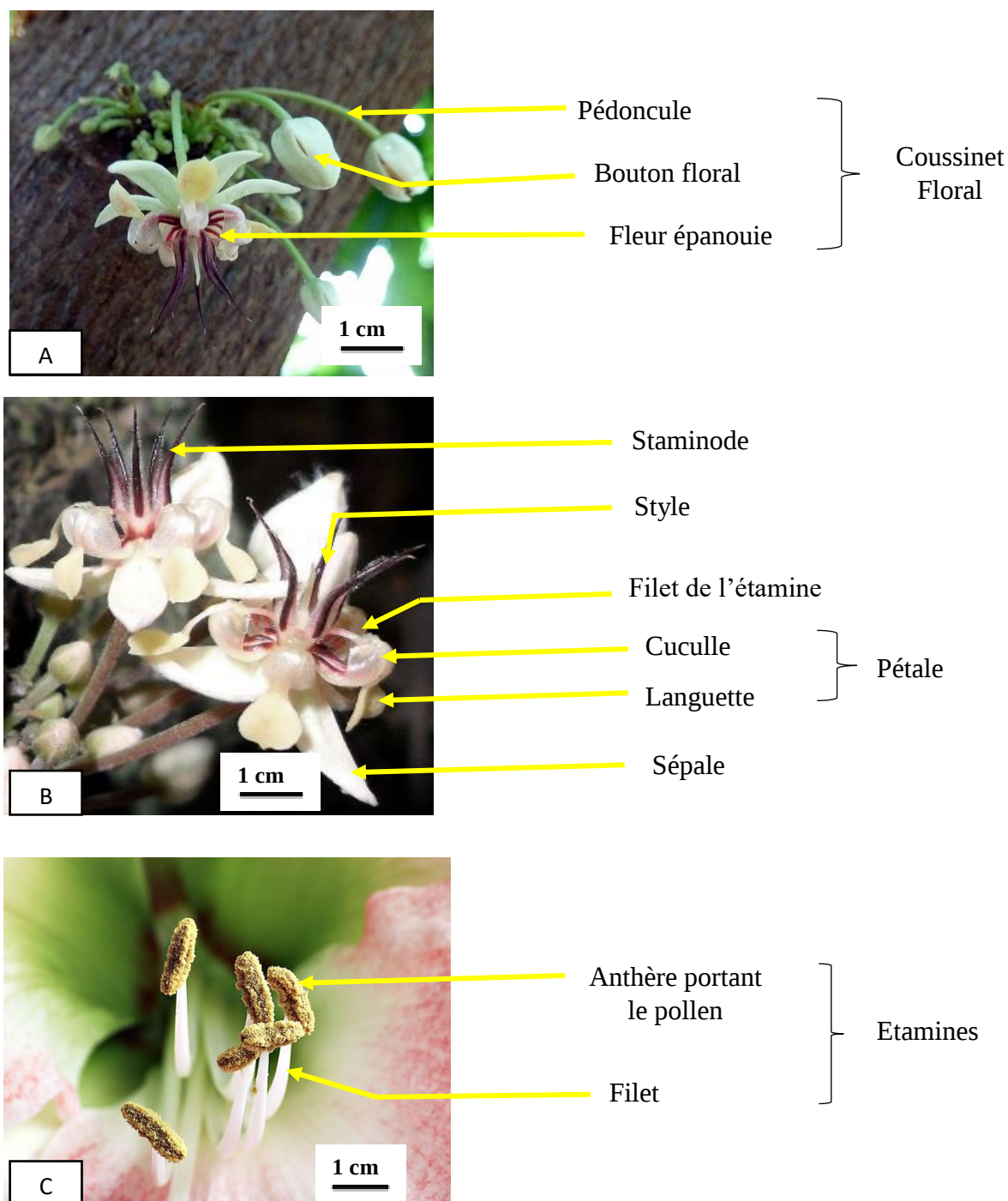


Figure 2 : Inflorescence et fleurs du cacaoyer (M'bo, 2015)

A : Coussinet floral ; B : Fleurs épanouies ; C : Etamines

Un cacaoyer produit en moyenne 50 000 fleurs par an, mais, celles-ci ne sont pas toutes pollinisées.

En effet, Les pièces florales du cacaoyer telles que disposées ne facilitent pas la pollinisation naturelle. Les anthères sont logées dans les cuculles des pétales et les stigmates sont protégés par les staminodes qui les entourent. Ainsi, c'est avec difficulté que les pollens (gluants et compacts) atteignent les stigmates sous le seul effet du vent. De ce fait, Paulin *et al.* (1984) ont affirmé que la pollinisation du cacaoyer est essentiellement entomophile et est assurée par de petits insectes du genre *Forcipomya* et *Crematogaster*. Le cacaoyer produit annuellement plusieurs milliers de fleurs mais seulement une dizaine de fruits sont formés. C'est pourquoi Parvais *et al.* (1977) pensaient en effet qu'une pollinisation plus efficace pourrait augmenter la production.

En ce qui concerne la pollinisation artificielle, les pollens peuvent être mis en contact avec le stigmate de la fleur grâce à l'intervention humaine en vue d'une augmentation de la production et/ou d'une production des hybrides légitimes. Ainsi, la veille de la pollinisation, les boutons floraux à polliniser sont isolés avec des tubes d'isolement appelés « manchons ». Ces tubes, préférentiellement en plastique, ont une longueur variant entre 4 à 5 cm et un diamètre compris entre 10 et 15 mm. Ils sont fermés à une extrémité par un tissu à mailles très serrées permettant les échanges gazeux mais empêchant toute pénétration d'insectes. Le lendemain de l'isolement, une fois les fleurs ouvertes, le pollen et les anthères de la fleur mâle sont frottés sur le stigmate de la fleur femelle (Braudeau, 1969).

1.1.2.5. Fécondation et mécanisme d'incompatibilité

Vingt-quatre (24) heures après la pollinisation, se déroule la germination du grain de pollen dans le stigmate, suivi de la pénétration dans le style du tube pollinique et son développement jusqu'au sac embryonnaire de l'ovule. Peu de temps après l'arrivée du tube pollinique dans le sac embryonnaire, le premier noyau mâle fusionne avec celui de l'oosphère pour former le zygote alors que le second noyau mâle s'accrole aux deux noyaux polaires pour former le noyau triploïde de l'endosperme. La fusion du gamète est complète trois jours après la pollinisation (Braudeau, 1969). Cependant, chez le cacaoyer, de nombreux cas d'incompatibilité se traduisent par la chute de certaines fleurs pollinisées faute de fécondation. En effet, l'espèce *T. cacao* se compose d'un grand nombre de populations infertiles, très variables sur le plan morphologique. Les plantes sont majoritairement allogames et caractérisées également par un système d'auto-incompatibilité gaméto-sporophytique qui renforce l'allogamie de certaines populations (Knight & Rogers, 1955 ; Lanaud *et al.*, 2017).

Le phénomène d'incompatibilité gaméto-sporophytique semble être spécifique au cacaoyer. En effet, le processus de fécondation reste le même que le croisement soit compatible ou non, jusqu'au moment où les gamètes viennent en contact les uns des autres dans le sac embryonnaire. C'est en ce moment que l'incompatibilité se manifeste en empêchant la fusion des gamètes. Cope (1958) a montré que les croisements incompatibles sont toujours caractérisés par la présence dans l'ovaire de 25,5 à 100 % d'ovules pour lesquels la fusion des gamètes n'a pas eu lieu. Ainsi, selon cet auteur, la seule présence de 25 % d'ovules non fécondés peut être responsable de la chute des fleurs. Les phénomènes d'incompatibilité revêtent une très grande importance pour tous les travaux de sélection effectués sur le cacaoyer. L'auto-incompatibilité a l'avantage de maintenir dans une population, une grande variabilité génétique et une sélection clonale dans cette population, avec plus de chance de succès (Braudeau, 1969).

1.1.2.6. Fruit

Le fruit du cacaoyer, indéhiscent, ressemble à une baie appelée « cabosse ». Il présente un péricarpe charnu et épais dont l'assise épidermique extérieure peut être pigmentée. Le mésocarpe, mince et dur, est plus ou moins lignifié, et l'endocarpe charnu est plus ou moins épais. Le jeune fruit appelé « cherelle » comprend au niveau de l'ovaire, cinq loges dans chacune desquelles les graines sont régulièrement réparties. Lorsque le fruit mûrit, les parois des loges disparaissent et il ne subsiste qu'une seule cavité dans laquelle les graines entourées de pulpes mucilagineuses apparaissent normalement disposées en cinq rangées. Une cabosse contient en général 30 à 40 fèves. La durée de développement d'un fruit peut varier de 5 à 7 mois en fonction des génotypes. Avant maturité, la couleur de la cabosse du cacaoyer est soit verte soit rouge-violet plus ou moins foncé, soit verte partiellement pigmentée de rouge violet. Les fruits des variétés Forastero amazoniens ont généralement une couleur verte à l'état immature et jaune-orangé à l'état mature selon Braudeau (1969). Les sillons sont plus ou moins marqués selon le génotype. Ils sont particulièrement profonds chez les variétés Criollo et sont souvent à peine marqués chez certaines variétés Forastero. Le péricarpe de la cabosse peut présenter une surface très verruqueuse (c'est le cas pour la majorité des Criollo et Trinitario) ou plus ou moins lisse. L'épaisseur du péricarpe (cortex) varie de 6 à 10 mm chez les Criollo et de 18 à 20 mm chez certains Forastero. Le poids de la cabosse est compris en moyenne entre 200 g et 1 kg. Chez les Forastero, les valeurs de poids moyen de cabosses sont comprises entre 400 et 500 g (Braudeau, 1969).

La forme des cabosses a souvent servi de critère dans la classification des cacaoyers cultivés et est utilisée en particulier pour décrire les variétés. Il existe chez le cacaoyer, les formes angoleta,

cundeamor, amelonado et calabacillo (Figure 3). Les appellations angloleta, cundeamor, amelonado, calabacillo ne sont aujourd'hui utilisées que pour décrire la forme des cabosses de certains cultivars par rapport à quelques formes caractéristiques (Lachenaud, 2014).

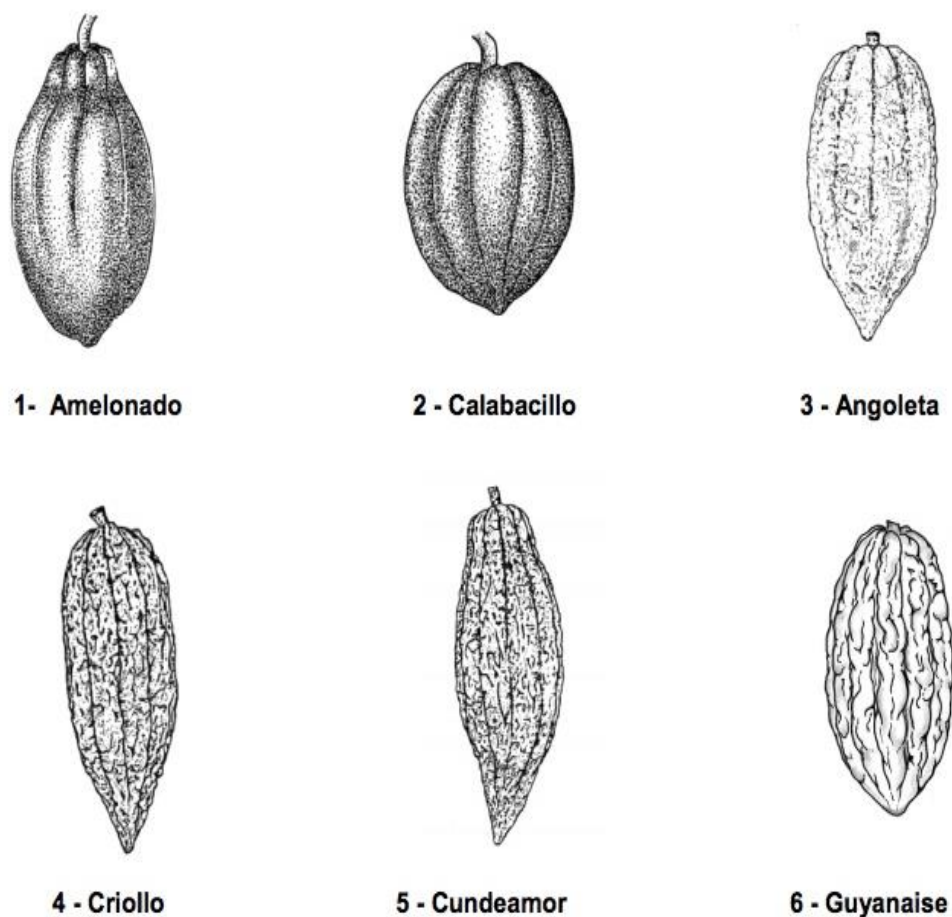


Figure 3 : Différentes formes de cabosses chez le cacaoyer *Theobroma cacao* L. (Lachenaud, 2014).

1.1.2.7. Graines

Les graines de *T. cacao*, appelées fèves, sont généralement disposées en cinq rangées dans la cabosse (Figure 4). Les graines sont sans albumen et ont une forme dodue de 2 à 3 cm de longueur et de section presque ronde. Elles sont recouvertes d'une pulpe mucilagineuse de couleur blanche et de saveur sucrée. La graine, de couleur rosée et fortement nervurée, est recouverte d'une fine enveloppe. L'intérieur du tégument est occupé par deux cotylédons de l'embryon dont les couleurs peuvent varier du blanc (pour la variété Criollo) au violet (pour la variété Forastero) en passant par toutes les teintes intermédiaires possibles chez le type

Trinitario (Mossu, 1990). Le nombre moyen de graines par cabosse constitue un indicateur de taille dans l'appréciation de la productivité des génotypes de cacaoyers (Lachenaud, 1991).

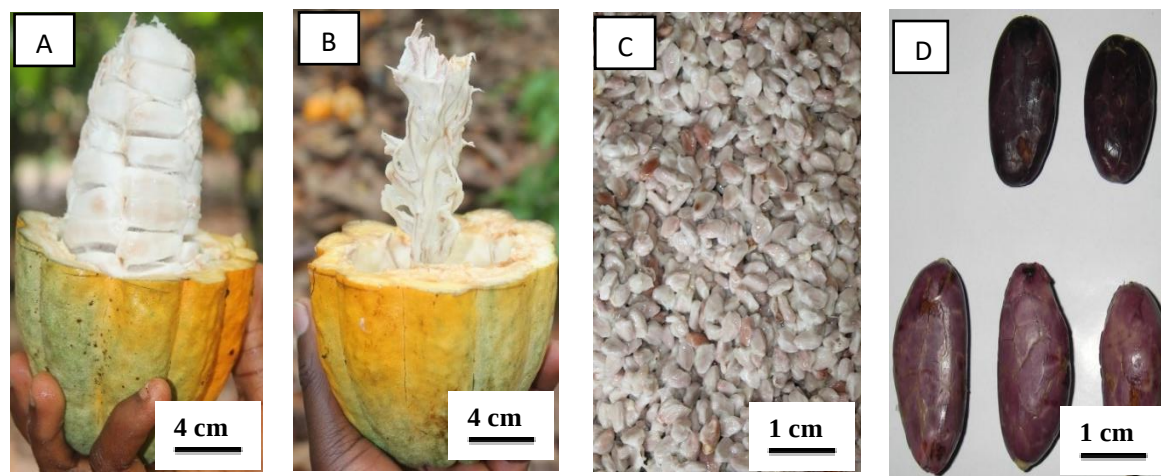


Figure 4 : Fèves de cacaoyer *Theobroma* L. (Lachenaud, 1991).

A= Disposition en rangée des fèves dans la cabosse ; B= cabosse vide plus rachis ; C= fèves recouvertes d'une pulpe mucilagineuse ; D= Cotylédons Violet. Echelle =2/3

1.1.3. Historique de la cacaoculture

Dérivé de la langue Maya, le cacao a été mentionné pour la première fois dans la littérature botanique par Charles de l'Ecluse (Braudeau, 1969). La domestication du cacaoyer est ancienne et sa culture a été pratiquée il y a 2 000 à 3 000 ans par les civilisations précolombiennes, en particulier par les Mayas et les Aztèques (Paradis, 1979). Le genre *Theobroma* se rencontre à l'état naturel dans les étages inférieurs des forêts humides d'Amérique tropicale, à une altitude généralement inférieure à 1250 m. Linné a attribué en 1737 le nom de *Theobroma* ou « nourriture des dieux » au genre cacao, rappelant le caractère divin que décernaient les Aztèques à cette plante. En effet, selon ces derniers, les semences leur auraient été envoyées par le dieu Quetzcoalt.

Theobroma cacao L., a été cultivé depuis le XIV^{ème} siècle par les Aztèques au Mexique. Il était utilisé pour la préparation d'une boisson nourrissante utilisée à l'occasion des cérémonies religieuses (Paradis, 1979) et constituait également une monnaie d'échanges couramment utilisée dans toutes les provinces du Mexique (Wood, 1985). Dès la fin du XVI^{ème} siècle, la culture du cacao s'est répandue dans la plupart des régions tropicales d'Amérique centrale, d'Amérique du Sud, ainsi que dans plusieurs contrées des îles Caraïbes et notamment à Trinidad. Avant son introduction en Espagne par les espagnols, le cacaoyer avait déjà été cultivé dans les régions Sud-ouest de Costa Rica (Bergman, 1969). Les premières exportations du

cacao vers l'Europe se sont faites d'abord sous forme de pâtes préparées localement, ensuite sous forme de fèves de cacao. D'Espagne, l'usage du cacao s'est répandu en Italie et en France. Vers 1750, les Français ont planté des cacaoyers en Martinique, en Haïti ; les Portugais à Belém et à Bahia. C'est au cours du XVIIème siècle que l'usage du chocolat sous forme de boisson a été observé en Hollande, en Angleterre, en Allemagne et au Venezuela (Barrau, 1979).

L'introduction du cacaoyer en Afrique est plus récente. Les premières graines de cacaoyers ont été semées sur le continent Africain en 1857, en provenance de Surinam. Elles ont été importées au Ghana par les missionnaires Suisses. Les premiers cacaoyers répandus en Afrique de l'ouest à partir du Ghana étaient originaires de la basse Amazonie (Forastero Amelonado). En 1920, des formes hybrides Trinitario et Criollo ont été importées. Ces variétés se sont hybridées avec les Amelonado locaux. La culture de cacao a démarré dans la région Est du Ghana en 1879. Elle a ensuite pris des dimensions commerciales en colonisant toute la zone forestière ghanéenne. Du Ghana, la culture a migré vers la Côte d'Ivoire, ensuite au Togo et dans l'ouest du Nigeria et quelques années après au Cameroun. Les premières fèves furent introduites en Côte d'Ivoire par Verdié à partir de la région d'Aboisso en 1888. Par la suite, elles ont été distribuées par l'administration coloniale aux populations d'Abengourou, d'Agboville, de Tiassalé et de Dabou qui ont fini par se convaincre de l'intérêt économique de cette culture avec beaucoup de méfiances au départ (Boni, 1978). L'extension rapide de la culture du cacaoyer en Afrique au cours du XIXème siècle est liée au développement de l'industrie du chocolat (Braudeau, 1969). La figure 5, présente les principales zones de production et de consommation du cacao dans le monde.

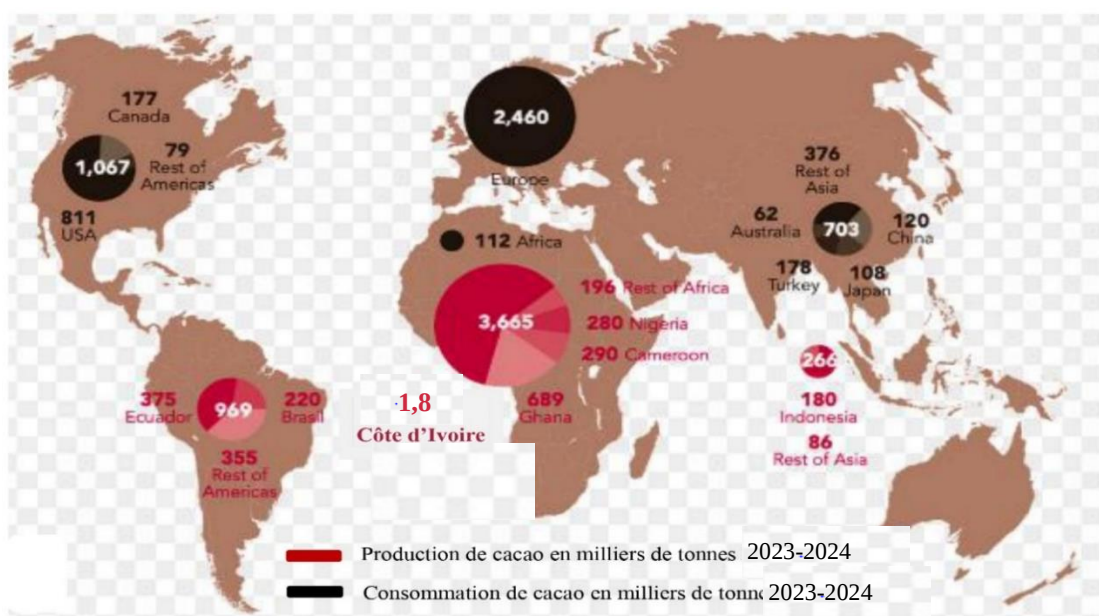


Figure 5 : Répartition des zones de production et des principales zones de consommation de cacao (ICCO 2024).

1.1.4. Importance économique

Theobroma cacao L. produit une matière première de grande valeur commerciale pour de nombreux pays. Le cacao a été exploité par les Mayas au XVe siècle pour la confection de plats cuisinés, de gelées ou de boissons rafraîchissantes qui découlent de la pulpe sucrée et acidulée entourant les fèves. Aujourd'hui, les mêmes fèves servent à la fabrication du chocolat, de denrées alimentaires, de produits cosmétiques et pharmaceutiques (Dorin, 2003). Le cacao représente une importante source de revenus pour environ 5 millions de personnes dans le monde. La production mondiale de cacao marchand a enregistré une baisse de 14 % au cours de la campagne 2023-2024 pour 4,2 millions de tonnes de cacao marchand contre 4,9 millions au cours de l'année 2022-2023 (ICCO, 2024).

L'Afrique occupe une position dominante avec près de 74 % du volume de production, 21 % pour l'Amérique du sud, 5 % pour l'Asie et l'Océanie (Figure 6 A). La Côte d'Ivoire est le premier pays producteur et détient à elle seule, 39 % des parts de marché mondial, suivie du Ghana (16 %), de l'Équateur (9 %), du Cameroun (7 %) et du Nigeria (6 %), comme l'indique la Figure 6 B. En 2024. La production ivoirienne en cacao marchand a franchi la barre de 1,8 million de tonnes, mais les revenus des exportations de fèves de cacao de la campagne 2023/24 (qui s'étend d'octobre à septembre) sont en baisse de plus de 25% par rapport à la campagne 2022/23. En 2023, les exportations de cacao en fèves ont rapporté 2 018 milliards de francs CFA à la Côte d'Ivoire (ICCO, 2024).

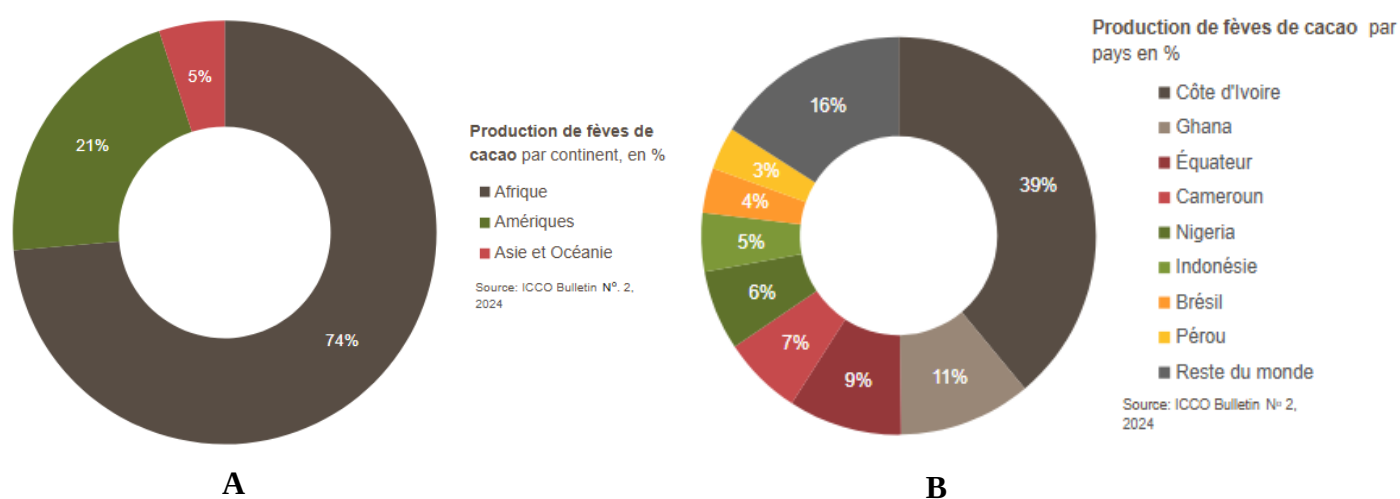


Figure 6 : Production mondiale de cacao marchand par continent (A) et par les principaux pays producteurs (B) ; (ICCO, 2024)

1.1.5. Diversité génétique

Des études sur la diversité génétique et les bases génétiques des caractères d'intérêt chez le cacaoyer ont permis de distinguer trois grands groupes relativement à leurs origines géographiques et les caractères morphologiques des cabosses et des fèves.

Les *Forastero* sont originaires de l'Est de la cordillère des Andes, dans la région comprenant le nord du Brésil jusqu'aux Guyanes (Cuatrecasas, 1964). Leurs fèves constituent la quasi-totalité du cacao marchand provenant du Brésil, de l'Afrique de l'ouest et du Sud-Est Asiatique (Lerceteau *et al.*, 1992). Les *Forastero* sont généralement vigoureux et présentent un bon niveau de résistance aux maladies. Ils sont subdivisés en deux sous-groupes : les Haut-Amazoniens et les Bas-Amazoniens qui incluent les *Amelonado* dont les *Amelonado* «Ouest-Africains»

Les *Criollo* sont domestiqués dans la région allant du Mexique jusqu'en Colombie et au Venezuela (Reyes, 1992). Ils se présentent sous forme cultivée ou subspontanée et produisent des fruits allongés violet ou verts avant maturité avec une pointe acuminée, une surface lisse ou rugueuse, et un cortex peu lignifié. Les graines sont généralement grandes et épaisses, de couleur blanche ou rosée (Lachenaud & Motamayor, 2017). Ce groupe donne un cacao fin avec de bonnes caractéristiques organoleptiques. Cependant, les *Criollo* sont de plus en plus abandonnés à cause de leur faible vigueur et leur sensibilité élevée aux maladies et aux insectes nuisibles (Soria, 1970).

Les *Trinitario* sont constitués de types diversifiés et hétérogènes issus de l'hybridation entre *Forastero* et *Criollo*.

Ces groupes génétiques ont toujours constitué la base de l'amélioration génétique du cacaoyer. Cependant, les études moléculaires de Motamayor *et al.* (2008) sur 1241 accessions représentatives de la diversité génétique de l'espèce ont révélé une nouvelle classification des cacaoyers en dix groupes génétiques, basée sur des critères morpho-géographiques et génomiques distincts que sont : Marañón, Curaray, Criollo, Iquitos, Nanay, Contamana, Amelonado, Purús, Nacional et les Guiana. . La Figure 7 présente quelques caractères morphologiques des fruits de ces groupes génétiques.

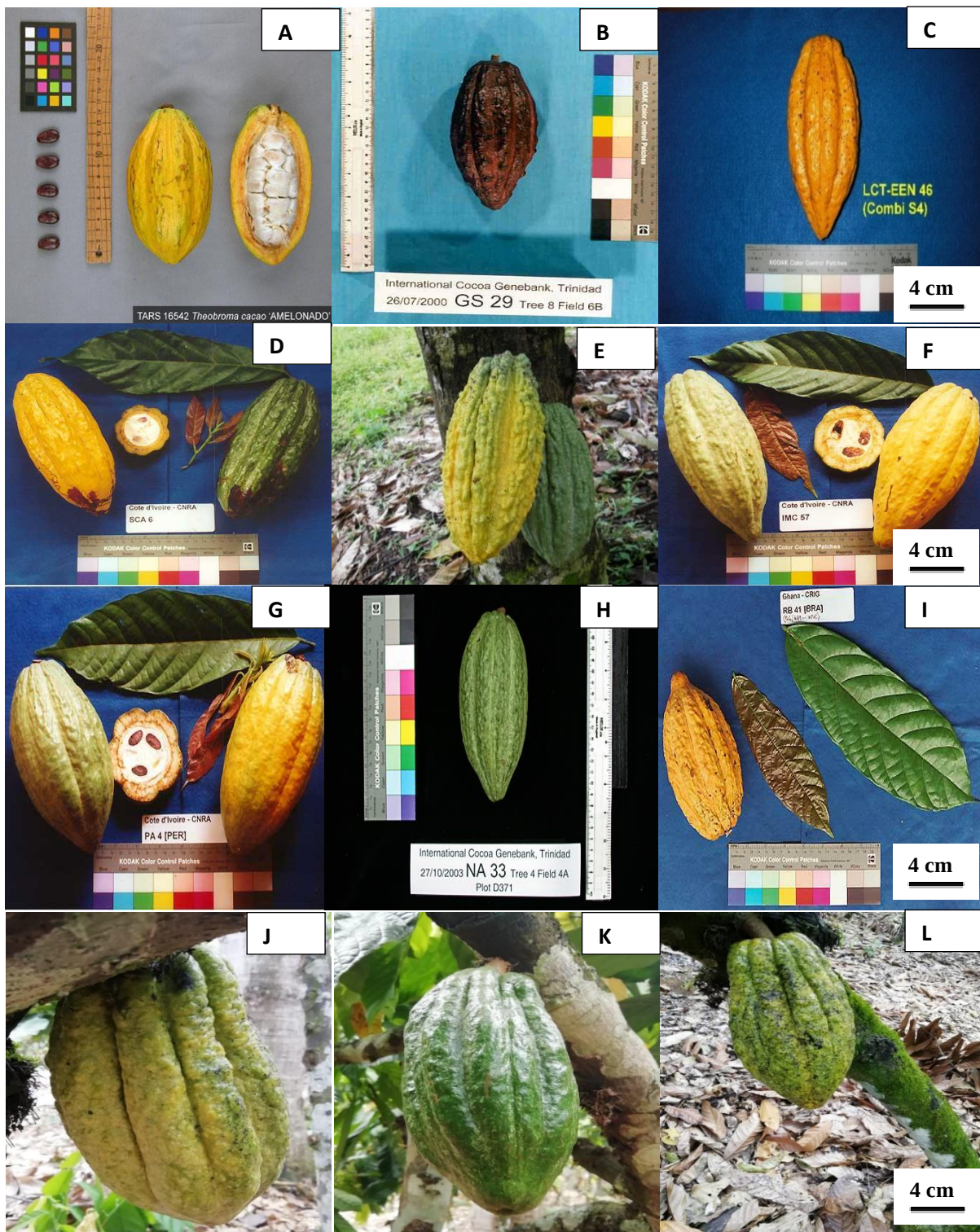


Figure 7 : Diversité de la morphologie des fruits de certains génotypes de *Theobroma cacao* L. issus de 10 groupes génétiques proposés par Motamayor et al. (2008) ;

A = TARS16542 (Amelonado), B = GS 29 (Criollo), C = LCTEEN- 46 (Nacional), D = SCA 6 (Contamana), E = GU139A (Guiana), F = IMC57 (Iquitos), G = PA 4 (Marañón), H = NA 33 (Nanay), I = RB 41 (Purus); J et K = LCTEEN-37 (Curaray), L = LCTEEN-241 (Curaray). Echelle=2/3

1.1.6. Amélioration génétique du cacaoyer

1.1.6.1. Sélection clonale et générative

La sélection clonale (végétative) et la sélection de descendance d'hybrides (générative) constituent les deux voies d'amélioration entreprises dans les programmes de sélection cacaoyère pour la vigueur, la productivité, la qualité, la résistance aux attaques des parasites et virus et la résistance à la sécheresse (Demol *et al.*, 2002).

Au niveau de la sélection végétative (ou clonale), un arbre est choisi, de par ses caractères propres. Il se révèle beaucoup plus intéressant que les autres individus de la population dont il est issu (Koko *et al.*, 2011). Cet arbre (tête de clone) est multiplié par voie végétative (bouturage, greffage, embryogénèse somatique, etc) pour constituer des clones dont tous les individus sont génétiquement identiques entre eux et au « pied mère ». Ces différents clones ainsi multipliés sont mis en essai multi local en vue d'en tirer les meilleurs qui seront appelés clones élites (Braudeau, 1969).

La sélection générative (ou sélection d'hybrides) est basée sur la création d'hybrides par le croisement entre les clones possédant des caractères d'intérêts agronomiques (Lachenaud *et al.*, 2001 ; Tahi *et al.*, 2017). L'objectif essentiel de cette sélection est donc de rechercher les géniteurs susceptibles de fournir les hybrides manifestant l'hétérosis. La sélection repose donc d'une part, sur le choix des arbres géniteurs en fonction des caractères que chacun d'eux manifeste qui pourraient être transmis à la descendance et, d'autre part, en fonction de la vigueur hybride que le croisement des géniteurs pourra permettre d'obtenir. Un effet hétérosis est matérialisé au niveau de la descendance permettant une sélection des individus plus performants que les parents en fonction des critères de sélection fixés. L'aboutissement de la sélection générative est la fourniture de matériel végétal sous forme de semences.

1.1.6.2. Sélection Récurrente Réciproque (SRR)

Le programme d'amélioration génétique, initié en Côte d'Ivoire depuis 1946, bien que répondant aux attentes des producteurs et des sélectionneurs, n'assurait pas un progrès génétique continu et restait peu efficace pour l'amélioration des caractères quantitatifs tels que la résistance aux maladies (Paulin & Eskes, 1995). A partir de 1990, ce programme a été orienté vers la Sélection Récurrente Réciproque (SRR) afin d'obtenir des variétés gardant un niveau de production acceptable, mais, présentant une meilleure adaptation aux contraintes de production telles les *Phytophthora* et les mirides (Clément *et al.*, 1994). Cette voie d'amélioration avait été

déjà adoptée pour différentes espèces annuelles comme le maïs (Hallauer & Filho, 1981) et pour des plantes arbustives comme le palmier à huile (Meunier & Gascon, 1972) et le caféier (Leroy & Charrier, 1989). Ce nouveau schéma mis en place est fondé sur l'amélioration simultanée de 2 populations de base (Figure 8), aux caractéristiques complémentaires et assez distantes génétiquement pour que l'inter-croisement après plusieurs cycles de brassage intragroupe, conduise à des effets d'hétérosis (Gallais, 1978).

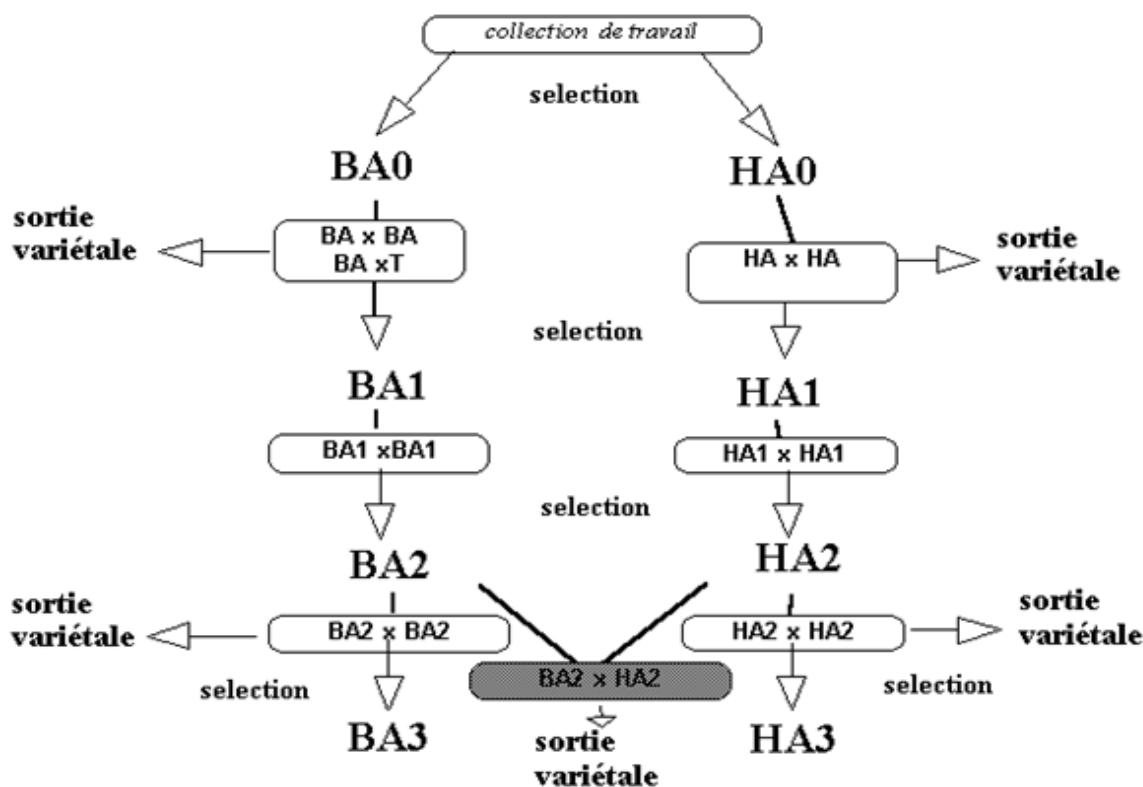


Figure 8 : Schéma de sélection récurrente et réciproque (Tahi *et al.*, 2017).

T= témoin ; BA0=Bas Amazonien génération 0 ; HA0= Haut Amazonien génération 0 ; BA= Bas Amazonien ; HA= Haut Amazonien ; BA1= Bas Amazonien génération 1 ; HA1= Haut Amazonien génération1, BA2= Bas Amazonien génération 2 ; HA2= Haut Amazonien génération 2, BA3= Bas Amazonien génération 3 ; HA3= Haut Amazonien génération 3.

En marge des parcelles de brassage intragroupe, un test intergroupe impliquant 25 familles a été mis en place en 2001. Le but de la création de ces parcelles est la vérification de l'efficacité de la SRR à ce stade et de favoriser à l'intérieur des descendances la recombinaison entre les gènes de résistance à *Phytophthora* provenant de diverses sources. Certains croisements prévus n'ont pu être réalisés car des phénomènes d'incompatibilité ont empêché la nouaison des fleurs pollinisées manuellement. Les meilleurs croisements du premier cycle ont été utilisés comme témoins. Ces croisements sont : un croisement entre un HA0 et un T0 (F203), un croisement entre deux géniteurs HA0 (F201) et un croisement entre un T0 et un BA0 (F205).

Il combine à chaque génération une phase de test des parents de chaque population pour leur aptitude générale à la combinaison et une phase de recombinaison des meilleurs géniteurs. Ainsi, cette procédure conduit à sélectionner d'abord pour l'aptitude générale à la combinaison et ensuite à chaque génération, proposer une sortie variétale en tirant parti de l'aptitude spécifique à la combinaison (Sélection des meilleures combinaisons hybrides) et des effets de dominance et épistasie individuelle (sélection des meilleurs génotypes) selon Baradat *et al.* (1995).

Le premier cycle a débuté en 1990 par le choix de génotypes basé sur la diversité génétique et enzymatique de l'époque (Lanaud, 1986), sur leur valeur propre et leur comportement en croisement (Paulin, 1990). Ainsi, les deux populations de départ ont été constituées à partir d'une population composite de Bas-Amazonien (BA) et de Trinitario (T) pour la population BA-T0 et de Haut-Amazoniens (HA) et quelques « Criollo » (C) pour la population HA0. Le dispositif expérimental adopté pour chaque essai est un factoriel comprenant un diallèle et deux factoriels incomplets. Les essais ont été mis en place en 1992 selon un dispositif en randomisation totale de parcelles mono-arbre pour les HA0 et poly-arbres (4) pour les BA-T0 (Clément *et al.*, 1994). Le premier cycle a été clôturé en 1999 et les géniteurs du second cycle ont été sélectionnés. Des croisements et des individus prometteurs ont été proposés en sortie variétale et mis en essai de confirmation multi local (Lachenaud *et al.*, 2001).

Le second cycle a débuté en 2000, par la mise en place d'une parcelle de brassage intra-HA et d'une autre de brassage intra-BA-T (Lachenaud *et al.*, 2001). Pour les croisements entre HA (factoriel 20 x 20), sur 40 géniteurs, 28 ont été sélectionnés dans 19 familles dont 6 présentent un pourcentage de cabosses pourries d'au plus 6 %. Douze autres ont été sélectionnés dans divers essais pour des caractéristiques particulières. Pour les croisements entre BA-T (factoriel 20 x 20), ce sont 31 individus qui ont été sélectionnés dans 31 familles et 9 autres dans les essais et collections des différentes stations.

1.1.6.3. Principaux critères de sélection

1.1.6.3.1. Production et productivité

La production est exprimée soit en nombre de cabosses, soit en masse de fèves fraîches ou en cacao marchand (fèves fermentées et séchées) par an par hectare (Lachenaud, 1984 ; Lotode & Lachenaud, 1988). En station, elle est observée sur un cumul de 4 à 8 années de pleine production. Les cabosses mûres saines (S), pourries (P) et rongées (R) sont dénombrées, ce qui permet de définir une production réelle (cabosses mûres saines) et une production potentielle

(cabosses mûres saines + pourries + rongées). La vigueur au jeune âge est mesurée par l'accroissement du diamètre au collet et à l'âge adulte par la circonférence du tronc. Dans certains programmes de sélection, le rapport production/vigueur est pris en compte afin de sélectionner des arbres productifs et peu encombrants (Toxopeus, 1969, Tan, 1990, Eskes *et al.*, 1995). Paulin & Eskes (1995) ont affirmé que cette variable était fondamentale pour la sélection d'individus dans les dispositifs expérimentaux en randomisation arbre par arbre. Les analyses génétiques montrent que l'aptitude générale à la combinaison est prédominante pour la production du cacaoyer (Lachenaud *et al.*, 2001; Tahi *et al.*, 2010) même si les valeurs de l'aptitude spécifique à la combinaison sont parfois significatives (Eskes & Lanaud, 1997).

1.1.6.3.2. Résistance aux maladies et ravageurs

Dans toute son aire de culture à travers le monde, le cacaoyer est confronté à de nombreuses maladies, mais aussi, à des ravageurs. Les maladies sont pour la plupart causées par des champignons (*Phytophthora spp*, *Oncobasidium spp*, *Moniliophthora sp.*) et des virus (CSSV), alors que les ravageurs sont généralement des insectes. La connaissance de ces maladies et parasites constitue une étape importante pour lutter efficacement contre ces ennemis du cacaoyer. En Côte d'Ivoire, la sélection pour la résistance aux maladies, notamment la pourriture brune des cabosses et surtout le swollen shoot, constitue actuellement des axes de recherche prioritaires.

1.1.6.3.3. Qualités technologiques et sensorielles

Elles reposent sur les caractéristiques physiques et organoleptiques des fèves. La taille des fèves, évaluée par la masse moyenne de 100 fèves de cacao marchand ou par le nombre de fèves pour 100 g de cacao marchand (grainage), reste encore aujourd'hui le principal critère de qualité technologique. La forte héritabilité de ce caractère a été démontrée dans plusieurs études (Cilas *et al.*, 1989). Le nombre de fèves par cabosse, critère non moins important, est très peu pris en compte bien que son influence sur la masse des fèves ait été démontrée. Il est sous l'influence de plusieurs facteurs qui sont le nombre d'ovules par ovaire, le système de compatibilité, l'efficacité de la pollinisation et de la nutrition minérale et hydrique. Les deux paramètres étant corrélés négativement (Lachenaud, 1991a), il est toujours difficile de choisir entre des cabosses bien remplies avec des petites fèves et celles moins bien remplies avec de grosses fèves. L'amélioration et l'évaluation de la qualité aromatique sont plus difficiles, car elles sont fortement influencées par les traitements post-récoltes. Des normes internationales ont été néanmoins fixées. Ce sont : le degré de fermentation ; la masse de fèves sèches (entre 0,6 et 2 g) ; la teneur en coque (11 à 17 % de la masse de la fève) ; la teneur en beurre de cacao (50 à

60 %) ; l'arôme ; la viscosité ; la couleur des cotylédons ; le goût des cotylédons fermentés et torréfiés (Lockwood *et al.*, 1994).

1.1.6.3.4. Résistance et la tolérance à la sécheresse

La résistance à la sécheresse repose sur l'identification de matériel végétal (familles d'hybrides) prometteur capable de faire intervenir diverses stratégies au niveau morphologique, physiologique, biochimique et génétique (Daymond *et al.*, 2011) ou leur combinaison pour s'adapter au changement climatique. Ces variétés induisent une accumulation de composés biochimiques pour limiter l'action néfaste du stress hydrique déficitaire (Cameron *et al.*, 2006 ; Kosma *et al.*, 2009 ; Seo *et al.*, 2011). Au niveau morphologique, les familles d'hybrides recherchées, devraient réagir par la diminution de leurs tailles et du nombre de leurs feuilles. Au plan cellulaire, ce matériel végétal doit mettre en place des mécanismes d'ajustement osmotique pour la résorption de l'eau et la protection des structures les plus sensibles à une déshydratation létale (Mourid, 1988 ; Casals, 1996 ; Zhang *et al.*, 1999).

1.1.7. Contraintes de la cacaoculture

1.1.7.1. Contraintes biotiques

Dans les régions tropicales, la cacaoculture est affectée par quatre grandes pathologies que sont le « Balai de sorcière » causé par *Moniliophthora perniciosa*, la pourriture brune des cabosses due principalement à *Phytophthora megakarya* et *Phytophthora palmivora*, la maladie virale du *Cocoa swollen shoot virus* (Csvg) et le *Vascular streak die back* (Vsd) dont l'agent pathogène est *Oncobasidium theobromae*. A ces maladies, il faut associer deux importants insectes nuisibles du cacaoyer que sont les mirides et les foreurs de tige (Koffié *et al.*, 2011 ; Tahi *et al.*, 2012).

1.1.7.1.1. Maladies fongiques

A l'origine de près de 44 % des pertes de la récolte mondiale (Lass, 1985, Anonyme, 2013), la pourriture brune des cabosses est provoquée par plusieurs espèces de champignon *phytophthora*. Ces champignons s'attaquent aux fruits, aux feuilles et peuvent entraîner le chancre du tronc. Cette maladie est signalée dans tous les pays producteurs de cacao. Au Ghana, les pertes de récoltes sont estimées entre 60 et 100 % (Opoku *et al.*, 2002). Au Cameroun, l'espèce *Phytophthora megakarya*, la plus redoutable, provoque plus de 50 % de pertes de récoltes (Paulin & Eskes, 1995). En Côte d'Ivoire, deux principales espèces *P. palmivora* et *P. megakarya* ont été identifiées comme responsables de la pourriture brune des cabosses du

cacaoyer (Kébé *et al.*, 1999 ; Coulibaly *et al.*, 2013). Traditionnellement, seul *P. palmivora* était significativement présente dans le verger et l'essentiel des études sur la lutte contre la pourriture brune des cabosses du cacaoyer a été consacré à cette espèce (Kébé *et al.*, 1999; Tahi *et al.*, 2000; Coulibaly *et al.*, 2018). Aujourd'hui, avec la présence de plus en plus persistante de *P. megakarya* et les dégâts causés par celle-ci (Kébé *et al.*, 2009 ; Pokou *et al.*, 2019), il devient impérieux de réorienter les études afin de limiter son impact sur la production dans le verger.

La maladie du « balai de sorcière » est due à *Crinipellis pernicioso*. Cette maladie peut provoquer l'avortement des jeunes fruits, la prolifération anarchique des rameaux et même la mort de l'arbre. Elle est répandue en Amérique du Sud, dans les caraïbes et en Amérique centrale

Le vascular streak die back (VSD) est une autre maladie fongique causée par *Oncobasidium theobromae*. Cette maladie provoque la chute des feuilles et la mort des arbres. Elle sévit en Indonésie, Malaisie et en Papouasie Nouvelle Guinée.

Enfin, la moniliose est provoquée par *Moniliophthora roreri*. Cette maladie s'attaque aux fruits et peut infecter les jeunes pousses végétatives et les coussinets floraux. Elle est présente en Amérique du sud et en Amérique centrale.

1.1.7.1.2. Maladies virales

Plusieurs maladies virales ont été signalées chez le cacaoyer. Il s'agit notamment du *Cocoa Mottle Virus* (C.M.L.V) qui est un virus isolé au Ghana et au Nigeria et qui peut provoquer des symptômes de marbrures chlorotiques sur les feuilles. Cette maladie est due à un virus à particule bacilliform (Kenten & Legg, 1967). Ce virus peut être transmis par des cochenilles et admet une plante hôte qui est le baobab (*Adansonia digitata*). Il y a également le *cocoa necrosis virus* (C.N.V.) qui a été isolé au Nigeria. Il ne provoque ni gonflement de rameaux, ni mosaïque sur les feuilles, mais, seulement une nécrose des jeunes feuilles. Il n'est pas transmis par les cochenilles et la maladie ne se propage que très lentement. Enfin, la maladie virale la plus grave et la plus dévastatrice du cacaoyer est le *cocoa swollen shoot virus* (cssv) qui tient son nom d'un symptôme caractéristique de la maladie : le gonflement des rameaux (Braudeau, 1969). Cette maladie est importante dans certains pays d'Afrique de l'ouest comme le Ghana, le Togo et la Côte d'Ivoire. En Côte d'Ivoire, l'épidémie a débuté dans la région Est (faisant frontière au Ghana), précisément à Kongodia dans le département d'Agnibilékro. Depuis 2003, de nouveaux foyers en pleine expansion ont refait surface sur presque toute la zone cacaoyère de

ce pays. Alors qu'elle prend de l'ampleur en Afrique de l'Ouest, la maladie n'a jamais été observée dans les zones de production Sud-américaine (Thresh *et al.*, 1988). Elle se caractérise par un gonflement des organes végétatifs (tiges et racines), une déformation des cabosses et l'apparition de coloration rougeâtre entre les nervures secondaires des jeunes feuilles. Cette maladie du cacaoyer considérée comme la plus redoutable peut entraîner la mort des arbres en l'espace de moins de cinq ans (Gregory, 1974 ; Thorold, 1975).

1.1.7.2. Insectes et autres nuisibles

Parmi les insectes piqueurs, les Mirides (*Sahlbelgella sp*, *Distantiella sp*, *Helopeltis sp*) de taille comprise entre de 8 et 10 mm sont les plus virulents. Ils sont très répandus en Afrique. Leurs piqûres font apparaître des tâches rondes de 5 à 6 mm sur les fruits et provoquent la chute des cherelles. Les cochenilles qui sont sur les cacaoyers sont les vecteurs du swollen shoot. Les coléoptères du genre *Tragocephala* détruisent la partie apicale des tiges en croissance. Les Thrips (*Selanothrips rubrocinthus*) provoquent de graves défoliations chez le cacaoyer alors que le pod borer (*Conopomorpha crameana*) est un insecte foreur de cabosses entraînant d'importantes pertes de cabosses en Asie. Les fruits de certains clones semblent être prisés par les rats, les écureuils et les singes. Hormis ces animaux ravageurs, s'ajoutent les plantes parasites du cacaoyer comme les Loranthus (Tahi, 2003).

1.1.8. Contraintes abiotiques

1.1.8.1. Variabilité pluviométrique

Le cacaoyer est une plante qui a un besoin pluviométrique supérieur à 1200 mm de pluie, uniformément répartie sur toute l'année selon Servat *et al.* (1995). Ces dernières années, ce besoin en eau du cacaoyer est difficilement atteint dans certaines zones, du fait de la réduction et de la mauvaise répartition de la pluviométrie (Caroline, 2007 ; Brou, 2010). Les tendances des précipitations des cinq dernières décennies (Figure 9) en Côte d'Ivoire, ont conduit à des conditions écologiques extrêmement défavorables même pour les cacaoyers sous ombrages temporaires (Brou, 2010).

1.1.8.2. Variabilité thermométrique

L'optimum de la température pour le bon développement du cacaoyer est de 28 °C (Servat *et al.*, 1995). Des études menées par la Direction Météorologique Nationale de Côte d'Ivoire (DMN) montrent que durant ces cinq dernières décennies, la Côte d'Ivoire s'est réchauffée en

moyenne de 0,5°C depuis la décennie 1980-1990. Aujourd'hui, l'élévation de la température entraine la mortalité des jeunes cacaoyers au champ selon Tahi *et al.* (2012) (Figure 10).

Les variables abiotiques prises séparément n'ont pas un effet très significatif sur le potentiel de production et la vigueur végétative des cacaoyers adultes (Tahi *et al.*, 2012).

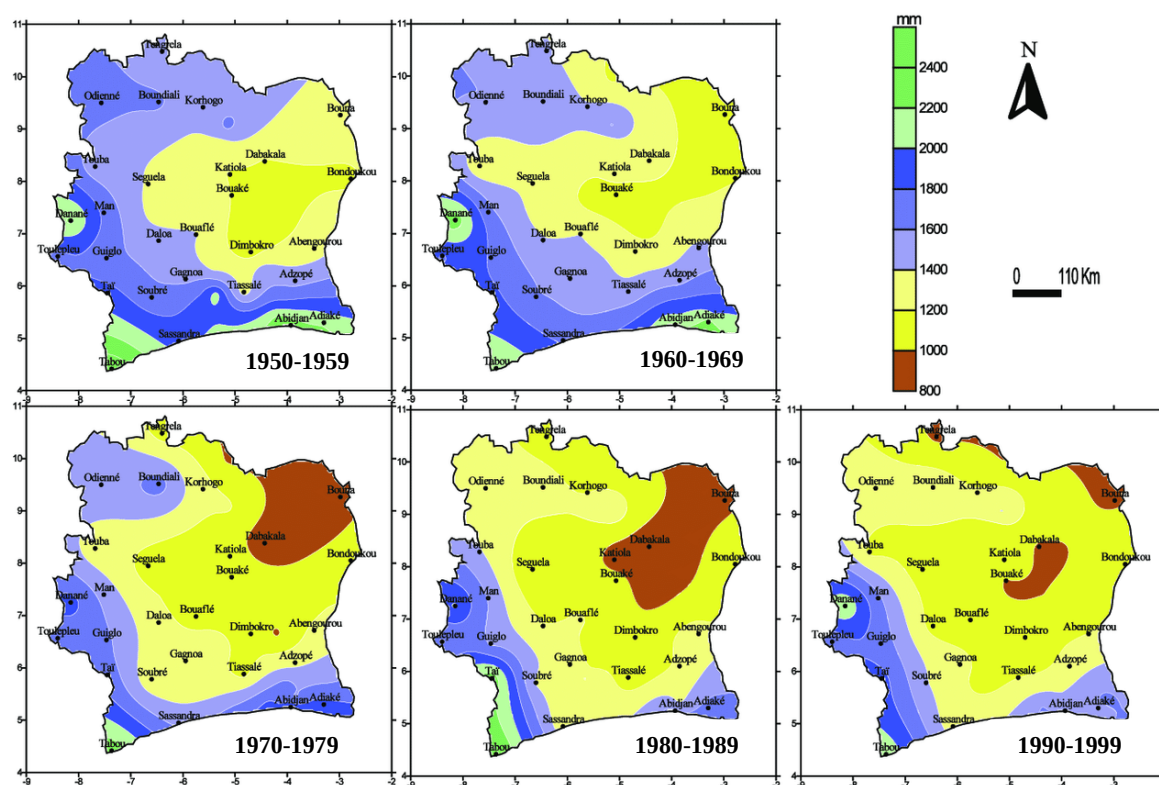


Figure 9 : Hauteurs pluviométriques moyennes des régions au cours des 5 décennies 1950 – 1959 ; 1960 – 1969 ; 1970 – 1979 ; 1980 – 1989 et 1990 - 1999 en Côte d'Ivoire (Brou, 2010)



Figure 10 : Cacaoyers asséchés par la sécheresse au champ à Bouafle (Tahi *et al.*, 2012)

1.1.8.3. Impact cumulé des variations de la pluviométrie et de la température

De façon concomitante, les variations saisonnières des précipitations et de la température affectent les performances agronomiques du cacaoyer. Selon Djé (2007), les perturbations climatiques impactent significativement la production du cacao dont le rendement peut chuter de plus de 20 %. Pour Vijayakumar *et al.* (1991), le rendement du cacaoyer est fortement corrélé au nombre de jours de pluie de l'année précédente, à la photopériode et à la température de l'année en cours. En effet, le nombre de jours de pluie, la température de la nuit, et la vitesse du vent, six mois avant la fructification du cacaoyer contribuent à hauteur de 69,65 % à la variation du nombre de fèves dans la cabosse. Ces mêmes variables, sept mois avant la période de fructification, contribuent à 66,92 % à la variation de poids des fèves fraîches des cabosses (Manurung *et al.*, 1988).

1.2. NUTRITION MINERALE DES PLANTES ET MECANISMES D'ADAPTATION AU DEFICIT HYDRIQUE

1.2.1. Rôle de l'eau dans la nutrition de la plante

L'alimentation en eau est vitale pour les plantes car leur développement y est fortement lié et quand celle-ci vient à manquer, les conséquences peuvent être graves (Bernard, 2006). Selon Laberche (2004), l'eau participe au maintien des structures des cellules, en particulier de la structure colloïdale du cytoplasme et permet le déroulement du métabolisme. Elle contribue au port des végétaux par une pression de turgescence qu'elle exerce sur leurs parois ; elle commande divers mouvements d'organes (tropismes, nasties), de cellules (stomates) et participe à l'allongement cellulaire. Elle transporte également les substances nutritives, déchets et hormones. Coudret & Ferron (1977), Fitter & Hay (1981) précisent que l'eau représente 85 à 90 % du poids frais de la cellule, 98 % de la vacuole de la plante en assurant tous ces rôles. Cependant, moins de 1 % de l'eau absorbée par les racines est retenue par la plante. Il existe donc un flux continu à travers la plante, renouvelé constamment par des modifications endogènes (régulation stomatique) et exogènes (alternance jour/nuit, humidité de l'air et du sol, température) dont les conséquences sont les variations de l'hydratation des tissus. Monneveux & This (1997) montrent quant à eux le rôle de l'eau dans la photosynthèse, le transport et l'accumulation, la multiplication et le grandissement cellulaires, c'est-à-dire, dans le développement des plantes cultivées. En effet, l'alimentation hydrique conditionne l'efficacité de la réalisation de la photosynthèse (MAE – CIRAD, 2002). Selon Laberche (2004), par le rejet de l'eau dans l'atmosphère sous forme de vapeur, la plante se débarrasse de sa chaleur

latente de vaporisation afin de supporter les rayonnements solaires et les divers échauffements climatiques.

1.2.2. Résistance et/ou tolérance à la sécheresse

Parmi les contraintes environnementales, la sécheresse est celle qui provoquerait le plus de dégâts à la production agricole. Environ 20 millions d'hectares de superficies sont perdues chaque année dans le monde à cause du déficit hydrique et le stress salin (Trinchant *et al.*, 2004).

1.2.2.1. Notions de stress hydrique et de sécheresse

1.2.2.1.1. Notion de stress hydrique

Le stress, au sens large est un dysfonctionnement produit dans un organisme ou dans un système vivant par une carence ou un excès d'un ou de plusieurs facteurs. Pour Dutuit *et al.* (1994), on parle de stress hydrique lorsque cette perturbation est due au déficit d'eau. En agriculture, le stress hydrique est défini comme un déficit en eau du sol marqué par la rareté des précipitations, réduisant ainsi significativement les productions agricoles par rapport à la normale pour une région (Mckay, 1985 in Bootsma *et al.*, 1996). Selon Madhava Rao *et al.* (2006), on parle de stress hydrique lorsque la demande en eau de la plante dépasse la quantité disponible dans le sol pendant une période ou quand son usage est limité par sa mauvaise qualité. Il peut se définir selon Laberche (2004) comme le rapport entre la quantité d'eau nécessaire à la croissance de la plante et celle disponible dans son environnement accessible par son système racinaire. La demande en eau de la plante pour Laberche (2004) est déterminée par les pertes d'eau au niveau des feuilles et du sol suite à la transpiration ou évapotranspiration.

Le stress hydrique est aussi toute restriction hydrique due à une baisse de potentiel de la plante suite à une perturbation de son activité physiologique causée par un déficit en eau (Mouhouche & Boulassel, 1997). Monneveux & This (1997) affirment que dans les zones soumises à la sécheresse, le déficit hydrique du sol peut atteindre des niveaux très variables selon le type de précipitation, la texture et la structure du sol. Les réserves en eau du sol peuvent être exploitées de façon plus ou moins complète par la plante. La quantité d'eau exploitable d'un sol ou réserve utile en eau constitue un paramètre important pour évaluer ses potentialités. L'humidité à la capacité au champ est une première méthode de quantification du déficit hydrique.

1.2.2.1.2. Notion de sécheresse

Cause principale du stress hydrique, la sécheresse est, au sens climatique, une période pendant

laquelle les précipitations sont très inférieures à la normale (c'est-à-dire sont dysbiotiques ou pire abiotiques au sens hydrologique). Selon Mainguet (1995), c'est une période où année durant laquelle les débits sont très inférieurs à la moyenne. Cet auteur précise aussi que la sécheresse se différencie de l'aridité en ce sens que la sécheresse se manifeste dans le temps (période sèche) alors que l'aridité est un phénomène spatial (région aride). Pour Monneveux & This (1997), la sécheresse se traduit par une faible disponibilité en eau pour les plantes. Bootsma *et al.* (1996) définissent quant à eux la sécheresse en agriculture comme étant un déficit marqué et soutenu des précipitations réduisant significativement les productions agricoles par rapport à la normale ou aux valeurs attendues pour une région de grande étendue. Déjà, DE Raissac en 1992 et Lamaze *et al.* (1995) estimaient qu'il y a sécheresse lorsque la disponibilité de l'eau du sol devient le facteur limitant la croissance et le rendement par rapport au potentiel du génotype. Par ailleurs, Katerji *et al.* (1991), ont défini le coefficient de sécheresse comme étant le rapport de la transpiration des plantes en cours de dessèchement et la transpiration maximale des mêmes plantes bien irriguées. Le stress dû à la sécheresse peut être atténué en cultivant des variétés de plantes à cycle court ou résistantes à la sécheresse.

1.2.2.2. Notion de la résistance à la sécheresse

La résistance d'une plante à la sécheresse en terme agronomique est sa capacité de production lorsque la transpiration ne répond que partiellement à la demande évaporative de l'atmosphère en raison des disponibilités insuffisantes d'eau (Falalou 2000). Dans le même ordre d'idées, Miller *et al.* (1997) et Tardieu *et al.* (2006) considèrent la résistance à la sécheresse d'une culture comme sa capacité (et/ou aptitude) à se développer et à donner un certain rendement dans des zones à ressources hydriques limitées. Par ailleurs, certains stades de croissance d'une culture donnée sont plus sensibles au stress hydrique ; par exemple, les cultures céréalières sont plus sensibles à la sécheresse au moment de la floraison et du remplissage des grains (Barry & Sivakumar, 1997). Toutefois, la notion de tolérance à la sécheresse est à prendre avec réserve selon Falalou (2000), car il n'y a pas d'espèce qui résiste de façon absolue à la sécheresse, toutes lui sont sensibles à des degrés divers. En effet, Levitt (1972) a pu distinguer quatre stratégies mises en œuvre dans la résistance : l'échappement, la restauration, l'évitement et la tolérance à la déshydratation : **L'échappement** est une stratégie développée par les plantes dans les zones arides. La plante achève son cycle biologique au cours des périodes de disponibilité en eau. **La restauration** est la capacité de la plante à rétablir un métabolisme normal après une période de déficit hydrique. Elle concerne principalement les plantes poikilohydriques, à savoir les mousses, les lichens, les bryophytes et les algues. **L'évitement** est la capacité de la plante à

éviter la déshydratation des tissus, en continuant d'une part, à prélever l'eau du milieu et d'autre part, à retenir l'eau dans les cellules. La plante peut éliminer ou réduire l'impact du déficit hydrique en ajustant son cycle biologique à la longueur de la saison pluvieuse. Plusieurs mécanismes physiologiques contribuent à ce processus. Enfin, la **tolérance** à la déshydratation correspond à la capacité des tissus végétatifs à supporter des potentiels hydriques très négatifs.

Tous ces mécanismes d'adaptation à la sécheresse ont été résumés par Jones (1992) à l'évitement qui est l'action d'esquiver le stress hydrique et la tolérance à la déshydratation. La tolérance au déficit hydrique est un caractère dont le phénotype et le contrôle génétique sont complexes (Tardieu, 2004 ; Shinozaki & Yamaguchi-shinozaki, 2007). Une meilleure compréhension des mécanismes qui sont à la base de la tolérance à la sécheresse, chez les plantes, est nécessaire pour développer des variétés plus adaptées et performantes (Rebetzke *et al.*, 2008).

1.2.3. Mécanismes d'adaptations de la résistance des plantes à la sécheresse

La résistance des plantes à la sécheresse est associée selon de nombreux auteurs à des paramètres morpho-physiologiques et biochimiques propres aux espèces et même aux variétés dans une même espèce.

1.2.3.1. Mécanismes morpho-physiologiques de la résistance des plantes à la sécheresse

La stratégie des plantes à garder l'eau dans les cellules de façon à maintenir un bon état hydrique en condition de sécheresse est un mécanisme de résistance. Cette stratégie selon Levitt (1980) est liée à la réduction de la transpiration et à l'optimisation de l'absorption d'eau des racines. Selon Djekoun & Planchon (1992), la fermeture des stomates est un moyen d'adaptation des plantes au stress hydrique car elle réduit la transpiration. Lors de la photosynthèse, les chlorophylles absorbent l'énergie de la lumière. Les plantes utilisent ensuite cette énergie pour transformer le dioxyde de carbone (ou gaz carbonique) et l'eau en glucides (ou sucres) et en oxygène. La chlorophylle est produite dans des petits sous-compartiments cellulaires (organites) appelées chloroplastes. Le stress hydrique entrave considérablement le processus de la photosynthèse par l'altération de la structure des chloroplastes. Selon Batra *et al.* (2014), les plantes sous stress hydrique réduisent la synthèse des pigments chlorophylliens pour préserver la structure des chloroplastes. Ainsi, les génotypes qui ont la capacité photosynthétique intrinsèque la moins affectée par le stress hydrique présentent une efficacité de l'utilisation de l'eau (photosynthèse/transpiration) plus élevée et une plus grande capacité de survie selon Ykhlef (2001). Cependant, selon Sena *et al.* (1987) et Bousba *et al.* (2009), cette baisse de la transpiration, liée en partie à la réduction des surfaces foliaires ou à la fermeture des stomates,

a pour conséquences, la diminution des échanges gazeux foliaires et une baisse significative de la récolte. D'après Balasimha (1989), il existe une corrélation positive entre la réduction de la surface foliaire des cacaoyers, sa teneur en carbone et sa biomasse sous l'effet d'un stress hydrique déficitaire. Alvim (1954) et Vogel (1975) ont montré l'effet négatif du déficit hydrique de plus de quatre mois consécutifs sur le rendement du cacaoyer corrélé à sa biomasse. Quant à Sena *et al.* (1987), le principal mécanisme de contrôle impliqué à court terme pour réduire les pertes d'eau est la conductance stomatique chez le cacaoyer. Les mêmes auteurs ont aussi démontré que le potentiel hydrique de la feuille reste maintenu encore plus longtemps que la fermeture des stomates est précoce. En effet, la régulation de la conductance stomatique dépend du potentiel hydrique de la feuille et de l'humidité relative de l'air selon Turner (1997). Pour Forestier (1979), Lam-Sanchez *et al.* (1987), Asch *et al.* (2000), les facteurs comme la profondeur d'enracinement, le degré de fermeture des ostioles et la résistance de la cuticule à la diffusion de la vapeur d'eau sont les critères pertinents qui discriminent les variétés en ce qui concerne la résistance aux contraintes hydriques. A cet effet, Tamini (1997) a précisé que l'opposition d'une feuille à la perte d'eau sous forme de vapeur par la plante signifie sa résistance à la diffusion de l'eau sous forme de vapeur. Plus la résistance est faible, plus il y a perte d'eau et vice-versa. Selon Premachandra *et al.* (1992), les génotypes sensibles au déficit hydrique présentent une conductance élevée. Par conséquent, Balasimha & Rajagopal (1988), Turner & Jones (1980) ont proposé la faible conductance stomatique comme un trait d'adaptation à la sécheresse. D'autres facteurs comme le rapport poids de la partie aérienne / poids des racines, la grosseur et la longueur des racines interviennent dans les mécanismes de résistance au déficit hydrique. Ainsi, certaines plantes, en particulier celles des milieux arides contrôlent peu leur mécanisme de transpiration. Cependant, elles compensent ce déficit par un développement profond et dynamique de leur système racinaire pour extraire l'eau du sol.

Cependant, en condition de déficit hydrique, la nutrition en azote minérale est diminuée avec l'assèchement des horizons superficiels qui les regorgent. En effet, durant l'assèchement des horizons superficiels où se trouvent ces ions, la transpiration au niveau des plantes sollicite des horizons profonds et plus pauvres en azote. C'est pourquoi Tardieu & Hubert (1986) ont montré que ce trait morphologique est favorable pour la sélection de variétés tolérantes au stress.

1.2.3.2. Mécanismes biochimiques de la résistance des plantes à la sécheresse

La tolérance à la sécheresse est une stratégie qui permet à la plante de moduler ses fonctions physiologiques pour s'adapter, au prix d'une accumulation de ses réserves. Elle permet de maintenir la turgescence de la plante en raison du phénomène de l'ajustement osmotique. Selon

Blum (1988) et Nouri *et al.* (2002), l'ajustement osmotique est le processus majeur pour la plante d'accumuler activement des solutés tels que les acides aminés, les sucres et les alcools à des niveaux élevés dans les cellules sans y perturber le fonctionnement physiologique.

1.2.3.3. Notion de métabolites

Les métabolites sont des composés organiques intermédiaires de petits poids moléculaires issus du métabolisme cellulaire (Figure 11). Il existe deux groupes de métabolites. Les métabolites dits primaires sont directement impliqués dans les processus indispensables au développement normal et à la reproduction de la cellule (acides aminés, acides carboxyliques, alcools, antioxydants, nucléotides, vitamines, polyols...). A l'opposé, se trouvent les métabolites secondaires qui sont quant à eux impliqués dans la survie, la propagation de l'espèce, l'adaptation à l'environnement et la protection contre les radiations solaires (antibiotiques, pigments, phéromones...). Ils sont de ce fait considérés comme des moyens de défenses contre les herbivores et les pathogènes (Kossel, 1891 ; Peter *et al.*, 2007). Ce rôle de défenseurs des métabolites secondaires dans la protection des végétaux est bien connu en agronomie. Cependant, ils sont peu exploités dans la recherche de variétés résistantes aux facteurs climatiques. Aujourd'hui, les métabolites constituent, l'un des leviers d'une possible intensification écologique de l'agriculture.

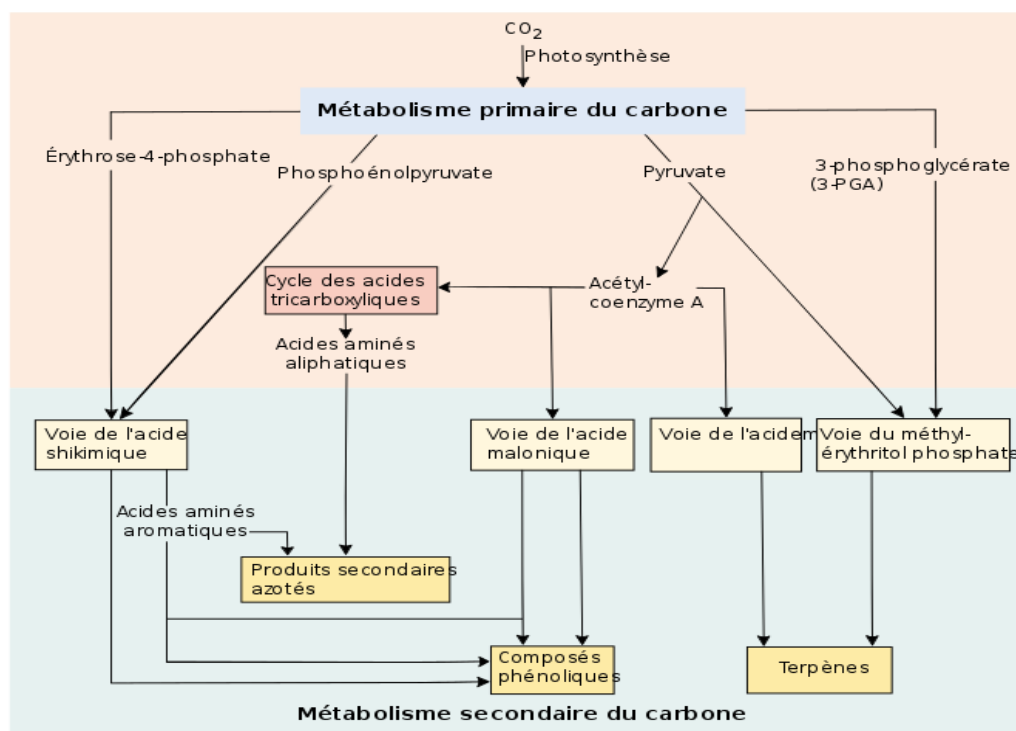


Figure 11: Vue schématique des principales voies de synthèse de métabolites secondaires et leurs interactions avec le métabolisme primaire (Source : WWW.le-nobel-des-yceens.livehost.fr)

1.2.3.4. Implication des métabolites dans la tolérance aux stress abiotiques

L'accumulation de composés organiques de faibles masses moléculaires (Hare *et al.*, 1998 ; Sakamoto & Murata, 2002), est l'un des mécanismes clés de l'adaptation au stress abiotique. Ainsi, pour Sairam & Tyagi, (2004), les végétaux accumulent dans les cellules des osmolytes (sucres et les alcools), la proline, les composés d'ammonium quaternaires et tertiaires sous stress abiotique. Selon Wahid & Close (2007), l'accumulation de ces solutés contribue en effet à l'amélioration de la tolérance au stress hydrique.

Abbas *et al.* (1995) ont montré que le stress thermique augmente l'accumulation de saccharose foliaire et diminue celle de l'amidon dans les feuilles des plantes. Selon ces mêmes auteurs, l'augmentation de la chaleur n'influence pas la concentration en sucres réducteurs dans les feuilles matures de pommes de terre. Trostel *et al.* (2003) ont indiqué que lorsque la disponibilité en eau du sol est limitée, l'accumulation de composés de masses moléculaires faibles tels que les acides aminés libres, augmente pour assurer l'ajustement osmotique des plantes.

La proline est largement connue pour son accumulation chez les plantes supérieures en réponse aux stress environnementaux (Hare *et al.*, 1998 ; Kavi *et al.*, 2005). Selon Aspinall & Paleg (1981) la proline est accumulée par bon nombre de plantes comme un soluté compatible sous stress hydrique. En effet, elle protège les membranes cellulaires et les protéines fonctionnelles contre les effets néfastes des concentrations élevées d'ions inorganiques et des températures extrêmes selon Santoro *et al.*, (1992). Tahri *et al.* (1997) ont montré quant à eux, que l'augmentation de la teneur en proline foliaire sous l'effet du stress est suivie par un abaissement de la teneur en pigments chlorophylliens totaux (Chlorophylles a b et c). Ainsi la variété qui accumule plus de proline est aussi celle qui connaît la plus forte diminution de ses teneurs en pigments chlorophylliens et vice versa.

La plupart des études antérieures ont indiqué une diminution de la concentration de protéines dans des traitements à température élevée. Les hautes températures perturbent l'intégrité de la membrane cellulaire en affaiblissant les liaisons hydrogènes et les interactions électrostatiques entre les groupes polaires de protéines (Wahid *et al.*, 2007). Les teneurs en protéines solubles totales observées chez la luzerne et chez le coton BT ont diminué sous l'effet des températures élevées (Chen *et al.*, 2004 ; Gorka *et al.*, 2007). D'après Bensari *et al.* (1990), lorsque la contrainte hydrique cesse, la feuille reconstitue les réserves d'amidon et si une nouvelle contrainte hydrique intervient, le temps d'adaptation est plus court. En effet, Hare & Cress (1997) ont remarqué que les sucres (glucose, fructose et le saccharose) représentent des

osmotiques beaucoup moins puissants que la proline ; cependant, ils participent aussi au maintien de la balance de la force osmotique. Par ailleurs, il a été observé que sous stress hydrique, les réserves amylacées sont progressivement utilisées suite à leur conversion rapide en saccharose qui associerait à une inhibition de la synthèse de l'amidon (Geigenberger *et al.*, 1997). Ainsi, les enzymes liées au métabolisme des sucres semblent avoir une importance majeure dans la tolérance au stress hydrique (Geigenberger *et al.*, 1997).

1.2.4. Métabolisme oxydatif et tolérance à la sécheresse

La sécheresse est un phénomène complexe impliquant non seulement la privation de l'eau, mais, également la limitation nutritive et les stress oxydatifs. En effet, selon Luna *et al.* (2004), les plantes bien alimentées en eau présentent un niveau optimal de la lumière pour la photosynthèse et ce niveau optimal devient excessif pour celles souffrant de la privation de l'eau. La fermeture des stomates lors d'un déficit hydrique limite le flux de dioxyde de carbone (CO_2) dans les feuilles. Ainsi, l'assimilation photosynthétique du carbone diminue en faveur de l'absorption d'oxygène photo-respiratoire. Le processus de la fermeture stomatique et le perfectionnement du flux par la voie photo-respiratoire augmentent la charge oxydante dans les tissus. Ces deux processus produisent des formes actives de l'oxygène (FAOx), en particulier le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). Les phénols totaux ou Polyphénols bloquent l'auto oxydation et la génération de radicaux oxygénés actifs comme le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) lors du stress hydrique sévère (Adra, 2010). De plus, les composés phénoliques permettent aux plantes de résister aux diverses agressions des organismes pathogènes en conditions favorables et en condition de stress hydrique (Macheix *et al.*, 2005). La production du superoxyde par la chaîne de transport photosynthétique d'électrons et par l'intermédiaire de la réaction de Mehler, est exacerbée par la sécheresse (Foyer & Noctor, 2000). En conditions optimales, les FAOx sont produites de façon contrôlée. Elles ont des fonctions importantes et sont impliquées dans la biosynthèse des parois cellulaires et la signalisation dans le système redox (Noctor & Foyer, 1998). Cependant, les conditions contraignantes mènent à une surproduction des FAOx. Pour contrecarrer leur toxicité, les cellules sont équipées par un système anti-oxydatif qui renferme les enzymes du cycle ascorbate-glutathion, le superoxyde dismutase (SOD), les peroxydases (POX), la catalase (CAT), les molécules comprenant l'acide ascorbique, le glutathion et les composés phénoliques (Foyer & Noctor, 2000 ; Aroca *et al.*, 2003). Les réponses du métabolisme anti-oxydatif résident dans leurs propriétés à détoxifier le radical superoxyde et l'oxygène (Bors *et al.*, 1996). L'action de ces derniers devient plus importante sous stress hydrique quand la production des radicaux superoxydes s'accroît (Sgherri *et al.*, 1996).

1.3. NOTIONS DE GENETIQUE QUANTITATIVE

La sélection nécessite de connaître les valeurs de certains paramètres génétiques tels que les héritabilités, les valeurs en croisements et les corrélations génétiques (Poujardieu & Mallard, 1992). Leur estimation directe ne peut se faire que par le déterminisme génétique des caractères à variation continue. La génétique quantitative rend compte de ce type de caractères. Elle se définit comme une discipline qui étudie l'hérédité des caractères quantitatifs, contrôlés par un grand nombre de gènes et caractérisés par une variation continue (Clark & Kempthorne, 1957). Cette discipline est née des nombreuses controverses au sujet de l'hérédité des caractères liées à la nature discrète ou continue de la génétique mendélienne, opposant au début du XXe siècle les mutationnistes et les biométriciens (Laloë, 2011). Ainsi, à la suite de ces controverses, le statisticien Ronald Fisher a proposé un modèle de synthèse, rendant à la fois compte des lois de Mendel et des relations biométriques entre apparentés (Gallais, 2011). Ce modèle reste le fondement actuel de la génétique quantitative qui guide aujourd'hui l'amélioration des espèces. D'après Clark & Kempthorne (1957), l'objectif de la génétique quantitative est de développer des modèles pour l'expression phénotypique, en face d'une impossibilité partielle d'identification des génotypes et des facteurs d'environnement. L'utilisation optimale de génotypes sélectionnés passe par l'estimation des paramètres génétiques et de leur croisement qui constitue le fil conducteur cette thèse.

1.3.1. Effets génétiques et environnementaux

Tout caractère d'un organisme donné est sous la dépendance de facteurs environnementaux et génétiques. La valeur phénotypique mesurable P d'un individu, peut se décomposer de la manière suivante :

$$P = G + E$$

Avec G : valeur génotypique induite par les facteurs génétiques et E : valeur environnementale induite par les facteurs du milieu (Falconer & Mackay, 1996).

La part prise respectivement par ces deux facteurs varie selon les caractères considérés, la population concernée, l'âge et le milieu. Les facteurs génétiques peuvent eux-mêmes se subdiviser en trois catégories :

- La valeur génétique additive qui est la somme des effets moyens des gènes paternels et maternels indépendamment des effets des autres gènes du génome. Ils sont transmissibles par tous les systèmes de reproduction, en particulier les croisements au hasard.

- La valeur de dominance ou effets d'interactions des gènes situés à un locus donné qui représente l'écart entre la valeur génétique d'un individu et sa valeur génétique additive, reproductible par multiplication végétative. Des croisements contrôlés permettent aussi de conserver dans une certaine proportion cette combinaison (Facon *et al.*, 2005).
- Les effets ou résidus d'épistasie dans le cas d'une interaction entre gènes situés à des locus différents, sont l'écart entre la valeur génétique et la somme de la valeur génétique additive et de la valeur de dominance. Dans la plupart des cas, l'effet d'épistasie est négligé. La valeur phénotypique totale peut être alors décomposée comme suit ;

$$P = A + D + E$$

Avec A : valeur génotypique additive, D : valeur génotypique non additive. La somme des deux valeurs représente la valeur génétique totale ou héréditaire.

La valeur phénotypique totale de certains caractères peut varier d'un individu à l'autre dans une même population. C'est la variance phénotypique (σ^2P). La variance phénotypique totale peut être aussi décomposée en variance additive (σ^2A), variance de dominance (σ^2D) et variance de l'environnement (σ^2E). Le modèle polygénique infinitésimal peut alors s'écrire comme suit :

$$\sigma^2P = \sigma^2A + \sigma^2D + \sigma^2E.$$

1.3.2. Héritabilité des caractères

L'héritabilité d'un caractère est le degré de fidélité avec lequel ce caractère se transmet. Elle exprime la proportion de variation totale qui est due à l'effet des gènes. On distingue l'héritabilité au sens large et l'héritabilité au sens étroit (ou strict).

1.3.2.1. Héritabilité au sens strict

L'héritabilité au sens strict (h^2) mesure l'influence génétique ou l'importance des gènes dans le façonnement d'un caractère. Elle est définie par le rapport de la variance génétique additive (σ^2A) à la variance phénotypique totale (σ^2P). Elle est conditionnée par la diversité génétique des parents (Sprague & Tatum, 1942 ; Gupta & Singh, 1973).

1.3.2.2. Héritabilité au sens large

La fraction héréditaire de la variation totale est appelée héritabilité au sens large (H^2) conditionnée aussi par la diversité génétique des parents (Gupta & Singh, 1973).

Dans de nombreux programmes d'amélioration des plantes pérennes, il a été montré que les effets additifs représentaient la part la plus importante parmi les facteurs génétiques contrôlant des caractères aussi divers. Ceci a été vérifié chez le caféier (*Coffea canephora*) par Leroy (1993) et Montagnon (2000) ; chez le colatier (*Cola nitida*) par Sié (1998) et chez le cacaoyer (*Theobroma cacao*) par Cilas (1991).

L'héritabilité peut être estimée à partir de diverses manières :

- soit à partir de l'étude de la transmission du caractère établissant une régression entre les parents et la valeur moyenne de leurs descendants (Falconer & Mackay, 1996).
- soit à partir de l'analyse de la covariance entre familles de plein-frères ou de demi-frères possible par la réalisation de plan de croisement.
- soit à partir de la méthode de vraisemblance maximale (REML).

L'estimation de l'héritabilité chez le caféier par exemple, dépend de plusieurs facteurs, dont le plan de croisements réalisé et le nombre de géniteurs utilisé (Leroy, 1993). Ces héritabilités évoluent très vite en fonction du nombre de répétibilités (Adou, 2004). Cette estimation n'est donc valable que dans des conditions particulières définies.

1.3.3. Liaisons entre caractères

Les liaisons entre caractères ont une connotation physiologique. Elles traduisent le degré de détermination de 2 caractères par la même cause, génétique ou environnementale, sachant l'effet qu'aura la sélection de l'un sur l'autre (Baradat, 1982). Cette liaison peut être totale ou nulle, traduisant respectivement l'identité de contrôle des 2 caractères ou leur indépendance.

L'évaluation du degré de liaison entre caractères demeure une information prioritaire au début de tout programme d'amélioration afin de pouvoir sélectionner ou non des génotypes pour des caractères différents. Si les liaisons sont très défavorables, l'amélioration simultanée pour les différents objectifs sera presque inefficace ; si les liaisons sont peu défavorables, l'amélioration pourra aboutir à des gains significatifs au prix d'un compromis à définir en fonction de l'importance économique des caractères (Baradat *et al.*, 1995 ; Cilas *et al.*, 1995). S'il n'existe pas de liaison, ou si elles sont favorables, la sélection simultanée pour des objectifs différents ne pose pas de problème méthodologique particulier. La corrélation génétique entre deux caractères est calculée sur les valeurs moyennes des familles d'hybrides ou des clones tandis que la corrélation phénotypique est basée quant à elle, sur les valeurs des arbres individuels des familles ou des clones (Tahi, 2003).

1.3.4. Aptitudes générales et spécifiques à la combinaison

L'estimation des valeurs en croisement a commencé avec le développement du concept d'aptitude à la combinaison par Sprague & Tatum (1942). L'aptitude à la combinaison des géniteurs est estimée à partir de l'analyse de croisements faits suivant un plan factoriel ou un plan diallèle. L'aptitude générale à la combinaison (AGC) d'un parent est définie comme son comportement moyen dans toutes les combinaisons hybrides. L'aptitude spécifique à la combinaison (ASC) est la déviation entre la valeur observée d'un hybride et sa valeur prévisible sur la base de l'AGC des géniteurs. Les deux sont appelées valeurs en croisement. Génétiquement, l'AGC est le résultat des effets additifs des gènes et de leurs interactions (épistasie de type additif x additif) et l'ASC, le résultat des effets non additifs des gènes (dominance et épistasie). Une AGC importante permet la constitution progressive de populations de base améliorées pour les caractères recherchés. Une ASC importante conduit à rechercher à partir de nombreux croisements entre populations les meilleures combinaisons de gènes et la plus grande vigueur hybride (Tableau I). Avant d'utiliser une méthode de sélection, il est donc important de connaître au préalable, pour l'espèce considérée et dans le matériel utilisé, l'importance relative des variances d'AGC et d'ASC (Demarly, 1977) :

- si la variance d'AGC sur la variance d'ASC est > 1 , la transmission du caractère est de nature additive ;

- si la variance d'AGC sur la variance d'ASC est < 1 , la transmission du caractère est de nature dominante.

Tableau I : Stratégies de sélection en fonction des valeurs de variances d'aptitudes à la combinaison (Demarly, 1977)

Valeur de la variance d'AGC		Valeur de la variance d'ASC	
Faible	Peu de choix chez les parents	Faible	Le choix des parents avant hybridation reste prioritaire
Forte	Choix efficace chez les parents	Forte	Faire de nombreux croisements et choisir ensuite

DEUXIEME PARTIE :
MATERIEL ET METHODES

2.1. Zones d'étude

2.1.1. Localisation des sites des parcelles

L'étude s'est déroulée dans six (06) régions de la Côte d'Ivoire : Loh djiboua, Béliér, Moronou, Nawa, District autonome de Yamoussoukro et Marahoué. Le choix des parcelles dans ces régions a été fait en suivant l'échelle de classification des zones favorables à la cacaoculture en fonction des caractéristiques agro-climatiques (Figure 12). Trois (03) parcelles ont été installées dans la région du Béliér dans les localités de Djékanou, Toumodi et Yamoussoukro situées au centre (zone sèche). Dans la région de la Marahoué, une parcelle a été installée dans la localité de Bouaflé, centre-ouest précisément à Garango (zone sèche). Dans la région de Moronou, l'essai a été installé dans la localité de Bongouanou (N'zanfouénou) à l'est de la Côte d'Ivoire (zone sèche). Cependant, les parcelles témoins ont été installées dans la région de Loh-djiboua, à la station CNRA de Divo au Centre-sud de la Côte d'Ivoire (zone favorable à la cacaoculture avec une pluviométrie normale). Les zones de Djékanou, Toumodi et Yamoussoukro, ont abrité les parcelles d'hybrides simples et les hybrides issus des croisements diallèles ont été installés dans les zones de Bongouanou et Bouaflé. L'étude en serre s'est déroulée à la station CNRA de Soubré, dans la région de la Nawa.

2.1.2. Caractéristiques pédoclimatiques des sites de l'étude

L'étude a été menée dans des zones contrastées dont les différentes caractéristiques sont consignées dans le tableau II.

La station de recherche du CNRA de Divo est située en zone forestière au sud du pays, entre 5°48 de latitude nord et 5°18 de longitude ouest. Elle s'étant sur une superficie de 3570 ha et bénéficie d'un climat tropical humide. La végétation est une forêt dense semi décidue. La pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 1200 et 1400 mn (Kouamé *et al.*, 2007), caractérisée par deux saisons pluvieuses (Mars-Juin et septembre-novembre) et deux sessions sèches (Juillet-août et Novembre-février) (Ehounou *et al.*, 2019). La température moyenne est de 27°C et le sol est du type Dystric Ferralsols favorables à la cacaoculture.

La région de la Nawa est située au Sud-ouest de la Côte d'Ivoire entre 5° 35'32'' et 5° 58'44'' de latitude Nord et 6° 34'24'' et 6° 36'00'' de longitude Ouest. Elle bénéficie d'un climat de type subéquatorial caractérisé par deux saisons pluvieuses (Avril-Juin et Septembre-Novembre) et deux saisons sèches (Juillet-Août et Décembre-Mars). La pluviométrie moyenne est relativement abondante, allant de 1 203 mm à 1 392 mm de pluie par an et une température moyenne mensuelle de 25,8 °C (Evi *et al.*, 2007).

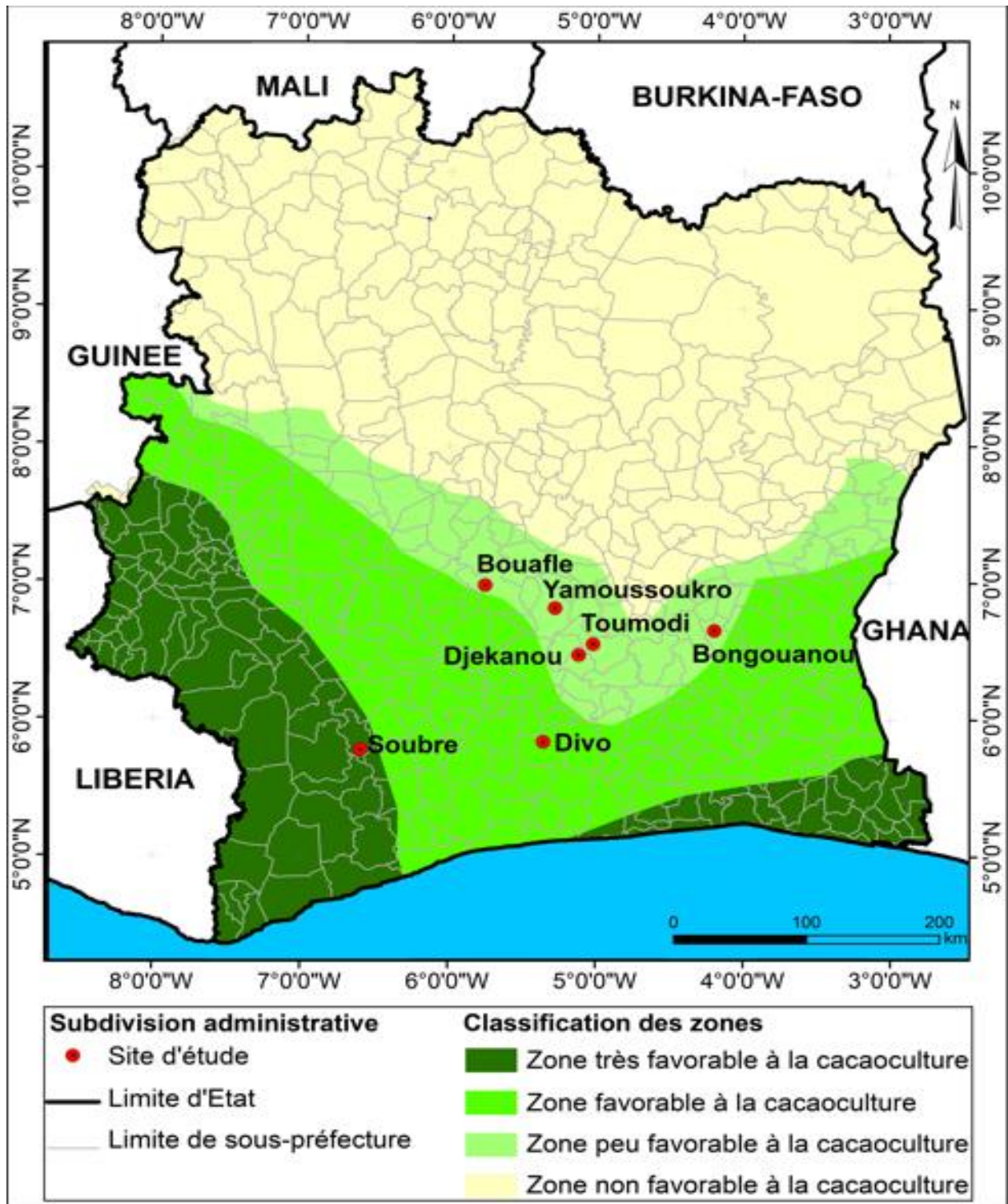


Figure 12 : Situation géographique des sites d'étude

Tableau II : Caractéristiques pédoclimatiques des zones expérimentales

Régions	Zones	Sites d 'étude	Végétation	Climat	Température (C°)	Pluviométrie (mn)	Type de sol
Loh-djiboua	Divo	Station CNRA	Forêt dense secondaire semi décidue	Tropical humide	25-27	1200 -1400	Dystric Ferralsols favorables à la cacaoculture
Béliér	Djékanou	Yobouekro	Forêt claire (savane arborée, herbeuse et forêts galeries)	Tropical humide	26,6-30	1091-1200	Ferralsols (sol sablo-argileux) caractérisée par la faible différenciation
Béliér	Toumodi	Yobouebo Loukouyaokro	Forêt claire (savane arborée, herbeuse et forêts galeries)	Tropical humide	26,6-30	1091-1200	Ferralsols (sol sablo-argileux) caractérisée par la faible différenciation
District	Yamoussoukro	Lolobo	Savanes pré-forestières	Equatorial	25,9-30	900-1100	Ferralsol manganiferric plinthic teinte brun foncé
Marahoué	Bouaflé	Garango	Zone de transition entre la forêt dense au sud et à l'ouest, la savane arborée au nord et à l'est	Equatorial	25- 30	745,5-1000	Manganiferric pseudo-gleyic plinthic ferralsol avec des tâches
Moronou	Bongouanou	N'zanfouénou	Forêt équatoriale devenue foret claire et par endroit savane arborée	Tropical humide et chaud	27-30	826,4-1000	Ferralsols Dystric, profond et meubles avec une texture argilo-sableuse propice à la cacaoculture
Nawa	Soubré	Station CNRA	Forêts denses sempervirentes	Subéquatorial	25,8-26	1203-1392	Dystic, Ferralsols profonds favorables à la cacaoculture

Les zones de Djékanou (6°28' 60'' de latitude nord et 5° 03'00'' de longitude ouest), de Toumodi (6°55' latitude nord ; 5°03' longitude ouest) et de Yamoussoukro (6°48'36'' de latitude nord et 5° 17'44'' de longitude ouest) sont situées dans la région du bélier. Le climat est tropical humide pour les zones de Djékanou et Toumodi et équatorial pour la zone de Yamoussoukro. Les températures oscillent entre 25,6-30° C et les précipitations moyennes entre 900 et 1200 mn. La végétation est dominée par la savane arborée, herbeuse et parfois formée de galerie de forêt avec des sols ferralitiques.

La zone de Bouaflé, Chef-lieu de la Marabouté est située au centre-ouest de la Côte d'Ivoire entre 6° 59' 00'' de latitude nord et 5°45'00'' de longitude ouest. Elle a une végétation de transition entre la forêt dense au sud et à l'ouest, la savane arborée au nord et à l'est, reposant sur un sol ferralitique dénaturé. Le climat est équatorial avec des précipitations annuelles comprises entre 745,5 et 1000 mn et des températures moyennes de 27 à 30° C.

La zone de Bongouanou est située dans la région du Moronou à l'est de la Côte d'Ivoire entre 6°38'55'' de latitude nord et 4°11'57'' de longitude ouest. Elle dispose d'une végétation devenue une forêt claire et par endroit une savane arborée avec des sols à textures argilo-sableuse. Le climat est tropical humide chaud.

2.2. Matériel végétal

2.2.1. Matériel végétal évalué en serre

Le matériel végétal évalué en serre est composé de trente et une (31) familles d'hybrides obtenues par pollinisation manuelle entre géniteurs élités caractérisés par une bonne production et une résistance à la pourrie brune de cabosses (Annexe 1). Un total de 6 696 plants âgés de six (6) mois ont été évalués en serre à la station CNRA de Soubré sur une période de 6 mois consécutifs.

2.2.2. Matériel végétal évalué au champ

Le matériel végétal étudié au champ est constitué de :

- ✓ vingt-trois (23) familles d'hybrides obtenues par pollinisation manuelle entre vingt-sept géniteurs élités caractérisés par une bonne production et une résistance à la pourrie brune de cabosses (Annexe 1) ;
- ✓ trente (30) familles d'hybrides issus du croisement diallèles 6 x 6 sans les autofécondations (Annexe 2) et deux autres familles hybrides, F8 et F3 respectivement témoin résistant et témoin sensible au déficit hydrique.

S'agissant des 23 premières familles d'hybrides, 1200 plants ont été installés dans des parcelles multi-locales en juin 2013 à Toumodi (localité à pluviométrie déficitaire) et à Divo (localité à pluviométrie normale). Ce matériel âgé, de 9 ans a servi aux évaluations de la production, des paramètres technologiques de cacao marchand et de leur comportement au stade adulte. En 2019, les mêmes 23 familles d'hybrides ont été reproduites. Ainsi, 4386 plants ont été installés dans des parcelles multi-locales dans quatre localités dont trois à pluviométrie déficitaire (Djékanou, Toumodi et Yamoussoukro) et une localité, à pluviométrie normale (Divo) en juin 2019. Ce matériel a été évalué à l'âge de 3 ans pour observer leur comportement au stade juvénile (Tableau III).

Concernant enfin les trente (30) familles d'hybrides issus du croisement diallèles 6 x 6, un total de 3168 plants a été installé dans des parcelles multi-locales dans trois zones à pluviométrie différentes (Tableau III). Il s'agit :

- ✓ 1152 plants (en raison de 12 plants/famille/répétition) installés à la zone de Bongouanou (localité à pluviométrie déficitaire) en Juin 2020 ;
- ✓ 864 plants (en raison de 9 plants/famille/répétition) installés à Bouaflé (localité à pluviométrie déficitaire) en Juin 2020 ;
- ✓ 1152 plants (en raison de 12 plants/famille/répétition) installés à Divo (localité à pluviométrie normale) en Juin 2020.

Ce matériel a été utilisé pour l'évaluation des paramètres génétiques.

2.2.3. Matériels techniques utilisés

Plusieurs matériels techniques ont été utilisés pour les évaluations des familles d'hybrides de cacaoyers en serre et au champ. Les rôles des principaux matériels techniques et leurs images sont présentés respectivement en annexe (3) et annexe (4).

Tableau III : Description du matériel végétal de cacaoyer évalué dans les différentes zones d'étude

Zones	Essais réalisés	Type de matériel végétal	Nombre de familles d'hybrides évaluées	Ages des hybrides évalués
Soubré	Serre	Hybrides simples	31 familles d'hybrides	06 mois
Divo	Multi-locaux	Hybrides simples	23 familles d'hybrides	03 ans (stade juvénile sans production)
Djékanou				
Toumodi				
Yamoussoukro				
Divo	Multi-locaux	Hybrides simples	23 familles d'hybrides	09 ans (stade adulte en production)
Toumodi				
Divo	Multi-locaux	Diallèle 6x6 sans les autofécondations + deux familles témoins	32 familles d'hybride	02 ans (stade juvénile sans production)
Bongouanou				
Bouaflé				

2.3. Méthodologies

2.3.1. Création des familles d'hybrides par pollinisation manuelle contrôlée

Sur les clones utilisés comme géniteurs femelles, des boutons floraux ont été isolés à la veille de l'anthèse. L'isolement s'est effectué à l'aide de « manchons » constitués d'un morceau de tuyau d'arrosage d'environ 6 à 7 cm de longueur, fermé par un tissu à l'une de ses extrémités et collé à l'arbre à partir de l'autre extrémité avec de la pâte à modeler. Le lendemain matin, les manchons ont été retirés et les fleurs épanouies sont alors pollinisées. La pollinisation a consisté à frotter successivement 2 à 3 anthères du parent mâle sur les stigmates des fleurs du géniteur femelle. Le manchon d'isolement est immédiatement remplacé après la pollinisation. Trois (03) jours après, la pollinisation, les « manchons » sont à nouveau retirés et le nombre de fleurs pollinisées (taux de réussite) est suivi jusqu'à maturité (Figure 13)

2.3.2. Préparation des familles d'hybrides en pépinière

Six (06) mois après la pollinisation, les cabosses mûres (taux de réussite) ont été récoltées par croisement/famille, cabossées (c'est-à-dire ouverture des cabosses) et les fèves fraîches ont été semées dans des pots préalablement remplis de terreaux (Annexe 5). Les pots ont été arrosés régulièrement pour permettre la levée des plants et favoriser leur développement. L'entretien de la pépinière a consisté au désherbage manuel et à l'application de l'engrais foliaire (califère, 100 ml dans un pulvérisateur pour 15 litres d'eau) chaque trimestre et des produits insecticides (Califan super solicao et pyricol) ont été utilisés en cas d'apparition des symptômes de parasitisme en raison de 100 ml d'insecticide dans un pulvérisateur pour 10 litres d'eau. Le transfert des plants sur les différents sites d'étude (serre et champ) s'est effectué après six mois de séjour des semenceaux à la pépinière. L'installation des jeunes cacaoyers en serre et au champ a concerné les plants vigoureux (Annexe 6).

2.3.3. Evaluation de l'influence du stress hydrique en serre

2.3.3.1. Dispositif expérimental

L'étude a été conduite dans la serre expérimentale du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) de Soubré. Les valeurs moyennes de l'évaporation comprises entre 1,6 et 3,8 jours.etr^{m-1}, celles de l'humidité relative oscillant entre 74,2 et 93,3 % et de la température moyenne variant de 25,3 à 30 °C ont été celles de conditions favorables à la culture du cacaoyer en serre. Le dispositif expérimental était un split-plot avec deux facteurs (Tableau IV). Le premier facteur est le régime d'irrigation ou le traitement hydrique avec trois niveaux : 100 % CC, 50 % CC et 20 % CC.

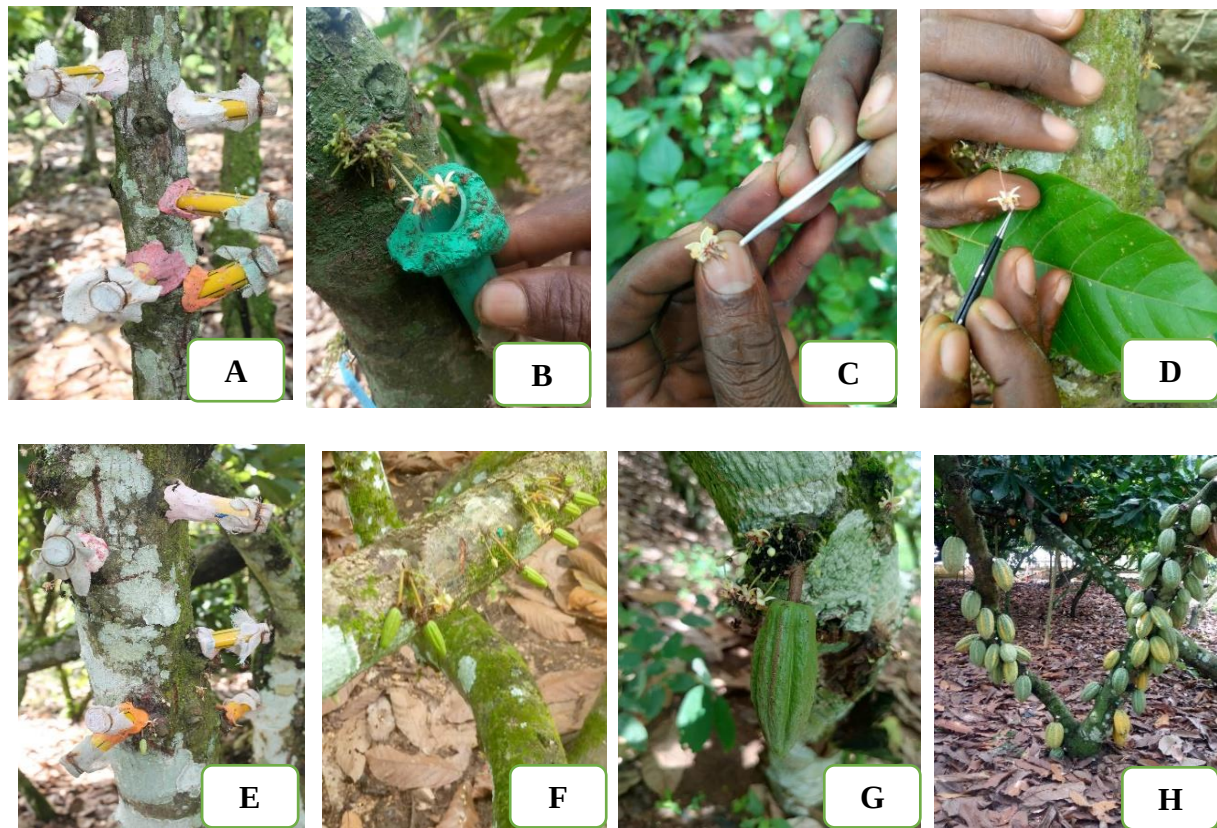


Figure 13: Différentes étapes de la pollinisation manuelle

A=isolément des fleurs avec des manchons ; B= Retrait des manchons : C=prélèvement des grains de pollen, D= dépôt des grains de pollen sur le pistil de la fleur épanouie ; E= fermeture des fleurs pollinisées avec les manchons, F= cherelles d'une semaine, G= cabosses d'un mois ; H= cabosses matures.

Tableau IV : Dispositif expérimental en serre

Bloc 1	100 % CC	50 % CC	20% CC
	31 hybrides x 24 = 744 plants	31 hybrides x 24 = 744 plants	31 hybrides x 24 = 744 plants
Bloc 2	20% CC	100 % CC	50 % CC
	31 hybrides x 24 = 744 plants	31 hybrides x 24 = 744 plants	31 hybrides x 24 = 744 plants
Bloc 3	50 % CC	20% CC	100 % CC
	31 hybrides x 24 = 744 plants	31 hybrides x 24 = 744 plants	31 hybrides x 24 = 744 plants

Légende : 100 % CC.= Apport d'eau continu à capacité au champ maximale, 50 % CC = Teneur en eau du sol du pot correspondant à 50 % de la capacité au champ maximale (Régime hydrique déficitaire), 20 % CC = Teneur en eau du sol du pot correspondant à 20 % de la capacité au champ maximale (Régime hydrique déficitaire).

Le premier niveau est un arrosage quotidien pour maintenir la teneur en eau du pot à la capacité au champ maximale (Lot témoin ; 100 % CC). Le second niveau (Test 1 ; 50 % CC), l'humidité du sol est pour maintenir à 50 % de la capacité au champ des pots et le troisième niveau (Test 2 ; 20 % CC), avec un apport d'eau de 20 % de la capacité au champ du pot. Le second facteur est constitué par les 31 failles d'hybrides. Un total de 6 696 plants a été disposé et évalué en serre (Annexe 7).

2.3.3.2. Détermination de la capacité au champ et apport en eau

Afin d'appliquer convenablement les différents niveaux du régime d'irrigation, l'humidité du sol des pots a été vérifiée par la méthode gravimétrique. Cette méthode a consisté à prélever 20 g d'échantillon de sol dans la moitié inférieure du pot (M'Bo *et al.*, 2015). A l'aide d'une balance électronique Sartorius de précision (0,01), la masse fraîche de l'échantillon (MFE) a été déterminée et après le séchage à l'étuve pendant 12 heures à 80° C, la masse sèche de l'échantillon (MSE) a été déterminée. Le taux d'humidité W (%) a été déterminé selon la formule de M'bo *et al.* (2015) :

$$W (\%) = \frac{MFE - MSE}{MSE} * 100$$

Par la suite, le volume (ml) correspondant à la capacité au champ a été déterminé selon la formule :

$$V(ml) = \frac{Psa}{Msw} * W$$

Avec est une constance Psa =2,6 et la masse volumique de l'eau (Msw) =1g/cm³.

Le volume obtenu (204,3 ml) correspondant à la capacité au champ (100 % CC), a été utilisé pour estimer les apports en eau des pots à 50 % (102,15 ml) et 20 % (40,86 ml) de la capacité au champ du pot témoin. Les apports d'eau sous chaque condition hydrique ont été appliqués régulièrement trois (03) semaines après l'installation des plants en serre. L'évaluation des familles d'hybrides en serre s'est faite sur une période de 6 mois.

2.3.3.3. Paramètres évalués en serre

Cinq paramètres ont été évalués en condition de serre : le taux de mortalité, les agromorphologiques et les paramètres physiologiques.

2.3.3.3.1. Taux de mortalité

Le taux de mortalité (TxM) des plants a été calculé chaque mois après installation des 31 familles d'hybrides simples en serre. Il est exprimé en pourcentage et correspond au rapport entre le nombre de plants morts et le nombre de plants considérés par famille au début de l'expérimentation en serre :

$$\text{TxM (\%)} = \frac{\text{NPM}}{\text{NTP}} * 100$$

Avec NPM= nombre de plants morts ; NTP= nombre plants planté par famille.

2.3.3.3.2. Paramètres Agro-morphologiques

Il s'agit du diamètre au collet, de la hauteur des plants, le nombre de feuilles fonctionnelles, la surface foliaire totale et la masse spécifique foliaire.

Le diamètre au collet (cm) a été mesuré au collet (à la surface des pots) avec un pied à coulisse. La hauteur des plants (cm) a été mesurée depuis la surface des pots jusqu'à l'apex du plant à l'aide d'un mètre ruban. Ces mesures ont été prises sur un total de 6 696 plants issus des 31 familles d'hybrides dont 24 plants par famille, par régime hydrique et par répétition.

Le nombre de feuilles fonctionnelles de chaque plant par famille a été compté. Il s'agit des feuilles vertes capables de réaliser la photosynthèse.

La surface foliaire élémentaire a été mesurée sur trois feuilles semi-aoutés par plant. La longueur (cm) et la largeur (cm) ont été déterminées avec une règle graduée, puis la surface foliaire élémentaire a été calculée suivant la formule de M'bo *et al.* (2015) :

$$\text{SRF (cm}^2\text{)} = \frac{\pi ab}{4}$$

Avec $\pi=3,14$; $a = A/2$ et $b = B/2$; A = longueur, B= largeur. La surface foliaire totale (SRFT) a été obtenue par addition des surfaces foliaires élémentaires (SRF).

Trois feuilles ont été pesées immédiatement après la prise des mesures de la surface foliaire totale pour obtenir la masse fraîche (g). La Masse spécifique foliaire (MSF) est déterminée par la formule de Zeghida *et al.* (2004) :

$$\text{MSF (mg/cm}^2\text{)} = \frac{\text{MF}}{\text{SRFT}}$$

Avec MF= Masse fraîche et SRFT= surface foliaire totale.

2.3.3.4. Paramètres physiologiques

2.3.3.4.1. Couleur, aspect et indice de nécrose des feuilles des hybrides en serre

Ces paramètres ont été déterminés conformément aux descripteurs de l'IPGRI-INIBHP/CIRAD 1996.

Ces trois paramètres qualitatifs ont été mesurés selon une échelle de notation comme suit :

Couleur des feuilles :

- ✓ 1= jaune ;
- ✓ 2 = vert-clair ;
- ✓ 3 = verte ;
- ✓ 4 = vert-foncé ;

L'aspect des feuilles :

- ✓ 1= Totalité des feuilles desséchées ;
- ✓ 2 = Moitié des feuilles desséchées ;
- ✓ 3 = Moitié des feuilles fraîches ;
- ✓ 4 = Totalité des feuilles fraîches ;

Indice de nécrose

- ✓ 0 = pas de nécrose ;
- ✓ 1= nécrose au bout du limbe ;
- ✓ 2= nécrose du bout au milieu du limbe ;
- ✓ 3= nécrose du milieu au bas du limbe
- ✓ 4= tout le limbe est nécrosé

2.3.3.4.2. Teneur en eau des familles d'hybrides de cacaoyers

La teneur en eau des familles d'hybrides a été déterminée six mois après l'application du stress hydrique en serre. Quatre plants par famille d'hybrides dans chaque régime hydrique et par répétition ont été retirés des pots et séparés à partir du collet avec un sécateur. Les parties racinaires ont été lavées à l'eau, puis, essuyées. Les masses fraîches (g) des parties racinaires (MFR) et des parties aériennes (MFTF) ont été déterminées avec une balance de précision (0,01). Ces différentes parties ont été placées à l'étuve à 80 °C pendant 48 heures. Les masses sèches (g) des parties racinaires (MSR) et des parties aériennes (MSTF) ont été déterminées avec une balance de précision (0,01). La teneur en eau (TE) a été calculée selon la formule de Kouamé *et al.* (2021) :

$$TE (ml) = \left(\left[\frac{MFR - MSR}{MSR} \right] + \left[\frac{MFTF - MSTF}{MSTF} \right] \right)$$

2.3.3.4.3. Teneur en eau des feuilles des familles d'hybrides de cacaoyers

La teneur en eau foliaire des cacaoyers exprimée en mg/g de matière fraîche, a été déterminée après six mois d'application du stress hydrique en serre. Trois feuilles semi-aotés ont été collectées par génotype, par famille d'hybrides et par répétition avec un sécateur. La masse fraîche (g) des trois feuilles a été déterminée avec une balance de précision (0,01). Ces feuilles ont été placées à l'étuve à 80 °C pendant 48 heures. La masse sèche (g) des feuilles a été déterminée avec une balance de précision (0,01). La teneur en eau des feuilles des cacaoyers a été déterminée selon la formule de Kouamé *et al.* (2021) :

$$TE (mg/g Ms) = \frac{MF-MS}{MS}$$

Avec TE = teneur en eau ; MF = Masse fraîche de la feuille et MS = Masse sèche de la feuille.

2.3.3.4.4. Teneur relative en eau des feuilles des familles d'hybrides de cacaoyers

La teneur relative en eau (%) des cacaoyers a été déterminée après six mois d'application du stress hydrique en serre. Trois feuilles semi-aotés ont été collectées par génotype, par famille d'hybrides et par répétition avec un sécateur. Elles ont été pesées (g) pour obtenir les masses fraîches (MF). Les feuilles ont été mises par la suite dans des glacières remplies d'eau distillée hermétiquement fermées et placées à l'obscurité. Après 24 heures, les feuilles ont été retirées et placées dans un papier buvard pour absorber l'eau de la surface. Les feuilles ont été pesées de nouveau pour obtenir la masse (g) de la pleine turgescence (MT). Elles ont été mises à l'étuve réglée à 80 °C pendant 48 heures et pesées pour obtenir la masse (g) sèche (MS). La teneur relative en eau est calculée par la formule d'Achour *et al.* (2015) :

$$TRE (\%) = \left[\frac{MF - MS}{MT - MS} \right] * 100$$

Ou MF = Masse fraîche de la feuille ; MS = Masse sèche de la feuille obtenue après 48 heures à l'étuve régler à 80° C ; MT = Masse de la feuille turgescence obtenue après 24 heures de séjour dans une glacière remplie d'eau destinée hermétiquement fermée et placée à l'obscurité.

2.3.3.4.5. Perte en eau des feuilles des familles d'hybrides de cacaoyers

La perte en eau ou le taux de perte d'eau (PED « g.10³- /cm²/mn »), est une méthode qui permet l'identification des génotypes adaptés à des conditions défavorables. Trois feuilles semi-aotés été collectées par génotype, par famille d'hybrides et par répétition avec un sécateur. Elles ont été pesées (g) pour obtenir les masses fraîches (MF). Les feuilles ont été mises par la suite dans des glacières remplies d'eau distillée hermétiquement fermées pendant 120 mn. Après ce temps, les feuilles ont été retirées et placées dans un papier buvard pour absorber l'eau de la surface. Les feuilles ont été pesées de nouveau pour obtenir la masse (g) de la pleine turgescence (MT). Elles ont été mises à l'étuve réglée à 80 ° C pendant 48 heures et pesées pour obtenir la masse (g) sèche (MS). La perte d'eau des feuilles a été évaluée selon Monneveux (1991) :

$$PED (g.10^{-3} / cm^2 / mn) = \left[\frac{MF - MT}{MS} \right] * \left[\frac{1}{SRF * 120 mn} \right]$$

Avec : MF : Masse fraîche de la feuille ; MT : Masse de la feuille turgescence (trempée dans l'eau distillée 120 mn) ; MS : Masse sèche de la feuille (48 heures à 80 ° C à l'étuve) ; SRF : la surface foliaire élémentaire.

2.3.4. Etude du comportement des hybrides au champ**2.3.4.1. Dispositif expérimental**

Le dispositif expérimental a été un bloc de Fischer pour chaque zone (Annexe 8). Les traitements ont été 23 familles d'hybrides simples (F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F11, F12, F13, F14, F15, F16, F17, F19, F20, F21, F22, F24, F25) et 30 familles d'hybrides (F2, F6, F12, F14, F19, F30, F35, F40, F41, F42, F43, F44, F45, F46, F47, F48, F49, F50, F51, F52, F53, F54, F55, F56, F57, F58, F59, F60, F61, F62) issues du plan de croisement diallèle 6 x 6 sans les autofécondations, plus, deux témoins F8 et F3 (Annexe 9). Lorsque les six zones ont été prises ensemble, l'étude a consisté en un split spot (essai factoriel) dont le premier facteur a été la zone et le second les familles d'hybrides. Un total de 8754 génotypes a été évalué.

Les premières parcelles abritant les 23 familles d'hybrides ont été installées en Juin 2013 avec trois (03) répétitions dans la zone de Divo et trois (03) répétitions de sept (07) plants dans la zone de Toumodi. Au total, 1200 plants ont été installés dans les deux zones.

En juin 2019, de nouvelles parcelles comportant les mêmes hybrides ont été installés concomitamment dans les zones de Djékanou, Toumodi, Yamoussoukro et Divo avec 3

répétitions de 12 plants, soit un total de 36 plants par famille d'hybrides, pour Divo, Djékanou et Toumodi et 3 répétitions de 8 plants pour Yamoussoukro. Au total 4 386 plants ont été installés dans ces différentes zones.

Quant aux familles d'hybrides issues du plan de croisement diallèle, 3 168 plants ont été installés dans les localités de Bongouanou, Divo et Bouaflé avec 3 répétitions de 12 plants, soit un total de 36 plants par hybride, pour Divo, Bongouanou et 3 répétitions de 9 arbres pour Bouaflé en juin 2020.

La densité classique de 1333 arbres par hectare (3 m entre les lignes et 2,5 m entre les plants sur la même ligne) a été respectée pour chaque type de parcelle.

2.3.4.2. Entretien phytosanitaire des essais multi-locaux

L'entretien des parcelles a consisté au désherbage manuel et à l'application de l'engrais foliaire (califère, 100 ml dans un pulvérisateur pour 15 litres d'eau) chaque trimestre et des produits insecticides (Califan super solicao et pyrical) ont été utilisés dès l'apparition des symptômes de parasitisme en raison de 100 ml d'insecticide dans un pulvérisateur pour 10 litres d'eau.

2.3.4.3. Paramètres évalués au champ

Six paramètres ont été évalués : le taux de mortalité, les paramètres agro-morphologiques, les paramètres de production, les paramètres physiologiques, les paramètres technologiques et les paramètres biochimiques selon le type de matériel et l'âge des parcelles. Signalons que, les paramètres de production et les paramètres technologiques ont été évalués seulement dans les parcelles âgées de neuf (09) années.

2.3.4.3.1. Taux de mortalité

Les taux de mortalité des plants au stade juvénile (2 et 3 ans) et au stade adulte (9 ans), exprimés en pourcentage et correspond au rapport entre le nombre plants morts et le nombre plants mis en terre ont été déterminé selon la formule suivante :

$$\text{TxM (\%)} = \frac{\text{NPM}}{\text{NTP}} * 100$$

Avec NPM= nombre de plants morts ; NTP= nombre plants planté par famille.

2.3.4.3.2. Paramètres agro-morphologiques

Il s'agit du diamètre à 10 cm du sol (hybrides de trois ans), à 30 cm du sol (hybrides de neuf ans), de la hauteur des plants, de la hauteur de couronne, de la section des arbres à 15 cm du

sol, la surface foliaire totale et de la masse spécifique foliaire. Les méthodes pour la détermination des dimensions foliaires et de la masse spécifique foliaire ont été celles déjà utilisées dans l'évaluation des hybrides en serre.

2.3.4.3.2.1. Diamètre à 10 cm du sol

Le diamètre (cm) a été mesuré à 10 cm du sol (hybrides de deux à trois ans) et 30 cm du sol (hybrides de neuf ans) avec un pied à coulisse.

2.3.4.3.2.2. Hauteur des plants et hauteur de la couronne

La hauteur des plants (m) a été mesurée depuis le sol jusqu'à l'apex du tronc à l'aide d'une règle graduée en bois de 8 m. La hauteur de couronne (m) correspond à la longueur entre le sol et la structure formée par les branches maitresses ou rameaux secondaires. Elle a été mesurée à l'aide d'une règle graduée en bois.

2.3.4.3.2.3. Section des cacaoyers

La circonférence (C) a été mesurée à 1,5 m du sol sur les hybrides de neuf (09) ans et la section a été calculée par la formule suivante :

$$\text{Sec (cm}^2\text{)} = \frac{C^2}{4\pi}$$

Avec Sec=Section ; C=circonférence à 1,5 m du sol ; $\pi=3,14$

2.3.4.3.3. Morphologique des cabosses

Six paramètres morphologiques liés aux cabosses ont été étudiés. Ce sont, la section, l'épaisseur, le volume, la forme, la taille, le nombre de fèves normales et plates des cabosses. Pour ces six paramètres, 30 cabosses ont été échantillonnées par hasard par famille d'hybrides dans les parcelles de neuf (09) ans au cours de chaque campagne de récolte.

2.3.4.3.3.1. Section des cabosses

La section moyenne d'une cabosse a été déterminée en mesurant la circonférence de chacune des 30 cabosses issues des familles d'hybrides avec un mètre ruban. Par la suite, la section moyenne a été calculée suivant la formule :

$$\text{Sec (cm}^2\text{)} = \frac{C^2}{4\pi}$$

Avec Sec=Section ; C=circonférence à 1,5 m du sol ; $\pi=3,14$

2.3.4.3.3.2. Epaisseur et volume des cabosses

L'épaisseur moyenne du cortex (cm) a été déterminée sur un échantillon de 30 cabosses par famille d'hybrides à l'aide d'un pied à coulisse. La longueur (cm) et la largeur (cm) de la cabosse ont été ensuite déterminées sur les mêmes 30 cabosses avec un mètre ruban.

Enfin, le volume moyen (V) des cabosses par famille d'hybrides a été calculé selon la formule de Tahi *et al.* (2017) :

$$VC (cm^3) = \frac{L * (\pi * D)^2}{22}$$

Où L = longueur de la cabosse et D = diamètre de la cabosse, $\pi = 3,14$

2.3.4.3.3.3. Forme et taille des cabosses

La forme moyenne des cabosses (FCM) a été déterminée suivant la formule suivante :

$$FCM = \frac{Lc}{Dc}$$

Lc : longueur des cabosses ; Dc : diamètre des cabosses.

La taille moyenne des cabosses TMC (cm²) a été déterminée selon la formule suivante :

$$TCM (cm^2) = Lc * Dc$$

Lc : longueur de cabosse ; Dc : diamètre de cabosse.

2.3.4.3.3.4. Nombre de fèves normales et de fèves plates par cabosse

Les fèves de chaque cabosse ont été disposées dans des récipients puis séparées selon qu'elles sont normales ou plates. Le nombre moyen de fèves normales (Nfn) et le nombre de fèves plates (Nfp) ont été déterminés sur un échantillon d'au moins 30 cabosses par famille.

2.3.4.3.4. Paramètres de production

Les données de production ont été collectées arbre par arbre en période principale de récolte, c'est-à-dire de septembre à janvier et en période intermédiaire, d'avril à août, entre 2018 et 2021 sur trois campagnes. Pour chaque arbre, les données collectées au champ ont été le nombre de cabosses (saines, rongées, pourries et autres), la masse totale des cabosses saines produites (kg).

2.3.4.3.4.1. Production réelle et totale par arbre

Sur chaque arbre, la production réelle a été définie par le nombre de cabosses saines produites (Ncabs) par campagne. La production totale (Tot), a été définie par le nombre total de cabosses produites (saines + rongées + pourries + autres) par campagne.

$$\text{Tot} = \text{saines} + \text{rongées} + \text{pourries} + \text{autres}$$

2.3.4.3.4.2. Masse moyenne d'une cabosse saine par arbre

La masse moyenne d'une cabosse saine (g), est déterminé à partir du rapport entre la masse totale de cabosses saines produites et le nombre de cabosses saines par arbre.

$$\text{Mmcab (g/arbre)} = \frac{\text{MNcabs}}{\text{Ncabs}}$$

Ou MNcabs = Masse totale de cabosses saines produites ; Ncabs= nombre de cabosses saines produites.

2.3.4.3.4.3. Masse moyenne de fèves fraîches par cabosse

La masse moyenne de fève fraîche (Mmff) exprimée en gramme, est déterminée à partir du rapport entre la masse totale de fèves fraîches produites (Mff) par le nombre de cabosses saines (Ncabs) par arbre.

$$\text{Mmff (g/cabosse)} = \frac{\text{Mff}}{\text{Ncabs}}$$

2.3.4.3.4.4. Masse moyenne de fèves sèches ou cacao marchand par cabosse

La masse moyenne de fèves sèches (Mmfs) exprimée en gramme, est déterminée à partir du rapport entre la masse totale de fèves sèches produites (Mfs) par le nombre de cabosses saines par arbre.

$$\text{Mmfs (g/cabosse)} = \frac{\text{Mfs}}{\text{Ncabs}}$$

2.3.4.3.4.5. Taux de cabosses pourries

Le taux de cabosses pourries (Tcp) évalue l'étendue des pertes par pourriture au champ (toutes pourritures confondues). Il a été déterminé par le rapport entre le nombre total de cabosses pourries (Ncabp) et la production totale en nombre de cabosses (Tot) pour l'ensemble des campagnes.

$$\text{Tcp (\%)} = \frac{\sum \text{Ncabp}}{\text{Tot}}$$

2.3.4.3.4.6. Rendement potentiel annuel

Le rendement potentiel annuel en cacao marchand (RPA) a été calculé selon la formule de Lachenaud, (1991) et Tahi *et al.* (2017) :

$$\text{RPA (kg/ha/an)} = \frac{\text{Tot} \times \text{Mmff} \times 1333 \times 0,35}{\text{Nombre d'année de récolte}}$$

Tot= production totale en nombre de cabosses ; Mmff = masse moyenne de fève fraîche ;
1333 = Nombre de pieds de cacaoyers à l'hectare ; 0,35 = coefficient de conversion de la masse de fèves fraîches en cacao marchand.

2.3.4.3.4.7. Rendement réel annuel

Le rendement réel annuel (RRA) a été calculé par la formule de Tahi *et al.* (2017) :

$$\text{RRA (kg/ha/an)} = \frac{\text{Ncabs} \times \text{Mmff} \times 1333 \times 0,35}{\text{Nombre d'année de récolte}}$$

Ncabs = Nombre de cabosses saines ; Mmff = Masse moyenne de fèves fraîches ; 1333 = Nombre de pieds de cacaoyers à l'hectare ; 0,35 = coefficient de conversion de la masse de fèves fraîches en cacao marchand.

2.3.4.3.5. Paramètres technologiques

Il s'agit de la masse moyenne, de la longueur et la largeur d'une fève de cacao marchand. Pour cela, les fèves fraîches issues des 30 cabosses saines mûres de chaque famille d'hybrides ont été mélangées puis placées par famille dans des tissus ajourés (filet fermentation) étiquetés avant leur mise en fermentation dans des caisses en bois conçus à cet effet (Annexe 10). Après six jours de fermentation avec brassage tous les 2 jours, les fèves ont été sorties des caisses de fermentation au septième jour pour être placées sur des claies en vue d'être séchées au soleil. Le séchage solaire a duré 7 jours (Annexe 11). La masse (g), la longueur (cm) et la largeur (cm) des fèves ainsi séchées ont ensuite été déterminées respectivement par pesée à l'aide d'une balance de précision (0,01 g) et avec un pied à coulisse. La masse moyenne, la longueur moyenne et la largeur moyenne d'une fève sèche ont été déterminés à partir d'un échantillon de 60 fèves normales de cacao marchand par famille.

2.3.4.3.6. Paramètres physiologiques évalués au champ

Les paramètres physiologiques évalués au champ ont été la couleur, l'aspect, indice de nécrose des feuilles et les teneurs en eau des feuilles des familles d'hybrides. Pour ces paramètres, les évaluations ont été faites sur le matériel de 3 ans et celui de 9 ans. Cependant, la teneur relative en eau et la perte en eau, ont été évaluées seulement sur le matériel de 9 ans. Les méthodologies ont été les mêmes que celles utilisées pour l'évaluation des hybrides en serre.

2.3.4.3.7. Paramètres biochimiques impliqués dans la tolérance /résistance des cacaoyers.

Les paramètres biochimiques ont été déterminés sur les hybrides simples âgés 3 ans, de 9 ans à Toumodi et sur ceux issus du plan de croisement diallèle 6x6 âgés de 2 ans à Bongouanou (estimation des paramètres génétiques) avec leurs témoins respectifs de Divo. Trois feuilles semi-aoutées ont été prélevées sur chaque génotype, étiquetées et mises dans de l'azote liquide (conservation) depuis les différentes parcelles (Annexe 12) jusqu'au laboratoire et conservées dans des congélateurs à -60° C. Un total de 16 998 feuilles a été évalué (Tableau V).

2.3.4.3.7.1. Teneurs en chlorophylles a, b, c et totales

a) Principe

Les chlorophylles absorbent certaines radiations actives pour la photosynthèse dans la gamme de longueurs d'onde visibles comprise entre 400 et 700 nm. La concentration en chlorophylles a, b, c, et totales est déterminée en mesurant au spectrophotomètre à des longueurs d'ondes de 630, de 647 et de 664 nm d'un extrait chlorophyllien obtenu après extraction dans l'éthanol (80 %.)

b) Procédure de détermination teneurs en chlorophylles

La méthodologie suivie pour la détermination des chlorophylles est basée sur la méthode préconisée par Jeffrey & Humphrey (1957). Une masse de 0,5 g de feuille de cacaoyer a été broyée dans de l'azote liquide (conservation des chlorophylles), puis dissous dans 5 ml d'éthanol (80 %). Le filtrat éthanolique sur papier Whatman a été utilisé pour déterminer les teneurs en chlorophylles a, b, c et totales. La densité optique (DO) de l'extrait éthanolique chlorophyllien a été lue au spectrophotomètre aux longueurs d'ondes 630 nm, 647 nm et 664 nm. La teneur en chlorophylle exprimée en µg/g de matière fraîche, a été déterminée en suivant les formules de Jeffrey et Humphrey (1957) :

$$\text{Chl "a"} = [11,85 \times \text{DO}_{664} - 1,5 \times \text{DO}_{647} - 0,08 \times \text{DO}_{630}] \times V \times 10^{-3} \times M$$

$$\text{Chl "b"} = [21,03 \times \text{DO}_{647} - 5,43 \times \text{DO}_{664} - 2,66 \times \text{DO}_{630}] \times V \times 10^{-3} \times M$$

$$\text{Chl "c"} = [24,52 \times \text{DO}_{630} - 7,60 \times \text{DO}_{647} - 1,67 \times \text{DO}_{664}] \times V \times 10^{-3} \times M$$

$$\text{Chl "totale"} = [21,78 \times \text{DO}_{630} + 11,89 \times \text{DO}_{647} + 4,75 \times \text{DO}_{664}] \times V \times 10^{-3} \times M$$

V = volume de l'extrait éthanolique ; M = masse de l'échantillon broyé.

Tableau V : Description des échantillons de feuilles des familles d'hybrides collectés dans les zones agro-écologiques et évalués au laboratoire

Zones	Essais réalisés	Types de matériel	Ages des hybrides évalués	Nombre de familles évalué	Nombre de génotypes évalués	Nombre d'échantillons collectés
Divo	Multi-locaux	Hybrides simples	03 ans	23 familles d'hybrides	575	1725
Toumodi					483	1449
Divo	Multi-locaux	Hybrides simples	09 ans	23 familles d'hybrides	828	2484
Toumodi					825	2484
Divo	Multi-locaux	Diallèle 6x6 sans les autofécondations + deux familles témoins	02 ans	32 familles d'hybride	1152	3456
Bongouanou					1152	3456
Bouaflé					864	1 944
Totaux					5879	16 998

2.3.4.3.7.2. Teneurs en azotes foliaires

La teneur en azote (AZT« unité de SPAD ») a été mesurée directement à l'aide d'un chlorophylle-mètre SPAD 502 de Minolta selon Nouri (2002) sur trois feuilles semi-aoutées par plant et par famille d'hybrides. Le chlorophylle-mètre est utilisé pour évaluer la teneur en azote des feuilles puisque la majeure partie de l'azote est contenue dans la chlorophylle. Il suffit de fermer la pince vide sur elle-même pour étalonner l'instrument. Trois prises de mesure ont été effectuées au niveau de la feuille sur trois différents niveaux (sommet, milieu, et base). La moyenne des trois valeurs s'affiche sur l'écran à la fin (unité SPAD) à la fin de la manipulation.

2.3.4.3.7.3. Teneurs en phénols totaux

a) Principe

Le réactif de folin-ciocalteu est constitué par un mélange d'acide phosphotungstique ($H_3PW_{12}O_{40}$) et d'acide phosphomolybdique ($H_3PMo_{12}O_{40}$) de coloration jaune. Il est réduit lors de l'oxydation des phénols, en un mélange d'oxydes bleus de tungstène et de molybdène (Bray et Thorpe, 1954). La coloration bleue produite possède une absorption maximale aux environs de 650 nm. Elle est proportionnelle à la quantité de polyphénols présents dans les extraits.

b) Procédure de détermination des teneurs en phénols totaux

Le mélange réactionnel pour l'estimation des phénols totaux a été constitué de 0,5 ml d'extrait éthanolique des échantillons foliaires et de 0,5 ml de réactif de folin-ciocalteu (2 M). Après avoir été mixé au vortex pendant 15 s, 2,5 ml de carbonate de sodium (20 pc) ont été ajoutés au mélange réactionnel. Le mélange obtenu a été mixé à nouveau, puis, laissé au repos à la température ambiante ($\approx 25^\circ C$) pendant 1 h, avant d'être ajusté à 12,5 ml avec de l'eau distillée.

La densité optique de la solution a été lue à la longueur d'onde de 650 nm au spectrophotomètre à UV-visible. La concentration en phénols totaux des échantillons foliaires, estimée en μg de phénol/g de matière fraîche a été déterminée suivant la régression (Annexe 13) entre les concentrations et les densités optiques de la gamme étalon d'une solution mère d'acide gallique 200 $\mu g/ml$.

2.3.4.3.7.4. Teneurs en protéines solubles

a) Principe

La méthode de Bradford (1976) est un dosage colorimétrique, basé sur le changement d'absorbance (la mesure se fait à 595 nm), se manifestant par le changement de la couleur du bleu de Coomassie G-250 après liaison avec les acides aminés basiques (arginine, histidine, lysine) et les résidus hydrophobes des acides aminés présents dans la ou les protéines.

b) Procédure de détermination des teneurs en protéines solubles

Elle a consisté à broyer 500 mg de tissus foliaires dans de l'azote liquide en présence de 0,05 g de polivinylpyrrolidone (PVP). Le broyat a été homogénéisé dans 5 ml de tampon phosphate de sodium 0,1 M à un pH de 7,9. L'homogénat a été centrifugé à 4000 rpm à 4 °C pendant 30 min dans une centrifugeuse réfrigérée. Au surnageant (0,1 ml), le réactif de Bleu Brillant de Coomassie (5 ml) ont été ajoutés. Le mélange réactionnel a été incubé dans un bain de glace à l'obscurité pendant 30 min. Ensuite, la teneur en protéine a été lue au spectrophotomètre à 595 nm après agitation sur le vortex. La concentration en protéine (μg de BSA/g de matière fraîche) de chaque échantillon a été déterminée suivant la régression entre les concentrations et les densités optiques de la gamme étalon (Annexe 14) de la solution standard de bovine sérum albumine (BSA).

2.3.4.3.7.5. Teneurs en proline

a) Principe

La proline est l'un des vingt principaux acides aminés qui entrent dans la constitution des protéines. Le dosage de la proline a été réalisé en suivant la méthode décrite par Dreier et Goring (1974) et dont le principe repose sur la quantification de la réaction proline-ninhydrine par spectrophotométrie à la longueur d'onde de 520 nm.

b) Procédure de détermination des teneurs en proline

Une masse d'un (01) g de tissu foliaire a été broyée dans de l'azote liquide puis, homogénéisée dans 3 ml de méthanol à 40 %. Le mélange a été porté au bain-marie bouillant à 85 °C pendant 30 minutes, puis refroidi dans un bain de glace fondante et centrifugé à 4000 tours pendant 10 mn. Un volume de 1 ml du surnageant a été prélevé auquel, 1 ml d'acide acétique glacial, 25 mg de ninhydrine et 1 ml du mélange (I) contenant (120 ml d'eau distillée, 300 ml d'acide acétique (CH_3COOH) et 80 ml d'acide phosphorique (H_3PO_4)) ont été ajoutés. L'ensemble a été bien homogénéisé à l'aide d'un vortex et porté à l'ébullition à 100 °C, pendant 45 mn jusqu'au virage de la couleur rouge. Après refroidissement, 5 ml de toluène ont été ajoutés à la

solution suivie d'agitation, puis, laissée au repos pendant 30 mn. Un volume de 3 ml du surnageant a été prélevé pour la lecture de la densité optique (DO) à 528 nm.

Le calcul de la concentration (C) de la proline a été effectué par la formule de Dreier et Goring (1974) :

$$C \text{ (mM/g MF)} = \frac{DO}{\varepsilon * L}$$

$\varepsilon = 0,9986 \text{ mM.L}^{-1}.\text{cm}^{-1}$, L : Longueur du tube de spectrophotomètre en cm.

2.3.5. Evaluation de composantes génétiques des paramètres impliqués dans la résistance/tolérance au déficit hydrique au champ

2.3.5.1. Estimation des variances génétiques

2.3.5.1.1. Variance phénotypique totale

La valeur phénotypique totale de certains caractères peut varier d'un individu à l'autre dans une même population. C'est la variance phénotypique (σ^2P). La variance phénotypique totale peut être aussi décomposée en variance additive (σ^2A), variance de dominance (σ^2D) et variance de variance d'épistasie (I) et variance de l'environnement (σ^2E). Le modèle appliqué à l'analyse des paramètres génétiques est de type Henderson III (Searle, 1971) qui est adapté aux plans diallèles :

$$\sigma^2 P = \sigma^2 A + \sigma^2 D + \sigma^2 I + \sigma^2 E.$$

L'utilisation de ce modèle permet d'estimer les composantes de la variance telles que les variances génétiques additives femelles et mâles, la variance de dominance, la variance résiduelle, la variance phénotypique ainsi que les héritabilités au sens strict et au sens large pour chacun des caractères étudiés à partir de l'équation :

$$Y_{ijk} = \mu + M_i + F_j + I_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Avec :

Y_{ijk} = performance observée de l'individu k, issu du croisement du mâle i et de la femelle j

μ = moyenne familiale

M_i = part de la performance due à l'effet du mâle i (p niveaux)

F_j = part de la performance due à l'effet de la femelle j (m niveaux)

I_{ij} = part de la performance due à l'effet d'interaction femelle j x mâle i

ϵ_{ijk} = part résiduelle. C'est l'écart individuel intra famille de pleins frères ($\epsilon_{ijk} = Y_{ijk} - \bar{Y}_{ij}$.)

En établissant l'égalité entre le modèle statistique et le modèle génétique, il est déduit les différentes variances, dont deux variances d'additivité, l'une par voie mâle (σ^2_{Am}) et l'autre par voie femelle (σ^2_{Af}) et une variance de dominance (σ^2_D) selon les formules de Baradat (1982) :

$$- \sigma^2_{Am} = 4(CMM - CMI) / nm$$

$$- \sigma^2_{Af} = 4(CMF - CMI) / np$$

$$- \sigma^2_D = 4(CMI - CMe) / n$$

Avec

- σ^2_{Am} = variance d'additivité mâle

- σ^2_{Af} = variance d'additivité femelle

- σ^2_D = variance de dominance

- σ^2_E = variance résiduelle.

- CMM = carré moyen du mâle M,

- CMF = carré moyen de la femelle F

- CMI = carré moyen d'interaction (F x M)

- CMe = carré moyen de la résiduelle

- m, p, n= respectivement nombre de parents femelles, nombre de parents mâles et nombre de répétition pour chaque croisement.

2.3.5.1.2. Coefficients de variation génétique (CVG) et phénotypique (CVP)

Les coefficients de variation génétique (CVG) et phénotypiques (CVP) utilisés en sélection pour identifier les variations au sein des génotypes (Solomon *et al.*, 2009) ont été calculés comme suit :

$$\text{CVG (\%)} = 100 \cdot \sigma_G / \mu$$

$$\text{CVP (\%)} = 100 \cdot \sigma_P / \mu$$

Avec :

- σ_G = racine carrée de la variance génétique totale = $\sqrt{12 (\sigma^2_{Am} + \sigma^2_{Af}) + \sigma^2_D}$;

- σ_P = racine carrée de la variance phénotypique totale = $\sqrt{(\sigma^2_G + \sigma^2_E)}$;

- μ = performance moyenne du caractère dans l'essai.

Les CVP et CVG inférieurs à 10 % sont faibles, ceux compris entre 10 et 20 % sont modérés et ceux supérieurs à 20 % sont considérés comme élevés (Cheserek *et al.*, 2020).

2.3.5.2. Héritabilité des caractères

2.3.5.2.1. Héritabilité au sens strict

L'héritabilité au sens strict (h^2) a été déterminée selon la formule de Sprague & Tatum, (1942) et Gupta & Singh, (1973).

$$h^2 = \frac{\sigma^2 A}{\sigma^2 P}$$

Avec $\sigma^2 A$ = variation Additive ; $\sigma^2 P$ = variation phénotypique

2.3.5.2.2. Héritabilité au sens large

La fraction héréditaire au sens large (H^2) a été calculée selon (Sprague et Tatum, 1942 ; Gupta et Singh, 1973) :

$$H^2 = \frac{\sigma^2 G}{\sigma^2 P}$$

Avec $\sigma^2 G$ = variation génétique ; $\sigma^2 P$ = variation phénotypique

2.3.5.3. Liaisons génétiques entre caractères

Les liaisons entre caractère, désignées par les coefficients de corrélation génétiques (r_G) et phénotypiques (r_P) sont calculés suivant la formule de Falconer & Mackay (1996) comme suit :

$$r_G = \frac{\text{Cov } G(x, y)}{\sqrt{(\sigma^2 G(x))(\sigma^2 G(y))}} \text{ et } r_P = \frac{\text{Cov } P(x, y)}{\sqrt{(\sigma^2 P(x))(\sigma^2 P(y))}}$$

Avec : Cov G (x, y) et Cov P (x, y) : covariance génétique et phénotypique des caractères x et y.

2.3.5.4. Aptitudes générales et spécifiques à la combinaison

L'aptitude générale à la combinaison (AGC) d'un géniteur et l'aptitude spécifique à la combinaison (ASC) d'un croisement pour un caractère donné, d'après Ross & Brookson (1966) ont été calculées comme suit :

$$AGC_{Mi} = \Sigma M_{ip} - \Sigma x_{ijmp}$$

$$AGC_{Fj} = \Sigma F_{jm} - \Sigma x_{ijmp}$$

$$ASCX_{ij} = F1 - (\sum X_{ij}/mp + AGCM_i + AGCF_j)$$

Avec :

- $AGCM_i$, $AGCF_j$, $ASCX_{ij}$: respectivement Aptitude générale à la combinaison du père i , Aptitude générale à la combinaison de la mère j et Aptitude spécifique à la combinaison du croisement Père i x Mère j ;
- p , m , respectivement nombres de pères et de mères ;
- $F1$: valeur de l'hybride.

2.3.6. Analyse statistique des données

Afin de définir les sources de variations observées dans les familles d'hybrides, des analyses de variance à un facteur (ANOVA) et à deux facteurs (MANOVA) ont été réalisées au niveau des paramètres agro-morphologiques, physiologiques (serre et au champ) et les paramètres biochimiques (au champ) évalués.

Le test de Newman - Kheuls au seuil $\alpha = 5 \%$ a été utilisé pour identifier l'existence de groupes homogènes entre les familles d'hybrides. Pour chacune des variables analysées, ce test a permis de comparer les valeurs moyennes des familles d'hybrides issues des différents croisements. Cette comparaison de moyennes des familles d'hybrides vise à identifier la ou les combinaisons de géniteurs qui sont les plus performants et qui pourraient être privilégiés dans les plans de croisements, selon le ou les caractères à améliorer.

Les histogrammes ont été réalisés à partir des valeurs moyennes de l'analyse de variance pour présenter l'effet des zones et de l'âge sur la synthèse des pigments chlorophylliens et l'accumulation des métabolites secondaires des familles d'hybrides.

L'analyse en composantes principales (ACP) du logiciel XLSTAT version 2014 a été conduite à partir des valeurs moyennes de l'analyse de variance. Elle a pour but d'établir des corrélations entre les caractères et les axes principaux. Elle présente l'avantage de caractériser une famille donnée par une valeur numérique liée à ces axes, représentant un ensemble de caractères spécifiques à cette famille. Les axes principaux ont été retenus sur la base de leur valeur propre. Ainsi les axes principaux ayant leur valeur propre supérieure à 1 ont été retenus (Dagnelie, 1975).

Enfin, une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été réalisée avec le logiciel R 3.4.3 (R Core Team, 2017). Le paquet ggplot2 (Wickham, 2016) et le paquet factoextra (Kassambara

et Mundt, 2017) ont été utilisés pour la réalisation des graphiques. Le package kml (Genolini *et al.*, 2015) a été utilisé pour l'analyse des clusters et le package FactoMineR (Lê *et al.*, 2008) a été utilisé pour l'analyse des correspondances et l'estimation de la distance euclidienne entre les individus selon le critère d'agrégation de Ward pour évaluer la ressemblance ou la dissimilarité entre les descendances.

La détermination des paramètres génétiques (héritabilités, coefficients de variation génétique et phénotypique et valeurs en croisement et corrélations entre les caractères) a été réalisée à travers des variables agro-morphologiques et biochimiques les plus discriminants des familles d'hybrides. Ces variables agro-morphologiques et biochimiques ont été déterminées deux ans après plantation dans les zones de Divo, Bongouanou et Bouaflé. Ces paramètres sont le diamètre au collet (Diam), la hauteur (Haut), le nombre de feuilles (NFF), la surface foliaire totale (SRFT), la masse spécifique foliaire (MSF), la teneur en eau des feuilles (TEF), la teneur relative en eau (Tre), l'azote des feuilles (Azote), les teneurs en chlorophylles totales (Chlt), en phénols totaux (Phénols) et proline (Proline).

L'application de l'analyse de variance suppose la distribution normale des résidus et l'homogénéité des variances. Lorsque les conditions d'application de l'analyse de variance ne sont pas vérifiées, la transformation de variables peut être envisagée. Cette transformation permet de se rapprocher des conditions idéales, surtout de normalité des distributions. Le choix de la méthode de transformation a été faite de façon théorique. Cette approche théorique de Dagnélie repose sur l'existence d'une relation linéaire liant les variances (σ^2) aux moyennes (m) :

$$\sigma^2 = f(m).$$

Les données récoltées ont une distribution de Poisson, caractérisée par l'égalité entre la variance et la moyenne. Une transformation racine carrée qui est la mieux indiquée dans ces conditions est appliquée.

Le modèle appliqué à l'analyse des paramètres génétiques est de type Henderson III (Searle, 1971) qui est adapté aux plans factoriels incomplets en analyses à effets aléatoires. L'utilisation de ce modèle permet d'estimer les composantes de la variance telles que les variances génétiques additives femelles et mâles, la variance de dominance, la variance résiduelle, la variance phénotypique ainsi que les héritabilités au sens strict et au sens large pour chacun des caractères étudiés.

En établissant l'égalité entre le modèle statistique et le modèle génétique, il est déduit les différentes variances, dont deux variances d'additivité, l'une par voie mâle (σ^2_{Am}) et l'autre

par voie femelle (σ^2Af) et une variance de dominance (σ^2D) selon les formules de Baradat (1982).

Les coefficients de variation génétique (CVG) et phénotypiques (CVP) utilisés en sélection pour identifier les variations au sein des génotypes (Solomon *et al.*, 2009).

Les CVP et CVG inférieurs à 10 % sont faibles, ceux compris entre 10 et 20 % sont modérés et ceux supérieurs à 20 % sont considérés comme élevés (Cheserek *et al.*, 2020). Suivant le plan de croisement factoriel, deux héritabilités ont été calculées. La première est l'héritabilité au sens strict et la deuxième, l'héritabilité au sens large. Elles sont estimées par les formules de Baradat (1982).

Ces analyses permettent de discuter de la possibilité de sélection directe d'un caractère sur la base des performances. Un coefficient de détermination élevé pourrait expliquer une part significative de la valeur propre des parents dans leur valeur en combinaison.

Les coefficients de corrélation génétiques (r_G) et phénotypiques (r_P) sont calculés suivant la formule de Falconer & Mackay (1996)

La signification des coefficients de corrélations est testée par rapport aux valeurs de la table du r , avec $n-2$ ddl et au seuil de 5 % de probabilité. Pour les caractères ayant des faibles corrélations ou des corrélations négatives, soit une sélection par paliers indépendants soit une sélection sur index est définie dans le but d'obtenir un progrès génétique optimal.

Toutes les analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel XLSTAT du tableur Office, Excel, version 2014. Les analyses des composantes de la variance et des corrélations entre caractères sont effectuées grâce à la procédure proc VARCOMP et à la procédure proc CORR du logiciel SAS version 9.4.

TROISIEME PARTIE :
RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. RESULTATS

3.1.1. Evaluation du comportement des familles d'hybrides en serre et au champ (objectif spécifique 1)

3.1.1.1. Détermination du taux de mortalité et des paramètres agro-physiologiques impliqués dans la résistance au déficit hydrique des familles d'hybrides de cacaoyers en serre

3.1.1.1.1. Taux de mortalité des 31 familles d'hybrides évaluées en serre

Les régimes hybrides (100 % CC, 50 % CC et 20 % CC) appliqués après 6 mois d'évaluation, ont influencé significativement la mortalité (Tableau VI). En effet, sur l'ensemble des familles, le taux moyen de mortalité enregistré a été d'environ 11 % dans le régime 100 % CC contre 36 % et 55 % respectivement pour les régimes hydriques 50 % CC et 20 % CC.

Tableau VI : Comparaison du taux de mortalité en fonction des différents régimes hydriques

Régime hydrique	Taux de mortalité (%)
100 % CC	10,97±0,01 ^C
50 % CC	36,41±0,03 ^B
20 % CC	55,05±0,03 ^A
Moyenne	34,14
CV (%)	15,13
p ≤0,05	< 0,001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %,

Aucune différence significative n'a été observée entre les familles d'hybrides dans les régimes hydriques 100 % CC ($p = 0,9158$) et 20 % CC ($p = 0,3434$). Cependant, pour le régime hydrique 50 % où des différences significatives ont été observées entre les familles d'hybrides, le taux de mortalité a varié de 9, 50 % pour la famille F12 à 75 % pour la famille F35. Dans le régime hydrique déficitaire 20 % CC, les familles d'hybrides F21, F39, F29, F1, F12, F30, F26, F28, F7, F22, F8, F14, F9 ont enregistré des taux de mortalité variant entre 25,33 et 48,67 %, inférieurs au seuil de 50 % (Tableau VII).

3.1.1.1.2. Paramètres agro-morphologiques des 31 familles d'hybrides évaluées en serre

3.1.1.1.2.1. Diamètre au collet et hauteur des 31 familles d'hybrides

Le développement végétatif a concerné le diamètre au collet et la hauteur des jeunes plants (Tableau VIII). Les analyses de variance ont montré des différences significatives ($p < 0,001$) entre les régimes hydriques pour ces variables. En ce qui concerne le diamètre au collet, il a été en moyenne de 1,01 cm dans le régime hydrique 100 % CC contre 0,92 et 0,85 cm pour les régimes hydriques déficitaires 50 % CC et 20 % CC. Au niveau de la hauteur des jeunes cacaoyers, elle a été en moyenne de 97,68 cm dans le régime hydrique 100 % CC.

Tableau VII : Taux de mortalité des plants des familles d'hybrides de cacaoyers sous les différents régimes hydriques

Familles	Taux de mortalité (%)		
	100%	50%	20%
F1	10,83±0,05 ^A	11,67±0,09 ^{BA}	33,33±0,08 ^A
F2	10,00±0,01 ^A	33,33±0,13 ^{BA}	80±0,06 ^A
F4	5,62±0,04 ^A	43,39±0,09 ^{BA}	88,33±0,03 ^A
F5	10±0,00 ^A	46,67±0,12 ^{BA}	75,83±0,11 ^A
F6	15,83±0,04 ^A	36,17±0,30 ^{BA}	84±0,18 ^A
F7	10±0,00 ^A	33,33±0,06 ^{BA}	43,33±0,21 ^A
F8	10±0,00 ^A	40,00±0,17 ^{BA}	45,83±0,15 ^A
F9	13,33±0,03 ^A	20,83±0,05 ^{BA}	48,67±0,09 ^A
F10	10,00±0,01 ^A	47,5±0,25 ^{BA}	70±0,15 ^A
F12	7,50±0,03 ^A	9,5±0,00 ^B	34,3±0,00 ^A
F13	15±0,05 ^{BA}	55±0,15 ^{BA}	59,17±0,26 ^A
F14	7,05±0,04 ^A	46,76±0,08 ^{BA}	48,67±0,07 ^A
F15	4,5±0,03 ^A	42,93±0,13 ^{BA}	73,33±0,10 ^A
F17	13,33±0,03 ^A	10,83±0,05 ^{BA}	53,33±0,15 ^A
F19	13,33±0,03 ^A	43,33±0,09 ^{BA}	70±0,10 ^A
F20	4,59±0,03 ^A	44,14±0,17 ^{BA}	86,54±0,06 ^A
F21	8,33±0,05 ^A	10,10±0,08 ^B	25,33±0,10 ^A
F22	10,00±0,01 ^A	23,33±0,09 ^{BA}	43,33±0,28 ^A
F25	10,00±0,01 ^A	56,67±0,15 ^{BA}	72,50±14 ^A
F26	7,50±0,03 ^A	14,17±0,06 ^{BA}	40±0,17 ^A
F27	13,33±0,03 ^A	26,67±0,12 ^{BA}	66,67±0,13 ^A
F28	7,50±0,03 ^A	20,00±0,06 ^{BA}	43,33±0,18 ^A
F29	10,00±0,01 ^A	56,67±0,17 ^{BA}	33,33±0,03 ^A
F30	13,3±0,33 ^A	26,67±0,06 ^{BA}	36,67±0,09 ^A
F31	10,8±0,05 ^A	36,67±0,03 ^{BA}	66,67±0,07 ^A
F32	16,66±0,03 ^A	56,67±0,03 ^{BA}	79,33±0,12 ^A
F33	10,00±0,01 ^A	63,33±0,23 ^{BA}	69,17±0,14 ^A
F35	13,33±0,30 ^A	75,00±0,05^A	82,17±0,14 ^A
F36	7,05±0,04 ^A	58,71±0,11 ^{BA}	90,28±0,07 ^A
F38	10,83±0,05 ^A	25±0,05 ^{BA}	60,00±0,11 ^A
F39	10,83±0,05 ^A	23,33±0,03 ^{BA}	26,67±0,09 ^A
Moyenne	10,97 ^C	36,41 ^B	55,05 ^A
Cv (%)	46,44	17,04	44,15
p ≤0,05	0,9158	0,0101	0,3434

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Tableau VIII : Comparaison du diamètre et de la hauteur dans les différents régimes hydriques

Régimes hydriques	Diamètre au collet (cm)	Hauteur (cm)
100 % CC	1,01±0,01^A	97,68±0,87^A
50 % CC	0,92±0,10 ^B	75,00±0,8 ^B
20 % CC	0,85±0,90 ^C	64,5±0,83 ^C
Moyenne	0,93	79,52
CV (%)	14,9	15,47
p ≤0,05	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Par contre, dans les régimes hydriques déficitaires 50 % CC et 20 % CC, les moyennes enregistrées ont été de 75,32 cm et 64,5 cm respectivement (Tableau VIII).

Des différences significatives ont été montrées entre les familles d'hybrides ($p < 0,001$) pour les variables diamètre au collet et la hauteur des plants dans chaque régime hydrique (Tableau IX). Dans le régime hydrique 100 % CC, les plants des familles d'hybrides F20 et F36 ont obtenu les plus gros diamètres au collet avec une valeur moyenne de 1,33 cm. Par contre, la famille F22 a obtenu le plus petit diamètre au collet avec une valeur moyenne de 0,80 cm. Dans le régime hydrique déficitaire 50 % CC, la famille F14 (1,4 cm) a obtenu la valeur moyenne du diamètre au collet la plus élevée contre la valeur moyenne la plus faible pour F22 (0,63 cm). La famille F36 a réitéré sa performance dans le régime hydrique déficitaire 20 % CC avec une valeur moyenne de 1,2 cm. La famille F22 a encore affiché la valeur moyenne (0,61 cm) la plus faible.

Au niveau de la hauteur des plants de cacaoyers, les familles F36 et F2 ont obtenu les grandes tailles avec des valeurs moyennes respectives de 135,73 cm et 135,43 cm dans le régime hydrique témoin 100 % CC. Par contre, les familles F32 et F22 ont présenté les plus petites tailles avec des valeurs moyennes de 74,07 cm et 73,42 cm respectivement. Sous régime hydrique déficitaire 50 %, les familles F14 (98,14 cm) et F2 (97,04 cm), ont obtenu les grandes hauteurs et les familles F6 (46,42 cm) et F22 (46,13 cm) ont obtenu les plus petites hauteurs. Sous régime hydrique déficitaire 20 %, les valeurs moyennes des hauteurs ont varié de 36,82 cm (faible valeur) pour la famille F22 à 88,69 cm pour la famille F1 (forte valeur).

3.1.1.1.2.2. Nombre de feuilles fonctionnelles, surfaces foliaires totales et masse spécifique foliaire des familles d'hybrides en serre

Les régimes hybrides ont influencé significativement ($p < 0,001$) le nombre de feuilles fonctionnelles, la surface foliaire totale et la masse spécifique foliaire évaluées (Tableau X). Sur l'ensemble des familles, le nombre de feuilles fonctionnelles enregistré a été en moyenne de 59,2 dans le régime 100 % CC contre 47,47 et 20,20 pour les régimes hydriques 50% CC et 20 % CC. Pour la surface foliaire totale, les valeurs moyennes enregistrées ont été de 121,12 cm², 96,03 cm² et 70,24 cm², respectivement dans les régimes hydriques respectifs 100 % CC, 50 % CC et 20 % CC. Au niveau de la masse spécifique foliaire, les régimes hydriques 100 % CC, 50 % CC et 20 % CC ont enregistré les valeurs moyennes respectives de 74,02 mg/cm², 90,02 mg/cm² et 116,48 mg/cm².

Tableau IX : Diamètre au collet et hauteur des familles d'hybrides de cacaoyers sous les différents régimes hydriques en serre

Familles	Diamètre au collet (cm)			Hauteur (cm)		
	100%	50%	20%	100%	50%	20%
F1	1,09±0,02 ^{EBDAC}	0,87±0,02 ^{BDEC}	0,89±0,02 ^{FGCED}	104,56±3,62 ^{CEBD}	93,10±1,39 ^{BAC}	88,69±2,23^A
F2	1,22±0,09 ^{BA}	1,00±0,03 ^{BAC}	1,06±0,07 ^{BA}	135,43±2,99^A	97,04±4,31^A	81,13±8,30 ^{BA}
F4	1,29±0,01 ^{BA}	1,19±0,01 ^{BA}	1,13±0,06 ^{BA}	116,91±1,88 ^B	77,18±4,43 ^{FDEG}	76,73±5,24 ^{BC}
F5	1,02±0,03 ^{EDFC}	0,91±0,02 ^{BDEC}	0,94±0,04 ^{BECD}	112,56±2,83 ^{CB}	77±3,38 ^{FDEG}	75,22±5,57 ^{BC}
F6	1,04±0,01 ^{EBDFC}	1,04±0,01 ^{BA}	0,81±0,01 ^D	90,71±1,12 ^{FE}	46,42±1,11^L	47,38±1,13 ^{HG}
F7	1,05±0,03 ^{EBDFC}	0,91±0,03 ^{BDEC}	0,82±0,02 ^{FGED}	98,87±2,47 ^{FCED}	72,04±3,18 ^{HFIEG}	60,4±2,64 ^{ED}
F8	0,89±0,04 ^{GF}	1,04±0,03 ^{BA}	0,88±0,04 ^{FGCED}	102,67±5,95 ^{FCEBD}	83,57±2,71 ^{DEC}	70,2±3,28 ^{BCD}
F9	1,05±0,03 ^{EBDFC}	0,97±0,02 ^{BDAC}	0,97±0,02 ^{BCD}	102,55±2,65 ^{FCEBD}	87,64±2,46 ^{BDAC}	77,82±3,34 ^B
F10	1,08±0,04 ^{EBDAC}	0,97±0,03 ^{BDAC}	0,9±0,03 ^{FGCED}	105,47±4,95 ^{CEBD}	74,3±3,35 ^{HFDEG}	63,57±2,63 ^{ED}
F12	0,98±0,03 ^{EDF}	1,13±0,05 ^{BA}	1,13±0,0 ^{BA}	110,3±2,88 ^{CBD}	84,4±2,84 ^{BDEC}	84,4±8,30 ^{BA}
F13	0,88±0,04 ^{BDEC}	0,88±0,04 ^{BDEC}	0,91±0,03 ^{FGCED}	70,08±2,67 ^{HFIG}	70,08±2,67 ^{HFIG}	59,44±2,43 ^{ED}
F14	1,19±0,03 ^{BA}	1,49±0,03^A	1,16±0,12 ^{BA}	107,62±3,26 ^{CEBD}	98,14±2,77^A	78,14±9,58 ^{BA}
F15	1,10±0,02 ^{EBDAC}	1,10±0,02 ^{BA}	1,16±0,07 ^{BA}	103,52±1,87 ^{CEBD}	72,68±3,47 ^{HFIEG}	62,5±3,30 ^{ED}
F17	1,12±0,03 ^{BDAC}	0,98±0,03 ^{BAC}	0,88±0,03 ^{FGCED}	94,7±3,02 ^{FE}	81,51±2,36 ^{FDEC}	61,9±2,76 ^{ED}
F19	1,15±0,04 ^{BAC}	0,99±0,03 ^{BAC}	0,93±0,05 ^{FBECD}	103,29±4,27 ^{FCEBD}	91,24±3,40 ^{BAC}	74,44±2,99 ^{BC}
F20	1,33±0,04^A	1,03±0,04 ^{BA}	0,95±0,14 ^{FGCED}	125,69±3,1 ^B	60,11±4,18 ^{KIJ}	53,3±5,60 ^{EFG}
F21	1,09±0,02 ^{EBDAC}	1,09±0,02 ^{BA}	1,18±0,03 ^{BA}	102,59±3,58 ^{CEBD}	69,33±2,78 ^{HIJG}	71,17±9,06 ^{BA}
F22	0,80±0,02^G	0,63±0,02^F	0,61±0,02^I	73,42±1,59^H	46,13±1,56^L	36,82±1,62^I
F25	1,15±0,05 ^{BAC}	0,98±0,04 ^{BDAC}	1,13±0,04 ^{BA}	105,22±5,82 ^{CEBD}	74,38±3,74 ^{HFDEG}	75,11±3,84 ^{BC}
F26	0,90±0,03 ^{GF}	0,82±0,02 ^{DE}	0,75±0,02 ^{GH}	78±1,63 ^{HG}	57,5±2,06 ^{KJ}	44,28±1,24 ^{HI}
F27	0,94±0,04 ^{EGF}	0,91±0,02 ^{BDEC}	0,89±0,02 ^{FGCED}	88,83±2,56 ^{FG}	68±2,08 ^{HIJG}	55,07±3,16 ^{EFG}
F28	1,04±0,02 ^{EBDFC}	1,00±0,02 ^{BAC}	0,81±0,04 ^{FGED}	110,5±2,37 ^{CBD}	85,93±2,71 ^{BDAC}	76±2,31 ^{BC}
F29	1,03±0,02 ^{EBDFC}	0,99±0,02 ^{BAC}	0,9±0,02 ^{FGCED}	103,32±3,81 ^{FCEBD}	96±2,47 ^{BA}	75,16±2,54 ^{BC}
F30	0,95±0,02 ^{EGF}	0,85±0,04 ^{DEC}	0,82±0,02 ^{FGED}	88,83±2,04 ^{FG}	68,04±1,91 ^{HIJG}	57,09±1,56 ^{EF}
F31	1,09±0,02 ^{EBDAC}	0,99±0,02 ^{BAC}	0,87±0,03 ^{FGCED}	92,13±2,28 ^{FE}	77,83±2,17 ^{FDEG}	61,4±2,07 ^{ED}
F32	1,3±0,02 ^{BA}	0,79±0,03 ^E	0,67±0,02 ^{IH}	74,07±1,55 ^H	51,4±1,85 ^{KL}	48,92±1,30 ^{HFG}
F33	1,13±0,04 ^{BDAC}	1,01±0,04 ^{BAC}	0,93±0,03 ^{FBECD}	96,21±2,01 ^{FED}	70,24±2,86 ^{HFIG}	62,38±3,01 ^{ED}
F35	1,02±0,03 ^{EDFC}	1±0,05 ^{BAC}	0,76±0,03 ^{FGH}	89,13±3,44 ^{FG}	60,85±3,60 ^{KIJ}	46,4±1,92 ^{HG}
F36	1,33±0,06^A	1,33±0,06 ^{BA}	1,2±0,05^A	135,73±3,72^A	70,18±5,0 ^{HFIG}	61,33±3,52 ^{ED}
F38	1,2±0,02 ^{BA}	1,03±0,02 ^{BA}	0,99±0,03 ^{BC}	117,04±3,02 ^B	86,21±3,70 ^{BDAC}	79,95±1,98 ^{BA}
F39	0,96±0,02 ^{EDF}	0,82±0,02 ^{DE}	0,78±0,01 ^{FGEH}	97,11±2,83 ^{FED}	62,28±1,81 ^{HIJ}	64,82±1,32 ^{ECD}
Moyenne	1,01 ^A	0,92 ^B	0,85 ^C	97,68 ^A	75,32 ^B	64,5 ^C
Cv (%)	15,06	16,38	16,15	13,91	17,16	16,28
p ≤ 0,05	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Tableau X : Comparaison du nombre de feuilles, de la surface foliaire totale et de la masse spécifique foliaire dans les différents régimes hydriques

Régimes hydriques	Nombre de feuilles fonctionnelles	Surface foliaire totale (cm ²)	Masse spécifiques foliaire (g/cm ²)
100 % CC	59,2±0,42^A	121,12±2,47^A	72,02±1,53 ^C
50 % CC	47,47±0,34 ^B	96,03±3,01 ^B	90,02±1,83 ^B
20 % CC	20,20±0,35 ^C	70,24±3,03 ^C	116,48±2,36^A
Moyenne	42,29	95,80	92,84
CV (%)	17,94	30,86	19,47
p ≤0,05	<,0001	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Des différences significatives ont été observées entre les familles d'hybrides au seuil de 5 % pour le nombre de feuilles fonctionnelles, la surface foliaire totale et la masse spécifique foliaire à l'intérieur de chaque régime hydrique (Tableau XI). Dans le régime hydrique 100 % CC, la famille F25 a obtenu moins de feuilles fonctionnelles (46, 22) et la famille d'hybride F14 a obtenu plus de feuilles fonctionnelles (75,96). Sous stress hydrique déficitaire 50 % CC, la famille F32 a obtenu moins de feuilles fonctionnelles avec une moyenne de 44,9. Par contre, la famille F2 a obtenu le plus grand nombre de feuilles fonctionnelles avec une valeur moyenne de 54,14. Sous régime hydrique déficitaire 20 % CC, les familles d'hybrides F38 et F33 ont présenté moins de feuilles fonctionnelles avec des valeurs respectives de 16,3 et 16,88. Cependant, la famille d'hybride F19 a présenté le nombre de feuilles fonctionnelles le plus élevé avec une valeur moyenne de 25,88.

Pour ce qui concerne la surface foliaire totale, sous apport d'eau quotidien (100 % CC), la famille d'hybride F19 a obtenu la plus grande surface foliaire totale (158,3 cm²) et la plus petite surface foliaire totale (76,37 cm²) a été présentée par la famille F26. Sous régime hydrique déficitaire 50 % CC, la famille d'hybride F14, a présenté la plus grande surface foliaire (131,93 cm²). Par contre la plus petite surface foliaire a été obtenue par la famille F22 avec une moyenne de 55,24 cm². Sous régime hydrique déficitaire 20 % CC, la plus grande surface foliaire totale a été obtenue par la famille F1 avec une moyenne de 99,15 cm². Par contre, la plus petite surface foliaire a été obtenue par la famille F35 avec une moyenne de 30,88 cm² (Tableau XI).

Quant à la masse spécifique foliaire, en absence du stress (100 % CC), les familles F6 (98,51 mg/cm²) ont obtenu la plus grande masse spécifique et les plus petites masses spécifiques foliaires ont été obtenues par les familles F38 (44,6 mg/cm²) et F8 (47,09 mg/cm²). Sous régime hydrique déficitaire 50 % CC, la famille F6 (115,01 mg/cm²) et F33 (114,52 mg/cm²) ont obtenu les masses spécifiques foliaires les plus élevées et la famille F22, la plus petite masse spécifique foliaire (54,22 mg/cm²). Sous régime hydrique déficitaire 20 % CC, la masse spécifique foliaire la plus élevée a été obtenue par la famille d'hybride F2 avec une moyenne de 169,31mg/cm².

Tableau XI : Nombre de feuilles fonctionnelles, surface foliaire et masse spécifique foliaire des familles sous régimes hydriques en serre

Familles	Nombre de feuilles fonctionnelles			Surface foliaire (cm ²)			Masse spécifique foliaire (mg/cm ²)		
	100%	50%	20%	100%	50%	20%	100%	50%	20%
F1	59,16±1,28 ^{CB}	48,59±1,27 ^{BA}	21,52±1,49 ^{BA}	120,25±8,01 ^{BDAC}	106,71±9,68 ^{BAC}	99,15±12,29^A	76,43±3,83 ^{BA}	88,95±5,38 ^{BC}	109,74±6,79 ^{BA}
F2	72,43±6,93 ^{CB}	54,14±2,30^A	24±3,41 ^{BA}	134,67±15,78 ^{BAC}	119,55±3,26 ^{BA}	55,56±3,69 ^{BC}	81,28±11,6 ^{BA}	69,62±9,07 ^{BC}	166,22±0,01^A
F4	59,59±3,55 ^{CB}	45,47±4,40 ^{BA}	21,64±4,47 ^{BAC}	112,01±5,62 ^{BDAC}	84,19±6,55 ^{BC}	83,68±9,32 ^{BA}	71,88±1,96 ^{BA}	77,98±4,53 ^{BC}	111,18±7,84 ^{BA}
F5	59,13±1,35 ^{CB}	50,5±1,78 ^{BA}	19,22±2,40 ^{BA}	120,64±10,25 ^{BDAC}	78,32±34,95 ^{BC}	59,37±20,66 ^B	80,05±6,80 ^{BA}	107,36±25,32 ^{BA}	85,07±7,25^B
F6	50,71±0,80 ^{CD}	43,64±1,13 ^B	19,6±0,85 ^{BC}	123,64±4,11 ^{BAC}	83,95±6,33 ^{BC}	65,74±6,69 ^{BAC}	98,51±2,58^A	115,01±20,14^A	116,62±4,31 ^{BA}
F7	56,13±1,75 ^{CB}	48,17±1,22 ^{BA}	18,6±1,88 ^{BA}	137,06±13,41 ^{BAC}	129,76±9,28 ^{BA}	60,47±17,89 ^{BC}	76,91±4,94 ^{BA}	109,48±7,96 ^{BA}	127,35±14,03 ^{BA}
F8	55,92±3,80 ^{CB}	53,09±2,21 ^{BA}	26±1,23^A	124,07±20,76 ^{BDAC}	96,71±13,79 ^{BC}	72,56±5,29 ^{BAC}	47,09±6,03^B	100,32±13,99 ^{BA}	129,76±8,14 ^{BA}
F9	59,55±2,53 ^{CB}	51,5±1,97 ^{BA}	20,59±2,55 ^{BA}	124,35±1,88 ^{BDAC}	120,85±16,03 ^{BA}	58,01±31,29 ^{BC}	69,88±3,91 ^{BA}	110,71±12,39 ^{BA}	101±0,40 ^{BA}
F10	63,53±3,17 ^B	47,80±2,03 ^{BA}	19,36±1,92 ^{BA}	119,29±14,97 ^{BDAC}	108,28±8,79 ^{BAC}	90,16±14,09 ^{BA}	69,58±4,16 ^{BA}	90,49±9,10 ^{BAC}	114,04±10,23 ^{BA}
F12	58,75±2,55 ^{CB}	47,00±1,10 ^{BA}	25,00±2,5 ^{BA}	114,8±8,77 ^{BDAC}	100,03±17,65 ^{BAC}	90,42±3,21 ^{BA}	77,45±4,00 ^{BA}	109,32±8,47 ^{BA}	129,32±5,03 ^{BA}
F13	55,35±3,14 ^{cB}	45,15±2,04 ^{BA}	17,63±1,06 ^{BA}	79,06±6,11^B	78,28±12,32 ^{DC}	48,28±12,32 ^B	86,45±5,23 ^{BA}	86,45±5,23 ^{BC}	120,03±7,45 ^{BA}
F14	75,96±2,10^A	42,71±1,81 ^{BA}	24,00±4,26 ^{BA}	139,44±7,69 ^{BAC}	131,93±11,67^A	83,62±1,09 ^{BAC}	72,26±3,38 ^{BA}	111,82±4,52 ^{BA}	103,67±7,80 ^{BA}
F15	73,27±1,12 ^{CB}	46,95±4,69 ^{BA}	17,13±3,25 ^{BA}	129,52±6,86 ^{BAC}	92,14±8,88 ^{BAC}	84,88±6,00 ^{BAC}	67,83±2,36 ^{BA}	110,67±3,76 ^{BA}	124,76±3,98 ^{BA}
F17	57,5±1,65 ^{CB}	47,21±1,36 ^{BA}	18,95±1,42 ^{BA}	135,46±7,59 ^{BAC}	86,57±20,62 ^{BC}	59,39±9,81 ^{BC}	83,20±4,62 ^{BA}	77,15±16,20 ^{BC}	112,3±5,16 ^{BA}
F19	57,71±2,64 ^{CB}	45,86±1,40 ^{9BA}	25,88±2,51^A	158,3±12,38^A	110,68±18,70 ^{BAC}	65,2±8,80 ^{BC}	89,47±6,02 ^{BA}	91,27±8,90 ^{BAC}	128,96±1,80 ^{BA}
F20	63,08±2,32 ^{CB}	40,32±1,88 ^{BA}	19,8±5,90 ^{BA}	118,27±4,61 ^{BDAC}	99,94±14,80 ^{BAC}	74,81±10,51 ^{BAC}	78,98±4,99 ^{BA}	108,72±3,71 ^{BA}	98,05±0,78 ^B
F21	72,86±2,08 ^{CB}	40,89±2,77 ^{BA}	24,89±4,69 ^{BA}	131,3±10,49 ^{BA}	96,88±7,84 ^{BA}	81,18±12,66 ^{BAC}	79,47±6,07 ^{BA}	103,76±4,27 ^{BA}	126,83±5,97 ^{BA}
F22	55,68±1,39 ^{CB}	47,13±0,69 ^{BA}	21,06±1,29 ^{BA}	85,93±4,98 ^{DC}	55,24±6,52 ^{BC}	59,91±8,51 ^{BC}	64,34±3,5 ^{BA}	54,22±7,25^C	104,86±8,19 ^{BA}
F25	46,22±2,59^D	45,67±2,01 ^{BA}	19,33±3,19 ^{BA}	152,85±26,32 ^{BA}	70,19±3,23 ^{BC}	79,48±7,23 ^{BAC}	92,21±3,96 ^{BA}	108,28±6,24 ^{BA}	135,93±0,23 ^{BA}
F26	54,82±1,21 ^{CB}	47,43±1,15 ^{BA}	20,56±0,88 ^{BA}	76,37±5,92 ^{DC}	68,58±11,18 ^{BC}	52,30±7,69 ^{BC}	66,96±5,04 ^{BA}	70,66±14,61 ^{BC}	121,83±9,45 ^{BA}
F27	54,38±1,62 ^{CB}	49,11±1,29 ^{BA}	24,14±1,74 ^{BA}	114,99±7,52 ^{BDAC}	99,29±12,88 ^{BAC}	71,27±15,58 ^{BAC}	80,79±4,693 ^A	94,28±9,93 ^{BAC}	77,14±6,32^B
F28	57,5±1,46 ^{CB}	49,63±1,06 ^{BA}	19,75±1,16 ^{BA}	119,12±7,83 ^{BDAC}	105,38±14,58 ^{BAC}	89,32±19,56 ^{BA}	69,39±4,91 ^{BA}	81,82±6,11 ^{BC}	123,04±11,67 ^{BA}
F29	59±1,46 ^{CB}	50,29±1,59 ^{BA}	21,48±1,67 ^{BA}	137,99±12,99 ^{BAC}	97,67±19,74 ^{BC}	61,51±15,53 ^{BC}	77,68±3,13 ^{BA}	68,9±5,88 ^{BC}	108,4±3,08 ^{BA}
F30	56±1,71 ^{CB}	47,57±1,41 ^{BA}	21,52±1,09 ^{BA}	119,86±9,88 ^{BDAC}	86,98±9,10 ^{BC}	74,56±8,89 ^{BAC}	75,1±3,05 ^{BA}	82,6±5,70 ^{BC}	95,51±4,16^B
F31	57,71±1,53 ^{CB}	48,46±2,09 ^{BA}	20,15±1,71 ^{BA}	121,65±10,43 ^{BDAC}	103,9±6,98 ^{BAC}	73,99±9,78 ^{BAC}	79,1±4,36 ^{BA}	80,98±6,93 ^{BA}	117,51±15,53 ^{BA}
F32	51,45±1,04 ^{CD}	44,9±1,03^B	19,79±0,83 ^{BA}	96,89±8,30 ^{BDC}	89,37±2,67 ^{BC}	82,78±6,16 ^{BAC}	69,12±3,59 ^{BA}	91,69±7,29 ^{BAC}	126,03±5,04 ^{BA}
F33	58,14±2,01 ^{CB}	52,47±2,60 ^{BA}	16,88±1,80^B	97,72±13,35 ^{BDC}	79,74±5,34 ^{BC}	31,89±1,31 ^{BC}	74,82±7,25 ^{BA}	114,52±11,78^A	139,44±7,45 ^{BA}
F35	56±2,20 ^{CB}	48,57±2,48 ^{BA}	20,6±2,41 ^{BA}	124,01±8,88 ^{BDAC}	116,31±34,18 ^{BAC}	30,88±5,77 ^C	69,4±5,17 ^{BA}	102,18±13,55 ^{BA}	93,66±7,87^B
F36	65,82±3,83 ^{CB}	41,82±5,71 ^{BA}	21,68±6,22 ^{BA}	149,48±6,58 ^{BAC}	106,15±7,88 ^{BAC}	71,34±15,58 ^{BAC}	74,29±2,72 ^{BA}	80,66±4,95 ^{BA}	94,43±0,7^B
F38	55,04±1,62 ^{CB}	51,57±1,95 ^{BA}	16,3±1,29 ^B	109,66±15,62 ^D	78,9±5,23 ^{BAC}	72,97±2,31 ^{BAC}	44,6±2,56^B	68,32±11,44 ^{BC}	82,47±6,84^B
F39	57,11±1,35 ^{CB}	48±0,92 ^{BA}	20,64±1,28 ^{BA}	125,98±6,00 ^{BDAC}	94,6±7,32 ^{BC}	92,76±14,30 ^{BA}	76,40±6,80 ^{BA}	98,04±7,54 ^{BAC}	104,38±3,58 ^{BA}
Moyenne	59,20 ^A	47,47 ^B	20,20 ^C	121,12 ^A	96,03 ^B	70,24 ^C	74,02 ^C	90,02 ^B	116,48 ^A
Cv (%)	15,31	15,73	33,63	26,98	34,22	37,31	20,1	22,74	17,07
p≤0,05	<0,001	0,0017	0,0083	<0,001	<0,001	0,0176	<0,001	0,0002	0,0003

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

Par contre, les plus faibles moyennes de la masse spécifique foliaire ont été obtenues par les familles d'hybrides F 27 (77,14 mg/cm²), F38 (82,47 mg/cm²), F5 (85,07 mg/cm²), F35 (93,66 mg/cm²), F36 (97,43 mg/cm²), F30 (95,51 mg/cm²).

3.1.1.1.2.3. Longueur, largeur racinaire et rapport de la masse racinaire par la masse de la tige des hybrides en serre

L'analyse de la variance des moyennes a montré des différences entre la longueur des racines, la largeur des racines et le rapport de la masse fraîche de la racine par celle de la tige (Tableau XII). Pour la longueur moyenne des racines des familles d'hybrides, elle a été de 39,32 cm dans le régime hydrique 100 % CC contre 32,20 cm et 23,65 cm respectivement dans les régimes hydriques déficitaires 50 % CC et 20 % CC. Au niveau du diamètre des racines, les valeurs moyennes ont été de 1,06 cm dans le régime hydrique 100 % CC contre 0,96 cm dans le régime hydrique déficitaire 50 % CC et 0,80 cm dans le régime hydrique déficitaire 20 % CC. Le rapport de la masse fraîche de racine par la masse fraîche de tige (MRF/MTF), a été en moyenne de 0,63 dans le régime hydrique 100 % CC, de 0,78 dans le régime hydrique 50% CC et de 0,89 dans le régime hydrique 20 % CC.

Tableau XII : Effet des régimes hydriques sur le système racinaire et sur le rapport entre masse fraîche de la racinaire et celle de la tige

Régimes hydriques	Longueur racinaire (cm)	Diamètre racinaire (cm)	MRF/MTF
100 % CC	39,32±0,66^A	1,06±0,02^A	0,63±0,01 ^C
50 % CC	32,20±0,7 ^B	0,96±0,02 ^B	0,78±0,01 ^B
20 % CC	23,65±0,77 ^C	0,80±0,02 ^C	0,89±0,024^A
Moyenne	31,72	0,94	0,66
Cv (%)	46,96	35,14	28,67
p ≤0,05	<0,001	<0,001	<0,001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

MRF/MTF= rapport entre la masse fraîche de la racinaire et celle de la tige

L'analyse de la variance des moyennes des familles d'hybrides a révélé un effet significatif des régimes hydriques sur la longueur des racines à 100 % CC et 50 % CC, le diamètre des racines à 50 % CC et MRF/MTF quel que soit le régime hydrique (Tableau XIII). Sous régime hydrique témoin (100 % CC), les familles F28, F12 et F1 ont obtenu les plus grandes longueurs de racines avec des valeurs moyennes respectives 45,61 cm, 45,1 cm et 45,06 cm. Par contre, les familles F33 (31,18 cm), F4 (33,47 cm), F32 (34,26 cm) et F6 (35,43 cm) ont obtenu les plus petites longueurs racinaires.

Tableau XIII : Croissance et développement du système racinaire des familles d'hybrides sous régimes hydriques en serre

Familles	Longueur des racines (cm)			Diamètre des racines (cm)			Poids racines fraîches/poids tiges fraîches		
	100%	50%	20%	100%	50%	20%	100%	50%	20%
F1	45,06±1,03^A	34,91±1,91 ^{BA}	26,69±2,44 ^A	1,24±0,02 ^A	1,03±0,06 ^{BC}	0,97±0,08 ^A	0,64±0,04 ^{BA}	0,65±0,03 ^{BAC}	0,78±0,04 ^{BC}
F2	39,2±7,13 ^{BA}	35,17±3,23 ^{BA}	27,25±7,57 ^A	1,06±0,18 ^A	1,16±0,06 ^{BA}	0,9±0,20 ^A	0,36±0,03^B	0,71±0,17 ^{BAC}	0,85±0,32 ^{BDAC}
F4	33,47±1,02^B	28,27±2,54 ^{BA}	27,33±0,88 ^A	1,28±0,31 ^A	1,37±0,88 ^{BA}	1,17±0,88 ^A	0,73±0,05 ^{BA}	0,73±0,05 ^{BAC}	0,75±0,03 ^{BDC}
F5	36,94±2,19 ^{BA}	30,24±3,54 ^{BA}	23,11±5,07 ^A	1,04±0,06 ^A	0,89±0,10 ^{BC}	0,86±0,16 ^A	0,47±0,04 ^{BA}	0,90±0,42 ^{BAC}	0,97±0,02 ^{BDAC}
F6	35,43±3,2^B	34,9±3,57 ^{BA}	30,28±4,02 ^A	1,23±0,44 ^A	1,13±0,36 ^{BAC}	1,09±0,43 ^A	0,66±0,03 ^{BA}	0,86±0,04 ^{BAC}	0,78±0,08 ^{BDC}
F7	38±3,59 ^{BA}	35±4,08 ^{BA}	28,93±1,68 ^A	1,02±0,10 ^A	1,01±0,10 ^{BC}	1,01±0,08 ^A	0,72±0,18 ^{BA}	0,75±0,04 ^{BAC}	1,19±0,05 ^{BA}
F8	39,77±4,74 ^{BA}	32,59±2,34 ^{BA}	25,42±2,98 ^A	0,84±0,51 ^A	1,11±0,09 ^{BAC}	1,14±0,04 ^A	0,36±0,10^B	0,50±0,08 ^{BC}	0,54±0,08 ^D
F9	43,35±3,23 ^{BA}	41,89±2,03^A	26,27±3,78 ^A	0,91±0,10 ^A	1,17±0,06 ^{BA}	0,92±0,14 ^A	0,55±0,17 ^{BA}	0,71±0,03 ^{BAC}	0,92±0,11 ^{BDAC}
F10	35,8±5,35 ^{BA}	34,4±4,64 ^{BA}	21,30±4,63 ^A	0,99±0,16 ^A	0,89±0,12 ^{BC}	0,81±0,17 ^A	0,50±0,07 ^{BA}	0,71±0,02 ^{BAC}	0,73±0,03 ^{BDC}
F12	45,1±2,70^A	42,23±2,00^A	26,23±0,88 ^A	1,55±0,07 ^A	1,52±0,04^A	1,13±0,03 ^A	0,54±0,02 ^{BA}	0,83±0,05 ^{BAC}	0,84±0,05 ^{BAC}
F13	37,61±5,15 ^{BA}	27,61±5,15 ^{BA}	26,96±5,06 ^A	0,80±0,15 ^A	0,78±0,15 ^{BC}	0,93±0,14 ^A	0,69±0,02 ^{BA}	0,79±0,02 ^{BAC}	0,92±0,04 ^{BDAC}
F14	44,52±2,49 ^{BA}	37,93±2,45 ^{BA}	32,00±5,29 ^A	1,21±0,44 ^A	1,26±0,43 ^{BA}	1,12±1,20 ^A	0,70±0,04 ^{BA}	0,71±0,04 ^{BAC}	0,76±0,09 ^{BC}
F15	40,24±2,5 ^{BA}	33,69±1,96 ^{BA}	25,40±4,23 ^A	1,19±0,39 ^A	1,45±0,84 ^{BA}	1,28±1,46 ^A	0,57±0,02 ^{BA}	0,68±0,02 ^{BAC}	0,7±0,03 ^{BAC}
F17	39,9±2,23 ^{BA}	33,01±2,19 ^{BA}	19,00±3,28 ^A	1,29±0,05 ^A	1,13±0,06 ^{BA}	0,81±0,12 ^A	0,50±0,03 ^{BA}	0,55±0,08 ^{BC}	0,79±0,06 ^{BDAC}
F19	42,82±4,73 ^{BA}	32,77±4,29 ^{BA}	17,13±3,94 ^A	1,21±0,09 ^A	0,91±0,11 ^{BC}	0,66±0,15 ^A	0,61±0,06 ^{BA}	0,64±0,07 ^{BAC}	0,91±0,08 ^{BDAC}
F20	43,88±1,94 ^{BA}	42,23±3,66^A	31,33±2,33 ^A	1,16±0,67 ^A	1,38±0,57 ^{BA}	1,17±1,20 ^A	0,73±0,03 ^{BAC}	0,75±0,04 ^{BAC}	1,04±0,31 ^{BAC}
F21	44,62±1,78 ^{BA}	42,63±4,96^A	30,75±1,65 ^A	1,25±0,53 ^A	1,49±1,18 ^{BA}	1,18±0,47 ^A	0,83±0,07 ^{BAC}	0,84±0,03 ^{BAC}	1,06±0,24 ^{BAC}
F22	38,32±2,16 ^{BA}	27,03±2,69 ^{BA}	23,94±3,71 ^A	0,93±0,06 ^A	0,6±0,06^C	0,66±0,08 ^A	0,73±0,05 ^{BA}	0,73±0,04 ^{BAC}	1,07±0,11 ^{BAC}
F25	30,28±5,47 ^{BA}	26,13±4,58 ^{BA}	21,78±5,33 ^A	0,96±0,24 ^A	0,75±0,13 ^{BC}	1,09±0,20 ^A	0,43±0,00 ^{BA}	0,88±0,12 ^{BAC}	1,11±0,53 ^{BA}
F26	36,52±2,87 ^{BA}	34,63±1,92 ^{BA}	23,64±3,42 ^A	0,83±0,08 ^A	0,95±0,05 ^{BC}	0,73±0,09 ^A	0,85±0,08 ^{BA}	1,03±0,04^A	1,10±0,06 ^{BA}
F27	42,64±4,45 ^{BA}	28,57±3,27 ^{BA}	21,57±4,66 ^A	0,96±0,08 ^A	0,96±0,10 ^{BC}	0,68±0,14 ^A	0,60±0,05 ^{BA}	0,89±0,05 ^{BAC}	0,89±0,05 ^{BAC}
F28	45,61±2,18^A	37,49±2,70 ^{BA}	27,18±3,01 ^A	1,14±0,03 ^A	1,10±0,08 ^{BAC}	0,87±0,09 ^A	0,72±0,10 ^{BA}	0,73±0,10 ^{BAC}	0,74±0,09 ^{BDC}
F29	38,12±2,38 ^{BA}	29,72±3,73 ^{BA}	27,79±3,17 ^A	1,11±0,08 ^A	0,94±0,13 ^{BC}	0,91±0,09 ^A	0,45±0,07 ^{BA}	0,63±0,07 ^{BAC}	0,94±0,07 ^{BDAC}
F30	40,82±2,90 ^{BA}	34,42±2,99 ^{BA}	27,31±3,27 ^A	1,04±0,07 ^A	1,03±0,06 ^{BC}	0,85±0,08 ^A	0,88±0,10^A	0,93±0,06 ^{BAC}	0,99±0,08 ^{BDAC}
F31	43,98±1,54 ^{BA}	31,98±3,71 ^{BA}	15,48±3,61 ^A	1,23±0,03 ^A	0,98±0,12 ^{BC}	0,55±0,12 ^A	0,65±0,05 ^{BA}	0,82±0,03 ^{BAC}	0,96±0,09 ^{BDAC}
F32	34,26±2,83^B	25,1±3,67 ^{BA}	14,58±2,72 ^A	1,05±0,28 ^A	0,64±0,10 ^{BC}	0,58±0,10 ^A	0,80±0,05 ^{BA}	0,83±0,04 ^{BAC}	0,98±0,07 ^{BDAC}
F33	31,18±3,80^B	21,71±3,79^B	16,35±3,92 ^A	0,99±0,15 ^A	0,75±0,16 ^{BC}	0,71±0,16 ^A	0,64±0,09 ^{BA}	0,91±0,12 ^{BAC}	0,91±0,12 ^{BAC}
F35	43,00±3,47 ^{BA}	28,4±10,95 ^{BA}	18,16±5,27 ^A	1,13±0,09 ^A	0,76±0,27 ^{BC}	0,69±0,19 ^A	0,67±0,06 ^{BA}	0,91±0,20 ^{BA}	1,28±0,23^A
F36	39,2±1,91 ^{BA}	36,22±4,60 ^{BA}	14,01±0,00 ^A	1,27±0,71 ^A	1,3±0,00 ^{BA}	1,13±0,10 ^A	0,74±0,06 ^{BA}	0,98±0,11 ^{BA}	0,75±0,00 ^{BDC}
F38	41,5±2,47 ^{BA}	35,84±4,71 ^{BA}	19,03±3,65 ^A	1,21±0,08 ^A	0,94±0,11 ^{BC}	0,68±0,13 ^A	0,40±0,05 ^{BA}	0,5±0,41^C	0,5±0,41^C
F39	37,26±2,19 ^{BA}	32,2±2,76 ^{BA}	22,98±2,50 ^A	1,05±0,06 ^A	0,93±0,07 ^{BC}	0,79±0,08 ^A	0,85±0,04 ^{BA}	1,02±0,04^A	0,99±0,04 ^{BDAC}
Moyenne	39,62 ^A	33,20 ^B	23,65 ^C	1,10 ^A	1,04 ^B	0,91 ^C	0,63 ^C	0,78 ^B	0,89 ^A
Cv (%)	35,65	48,41	32,92	29,51	48,06	45,3	37,46	24,75	21,49
p ≤ 0,05	0,0062	0,0027	0,0544	0,2138	<,0001	0,0859	<,0001	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

Sous régime hydrique déficitaire 50 % CC, les familles F21, F12, F20 et F9 ont présenté les plus longues racines avec des valeurs moyennes respectives 42,63 cm, 42,23 cm, 42,22 cm et 41,89 cm. Par contre, la famille F33 a obtenu les plus courtes racines avec une valeur moyenne de 21,71 cm. Sous régime hydrique déficitaire 20 % CC, la longueur des racines a montré une homogénéité entre les familles d'hybrides. Quant au diamètre racinaire, aucune différence n'a été observée entre les familles d'hybrides sous régimes hydriques 100 % CC et 20 % CC avec des moyennes respectives de 1,10 cm et 0,91 cm. Cependant, sous traitement hydrique déficitaire 50 % CC, la famille F12 a obtenu le plus gros diamètre racinaire (1,52 cm) et la famille F22, le plus petit diamètre racinaire avec une moyenne 0,6 cm. En absence de stress hydrique (100 % CC), le rapport MRF/MTF a été plus élevé pour la famille F30 avec une valeur moyenne de 0,88. Par contre la famille F2 et F8 ont obtenu le plus faible rapport MRF/MTF (0,36). Sous traitement hydrique déficitaire 50 % CC, les familles F26 (1,03) et F39 (1,02), ont présenté les plus grands rapports et la famille F38 a présenté le plus petit rapport (0,5). Sous régime hydrique déficitaire 20 % CC, la famille F35 (1,28) a obtenu le plus grand rapport MRF/MTF et la famille F38, a obtenu le plus petit rapport avec une valeur moyenne de 0,5 (Tableau XIII).

3.1.1.1.3. Variation physiologique en serre

Sept (07) paramètres physiologiques ont été évalués en serre : couleur, aspect, indice de nécrose, teneur en eau des cacaoyers, teneur en eau foliaires, teneur relative en eau foliaire et la perte d'eau. Les différents régimes hydriques appliqués sur ces paramètres ont modifié l'apparence visuelle des hybrides après 180 jours (Figures 13)

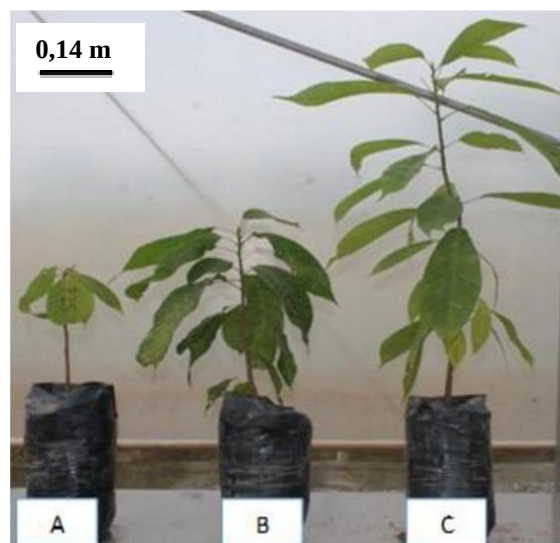


Figure 14: Apparence générale de famille d'hybrides (F12) sous régime hydrique en serre
A=20 % CC, B=50 % CC, C= 100 % CC

3.1.1.1.3.1. Etat des feuilles sous les régimes hydriques

Dans le régime hydrique 100 % CC, les plantes ont toutes présenté des feuilles de couleur vert foncé (Figure 14 A). En revanche, dans les traitements à 50 % CC et 20% CC, les couleurs des feuilles sont passées du vert au vert-clair respectivement (Figure 14 B-C).

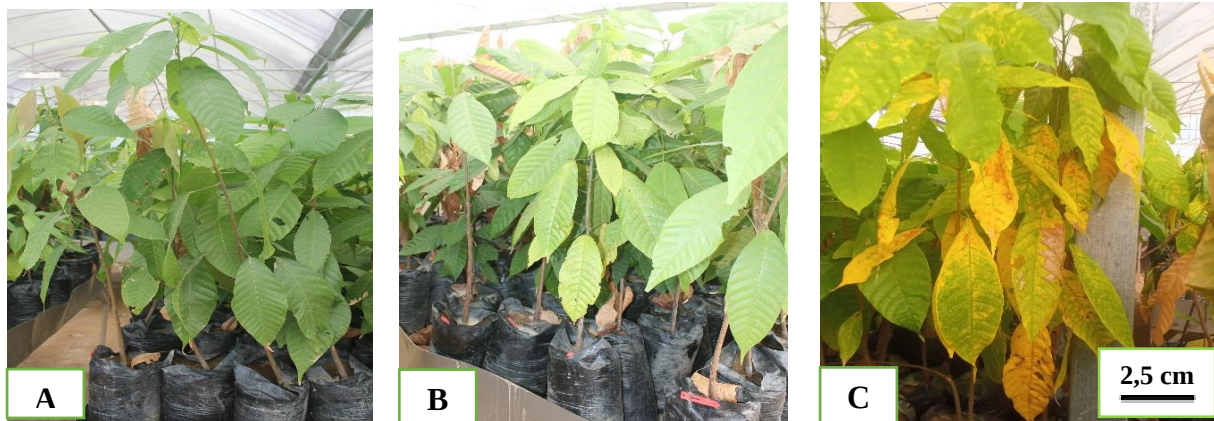


Figure 15 : Couleur des feuilles des familles d'hybrides sous régimes hydriques en serre.
A=100 % CC (vert pur), B=50 % CC (vert-clair), C= 20 % CC (jaune)

Relativement l'aspect des feuilles, les plantes ont toutes présenté des feuilles fraîches dans le régime hydrique témoin 100 % CC (Figure 15 A). Par contre, dans le régime hydrique déficitaire 50 % CC (Figure 15 B), les feuilles ont été moyennement fraîches et plus desséchées dans le régime hydrique déficitaires 20 % CC (Figure 15 C).

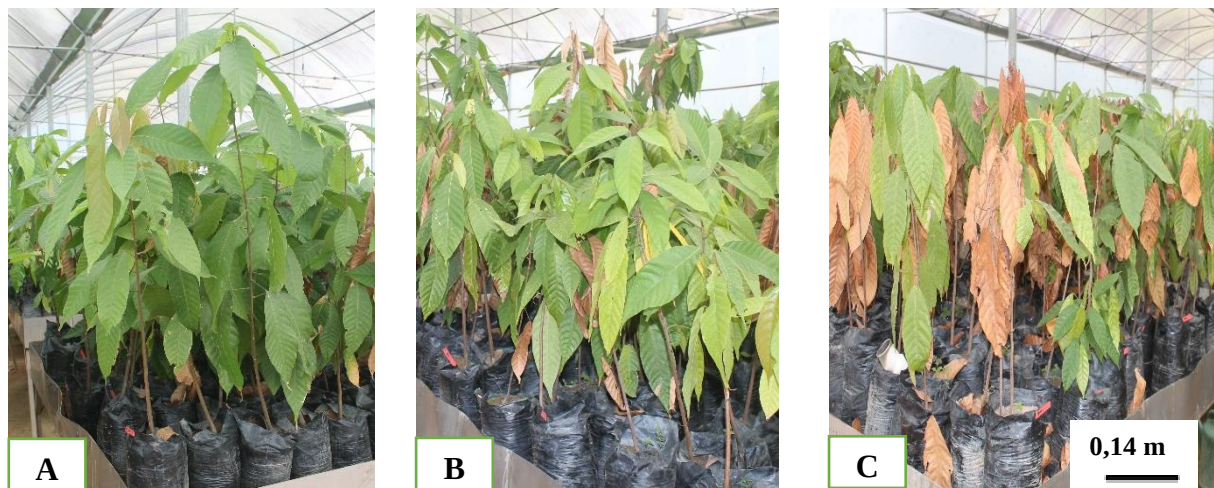


Figure 16 : Aspect foliaire des familles d'hybrides sous régimes hydriques
A=100 % CC, B=50 % CC, C= 20 % CC

Enfin, concernant la nécrose, elle a été plus accentuée dans le régime hydrique déficitaire 20 % CC (Figure 16 C) et moyenne dans le régime hydrique déficitaire 50 % CC (Figure 16 B). Cependant, les hybrides sous traitement témoin (100 % CC) ont montré des feuilles sans nécrose (Figure 16 A).

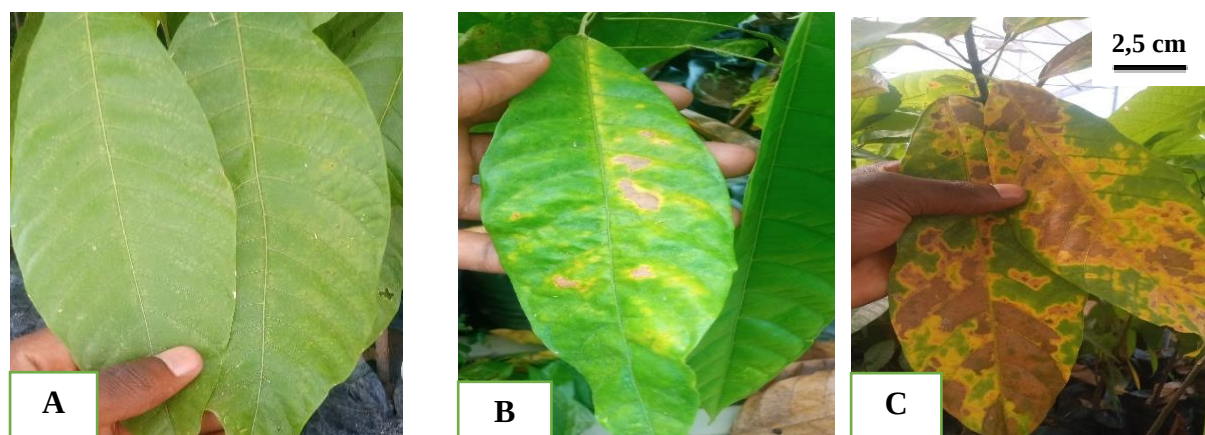


Figure 17 : Nécrose foliaire des familles d'hybrides sous régimes hydriques

A =100 % CC, B=50 % CC, C= 20 % CC

3.1.1.1.3.2. Teneurs en eau des cacaoyers et teneurs en eau foliaires des hybrides en serre

L'analyse de variance a montré des différences significatives ($p < 0,0001$) entre les régimes hydriques appliqués pour la teneur en eau des familles d'hybrides et la teneur en eau des feuilles (Tableau XIV). Sur l'ensemble des familles, la teneur en eau des familles d'hybrides enregistrée a été de 4,01 ml dans le régime hydrique témoin 100 % CC et de 3,03 et 2,24 ml dans les régimes hydriques déficitaires 50 % CC et 20 % CC respectivement. Pour la variable teneur en eau des feuilles des familles d'hybrides, les valeurs moyennes enregistrées ont été de 2971,41 mg/g Ms dans le régime hydrique 100 % CC, 2225,32 mg/g Ms dans le régime hydrique déficitaire 50 % CC et 1581,31 mg/g Ms dans le régime hydrique déficitaire 20 % CC.

Tableau XIV : Comparaison de la teneur en eau des plants et de la teneur en eau des feuilles dans les différents régimes hydriques

Régimes hydriques	Teneur en eau des cacaoyers (ml)	Teneur en eau Des feuilles des cacaoyers (mg/g)
100 % CC	4,01±0,04 ^A	2971,41±46,51 ^A
50 % CC	3,03±0,06 ^B	2225,32 ±94,65 ^B
20 % CC	2,24±0,07 ^C	1581,31 ±89,39 ^C
Moyenne	3,09	2259,35
Cv (%)	18,61	38,34
p ≤0,05	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

A l'intérieur de chaque régime hydrique, des différences significatives ont été observées entre les familles d'hybrides pour la teneur en eau des plants dans le régime hydrique 100 % ($p=0,0015$), dans le régime hydrique 50 % CC ($p<,0001$) et aucune différence dans le régime hydrique 20 % CC avec une probabilité $p=0,0683$ (Tableau XV). Les plants de la famille F8 ont obtenu les teneurs en eau les plus élevées avec une moyenne de 4,89 ml. Chez les plants des familles F32 et F13, il a été enregistré les plus faibles teneurs en eau avec des moyennes respectives de 3,48 et 3,44 ml. Dans le régime hydrique déficitaire 50 % CC, les plants de famille F12 ont obtenu les meilleures teneurs en eau avec une valeur moyenne de 3,95 ml. Les plants de la famille F31, ont obtenu les faibles moyennes avec une valeur de 2,2 ml. Cependant, le régime hydrique déficitaire 20 % CC a montré une homogénéité entre les familles d'hybrides qui ont affiché une teneur moyenne en eau de 2,24 ml.

Pour la variable teneur en eau des feuilles, des différences significatives observées entre les familles d'hybrides, ont été dans le régime hydrique 100 % ($p=0,0003$), dans le régime hydrique 50 % CC ($p=0,002$) et dans le régime hydrique 20 % CC ($p=0,0098$). Sur l'ensemble des familles d'hybrides, les plants de la famille F8 ont obtenu les teneurs en eau des feuilles les plus élevées avec une moyenne de 3813 mg/g Ms et les plants de la famille F38, les plus faibles teneurs en eau des feuilles avec une moyenne 2115,2 mg/g Ms. Dans le régime hydrique déficitaire 50 % CC, les plants de la famille F21 ont enregistré les meilleures teneurs en eau des feuilles avec une valeur moyenne 3674,21 mg/g Ms et les plants de la famille F38, les faibles moyennes avec une valeur de 1087,5 mg/g Ms. Dans le régime hydrique déficitaire 20 % CC, les plants de la famille F12 avec une valeur moyenne de 3042,8 mg/g Ms ont présenté les grandes teneurs en eau foliaire. Cependant, les plants de famille F39 ont obtenu les plus faibles teneurs en eau des feuilles avec une valeur moyenne 701 mg/g Ms (Tableau XV).

3.1.1.1.3.3. Teneur relative en eau des feuilles et perte en eau des feuilles des familles d'hybrides

Des différences significatives entre les régimes hydriques ($p<0,001$) ont été observées pour la teneur relative en eau des feuilles et la perte en eau des feuilles des familles d'hybrides cacaoyers (Tableau XVI). Au niveau de la teneur relative en eau, la valeur moyenne enregistrée a été de 80,2 % dans le régime hydrique témoin 100 % CC contre 51,03 % et 47,41 % respectivement dans les régimes hydriques déficitaires 50 % CC et 20 % CC. Les valeurs moyennes enregistrées au niveau la perte en eau des feuilles, ont été de $(-1,17 \text{ g.}10^{-3} / \text{cm}^2/\text{mn})$ dans le régime hydrique 100 % CC contre $(-1,58 \text{ g.}10^{-3} / \text{cm}^2/\text{mn})$ dans le régime hydrique déficitaire 50 % CC et $(-1,87 \text{ g.}10^{-3} / \text{cm}^2/\text{mn})$ dans le régime hydrique déficitaire 20 % CC.

Tableau XV : Teneur en eau, teneur en eau foliaire des hybrides sous régimes hydriques en serre

Familles	Teneur en eau des cacaoyers (ml)			Teneur en eau des feuilles (mg/g MS)		
	100%	50%	20%	100%	50%	20%
F1	4,01±0,2 ^{BAC}	3,04±0,11 ^{BAC}	2,37±0,18 ^A	2931,2±144,58 ^{BAC}	2239,1±200,38 ^{BAC}	1058±326,98 ^{BAC}
F2	3,83±0,02 ^{BAC}	3,32±0,27 ^{BAC}	2,84±0,02 ^A	3061,8±167,64 ^{BAC}	2292,3±822,21 ^{BAC}	1106±102,21 ^{BAC}
F4	3,62±0,07 ^{BAC}	2,57±0,17 ^{BAC}	2,71±0,29 ^A	2473,17±118,90 ^{BAC}	1254,56±73,03 ^{BC}	1448,48±613,13 ^{BAC}
F5	4,10±0,16 ^{BAC}	2,93±0,24 ^{BAC}	2,58±0,19 ^A	3101,1±413,91 ^{BA}	2801,1±213,17 ^{BAC}	1379±2,64 ^{BAC}
F6	4,25±0,07 ^{BAC}	2,37±0,15 ^{BC}	1,39±0,00 ^A	2847,93±131,69 ^{BAC}	1763,17±613,13 ^{BAC}	1156,92±73,03 ^{BC}
F7	4,44±0,30 ^{BAC}	3,23±0,19 ^{BAC}	2,41±0,33 ^A	3057±1126,98 ^{BA}	2975,7±158,20 ^{BAC}	2540,2±306,33 ^{BAC}
F8	4,89±0,10^A	3,55±0,44 ^{BAC}	2,62±0,22 ^A	3813±102,01^A	2724,7±584,66 ^{BAC}	2149,9±206,83 ^{BC}
F9	4,00±0,55 ^{BAC}	3,54±0,16 ^{BAC}	2,70±0,05 ^A	3434,5±419,01 ^{BAC}	3228,7±467,66 ^{BA}	769±638,78 ^{BC}
F10	4,40±0,20 ^{BAC}	2,54±0,10 ^{BAC}	2,16±0,19 ^A	3648,9±352,02 ^{BA}	1720,5±359,41 ^{BAC}	1480±312,69 ^{BAC}
F12	4,28±0,07 ^{BAC}	3,95±0,13^A	3,15±0,13 ^A	3742,8±556,62 ^{BA}	3324,7±156,24 ^{BA}	3042,8±556,62^A
F13	3,44±0,21^C	2,44±0,21 ^{BC}	2,02±0,24 ^A	1691±280,15 ^{BC}	1263,9±143,2 ^{BC}	1163,9±143,2 ^{BAC}
F14	3,50±0,11 ^{BAC}	3,90±0,13 ^{BAC}	2,81±0,15 ^A	2936,55±250,50 ^{BAC}	1925,57±887,23 ^{BAC}	1860,33±235,64 ^{BAC}
F15	3,87±0,13 ^{BAC}	2,29±0,24 ^{BC}	2,94±0,27 ^A	3247,01±230,4 ^{BAC}	2014,65±887,23 ^{BAC}	1102,73±143,2 ^{BAC}
F17	3,97±0,30 ^{BAC}	3,24±0,47 ^{BAC}	3,12±0,84 ^A	3330,9±230,4 ^{BAC}	2560,2±481,93 ^{BAC}	2138±887,23 ^{BAC}
F19	4,11±0,16 ^{BAC}	3,37±0,13 ^{BAC}	2,52±0,15 ^A	3383,2±214,64 ^{BA}	3064±548,7 ^{BA}	1490,5±192,10 ^{BAC}
F20	4,10±0,12 ^{BA}	3,7±0,64 ^{BAC}	2,84±0,19 ^A	3125,36±244,85 ^{BAC}	2554,67±306,33 ^{BAC}	2909,99±887,23 ^{BAC}
F21	4,82±0,19 ^{BA}	3,86±0,13 ^{BA}	2,44±0,17 ^A	3757,83±556,62 ^{BA}	3674,21±352,02^A	2500,13±887,23 ^{BAC}
F22	4,07±0,14 ^{BAC}	2,98±0,19 ^{BAC}	2,49±0,24 ^A	3102,5±244,85 ^{BAC}	1481,7±159,74 ^{BAC}	2148±145,52 ^{BAC}
F25	4,37±0,10 ^{BAC}	3,85±0,2 ^{BA}	1,86±0,14 ^A	3008±231,01 ^{BAC}	2969,3±176,61 ^{BAC}	2157,2±142,2 ^{BAC}
F26	4,24±0,15 ^{BAC}	3,74±0,31 ^{BA}	2,52±0,28 ^A	3266,6±257,80 ^{BAC}	2042,3±481,53 ^{BAC}	1166±409,17 ^{BAC}
F27	4,08±0,20 ^{BAC}	3,55±0,58 ^{BAC}	3,55±0,58 ^A	3014±188,76 ^{BAC}	2221,6±537,88 ^{BAC}	2221,6±537,88 ^{BAC}
F28	3,90±0,19 ^{BAC}	2,56±0,10 ^{BAC}	2,14±0,29 ^A	2580,2±118,90 ^{BAC}	1965,2±235,64 ^{BAC}	2188±230,05 ^{BAC}
F29	3,64±0,40 ^{BC}	2,74±0,15 ^{BAC}	1,59±0,31 ^A	2995,9±191,68 ^{BAC}	1463,3±212,04 ^{BAC}	1443±207,22 ^{BAC}
F30	3,61±0,23 ^{BC}	2,46±0,11 ^{BAC}	1,72±0,2 ^A	2907±250,50 ^{BAC}	1379,3±156,96 ^{BAC}	876±246,85 ^{BAC}
F31	3,83±0,07 ^{BAC}	2,2±0,16^C	1,90±0,33 ^A	2876,6±131,69 ^{BAC}	1298,4±73,03 ^{BC}	787±304,34 ^{BC}
F32	3,48±0,12^C	2,47±0,20 ^{BAC}	1,92±0,14 ^A	2734,2±180,72 ^{BAC}	2023,3±230,55 ^{BAC}	1574±336,44 ^{BAC}
F33	3,62±0,11 ^{BC}	2,83±0,36 ^{BAC}	2,83±0,36 ^A	3066,9±223,57 ^{BAC}	2980,8±613,13 ^{BAC}	2880,8±613,13 ^{BAC}
F35	3,87±0,10 ^{BAC}	2,99±0,37 ^{BAC}	3,09±0,61 ^A	2668±142,32 ^{BAC}	3063,8±309,30 ^{BAC}	1647±948,15 ^{BAC}
F36	3,65±0,48 ^{BAC}	2,65±0,22 ^{BAC}	2,22±0,12 ^A	2621,95±112,32 ^{BAC}	1293,62±73,03 ^{BC}	1183,28±613,13 ^{BAC}
F38	4,76±0,11 ^{BA}	2,66±0,62 ^{BAC}	2,66±0,62 ^A	2115,2±126,55^C	1087,5±171,3^C	887,5±171,3 ^{BC}
F39	3,59±0,16 ^{BC}	2,38±0,14 ^{BC}	1,63±0,18 ^A	3264,4±213,17 ^{BAC}	2333,3±32,71 ^{BAC}	701±188,17^C
Moyenne	4,01 ^A	3,03 ^B	2,24 ^C	2971,41 ^A	2225,32 ^B	1581,31 ^C
CV (%)	15,29	22,83	34,95	20,18	47,58	45,59
p ≤ 0,05	0,0015	<,0001	0,0683	0,0003	0,0002	0,0098

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Tableau XVI : Comparaison de la teneur relative en eau des feuilles et de la perte en eau des feuilles dans les différents régimes hydriques

Régimes hydriques	Teneur relative en eau des feuilles (%)	Perte d'eau des feuilles (g.10 ⁻³ /cm ² /mn)
100 % CC	80,2±0,48^A	-1,17±0,01^A
50 % CC	51,03±1,01 ^B	-1,58±0,09 ^B
20 % CC	47,86±1,67 ^C	-1,87±0,06 ^C
Moyenne	59,70	-3,37
Cv (%)	15,91	38,34
p ≤ 0,05	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Pour chaque régime hydrique, des effets significatifs entre les familles d'hybrides pour les variables teneur relative en eau des feuilles et perte en eau foliaire des jeunes cacaoyers ont été enregistrés (Tableau XVII). Au niveau de la teneur relative en eau, une différence significative a été révélée dans le régime hydrique 100 % CC ($p=0,0389$), dans le régime hydrique 50 % CC ($p=0,0165$) et dans le régime hydrique 20 % CC (0,033). Sur l'ensemble des familles, les plants des familles F25 et F9 ont obtenu les teneurs relatives en eau des feuilles les plus élevées avec des moyennes respectives de 87,55 % et de 87,37 %. Par contre, les plants de la famille F4, ont obtenu les plus faibles teneurs relatives en eau avec une moyenne de 69,97 %. Dans le régime hydrique déficitaire 50 % CC, les plants des familles F12 et F21 ont obtenu les meilleures teneurs relatives en eau des feuilles avec des valeurs moyennes respectives de 65,92 % et 65,02 %. Les plants de la famille F30 ont obtenu les faibles moyennes avec une valeur de 40,18 %. Dans le régime hydrique déficitaires 20 % CC, les plants de la famille F12 ont obtenu les meilleures performances avec une valeur moyenne de 53,12 % contre 31 % et 32,23 % pour les plants de la famille F5 et F39.

Pour la variable perte en eau des feuilles, un effet significatif du régime hydrique n'a été observé qu'à 20 % CC. Les plants de la famille F29 ont obtenu une faible perte en eau des feuilles avec une moyenne de $-3,64 \text{ g.}10^{-3} / \text{cm}^2/\text{mn}$ dans le régime hydrique déficitaire 20 % CC. Par contre, les plants de la famille F2, F12, F14 et F21 ont présenté des rejets d'eau des feuilles élevés avec des moyennes respectives de $-0,54$, $-0,49$, $-0,48$ et $-0,43 \text{ g.}10^{-3} / \text{cm}^2/\text{mn}$. Cependant, une homogénéité entre les familles d'hybrides dans le régime hydrique déficitaire 50 % CC, et 100 % CC a été observé avec des rejets d'eau moyens de $-1,58 \text{ g.}10^{-3} / \text{cm}^2/\text{mn}$ et $-1,17 \text{ g.}10^{-3} / \text{cm}^2/\text{mn}$ respectivement (Tableau XVII).

3.1.1.1.4. Corrélations entre les variables agro physiologiques

La matrice de corrélation de Pearson (Tableau XVIII) a permis de révéler les plus forts liens entre le taux de mortalité, les paramètres agro morphologiques et les paramètres physiologiques des jeunes cacaoyers. Les paramètres agro physiologiques diam (-0,23), haut (-0,14), Srft (-0,28), Longrac (-0,30), Diamrac (-0,19), Tepl (-0,4), Tef (-0,13) et Tre (-0,31) ont été négativement corrélés au taux de mortalité excepté Msf (0,26) et le rapport entre la masse racinaire et la masse de la tige (0,15). De même, la masse spécifique foliaire a été négativement corrélée aux paramètres agro-physiologiques tels que Longrac (-0,55), Diamrac (-0,13), Tepl (-0,56), Tef (-0,13) et Tre (-0,54), excepté le rapport entre la masse racinaire et la masse de la tige (0,48). Les corrélations significatives et positives au niveau des variables agro-morphologiques ont été observées pour les couples diam/srft (0,53), diam/diamrac (0,68),

srtf/longrac (0,73), longrac/diamrac (0,64). Les corrélations positives et significatives entre les variables agro physiologique ont été observées entre les couples srtf/tepl (0,62), srtf/tre(0,73), longrac/tepl (0,68), longrac/tre (0,71). Au niveau des paramètres physiologiques, le plus fort lien a été observé entre le couple tepl/tre (0,82).

Tableau XVII : Teneur relative en eau foliaire et perte en eau foliaire des hybrides sous différents régimes hydriques en serre

Familles	Teneur relative en eau des feuilles (%)			Perte d'eau foliaire (g.10 ⁻³ /cm ² /mn)		
	100%	50%	20%	100%	50%	20%
F1	79,95±1,66 ^{BA}	47,41±2,08 ^{BAC}	44,96±5,43 ^{BAC}	-1,40±0,02 ^A	-1,54±0,01 ^A	-1,66±0,02 ^{BAC}
F2	86,3±5,58 ^{BA}	48,67±7,60 ^{BAC}	42,19±0,23 ^{BAC}	-0,64±0,04 ^A	-2,47±0,02 ^A	-0,54±0,02 ^C
F4	69,97±2,71 ^C	50,36±4,56 ^{BAC}	45,42±7,22 ^{BAC}	-0,93±0,04 ^A	-1,65±0,01 ^A	-1,79±0,04 ^{BAC}
F5	79,87±1,55 ^{BA}	55,24±9,80 ^{BAC}	31±8,82 ^C	-1,06±0,01 ^A	-1,49±0,01 ^A	-1,01±0,05 ^{BC}
F6	84,53±1,36 ^{BAC}	47,71±3,12 ^{BAC}	42,53±3,88 ^{BAC}	-0,78±0,02 ^A	-1,29±0,02 ^A	-1,12±0,03 ^{BAC}
F7	79,92±1,92 ^{BA}	57,55±3,57 ^{BAC}	49,45±10,28 ^{BA}	-0,73±0,03 ^A	-0,91±0,02 ^A	-1,17±0,02 ^{BAC}
F8	76,46±3,29 ^{BA}	54,8±5,77 ^{BAC}	48,67±9,1 ^{BA}	-0,62±0,01 ^A	-1,37±0,01 ^A	-1,99±0,04 ^{BAC}
F9	87,37±1,83^A	61,46±5,09 ^{BA}	46,41±3,71 ^{BAC}	-0,72±0,01 ^A	-1,32±0,01 ^A	-2,94±0,03 ^{BA}
F10	82,9±2,43 ^{BA}	46,03±3,89 ^{BAC}	43,69±6,62 ^{BAC}	-1,60±0,04 ^A	-1,56±0,01 ^A	-1,76±0,02 ^{BAC}
F12	81,34±1,53 ^{BA}	65,92±3,66^A	53,12±3,66^A	-1,34±0,04 ^A	-1,49±0,01 ^A	-0,49±0,01 ^C
F13	74,48±2,31 ^{BAC}	44,48±2,31 ^{BAC}	41,37±5,31 ^{BC}	-1,79±0,01 ^A	-0,79±0,01 ^A	-1,93±0,01 ^{BAC}
F14	73,73±3,53 ^{BC}	59,7±3,53 ^{BA}	40,59±8,25 ^{BC}	-8,15±0,04 ^A	-1,07±0,01 ^A	-0,48±0,01 ^C
F15	86,08±2,5 ^{BA}	56,12±2,75 ^{BAC}	48±4,38 ^{BA}	-9,52±0,05 ^A	-1,00±0,01 ^A	-3,60±0,02 ^{BAC}
F17	83,53±2,00 ^{BA}	46,91±4,73 ^{BAC}	44,96±5,21 ^{BAC}	-0,92±0,03 ^A	-1,02±0,02 ^A	-2,91±0,01 ^{BAC}
F19	83,04±2,08 ^{BA}	48,61±5,74 ^{BAC}	43,58±0,49 ^{BAC}	-0,78±0,01 ^A	-1,51±0,04 ^A	-2,23±0,02 ^{BAC}
F20	83,04±1,43 ^{BAC}	53,98±1,65 ^{BAC}	43,29±9,53 ^{BAC}	-1,75±0,07 ^A	-2,74±0,02 ^A	-2,47±0,02 ^{BAC}
F21	77,20±3,80 ^{BAC}	65,02±5,2^A	42,53±4,78 ^{BAC}	-1,63±0,05 ^A	-3,25±0,02 ^A	-0,43±0,01 ^C
F22	80,24±1,52 ^{BA}	46,58±4,31 ^{BAC}	41,34±7,93 ^{BC}	-1,69±0,03 ^A	-2,22±0,02 ^A	-2,70±0,02 ^{BAC}
F25	87,55±6,36^A	46,26±4,31 ^{BAC}	41,8±2,34 ^{BAC}	-0,44±0,06 ^A	-1,82±0,01 ^A	-2,19±0,01 ^{BAC}
F26	80,82±2,86 ^{BA}	49,82±3,86 ^{BAC}	43,5±6,31 ^{BAC}	-1,56±0,05 ^A	-1,37±0,02 ^A	-1,69±0,01 ^{BAC}
F27	80,45±2,35 ^{BA}	54,62±6,24 ^{BAC}	45,62±6,24 ^{BAC}	-1,07±0,03 ^A	-0,88±0,03 ^A	-0,87±0,01 ^{BC}
F28	77,75±1,33 ^{BA}	42,98±2,93 ^{BC}	39,26±9,27 ^{BC}	-1,20±0,09 ^A	-1,62±0,03 ^A	-1,99±0,01 ^{BAC}
F29	81,82±3,54 ^{BA}	43,51±3,97 ^{BC}	39,2±7,58 ^{BC}	-0,83±0,03 ^A	-1,99±0,03 ^A	-3,64±0,01^A
F30	81,04±2,61 ^{BA}	40,18±1,13 ^C	33,45±3,91 ^{BC}	-0,97±0,01 ^A	-1,82±0,02 ^A	-1,91±0,01 ^{BAC}
F31	80,63±2,4 ^{BA}	58,07±12,17 ^{BA}	46,38±9,37 ^{BAC}	-0,80±0,01 ^A	-1,50±0,02 ^A	-1,84±0,01 ^{BAC}
F32	76,45±1,87 ^{BA}	49,82±1,99 ^{BAC}	42,96±4,94 ^{BAC}	-1,59±0,01 ^A	-1,75±0,01 ^A	-1,54±0,01 ^{BAC}
F33	84,50±3,75 ^{BA}	58,10±6,94 ^{BA}	48,1±6,94 ^{BA}	-1,47±0,01 ^A	-1,45±0,01 ^A	-1,45±0,01 ^{BAC}
F35	76,29±2,32 ^{BA}	53,35±5,19 ^{BAC}	49,17±10,02 ^{BA}	-1,11±0,01 ^A	-2,32±0,01 ^A	-3,13±0,02 ^{BA}
F36	73,02±4,14 ^{BC}	54,75±5,62 ^{BAC}	50,07±0 ^{BA}	-0,57±0,02 ^A	-2,38±0,01 ^A	-2,93±0,02 ^{BC}
F38	72,85±1,81 ^{BC}	49,93±2,36 ^{BAC}	46,93±2,36 ^{BAC}	-0,57±0,03 ^A	-0,92±0,01 ^A	-0,92±0,01 ^{BC}
F39	82,91±1,55 ^{BA}	52,39±2,78 ^{BAC}	32,23±3,29 ^C	-0,99±0,04 ^A	-1,72±0,01 ^A	-2,14±0,08 ^{BAC}
Moyenne	80,2 ^A	51,03 ^B	47,86 ^C	-1,17 ^A	-1,58 ^B	-1,87 ^C
CV (%)	8,24	23,45	33,79	0,06	0,1	0,112
p ≤0,05	0,0389	0,0165	0,033	0,0515	0,4447	0,0233

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

Tableau XVIII : Matrice de corrélation de Pearson entre les variables agro-physiologiques et le taux de mortalité en serre

Variables	Taumort	Daim	Haut	Srft	Msf	Longrac	Dimarac	Rpt	Tepl	Tef	Tre	Ped
Taumort	1											
Daim	-0,23	1										
Haut	-0,14	0,11	1									
Srft	-0,28	0,53	0,14	1								
Msf	0,26	-0,13	-0,26	-0,47	1							
Longrac	-0,30	0,41	0,23	0,73	-0,55	1						
Dimarac	-0,19	0,68	0,04	0,49	-0,13	0,64	1					
Rpt	0,15	-0,37	-0,14	-0,60	0,48	-0,48	-0,31	1				
Tepl	-0,40	0,38	0,31	0,62	-0,56	0,68	0,36	-0,54	1			
Tef	-0,13	-0,08	0,02	0,15	-0,13	0,20	0,03	-0,03	0,21	1		
Tre	-0,31	0,41	0,33	0,73	-0,54	0,71	0,38	-0,56	0,82	0,21	1	
Ped	0,04	0,03	0,04	0,07	0,01	0,04	-0,02	-0,13	0,12	0,00	0,06	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 avec un niveau de signification $p < ,000$. Taumort = taux de mortalité, Diam = diamètre au collet ; Haut = hauteur des plants, Srft = surface foliaire totale, Msf = masse spécifique foliaire, Longrac = longueur des racines, Diamrac = diamètre des racines, Rpt = rapport entre la masse racinaire et la masse de la tige, Tepl = teneur en eau de la plante, Tef = teneur en eau foliaire, Tre = teneur relative en eau, Ped = perte en eau.

3.1.1.1.5. Structuration des performances agro-morphologiques et physiologiques des familles d'hybrides de cacaoyers en serre

L'analyse en composantes principales (ACP) des 31 familles d'hybrides a fait ressortir deux composantes principales qui expriment l'ensemble de la variance totale pour une contribution de 52,73 % (Tableau XIX). La composante F1, contribuant pour 41,05 % de la variabilité totale, avec une valeur propre de 4,93 est liée à la vigueur (surface foliaire totale, longueur racinaire, teneur en eau des plants, teneur relative en eau). Les coefficients de corrélation entre ces variables et la composante 1 ont été respectivement de 0,85 ; 0,86 ; 0,85 et 0,88. La composante F2, contribuant pour 11,68 % de la variabilité totale, avec une valeur propre de 1,40 est expliquée par le rapport entre la masse racinaire et la masse de la tige avec un coefficient de corrélation de -0,78.

Tableau XIX : Valeur propre, variance exprimée et contribution des variables à la formation des composantes de l'analyse en composantes principales des hybrides dans le régime hydrique 20 % CC

	F1	F2
Valeur propre	4,93	1,40
Variabilité (%)	41,05	11,68
% cumulé	41,05	52,73
TAUMORT	-0,61	0,13
DAIM	0,60	0,62
HAUT	0,33	-0,59
SRFT	0,85	0,11
MSF	-0,64	0,43
LONGRAC	0,86	0,04
DIMARAC	0,61	0,63
PED	-0,69	0,00
TEPL	0,85	-0,22
TEF	0,20	-0,64
TRE	0,88	-0,18
RPT	0,09	-0,78

TAUMORT=taux de mortalité, DIAM= Diamètre au collet, HAUT= Hauteur, SRFT=Surface foliaire, MSF= Masse spécifique foliaire, LONGRAC= Longueur racinaire, DIMARAC= Diamètre racinaire, PED= Perte en eau, TEPL= Teneur en eau des plants, TEF= Teneur en eau foliaire, TRE=Teneur relative en eau, RPT= rapport entre la masse racinaire et la masse de la tige.

Dans l'ensemble, les deux premiers axes (F1 et F2) qui ont eu une contribution de 52,73 % sont considérés pour la projection des hybrides dans le plan factoriel (Figure 17). Sur l'ensemble des régimes hydriques (Figure 18 A), les performances des familles d'hybrides ont varié très significativement entre elles. La plupart des familles d'hybrides (F4*, F14*, F36*, F20*, F6*, F31*, F1*, F2*, F25*, F35*, F38*, F5*, F7*, F33*, F39*, F27*, F10*, F9*, F22*, F8*) évaluées dans le régime hydrique 100 % CC (GI) ont présenté les meilleures performances pour les variables surface foliaire totale, longueur des racines, teneur relative en eau, teneur en eau des plants, hauteur, teneur en eau foliaire, diamètre et diamètre des racines. Les familles (F14**, F12**, F21**, F20**, F4**, F15**, F36**, F15***, F21***, F4***, F6**, F1***, F24***, F28**, F9**, F32*, F2**, F7**, F17**, F31**, F10**, F35**, F21**, F25**, F19**, F13*) évaluées dans le régime hydrique déficitaire 50 % CC (GII) ont présenté des performances intermédiaires. Dans le régime hydrique déficitaire 20 % CC, les hybrides (F1***, F10***, F12***, F13***, F14***, F17***, F19***, F2***, F20***, F22**, F22***, F25***, F26**, F26***, F27***, F28***, F29***, F30***, F31***, F32**, F32***, F33***, F35***, F36***, F38***, F39***, F4***, F5***, F6***, F7***, F8***, F9***) évalués, ont été moins performantes avec un taux de mortalité élevé, un potentiel hydrique faible et une masse spécifique élevée.

Cependant, il ressort qu'à l'intérieur de chaque régime hydrique après la projection des familles d'hybrides dans les plans des différents régimes hydriques, les performances des familles ont également varié très significativement entre elles. Toutes les familles n'ont pas affiché les mêmes performances et n'ont pas présenté le même classement selon les régimes. Treize meilleures familles (F8, F35, F1, F31, F21, F12, F20, F28, F38, F4, F15, F36, F14) ont été caractérisées par un grand diamètre au collet, une grande taille, un grand nombre de feuilles fonctionnelles, une grande surface foliaire, une bonne teneur en eau, une masse spécifique foliaire et un taux de mortalité faibles dans le régime hydrique 100 % CC (Figure 18-B). Parmi les six familles d'hybrides performantes (F21, F20, F12, F14, F7 et F9) du régime hydrique déficitaire 50 % CC, quatre familles (F21, F20, F12, F14) ont été retrouvées parmi les meilleures performances dans le régime hydrique 100 % CC (Figure 18-C) et parmi les 13 familles performantes du régime hydrique 20 % CC, 10 familles (F36, F38, F20, F1, F21, F14, F4, F15, F8, F12) ont également été identifiées parmi les meilleures performances dans le régime hydrique 100 % CC (Figure 18 D).

Conclusion partielle

Les forts déficits hydriques (20 et 50 % CC), ont affecté considérablement tous les paramètres évalués. Ils ont augmenté le taux de mortalité et réduit la croissance et le développement des plants. Il en a été de même des paramètres physiologiques avec une forte perte de la teneur en eau et une réduction de la surface foliaire. Malgré ces effets néfastes, quatre familles F21, F20, F12 et F14, se sont révélées performantes à la fois dans les trois régimes hydriques (100, 50 et 20 % CC).

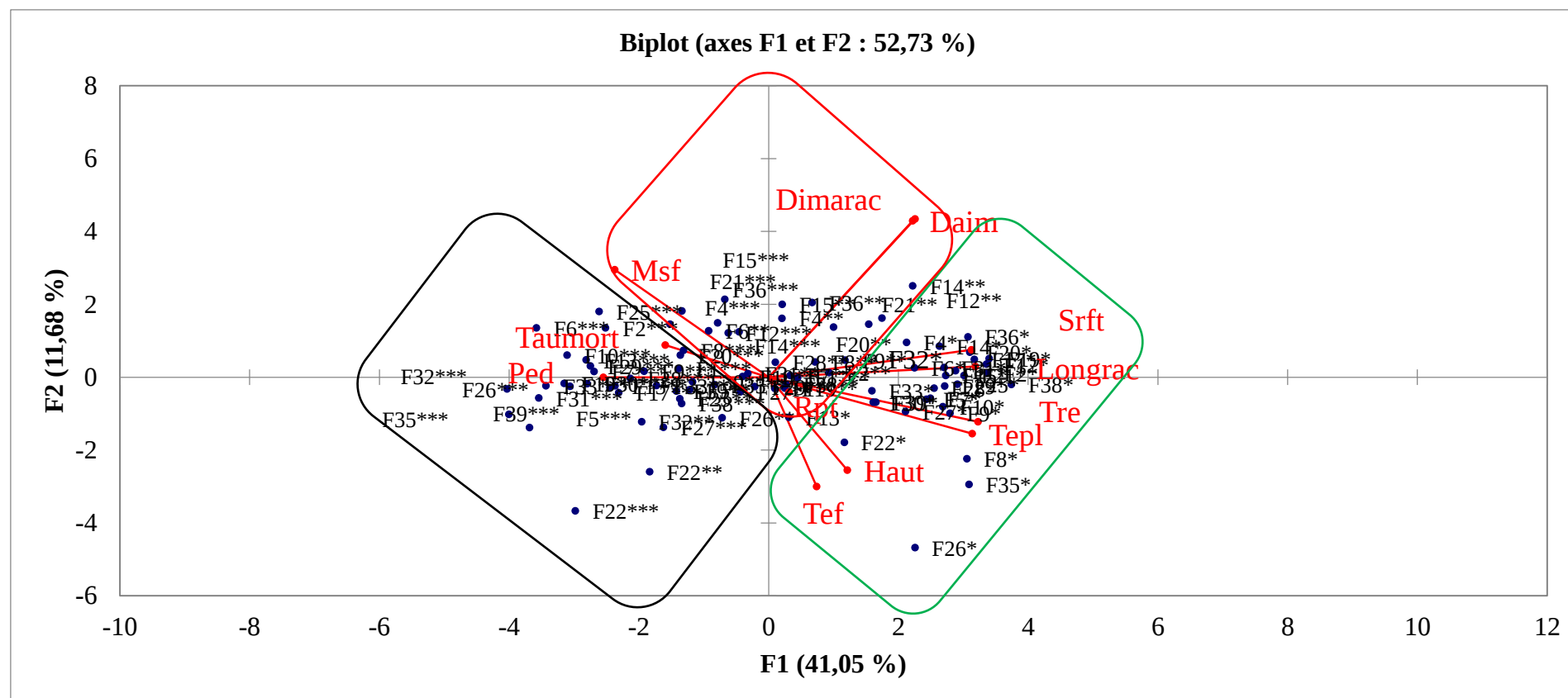


Figure 18 : Biplot de corrélation de l'analyse en composantes principales indiquant la relation entre les variables agro- physiologiques et les familles d'hybrides de cacaoyers évaluées en serre suivant les axes 1 et 2

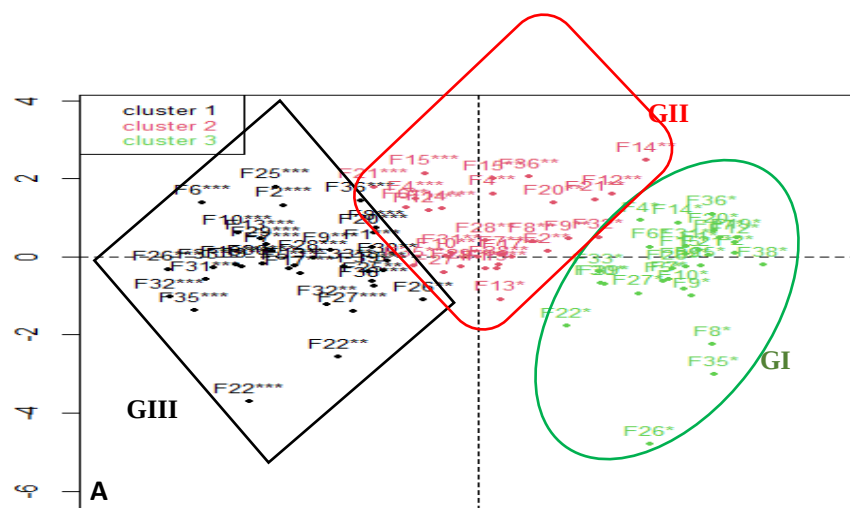
TAUMORT=taux de mortalité, DIAM= Diamètre au collet, HAUT= Hauteur, SRFT=Surface foliaire, MSF= Masse spécifique Foliaire, LONGRAC= Longueur racinaire, DIMARC= Diamètre racinaire, PED= Perte en eau, TEPL= Teneur en eau des plants, TEF= Teneur en eau foliaire, TRE=Teneur relative en eau, RPT= rapport entre la masse racinaire et la masse de la tige. (* hybrides évalués dans le régime 100 % CC, ** hybrides évalués dans le régime 50 % CC, *** hybrides évalués dans le régime 20 % CC)

□ : Régime hydrique 20% CC

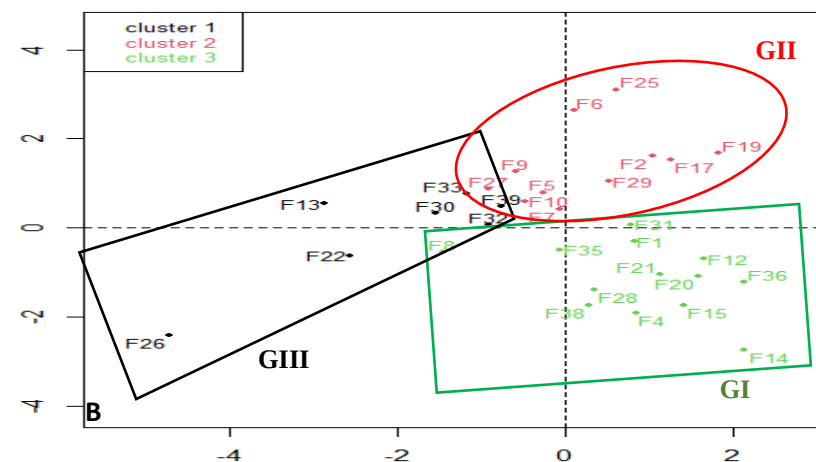
□ : Régime hydrique 50% CC

□ : Régime hydrique 100% CC

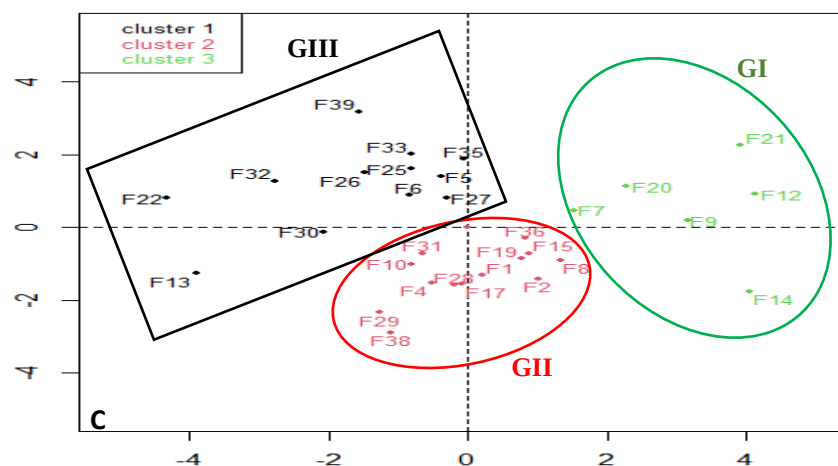
● Point observation, ● Point variable. La distance entre 2 observations est approximation de la distance de Mahalanobis. Les familles sont regroupées suivant le critère d'agrégation de Ward



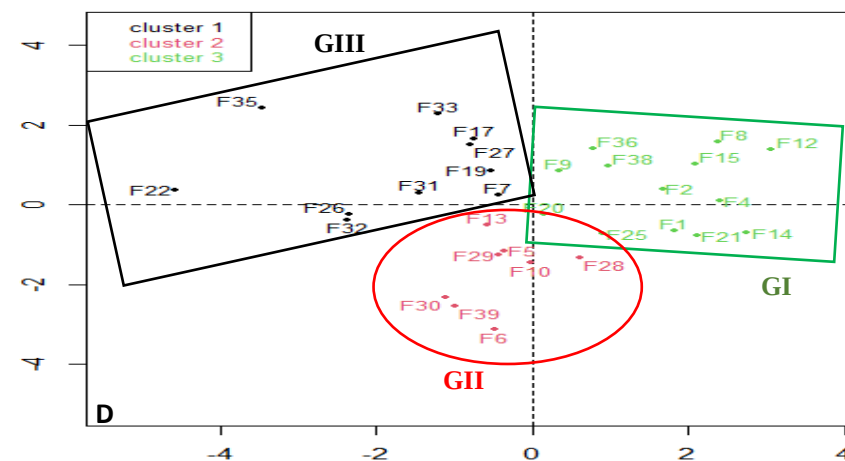
A-Projection des familles d'hybrides des différents régimes hydriques dans le plan1-2



B-Projection des familles d'hybrides du régime hydrique 100 % CC dans le plan 1-2



C-Projection des familles d'hybrides du régime hydrique 50 % CC dans le plan1-2



D-Projection des familles d'hybrides du régime hydrique 20 % CC dans le plan1-2

Figure 19 : Structuration des familles d'hybrides de cacaoyers par groupe homogène selon les variables discriminantes dans les différents régimes hydriques en serre.

3.1.1.2. Comportement des plants des familles d'hybrides au champ

3.1.1.2.1. Effets des zones et de l'âge sur la mortalité des cacaoyers

Les zones agro-écologiques ont montré des différences significatives ($P < ,0001$) entre elles pour la variable taux de mortalité évaluée sur l'ensemble des familles à différents âges avec des interactions zone*famille significatives (Tableau XX). Le taux de mortalité a été plus élevé dans les zones à pluviométrie déficitaire et faibles dans la zone à pluviométrie normale quel que soit l'âge des parcelles. Les valeurs moyennes du taux de mortalité enregistrées dans les parcelles de 3 ans, ont été de 16,25 % dans la zone de Divo contre 28,99 %, 51,32 % et 60,75 % dans les zones de Djékanou, Toumodi et Yamoussoukro. Par contre, les parcelles de 9 ans ont été moins affectées par la mortalité avec une moyenne de 6,02 % dans la zone de Divo contre 43,84 % dans la zone de Toumodi.

Dans les parcelles de 3 ans, les familles d'hybrides F4 (47 %) et F6 (39,67 %) ont obtenu les valeurs moyennes de mortalité les plus élevées et les familles hybrides F22 (5,04 %), F1 (4,05 %), F10 (4,05 %), F5 (4,05 %), F9 (4,05 %) et F21 (2,08 %) ont présenté les plus faibles taux de mortalité dans la zone de Divo. Dans la zone de Djékanou, le taux de mortalité le plus élevé a été obtenu par la famille F4 avec une valeur moyenne 55,33 % contre 9,03 % pour la famille F13. Dans la zone de Toumodi, les arbres de la famille F19 (83 %) ont enregistré le taux de mortalité le plus élevé et ceux de la famille F8 (22,33 %) les plus faibles taux de mortalité. Cependant, aucune différence significative n'a été observée entre les familles d'hybrides dans la zone de Yamoussoukro qui ont eu un taux de mortalité moyen de 60,75 %.

Dans les parcelles de 9 ans, une homogénéité entre les familles d'hybrides a été observée dans la zone de Divo où le taux de mortalité moyen a été de 6,02 %. Par contre, les plus forts taux de mortalité ont été obtenus au niveau des arbres de la famille F6 (81 %) et les plus faibles au niveau de ceux des familles F21 et F24 (16,71 %) dans la zone de Toumodi (Tableau XX).

3.1.1.2.2. Effets des zones sur la vigueur des cacaoyers à différents âges

3.1.1.2.2.1. Diamètres et hauteurs des familles d'hybrides à 3 ans

Les résultats des analyses de variances ont montré que le diamètre et la hauteur ont varié significativement entre les zones et les familles d'hybrides. Il en est de même des interactions zone*famille (Tableau XXI). Sur l'ensemble des 23 familles d'hybrides, le diamètre à 10 cm du sol a été en moyenne de 2,31 cm dans la zone de Divo ; 1,94 cm dans la zone de Djékanou, 1,57 cm dans la zone de Toumodi et 1,20 cm dans la zone de Yamoussoukro.

Tableau XX : Comparaison des familles d'hybrides en fonction du taux de mortalité à différents âges

Familles	Taux de mortalité (%)					
	Parcelles de 3 ans				Parcelles de 9 ans	
	Divo	Djékanou	Toumodi	Yamoussoukro	Divo	Toumodi
F1	4,05±0,01^C	22,33±0,02 ^{BA}	61±0,03 ^{EBDAC}	68±0,18 ^A	6,18±0,03 ^A	66,33±0,04 ^{BDAC}
F2	30,67±0,08 ^{BAC}	41,67±0,08 ^{BA}	80,67±0,05 ^{BA}	60,67±0,18 ^A	5,63±0,02 ^A	47,67±0,04 ^{EBDAGCF}
F3	6,03±0,07 ^{BC}	25,33±0,08 ^{BA}	36±0,03 ^{EDF}	56,67±0,22 ^A	2,89±0,00 ^A	76±0,05 ^{BA}
F4	47±0,04^A	55,33±0,07^A	75±0,04 ^{BAC}	68,67±0,08 ^A	2,89±0,00 ^A	24,86±0,16 ^{EGF}
F5	4,05±0,09 ^C	20,36±0,11 ^{BA}	25,33±0,08 ^{EF}	76,81±0,10 ^A	6,18±0,03 ^A	52,33±0,12 ^{EBDACF}
F6	39,67±0,05^A	47,33±0,02 ^{BA}	66,33±0,08 ^{BDAC}	81,67±0,05 ^A	16,26±0,08 ^A	81±0,05^A
F7	33,33±0,06 ^{BAC}	41,67±0,04 ^{BA}	75±0,08 ^{BAC}	60,25±0,16 ^A	2,89±0,00 ^A	29,86±0,15 ^{EGF}
F8	16,33±0,07 ^{BC}	25±0,09 ^{BA}	22,33±0,02^F	53,37±0,25 ^A	2,89±0,00 ^A	57±0,14 ^{EBDAC}
F9	4,05±0,07 ^C	11±0,03 ^{BA}	47,33±0,02 ^{EBDCF}	48,37±0,22 ^A	15,71±0,06 ^A	71,33±0,08 ^{BAC}
F10	4,05±0,01^C	33,67±0,16 ^{BA}	36±0,03 ^{EDF}	41,67±0,14 ^A	5,63±0,02 ^A	28,33±0,14 ^{EGF}
F11	8,01±0,08 ^{BC}	30,67±0,07 ^{BA}	69,33±0,11 ^{BDAC}	60±0,11 ^A	8,37±0,02 ^A	52,33±0,12 ^{EBDACF}
F12	11,01±0,03 ^{BC}	33,33±0,08 ^{BA}	36±0,11 ^{EDF}	55,67±0,15 ^A	10,18±0,07 ^A	34,52±0,15 ^{EDGF}
F13	7,05±0,10 ^{BC}	9,03±0,04^B	52,67±0,05 ^{EBDACF}	86,67±0,01 ^A	2,89±0,01 ^A	43±0,08 ^{EBDGCf}
F14	11,69±0,06 ^{BC}	25±0,09 ^{BA}	36,33±0,05 ^{EDF}	51,67±0,19 ^A	5,63±0,02 ^A	33,33±0,09 ^{EDGF}
F15	11±0,06 ^{BAC}	24,67±0,03 ^{BA}	44,67±0,02 ^{EDCF}	29,19±0,21 ^A	5,63±0,02 ^A	25,19±0,11 ^{EGF}
F16	33,33±0,06 ^{BAC}	25±0,09 ^{BA}	36±0,11 ^{EDF}	69±0,10 ^A	5,63±0,02 ^A	29,52±0,20 ^{EGF}
F17	11,69±0,07 ^{BC}	36,33±0,09 ^{BA}	36,33±0,05 ^{EDF}	77,33±0,04 ^A	6,18±0,03 ^A	71,67±0,14 ^{BAC}
F19	33±0,08 ^{BA}	37±0,09 ^{BA}	83±0,05^A	72,33±0,14 ^A	2,89±0,0 ^A	38,33±0,09 ^{EDGCF}
F20	11±0,07^{BC}	17,36±0,12 ^{BA}	41,33±0,08 ^{EDCF}	60,67±0,18 ^A	6,18±0,03 ^A	66,67±0,12 ^{BDAC}
F21	2,08±0,07^C	19,33±0,07 ^{BA}	47,33±0,02 ^{EBDCF}	56,67±0,22 ^A	2,89±0,00 ^A	16,71±0,13^G
F22	5,04±0,08 ^C	13,54±0,11 ^{BA}	42±0,02 ^{EDCF}	42±0,29 ^A	2,89±0,00 ^A	25,19±0,11 ^{EGF}
F24	16,67±0,08 ^{BC}	34±0,03 ^{BA}	66,33±0,16 ^{BDAC}	50,67±0,10 ^A	9,3±0,06 ^A	16,71±0,13^G
F25	23±0,07 ^{BAC}	37,67±0,04 ^{BA}	58±0,16 ^{EBDACF}	65,67±0,20 ^A	2,89±0,00 ^A	20,52±0,08 ^{GF}
Moyenne	16,25 ^D	28,99 ^C	51,32 ^B	60,7 ^A	6,02 ^B	43,84 ^A
Cv (%)	11,74	13,72	23,4	21,51	9,96	48,96
p≤0,05	<,0001	0,0065	<,0001	0,8511	0,4214	0,0007
Zone*famille	0,0385	0,0385	0,0385	0,0385	0,0014	0,0014

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Pour les hauteurs des familles d'hybrides, les valeurs moyennes enregistrées ont été de 169,85 cm dans la zone de Divo contre 128,18 cm dans la zone de Djékanou, 96,27 cm dans la zone de Toumodi et 84,43 cm dans la zone de Yamoussoukro.

Au niveau du diamètre des plants, les plants des hybrides F15 ont obtenu les plus gros diamètres avec une valeur moyenne de 2,91 cm dans la zone de Divo. Par contre, les plants des hybrides F1, F10, F11, F14, F17, F20, F21, F22, F25, F3, F5, F7, F8 et F9 ont obtenu les plus faibles diamètres avec une moyenne comprise 2,08 et 2,26 cm. Dans la zone de Djékanou, les meilleures valeurs pour le diamètre ont été obtenues par les plants des hybrides F17 et F3 avec des moyennes respectives de 2,43 cm et 2,4 cm. Les plants de la famille d'hybride F2 ont obtenu les faibles valeurs avec une moyenne de 1,64 cm. Dans la zone de Toumodi, les arbres de la famille d'hybride F25 avec une moyenne de 2,06 cm ont occupé la tête de classement.

Tableau XXI : Comparaison des familles d'hybrides de cacaoyers en fonction du diamètre et de la hauteur à 3 ans dans les différentes zones

Familles	Diamètre à 10 cm du sol				Hauteur (cm) des cacaoyers			
	Divo	Djékanou	Toumodi	Yamoussoukro	Divo	Djékanou	Toumodi	Yamoussoukro
F1	2,21±0,06^C	1,85±0,04 ^{CB}	1,49±0,10 ^{BDAC}	1,49±0,03^A	168,943±4,56 ^{BC}	120,92±4,54 ^B	88,8±8,39 ^{BA}	88,8±2,14 ^{BA}
F2	2,42±0,12 ^{BAC}	1,64±0,12 ^C	1,27±0,11 ^{DC}	1,16±0,03 ^{BDC}	173,47±7,22 ^{BAC}	114,56±8,49 ^B	83,9±5,84 ^{BA}	89,37±1,93 ^{BA}
F3	2,23±0,09^C	2,40±0,13^A	1,55±0,12 ^{BDAC}	1,12±0,03 ^{DC}	176,26±6,96 ^{BAC}	155,89±7,84^A	95,3±7,28 ^{BA}	80,26±2,73 ^{BA}
F4	2,44±0,18 ^{BAC}	1,98±0,06 ^{CB}	1,55±0,11 ^{BDAC}	1,15±0,13 ^{BDC}	161,77±6,57 ^{BC}	132,5±4,10 ^{BA}	104±8,08 ^{BA}	79,7±8,92 ^{BA}
F5	2,22±0,09^C	1,91±0,05 ^{CB}	1,85±0,14 ^{BAC}	1,23±0,03 ^{BDC}	161,34±4,88 ^{BC}	123,04±5,78 ^B	104,8±9,49 ^{BA}	84,5±2,58 ^{BA}
F6	2,69±0,16 ^{BAC}	2,07±0,11 ^B	1,37±0,13 ^{DC}	1,37±0,03 ^{BA}	189,31±6,81 ^{BA}	135,95±8,17 ^{BA}	87,71±8,92 ^{BA}	87,70±3,85 ^{BA}
F7	2,12±0,07^C	1,84±0,07 ^{CB}	1,33±0,11 ^{DC}	1,23±0,03 ^{BDC}	169,39±6,09 ^{BC}	128,87±6,35 ^{BA}	87,75±8,59 ^{BA}	88,48±2,57 ^{BA}
F8	2,08±0,06^C	1,89±0,05 ^{CB}	1,58±0,10 ^{BDAC}	1,2±0,03 ^{BDC}	160,31±3,85 ^{BC}	125,02±5,12 ^{BA}	101,08±6,28 ^{BA}	94,9±3,85^A
F9	2,08±0,08^C	1,83±0,03 ^{CB}	1,43±0,12 ^{BDC}	1,25±0,02 ^{BDC}	152,64±3,48^C	117,24±4,13 ^B	93,58±11,1 ^{BA}	90,4±2,95 ^{BA}
F10	2,08±0,05^C	1,96±0,09 ^{CB}	2,02±0,16 ^{BA}	1,19±0,03 ^{BDC}	162,37±5,15 ^{BC}	121,22±7,13 ^B	118,24±7,76^A	80,97±2,06 ^{BA}
F11	2,19±0,07^C	1,90±0,03 ^{CB}	1,70±0,10 ^{BDAC}	1,14±0,04 ^{BDC}	171,09±3,56 ^{BC}	134,06±5,73 ^{BA}	111,14±6,55 ^{BA}	85,45±7,00 ^{BA}
F12	2,59±0,23 ^{BAC}	2,03±0,10 ^{CB}	1,48±0,13 ^{BDAC}	1,26±0,02 ^{BDC}	176,66±8,33 ^{BAC}	133,57±8,58 ^{BA}	101±8,08 ^{BA}	83,87±2,97 ^{BA}
F13	2,86±0,22 ^{BA}	2,07±0,10 ^B	1,12±0,03 ^D	1,11±0,03 ^{DC}	191,03±8,00 ^{BA}	128,3±6,85 ^{BA}	73,21±5,97^B	72,75±2,13^B
F14	2,18±0,07^C	1,81±0,02 ^{CB}	1,39±0,07 ^{DC}	1,19±0,03 ^{BDC}	169,22±4,01 ^{BC}	118,11±5,27 ^B	84,47±6,23 ^{BA}	82,57±2,71 ^{BA}
F15	2,91±0,20^A	1,79±0,02 ^{CB}	1,71±0,11 ^{BDAC}	1,21±0,02 ^{BDC}	198,77±10,75^A	117,19±5,08 ^B	108,89±7,69 ^{BA}	78,84±2,43 ^{BA}
F16	2,34±0,12 ^{BC}	1,87±0,10 ^{CB}	1,27±0,04 ^{DC}	1,08±0,04^D	165,37±4,52 ^{BC}	124,12±6,19 ^{BA}	82,76±2,71 ^{BA}	81,02±5,85 ^{BA}
F17	2,12±0,10^C	2,43±0,15^A	1,65±0,09 ^{BDAC}	1,03±0,02^D	155,80±4,08^C	156±10,18^A	100,45±5,49 ^{BA}	77,02±1,94 ^{BA}
F19	2,43±0,15 ^{BAC}	1,97±0,06 ^{CB}	1,52±0,14 ^{BDAC}	1,34±0,03 ^{BAC}	178,81±9,38 ^{BAC}	133,08±7,92 ^{BA}	81,64±10,30 ^{BA}	90,3±3,71 ^{BA}
F20	2,10±0,09^C	1,92±0,04 ^{CB}	1,37±0,07 ^{DC}	1,15±0,04 ^{BDC}	153,67±3,85^C	130,95±0,04 ^{BA}	79,18±6,77 ^{BA}	83,42±3,57 ^{BA}
F21	2,22±0,08^C	1,89±0,05 ^{CB}	1,72±0,11 ^{BDAC}	1,16±0,03 ^{BDC}	165,8±4,43 ^{BC}	125,57±0,05 ^{BA}	100,44±5,99 ^{BA}	89,05±3,57 ^{BA}
F22	2,07±0,09^C	1,77±0,03 ^{CB}	1,55±0,13 ^{BDAC}	1,11±0,03 ^{DC}	154,70±5,93^C	119,5±5,31 ^B	93,58±5,48 ^{BA}	85,25±2,26 ^{BA}
F24	2,33±0,17 ^{BC}	2,06±0,06 ^B	1,68±0,12 ^{BDAC}	1,16±0,02 ^{BDC}	169,8±7,57 ^{BC}	140,47±5,44 ^{BA}	99,27±7,82 ^{BA}	79,071±2,45 ^{BA}
F25	2,26±0,07^C	1,96±0,07 ^{CB}	2,06±0,20^A	1,16±0,04 ^{BDC}	174,09±4,85 ^{BAC}	126,19±5,81 ^{BA}	115,86±11,9 ^{BA}	86,28±2,62 ^{BA}
moyenne	2,31 ^A	1,94 ^B	1,57 ^C	1,2 ^D	169,85 ^A	128,18 ^B	96,27 ^C	84,43 ^D
Cv (%)	11,56	19,77	30,98	17,77	20,05	24,19	33,24	19,31
p≤0,05	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0007	0,0168
Zone*famille	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Par contre, ceux de la famille F13 ont occupé le dernier rang du classement avec une moyenne de 1,12 cm. Dans la zone de Yamoussoukro, la famille F1 (1,49 cm) a obtenu les meilleurs diamètres et les familles F16 (1,08 cm) et F17 (1,03 cm) ont obtenu les plus faibles diamètres (Tableau XXI).

Concernant la hauteur des plants dans la zone de Divo, les plus grandes hauteurs des cacaoyers ont été obtenues par la famille d'hybride F15 avec une moyenne de 198,77 cm. Par contre, les plus petites hauteurs des cacaoyers ont été obtenues par les familles d'hybrides F17, F22, F20 et F9 avec des valeurs moyennes comprises entre 152,64 cm et 155,80 cm. Dans la zone de Djékanou, les meilleures hauteurs des cacaoyers ont été obtenues par les familles d'hybrides F17 (156 cm) et F3 (155,89 cm) et les plus petites hauteurs par les familles F22 (119,5 cm), F14 (118,11 cm), F9 (117,24 cm) et F2 (114,56 cm). Dans la zone de Toumodi, la famille d'hybride F10 a obtenu la plus forte moyenne (118,24 cm) et la plus faible par la famille d'hybride F13 (73,21 cm). Dans la zone de Yamoussoukro, les meilleures hauteurs ont été obtenues par les arbres de la famille F8 et les faibles hauteurs par ceux de la famille F13 (Tableau XXI).

3.1.1.2.2.2. Diamètres et section des familles d'hybrides à 9 ans

Le tableau XXII illustre l'influence significative des zones sur la vigueur des familles d'hybrides de 9 ans avec une interaction zone*famille significative. Sur l'ensemble des familles d'hybrides, le diamètre à 30 cm du sol a été en moyenne de 13,88 cm dans la zone de Divo, contre 12,45 cm dans la zone de Toumodi. Quant à la section du tronc à 1,5 m du sol, elle a été en moyenne de 111,55 cm² dans la zone de Divo, contre 86,98 cm² dans la zone de Toumodi.

Dans la zone de Divo, les plus grands diamètres à 30 cm du sol, ont été obtenus par les plants de la famille d'hybride F10 (15,76 cm) et les plus petits diamètres obtenus par la famille F2 (12,54 cm). Par contre, une homogénéité a été observée au niveau des familles d'hybrides pour le diamètre à 30 cm du sol dans la zone de Toumodi. Les plants ont eu une moyenne de 12,45 cm dans cette localité (Tableau XXII).

Les meilleures sections ont été obtenues par la famille F21 (157 cm²) dans la zone de Divo et la famille F14 (128,57 cm²) dans la zone de Toumodi. Par contre, les plus petites sections ont été présentées par les familles F7 (86,21 cm²) et F3 (55,81 cm²) respectivement dans les zones de Divo et Toumodi (Tableau XXII).

Tableau XXII : Comparaison des familles d'hybrides de 9 ans selon le diamètre et la section

Famille	Diamètre à 30 cm du sol (cm)		Section du tronc à 1,5 m du sol (cm ²)	
	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
F1	13,52±0,48 ^{BA}	12,84±2,07 ^A	95,63±10,5 ^{BC}	62,35±13,2 ^{BC}
F2	12,54±0,38^B	11,57±1,05 ^A	94,32±8,88 ^{BC}	68,39±14,1 ^{BC}
F3	13,33±0,36 ^{BA}	9,92±1,76 ^A	100,29±8,75 ^{BC}	55,81±17,1^C
F4	13,99±0,45 ^{BA}	11,93±0,51 ^A	106,12±7,83 ^{BC}	78,6±8,2 ^{BAC}
F5	13,69±0,67 ^{BA}	10,69±0,95 ^A	101,94±10,55 ^{BC}	63,84±13,1 ^{BC}
F6	14,6±0,58 ^{BA}	12,9±1,55 ^A	98,6±9,7 ^{BC}	86,27±17,2 ^{BAC}
F7	13,53±0,51 ^{BA}	12,13±0,77 ^A	86,21±8,05^C	83,63±13,1 ^{BAC}
F8	14,13±0,59 ^{BA}	12,38±0,79 ^A	138,39±11,3 ^{BA}	88,15±20,3 ^{BAC}
F9	14,54±0,71 ^{BA}	11,66±1,16 ^A	103,95±9,21 ^{BC}	68,17±16,2 ^{BC}
F10	15,67±0,31^A	14,56±0,73 ^A	114,88±8,4 ^{BAC}	114,92±13,8 ^{BA}
F11	14,49±0,61 ^{BA}	12,63±0,74 ^A	117,53±11 ^{BAC}	106,81±15,1 ^{BA}
F12	14,63±0,5 ^{BA}	11,58±1,25 ^A	124,81±11,08 ^{BAC}	66,62±10,2 ^{BC}
F13	14,21±0,51 ^{BA}	11,48±0,98 ^A	100,18±10,21 ^{BC}	80,11±11,2 ^{BAC}
F14	13,12±0,58 ^{BA}	14,36±0,71 ^A	110,43±11,6 ^{BC}	128,57±16,8^A
F15	13,45±0,45 ^{BA}	11,9±0,87 ^A	129,73±11,34 ^{BAC}	76,11±9,2 ^{BAC}
F16	13,68±0,47 ^{BA}	11,86±0,88 ^A	107,83±6,82 ^{BC}	81,97±13,2 ^{BAC}
F17	13,33±0,59 ^{BA}	14,32±1,49 ^A	120,19±10,42 ^{BAC}	84,96±34,1 ^{BAC}
F19	13,91±0,62 ^{BA}	12,29±0,98 ^A	104,87±11 ^{BC}	89,46±17,6 ^{BAC}
F20	13,72±0,68 ^{BA}	9,36 ±1,39 ^A	112,3±13,84 ^{BC}	60,73±15,5 ^{BC}
F21	15,17±0,49 ^{BA}	13,33±0,89 ^A	157,53±11,32^A	86,55±9,5 ^{BAC}
F22	13,44±0,59 ^{BA}	12,73±1,05 ^A	125,14±13,46 ^{BAC}	85,76±10,2 ^{BAC}
F24	12,93±0,5 ^{BA}	13,14±0,72 ^A	100,36±9,92 ^{BC}	99,31±10,4 ^{BA}
F25	14,03±0,54 ^{BA}	13,14±1,05 ^A	110,82±7,74 ^{BC}	108,31±15,3 ^{BA}
Moyenne	13,88 ^A	12,45 ^B	111,55 ^A	86,98 ^B
CV (%)	19,27	28,349	46,42	31,15
P < 0,05	0,0029	0,1865	<,0001	0,037
Zone*famille	0,0241	0,0241	0,0017	0,0017

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

3.1.1.2.3. Hauteur des plants et hauteur de couronnes des familles d'hybrides de cacaoyers à 9 ans

Les résultats des analyses de la variance ont montré des différences significatives entre les familles d'hybrides pour les variables hauteur des plants ($p<,0001$) et hauteur de couronne ($p=0,0001$) avec des interactions zone*famille non significatives (Tableau XXIII). Pour ces paramètres, les classements des familles d'hybrides ont été les mêmes d'une zone à l'autre. Pour la hauteur des cacaoyers, les familles F8 et F13 ont eu les grandes valeurs avec des moyennes respectives de 6,07 m et de 5,97 m. Par contre, les plus petites hauteurs ont été obtenues par les plants de la famille d'hybride F20 avec une moyenne de 4,9 m.

Concernant la hauteur des plants, les arbres de la famille F5 (2,12 m) ont eu les plus grandes hauteurs de couronne et ceux de la famille F11 (1,30 m), les plus petites hauteurs de couronne.

Tableau XXIII : Hauteur et hauteur de couronne des familles d'hybrides de 9 ans

Familles	Hauteur des Cacaoyers (m)	Hauteur de Couronne (m)
F1	5,16 ±0,20 ^{GF}	1,97±0,17 ^{BA}
10	5,68±0,13 ^{BDAC}	1,76±0,17 ^{BDAC}
F11	5,18±0,19 ^{EGF}	1,30±0,19^E
F12	5,44±0,16 ^{EBDFC}	1,80±0,23 ^{BDAC}
F13	5,97±0,24^A	1,82±0,23 ^{BDAC}
F14	5,33±0,15 ^{EGDFC}	1,88±0,16 ^{BAC}
F15	5,67±0,15 ^{BDAC}	1,95±0,17 ^{BA}
F16	5,46±0,16 ^{EBDFC}	1,69±0,21 ^{EBDAC}
F17	5,28±0,23 ^{EGDF}	2,00±0,17 ^{BA}
F19	5,63±0,15 ^{EBDAC}	1,69±0,18 ^{EBDAC}
F2	5,25±0,16 ^{EGDF}	1,36±0,20 ^{EDC}
F20	4,9±0,14^G	1,72±0,22 ^{EBDAC}
F21	5,87±0,18 ^{BA}	1,85±0,16 ^{BAC}
F22	5,87±0,29 ^{BA}	1,87±0,18 ^{BAC}
F24	5,12±0,15 ^{GF}	1,86±0,13 ^{BAC}
F25	5,78±0,14 ^{BAC}	1,97±0,23 ^{BA}
F3	5,12±0,15 ^{GF}	1,52±0,24 ^{BDC}
F4	5,68±0,14 ^{BDAC}	1,89±0,2 ^{BAC}
F5	5,31±0,2 ^{EGDFC}	2,12±0,14^A
F6	5,27±0,16 ^{EGDF}	1,84±0,20 ^{BAC}
F7	5,32±0,18 ^{EGDFC}	1,57±0,18 ^{EBDC}
F8	6,07±0,16^A	1,74±0,21 ^{BDAC}
F9	5,07±0,17 ^{GF}	1,63±0,2 ^{EBDAC}
Moyenne	5,47	1,76
CV	19,12	30,716
P < 0,05	<,0001	0,0001
zone*famille	0,1261	0,1217

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

3.1.1.2.4. Nombre de feuilles fonctionnelles des familles d'hybrides de 3 ans

Les résultats des analyses de variances ont montré que le nombre de feuilles fonctionnelles a varié significativement entre les zones et les familles d'hybrides ($p < ,0001$ dans les zones de Divo, Djékanou, Yamoussoukro et $p = 0,0056$ dans la zone de Toumodi). Il en est de même des interactions zone*famille avec une probabilité de $p < ,0001$ (Tableau XXIV). Sur l'ensemble des familles d'hybrides, le nombre de feuilles fonctionnelles évaluées a été de 107, 99 dans la zone de Divo, de 89,69 dans la zone de Djékanou, de 60,32 dans la zone de Toumodi et de 40,19 dans la zone de Yamoussoukro.

Dans la zone de Divo, la famille d'hybride F13 a présenté plus de feuilles fonctionnelles avec une moyenne de 135,63 et la famille d'hybride F8 moins de feuilles fonctionnelles avec une moyenne de 95,59.

Tableau XXIV : Nombre de feuilles fonctionnelles des hybrides de 3 ans selon les zones agro écologiques

Famille	Nombre de feuilles fonctionnelles			
	Divo	Djékanou	Toumodi	Yamoussoukro
F1	109,6±4,56 ^{BDC}	81,81±2,42 ^{DC}	62,7±2,50 ^{BA}	41,7±0,85 ^{CB}
F2	111,20±3,94 ^{BDC}	86,56±7,02 ^{BDC}	57±2,01^B	37,19±1,16 ^{CB}
F3	103,57±3,84 ^{BDC}	112,56±6,28^A	61,5±3,08 ^{BA}	39,3±1,30 ^{CB}
F4	116,64±6,57 ^{BDC}	88,4±3,69 ^{BDC}	55,85±2,39^B	39,1±2,35 ^{CB}
F5	104,25±3,88 ^{BDC}	86,79±3,54 ^{BDC}	66,75±3,24 ^{BA}	41,40±1,63 ^{CB}
F6	121,37±5,65 ^{BAC}	95,62±4,33 ^{BDC}	57,76±2,35^B	36,76±1,26 ^{CB}
F7	98,14±2,58 ^{BDC}	81,45±2,20 ^{DC}	60,91±2,43 ^{BA}	38,68±1,63 ^{CB}
F8	95,59±2,39 ^D	84,91±1,99 ^{BDC}	58,95±1,47 ^{BA}	39,85±1,26 ^{CB}
F9	102±3,16 ^{BDC}	84,64±1,89 ^{BDC}	58,83±2,04 ^{BA}	42,1±1,43 ^{CB}
F10	97,42±1,99 ^{DC}	96,22±5,99 ^{BDC}	65,58±4,6 ^{BA}	39,57±1,6 ^{CB}
F11	103±2,29 ^{BDC}	86,81±3,34 ^{BDC}	64,04±3,28 ^{BA}	37,04±2,01 ^{CB}
F12	104,77±4,99 ^{BDC}	95,18±5,48 ^{BDC}	54,71±1,58^B	44,55±1,48 ^B
F13	135,63±12,39^A	91,00±3,55 ^{BDC}	55,92±1,84^B	35,91±1,05^C
F14	106,80±3,05 ^{BDC}	81,83±1,58 ^{DC}	59,76±2,03 ^{BA}	40,75±1,49 ^{CB}
F15	123,27±6,86 ^{BA}	86,29±1,75 ^{BDC}	60,52±3,02 ^{BA}	42±1,09 ^{CB}
F16	109,82±5,68 ^{BDC}	88,3±3,62 ^{BDC}	54,52±1,38^B	39,28±3,56 ^{CB}
F17	101,32±3,84 ^{BDC}	104,81±7,67 ^{BA}	63,75±2,20 ^{BA}	37,22±0,88 ^{CB}
F19	109,81±6,21 ^{BDC}	91,5±3,94 ^{BDC}	63,14±5,33 ^{BA}	50,4±1,57^A
F20	100,52±2,81 ^{BDC}	89,08±6,14 ^{BDC}	56,45±1,67^B	40,8±2,93 ^{CB}
F21	104,7±2,95 ^{BDC}	87,23±5,90 ^{BDC}	62±2,29 ^{BA}	41,09±0,95 ^{CB}
F22	102,23±4,16 ^{BDC}	79,00±2,24^D	72,66±6,29^A	42,17±1,36 ^{CB}
F24	110,47±5,23 ^{BDC}	100,05±5,02 ^{BAC}	60,45±2,28 ^{BA}	42,47±1,31 ^{CB}
F25	108,36±2,51 ^{BDC}	86,76±2,88 ^{BDC}	54,92±2,11^B	38,61±1,21 ^{CB}
Moyenne	107,99 ^A	89,69 ^B	60,32 ^C	40,19 ^D
Cv (%)	25,27	20,93	18,65	16,58
p≤0,05	<,0001	<,0001	0,0056	<,0001
Zone*famille	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Dans la zone de Djékanou, la famille d'hybride F3 (112,56) a obtenu le plus grand nombre de feuilles fonctionnelles et la famille d'hybride F22, le plus petit nombres de feuilles fonctionnelles avec une moyenne de 79 feuilles.

Dans la zone de Toumodi, la famille d'hybride F22 a enregistré le plus grand nombre de feuilles (72, 66 feuilles). Les familles F12 (51,71), F13 (55,92), F16 (54,52), F2 (57), F20 (56,45), F25 (54,92) F4 (55,85) et F6 (57,76) ont obtenu les plus petits nombres de feuilles fonctionnelles.

Dans la zone de Yamoussoukro, les meilleures performances ont été enregistrées au sein des plants de la famille F19 avec une moyenne de 50,4 feuilles fonctionnelles. Par contre, les faibles performances ont été enregistrées chez les plants de la famille F13 avec une moyenne de 35,95 feuilles (Tableau XXIV).

3.1.1.2.5. Surface foliaire et masse spécifique foliaire des hybrides à 3 ans et à 9 ans

3.1.1.2.5.1. Surface foliaire et masse spécifique foliaire des hybrides à 3 ans

Les différentes zones agro écologiques ont influencé significativement les dimensions foliaires et la masse spécifique foliaire évaluées avec des interactions zone*famille significatives (Tableau XXV). Les valeurs moyennes enregistrées sur l'ensemble des hybrides dans les parcelles de 3 ans pour la surface foliaire ont été de 260,67 cm² dans la zone de Divo, de 185,32 cm² dans la zone de Djékanou, de 19,34 cm² dans la zone de Toumodi et de 143,12 cm² dans la zone de Yamoussoukro. Quant à la masse spécifique foliaire, les valeurs moyennes enregistrées ont été de 168,27mg/cm² dans la zone de Divo, de 177,74 mg/cm² dans la zone de Djékanou, de 204,16 mg/cm² dans la zone de Toumodi et de 248,36 mg/cm² dans la zone de Yamoussoukro.

Dans la zone de Divo, les meilleures surfaces foliaires ont été obtenues par les plants de la famille F25 (347,61 cm²) et ceux de la famille F11 (201,5 cm²), les plus faibles surfaces foliaires. Dans la zone de Djékanou, la famille d'hybride F4 a enregistré les plus grandes surfaces foliaires avec une valeur moyenne de 280,07 cm² et les familles d'hybrides F10 et F2, les plus faibles surfaces avec des moyennes respectives de 134,5 cm² et 138,74 cm². Dans la zone de Toumodi, les plants de la famille F4 (238,07 cm²) ont obtenu les plus grandes surfaces et ceux de famille F19 (127,74 cm²), ont obtenu les plus faibles surfaces. Dans la zone de Yamoussoukro, les meilleures moyennes des surfaces foliaires ont été enregistrées chez les plants de la famille F12, avec valeur de 216,54 cm². Par contre, les plus faibles surfaces ont été obtenues par les familles d'hybrides F22 (89,09 cm²) et F11 (89,89 cm²).

Pour la masse spécifique foliaire, les plants de la famille F20 (181,08 mg/cm²), ont enregistré les meilleures moyennes dans la zone de Divo et ceux de la famille F25 les plus faibles moyennes (148,88 mg/cm²). Dans la zone de Djékanou, la famille d'hybride F7 a obtenu les grandes valeurs de la masse spécifique (208,18 mg/cm²) et les faibles moyennes (150,04 mg/cm²) par la famille F22. Dans la zone de Toumodi, les meilleures masses spécifiques foliaires ont été obtenues par la famille d'hybride F4 (253,05 mg/cm²) ; les familles F19 et F6 ont enregistré les faibles masses spécifiques foliaires avec des valeurs respectives de 181,03 mg/cm² et 170,87 mg/cm². Dans la zone de Yamoussoukro, les plus grandes masses spécifiques foliaires (297,8 mg/cm) ont été observées chez les plants de la famille F12 et les plus petites chez les plants de la famille F20 (194,22 mg/cm²).

Tableau XXV : Surface foliaire totale et Masse spécifique foliaire des hybrides de 3 ans selon les différentes zones agro écologiques

Familles	Surface foliaires totale (cm ²)				Masse spécifique foliaire (mg/cm ²)			
	Divo	Djékanou	Toumodi	Yamoussoukro	Divo	Djékanou	Toumodi	Yamoussoukro
F1	258,41±19,57 ^{BAC}	137,05±24,54 ^B	191,45±20,23 ^{BA}	122,72±13,52 ^{BA}	170,05±6,74 ^{BA}	171,97±4,04 ^{BAC}	221,61±4,26 ^{BA}	214,42±7,32 ^{BA}
F10	257,48±30,85 ^{BAC}	134,5±19,15^B	128,36±3,37 ^{BC}	128,02±14,86 ^{BA}	155,44±7,38 ^{BC}	168,49±11,48 ^{BAC}	214,81±6,68 ^{BA}	247,51±6,49 ^{BA}
F11	201,5±18,34^C	157,69±24,05 ^{BA}	173,87±23,35 ^{BA}	89,89±13,17^C	160,96±4,43 ^{BAC}	161,9±7,85 ^{BC}	209,36±7,43 ^{BA}	228,62±14,82 ^{BA}
F12	271,71±21,91 ^{BAC}	166,23±18,97 ^{BA}	140,39±13,53 ^{BAC}	216,54±15,36^A	156,96±9,47 ^{BC}	173,81±7,72 ^{BAC}	207,98±9,44 ^{BA}	297,8±13,14^A
F13	257,06±15,38 ^{BAC}	170,69±11,77 ^{BA}	168,35±11,80 ^{BA}	170,69±11,77 ^{BA}	165,82±5,93 ^{BAC}	159,58±8,56 ^{BC}	216,43±9,30 ^{BA}	258,58±8,56 ^{BA}
F14	279,73±6,69 ^{BAC}	181,19±19,67 ^{BA}	178,72±15,88 ^{BA}	178,7±23,79 ^{BA}	179,33±6,69 ^{BA}	183,58±7,56 ^{BAC}	219,67±10,11 ^{BA}	246,43±12,85 ^{BA}
F15	238,16±23,70 ^{BAC}	203,11±19,86 ^{BA}	209,54±11,18 ^{BA}	151,12±11,57 ^{BA}	163,75±4,76 ^{BAC}	189,84±12,17 ^{BAC}	208,52±6,13 ^{BA}	261,88±13,35 ^{BA}
F16	266,91±18,05 ^{BAC}	228,87±15,43 ^{BA}	166,81±12,98 ^{BA}	186,6±58,45 ^{BA}	174,33±3,87 ^{BA}	189,55±8,45 ^{BAC}	203,56±9,38 ^{BA}	222,96±10,25 ^{BA}
F17	233,88±15,86 ^{BAC}	160,85±22,66 ^{BA}	177,76±27,89 ^{BA}	97,11±15,98 ^{BAC}	164,51±7,30 ^{BAC}	191,82±7,68 ^{BAC}	201,57±3,64 ^{BA}	230,42±10,52 ^{BA}
F19	315,16±17,63 ^{BA}	235,3±14,20 ^{BA}	127,74±13,23^C	98,05±23,94 ^{BAC}	169,96±9,53 ^{BAC}	157,72±4,70 ^{BC}	181,03±4,46 ^B	228,83±10,36 ^{BA}
F2	232,88±18,77 ^{BAC}	138,74±14,9^B	159,14±0,50 ^{BA}	122,89±13,24 ^{BA}	168,66±6,85 ^{BAC}	157,75±8,43 ^{BC}	234,45±3,0 ^{BA}	229,84±12,36 ^{BA}
F20	272,27±20,27 ^{BAC}	189,54±17,20 ^{BA}	157,99±17,47 ^{BA}	93,27±55,02 ^{BAC}	181,08±3,92^A	182,35±7,02 ^{BAC}	191,28±10,55 ^{BA}	194,22±11,42 ^B
F21	278,34±26,05 ^{BAC}	229,35±21,93 ^{BA}	175,14±8,28 ^{BA}	179,71±18,37 ^{BA}	161,82±5,53 ^{BAC}	187,71±10,45 ^{BAC}	169,32±16,43 ^B	245,34±19,63 ^{BA}
F22	209,71±11,04 ^{BC}	200,51±16,77 ^{BA}	215,35±13,11 ^{BA}	89,09±18,37^C	164,73±5,11 ^{BAC}	150,04±8,50 ^C	203,34±6,64 ^{BA}	256,79±31,06 ^{BA}
F24	309,26±53,44 ^{BA}	213,09±40,80 ^{BA}	165,04±7,27 ^{BA}	140,64±12,74 ^{BA}	170,21±5,52 ^{BA}	170,27±9,30 ^{BAC}	199,52±9,99 ^{BA}	259,73±7,96 ^{BA}
F25	347,61±32,26^A	220,33±20,07 ^{BA}	157,28±6,7 ^{BA}	102,75±9,00 ^{BAC}	148,88±7,34^C	175,54±6,10 ^{BAC}	201,33±8,32 ^{BA}	228,55±0,89 ^{BA}
F3	331,65±29,98 ^{BA}	198,27±26,25 ^{BA}	185,2±30,69 ^{BA}	136,33±39,91 ^{7BA}	166,07±3,85 ^{BAC}	186,93±5,94 ^{BAC}	198,13±9,05 ^{BA}	238,08±20,47 ^{BA}
F4	270,66±19,91 ^{BAC}	238,07±3,31^A	244,07±1,91^A	172,3±8,66 ^{BA}	177,07±4,85 ^{BA}	203,05±14,91 ^{BA}	253,05±8,61^A	258,9±18,75 ^{BA}
F5	245,2±20,35 ^{BAC}	175,24±25,63 ^{BA}	129,59±7,72 ^{BC}	113,14±13,96 ^{BAC}	174,63±5,99 ^{BA}	177,46±8,54 ^{BAC}	194,71±13,00 ^{BA}	242,04±16,89 ^{BA}
F6	259,29±24,63 ^{BAC}	176,2±6,53 ^{BA}	147,89±0,57 ^{BAC}	176,2±6,53 ^{BA}	174,41±6,75 ^{BA}	177,22±13,14 ^{BAC}	170,87±2,88 ^B	276,22±13,14 ^{BA}
F7	205,27±4,42 ^{BC}	162,38±11,38 ^{BA}	130,99±1,23 ^{BAC}	123,9±17,45 ^{BA}	180,44±19,11 ^{BA}	208,18±7,46^A	200,62±3,45 ^{BA}	238,67±7,26 ^{BA}
F8	259,81±24,43 ^{BAC}	170,27±9,99 ^{BA}	155,7±15,93 ^{BA}	157,26±42,37 ^{BA}	174,83±5,47 ^{BA}	188,77±6,55 ^{BAC}	193,85±7,18 ^{BA}	232,19±13,42 ^{BA}
F9	214,26±17,2 ^{6BC}	190,14±14,49 ^{BA}	143,49±20,91 ^{BAC}	114,93±45,37 ^{BAC}	165,19±4,94 ^{BAC}	183,79±8,71 ^{BAC}	198,8±7,54 ^{BA}	243,38±23,90 ^{BA}
moyenne	260,67 ^A	185,32 ^B	169,34 ^C	143,12 ^D	168,27 ^D	177,74 ^C	204,16 ^B	248,36 ^A
Cv (%)	26,97	31,22	29,61	36,08	11,33	13,42	12,28	13,70
p≤0,05	0,0020	0,0013	0,0353	0,0311	0,01837	<,0001	0,0012	0,04349
Zone*famille	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

3.1.1.2.5.2. Surface foliaire et masse spécifique foliaire des hybrides à 9 ans

Les résultats des analyses de variances ont montré des effets significatifs de la surface foliaire et de la masse spécifique entre les zones d'étude et les familles d'hybrides (Tableau XXVI). Au niveau de la surface foliaire, les différences significatives ont été de $p < 0,0001$ dans la zone de Divo, de $p = 0,0003$ dans la zone de Toumodi et une interaction zone*famille significative ($p = 0,01876$). Pour la masse spécifique foliaire, les différences significatives ont été de $p < 0,0001$ pour les deux zones avec une interaction zone*famille non significative ($p = 0,051$). Les valeurs moyennes enregistrées pour la surface foliaire, ont été de $201,02 \text{ cm}^2$ dans la zone de Divo et de $180,39 \text{ cm}^2$ dans la zone de Toumodi. Concernant, la masse spécifique foliaire, les moyennes enregistrées ont été $174,45 \text{ mg/cm}^2$ dans les deux zones, compte tenue de interaction zone*famille non significative.

Dans la zone de Divo, les plus grandes moyennes de la surface foliaire ($245,4 \text{ cm}^2$), ont été obtenues par la famille d'hybride F13 et les plus petites moyennes par la famille F3 ($155,39 \text{ cm}^2$). Dans la zone de Toumodi, les familles d'hybrides F1 et F22, ont obtenu les plus grandes surfaces foliaires avec des valeurs respectives de $218,74 \text{ cm}^2$ et de $215,02 \text{ cm}^2$. La famille F2 a obtenu les plus petites surfaces avec une moyenne de $134,35 \text{ cm}^2$.

Pour la masse spécifique foliaire, les arbres de la famille F8 ont obtenu les plus grandes masses spécifiques foliaires avec une moyenne de $208,29 \text{ mg/cm}^2$ dans les deux zones. Les arbres des familles F10, F12, F14, F2, F22, F25, F6 et F7, ont obtenu les plus petites masses spécifiques avec des moyennes variant de $174,51 \text{ mg/cm}^2$ à $181,15 \text{ mg/cm}^2$ (Tableau XXVI).

3.1.1.3. Effets des zones sur la physiologie des familles d'hybrides à différents âges

3.1.1.3.1. Etats des feuilles des jeunes hybrides (3 ans)

Les paramètres physiologiques (couleur, aspect, indice de nécrose) évalués ont présenté des effets significatifs ($P < 0,0001$) (Figure 20).

Dans la zone de Divo, tous les plants des familles d'hybrides ont présenté des feuilles de couleur vert-foncé avec une note moyenne de codification de 3,83. En revanche, dans les zones de Djékanou et de Toumodi, les hybrides ont présenté des feuilles de couleur verte avec des notes de codification respectives de 2,34 et 2,32. Cependant, les hybrides évalués dans la zone de Yamoussoukro ont présenté des feuilles de couleurs vert-clair avec une note de codification de 2.

Tableau XXVI : Surface foliaire totale et Masse spécifique foliaire des hybrides de 9 ans selon les différentes zones agro écologiques

Famille	Surface foliaire totale (cm ²)		Masse spécifique foliaire (mg/cm ²)	
	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
F1	215,74±9,34 ^{BDAC}	218,74±18,3^A	187,08±5,56 ^{BA}	187,08±5,56 ^{BA}
F2	168,73±11,2 ^{FHG}	134,35±17,2^B	174,60±6,65^B	174,60±6,65^B
F3	155,39±9,09^H	166,91±20,4 ^{BA}	185,06±4,36 ^{BA}	185,06±4,36 ^{BA}
F4	174,59±9,49 ^{FEHG}	188,14±9,6 ^{BA}	190,73±5,4 ^{BA}	190,73±5,4 ^{BA}
F5	193,81±9,06 ^{FBDECG}	177,51±7,9 ^{BA}	196,15±5,17 ^{BA}	196,15±5,17 ^{BA}
F6	187,98±12,9 ^{FBDEHCG}	159,85±14,3 ^{BA}	174,51±6,14^B	174,51±6,14^B
F7	198,23±13,3 ^{FBDECG}	165,84±12,2 ^{BA}	177,47±4,67^B	177,47±4,67^B
F8	154,95±8,1 ^H	162,59±12,2 ^{BA}	208,29±19,3^A	208,29±19,3^A
F9	218,34±12,7 ^{BDAC}	182,15±13,1 ^{BA}	188,48±5,69 ^{BA}	188,48±5,69 ^{BA}
F10	187,65±9,4 ^{FDEHCG}	166,39±8,6 ^{BA}	180,79±5,39^B	180,79±5,39^B
F11	224,22±11,38 ^{BA}	151,94±16,4 ^{BA}	183,39±4,51 ^{BA}	183,39±4,51 ^{BA}
F12	193,67±8,85 ^{FBDECG}	173,55±10,7 ^{BA}	170,23±4,16^B	170,23±4,16^B
F13	245,4±12,17^A	195,98±18,5 ^{BA}	187,98±5,64 ^{BA}	187,98±5,64 ^{BA}
F14	182,57±10,08 ^{FDEHG}	176,44±9,6 ^{BA}	181,15±5,39^B	181,15±5,39^B
F15	221,11± 12,22 ^{BAC}	193,75±10,3 ^{BA}	178,10±4,49^B	178,10±4,49 ^B
F16	217,76±25,62 ^{BDAC}	164,61±8,3 ^{BA}	186,41±5,03 ^{BA}	186,41±5,03 ^{BA}
F17	165,24±8,53 ^{HG}	158,46±13,3 ^{BA}	193,39±4,74 ^{BA}	193,39±4,74 ^{BA}
F19	202,53±10,15 ^{FBDEC}	204,96±11,4 ^{BA}	183,97±4,3 ^{BA}	183,97±4,3 ^{BA}
F20	186,44±11,2 ^{FDEHCG}	186,86±11,1 ^{BA}	186,81±4,46 ^{BA}	186,81±4,46 ^{BA}
F21	207,32±11,68 ^{BDEC}	200,83±12,2 ^{BA}	187,06±4,91 ^{BA}	187,06±4,91 ^{BA}
F22	203,36±14,48 ^{FBDEC}	215,02±9,5^A	180,1±2,76^B	180,1±2,76^B
F24	216,05±12,36 ^{BDAC}	186,9±9,2 ^{BA}	182,69±4,42 ^{BA}	182,69±4,42 ^{BA}
F25	219,07±13,13 ^{BAC}	166± 8,4 ^{BA}	180,23±4,38 ^B	180,23±4,38^B
Moyenne	201,02 ^A	180,39 ^B	174,45 ^A	174,45 ^A
CV (%)	29,557	24,24	29,264	29,264
P < 0,05	<,0001	0,0003	<,0001	<,0001
Zone*famille	0,01876	0,01876	0,051	0,051

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

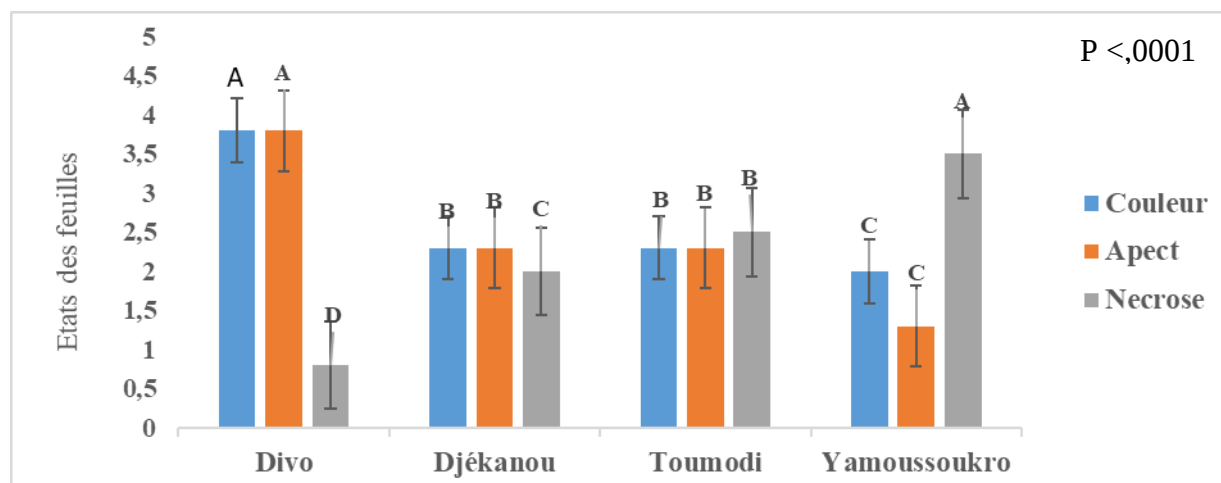


Figure 20 : Couleur, aspect et nécrose des feuilles des jeunes hybrides selon les zones

Relativement à l'aspect des feuilles, les plantes ont toutes présenté des feuilles très turgescentes dans la zone de Divo avec une moyenne de codification de 3,83. Par contre, dans les zones de Djékanou (2,34) et de Toumodi (2,33) les feuilles des hybrides ont été turgescentes et moyennement turgescentes dans la zone de Yamoussoukro (1,28).

Concernant la nécrose, elle a été plus accentuée dans la zone de Yamoussoukro avec une moyenne de 3,47, moyennement accentuée dans les zones de Toumodi et de Djékanou avec des notes moyennes respectives de 2,45 et 2,03. Cependant, les hybrides dans la zone de Divo ont montré des feuilles faiblement nécrosées avec une note moyenne de 0,78.

3.1.1.3.2. Teneurs en eau des feuilles des jeunes hybrides (3 ans) et des hybrides âgés (9 ans)

3.1.1.3.2.1. Teneurs en eau des feuilles des jeunes hybrides de 3 ans

La Teneur en eau foliaire (Tableau XXVII), a varié significativement entre les familles d'hybrides dans la zone de Djékanou ($p=0,0117$), dans la zone de Toumodi ($p<,0001$) et dans la zone de Yamoussoukro ($p=0,0137$). Quant à la zone de Divo, aucune différence significative n'a été observée entre les familles d'hybrides ($p=0,1509$). Cependant, l'interaction zone*famille a été significative ($p<,0001$). Les valeurs moyennes enregistrées dans les jeunes parcelles (3 ans) ont été de 5480,54 mg/g MF dans la zone de Divo, contre 4649,51 mg/g MF dans la zone de Djékanou, 3325,82 mg/g MF dans la zone de Toumodi et 3252,64 mg/g de MF dans la zone de Yamoussoukro.

Dans la zone de Djékanou, les meilleures teneurs en eau foliaires, ont été enregistré au niveau des plants de la famille F17 (5591,9 mg/g MF) et les faibles teneurs au niveau des plants de famille F11 (3673,6 mg/g MF). Dans la zone de Toumodi, les plus grandes teneurs en eau ont été obtenues par la famille F13 (5036,9 mg/g MF) et les plus faibles par les familles F15, F5 et F25 avec des moyennes respectives de 1736 mg/g MF, de 1862,1 mg/g MF et de 1989,3 Mg/g MF.

Dans la zone de Yamoussoukro, les plants de la famille F22 ont obtenu les plus grandes teneurs en eau des feuilles avec une moyenne de 3695 mg/g MF. Les plus faibles teneurs ont été obtenues par les plants de la famille F25 avec une moyenne de 1627 mg/g MF. Quant à la zone de Divo, aucune différence n'a été observée entre les familles d'hybrides qui ont obtenu une moyenne de 5480,54 mg/g MF (Tableau XXVII).

Tableau XXVII : Comparaison des jeunes familles d'hybrides de 3 ans en fonction de la teneur en eau des feuilles dans les différentes zones

Familles	Teneur en eau des feuilles (mg/g MF)			
	Divo	Djékanou	Toumodi	Yamoussoukro
F1	5253,7±424,43 ^A	5210±606,23 ^{BA}	4683,8±750,01 ^{BA}	3216±126,32 ^{BA}
F2	5893±368,47 ^A	4364,9±318,71 ^{BA}	2852,2±6,0 ^{BC}	2954±434,13 ^{BAC}
F3	6038,4±361,27 ^A	4291,2±315,73 ^{BA}	2927,2±147,79 ^{BC}	2958±888,38 ^{BAC}
F4	5712,6±311,2 ^A	4406±716,93 ^{BA}	4406±413,92 ^{BA}	3344±917,54 ^{BA}
F5	4848±394,30 ^A	4615±438,40 ^{BA}	1862,1±243,79^C	2821±123,67 ^{BAC}
F6	6234±256,14 ^A	5271,8±222,28 ^{BA}	2873,8±5,77 ^{BC}	2438±115,29 ^{BAC}
F7	5897,1±346,39 ^A	4591,9±443,75 ^{BA}	3454,6±3,37 ^{BC}	3586±851,1 ^{BA}
F8	4958,5±344,12 ^A	5174,5±587,20 ^{BA}	3119,5±193,37 ^{BC}	2133±22,97 ^{BC}
F9	6277,4±246,97 ^A	4983,6±409,59 ^{BA}	2545,2±165,40 ^{BC}	2347±32,97 ^{BAC}
F10	5602,6±336,96 ^A	4527,7±202,58 ^{BA}	2843,9±74,02 ^{BC}	2941±446,46 ^{BAC}
F11	5714,7±471,78 ^A	3673,6±230,30^B	4310,5±140,90 ^{BA}	3648±912,68 ^{BA}
F12	4860,4±336,62 ^A	4226,9±345,43 ^{BA}	2805,6±961,93 ^{BC}	1981±842,12 ^{BC}
F13	5370,5±387,70 ^A	4657±280,92 ^{BA}	5036,9±139,34^A	3157±280,92 ^{BA}
F14	5678,1±225,67 ^A	5241,5±541,18 ^{BA}	2842,3±255,98 ^{BC}	2644±213,72 ^{BAC}
F15	5234,5±427,68 ^A	3990,9±214,25 ^{BA}	1736±125,23^C	4417±458,62 ^{BA}
F16	4969±313,33 ^A	4356,1±293,46 ^{BA}	2979±154,31 ^{BC}	2579±324,09 ^{BAC}
F17	6179±699,82 ^A	5591,9±203,45^A	2937,2±96,32 ^{BC}	2647±724,34 ^{BAC}
F19	5456,7±297,16 ^A	4896,7±359,83 ^{BA}	2814,6±87,2 ^{BC}	2356±414,12 ^{BAC}
F20	5715,6±238,27 ^A	4499±191,74 ^{BA}	2544,3±323,83 ^{BC}	3024±999,52 ^{BA}
F21	4876,4±269,58 ^A	4942,5±537,07 ^{BA}	2332,4±463,60 ^{BC}	3134±142,44 ^{BA}
F22	4624,3±764,93 ^A	4216,9±320,26 ^{BA}	4843,9±234,77 ^{BA}	3695±482,44^A
F24	5663±278,30 ^A	5073,4±561,46 ^{BA}	2490,1±110,66 ^{BC}	3099±830,92 ^{BA}
F25	5103,9±300,90 ^A	4690,7±227,64 ^{BA}	1989,3±111,16^C	1627±194,82^C
Moyenne	5480,54 ^A	4649,51 ^B	3325,82 ^C	3252,64 ^D
Cv (%)	22,47	29,41	24,60	24,93
p≤0,05	0,1509	0,0117	<,0001	0,0137
Zone*famille	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

3.1.1.3.2.2. Teneurs en eau des feuilles des jeunes hybrides de 9 ans

Les résultats des analyses de variances ont montré des effets significatifs de la teneur en eau foliaire, la teneur relative en eau et perte d'eau foliaire entre les zones d'étude et les familles d'hybrides avec des interactions zone*famille significatives (Tableau XXVIII).

Les valeurs moyennes de la teneur en eau foliaire enregistrées sur l'ensemble des familles d'hybrides, ont été de 4699,79 mg/g MF dans la zone de Divo et de 3614,80 mg/g MF dans la zone de Toumodi. Pour la teneur relative en eau, les moyennes ont été de 78,83 % dans la zone de Divo et de 76,17 % dans la zone de Toumodi. Quant à la perte en eau, les moyennes sur l'ensemble des familles d'hybrides ont été de (-0,149350 g.10⁻³ /cm²/mn) dans la zone de Divo, contre (-0,231868 g.10⁻³ /cm²/mn) dans la zone de Toumodi.

Tableau XXVIII: Teneur en eau des feuilles, teneur relative en eau et perte d'eau des feuilles des familles d'hybrides de 9 ans dans différentes zones

Familles	Teneur en eau des feuilles (mg/g MF)		Teneur relative en eau (%)		Perte d'eau des feuilles (g.10 ⁻³ /cm ² /mn)	
	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
F1	5301,2±148,04^A	3627,5±550,10 ^A	81,24±0,01 ^{BAC}	75±0,06 ^{BA}	-0,1344±0,02 ^B	-0,19689±0,03 ^B
F2	4420,6±186,08 ^{BA}	3226,2±146,67 ^A	80,6±0,02 ^{BAC}	73,364±0,02 ^{BA}	-0,11125±0,02 ^B	-0,28599±0,03 ^{BA}
F3	4398,9±193,59 ^{BA}	2486,1±570,43 ^A	79,27±0,02 ^{BAC}	60,8±0,04^B	-0,13297±0,02 ^B	-0,33582±0,01 ^{BA}
F4	4533,5±285,86 ^{BA}	3742,4±353,72 ^A	81,12±0,02 ^{BAC}	80,938±0,02 ^{BA}	-0,10321±0,01 ^B	-0,17835±0,01 ^B
F5	4959,5±262,38 ^{BA}	3515,3±436,16 ^A	79,67±0,01 ^{BAC}	77,222±0,04 ^{BA}	-0,13326±0,02 ^B	-0,22733±0,05 ^B
F6	4393,8±287,22 ^{BA}	4093,2±711,07 ^A	75,62±0,01 ^{BC}	75,25±0,05 ^{BA}	-0,16742±0,03 ^B	-0,26532±0,03 ^{BA}
F7	4614,2±202,98 ^{BA}	3559,2±436,82 ^A	73,58±0,01^C	72±0,03 ^{BA}	-0,19704±0,02 ^B	-0,27305±0,03 ^{BA}
F8	4664±145,15 ^{BA}	3703,4±328,79 ^A	75,77±0,01 ^{BC}	84,111±0,03^A	-0,42598±0,18^A	-0,16462±0,02 ^B
F9	4800,9±229,30 ^{BA}	3896,3±674,28 ^A	76,27±0,02 ^{BC}	72,571±0,04 ^{BA}	-0,24322±0,10 ^B	-0,2442±0,01 ^{BA}
F10	4887,5±194,43 ^{BA}	4211,6±204,35 ^A	78,04±0,01 ^{BAC}	76,133±0,02 ^{BA}	-0,15903±0,02 ^B	-0,27536±0,03 ^{BA}
F11	4773,6±266,99 ^{BA}	3509,2±339,05 ^A	80,71±0,02 ^{BAC}	65,7±0,05 ^{BA}	-0,06572±0,00 ^B	-0,28335±0,02 ^{BA}
F12	4264,2±190,98 ^{BA}	3234,8±297,94 ^A	76,67±0,01 ^{BC}	68,643±0,03 ^{BA}	-0,11966±0,01 ^B	-0,39812±0,06^A
F13	5247,7±112,82^A	3350,1±218,58 ^A	79,65±0,01 ^{BAC}	81,333±0,02^A	-0,14261±0,02 ^B	-0,16472±0,01 ^B
F14	4878,9±171,06 ^{BA}	3746,8±368,05 ^A	74,6±0,01 ^{BC}	80,143±0,03 ^{BA}	-0,20963±0,02 ^B	-0,18665±0,02 ^B
F15	4918±172,68 ^{BA}	3854,7±285,80 ^A	82,6±0,01 ^{BAC}	77,438±0,02 ^{BA}	-0,13259±0,02 ^B	-0,23147±0,02 ^{BA}
F16	4902,3±128,47 ^{BA}	3275,4±233,68 ^A	82,04±0,01 ^{BAC}	76,733±0,02 ^{BA}	-0,11203±0,02 ^B	-0,21678±0,02 ^B
F17	5014,5±181,62 ^{BA}	3928,9±426,71 ^A	74,6±0,01 ^{BC}	81±0,02 ^{BA}	-0,23334±0,01 ^B	-0,20384±0,02 ^B
F19	4706,3±172,55 ^{BA}	3370,9±295,58 ^A	81,42±0,01 ^{BAC}	76,769±0,03 ^{BA}	-0,12027±0,02 ^B	-0,19025±0,02 ^B
F20	4529,7±159,09 ^{BA}	3927±374,20 ^A	74,64±0,01 ^{BC}	83,143±0,03^A	-0,18555±0,01 ^B	-0,1644±0,02 ^B
F21	4370,4±209,10 ^{BA}	3361,7±277,38 ^A	83,54±0,02 ^{BA}	77,722±0,03 ^{BA}	-0,06405±0,02 ^B	-0,18548±0,02 ^B
F22	4559±336,66 ^{BA}	3942,2±223,34 ^A	75,48±0,03 ^{BC}	78,688±0,02 ^{BA}	-0,10631±0,01 ^B	-0,19657±0,01 ^B
F24	4799,9±183,06 ^{BA}	3665,3±172,26 ^A	86,08±0,01^A	74,5±0,03 ^{BA}	-0,05854±0,01 ^B	-0,27911±0,04 ^{BA}
F25	4156±271,65^B	3762±342,40 ^A	79,27±0,01 ^{BAC}	75,563±0,03 ^{BA}	-0,07947±0,01 ^B	-0,24194±0,03 ^{BA}
Moyenne	4699,79 ^A	3614,80 ^B	78,83 ^A	76,17 ^B	-0,149350 ^B	-0,231868 ^A
CV (%)	22,27	31,94	11,96	16,61	12,45	7,48
P < 0,05	0,0039	0,5913	<,0001	0,0416	0,0002	<,0001
Zone*famille	0,0366	0,0366	<,0001	<,0001	0,0071	0,0071

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Dans la zone de Divo, les arbres des familles F1 et F13 ont obtenu les plus grandes teneurs en eau des feuilles avec des moyennes respectives de 5301,2 mg/g MF et de 5247,7 mg/g MF. Par contre, les arbres de la famille F25 (4156 mg/g MF) ont obtenu les plus faibles teneurs en eau foliaire. Dans la zone de Toumodi, une homogénéité entre les familles a été observée avec une moyenne de 3614,80 mg/g MF.

Pour la teneur relative en eau, les meilleures moyennes dans la zone de Divo, ont été obtenues par la famille F24 (86,08 %) et les faibles valeurs moyennes par la famille F7 (73,58 %). Dans la zone de Toumodi, les plants des familles F8 et F20 ont obtenu les plus grandes teneurs relatives en eau avec des moyennes respectives de 84,11 % et de 83,14 %, et les plus faibles teneurs relatives en eau par la famille F3 (60,8 %).

Concernant la perte en eau foliaire, seules les familles F8 ($-0,422598 \text{ g.}10^{-3} / \text{cm}^2/\text{mn}$) et F12 ($-0,39812 \text{ g.}10^{-3} / \text{cm}^2/\text{mn}$), ont obtenu des faibles pertes en eau respectivement dans la zone de Divo et dans la zone de Toumodi. Les 22 autres familles d'hybrides ont obtenu des pertes d'eau plus élevées dont les valeurs moyennes varient respectivement de ($-0,24322 \text{ g.}10^{-3} / \text{cm}^2/\text{mn}$) à ($-0,05854 \text{ g.}10^{-3} / \text{cm}^2/\text{mn}$) dans la zone de Divo et de ($-0,33582 \text{ g.}10^{-3} / \text{cm}^2/\text{mn}$) à ($-0,16462 \text{ g.}10^{-3} / \text{cm}^2/\text{mn}$) dans la zone de Toumodi (Tableau XXVIII).

3.1.1.4. Corrélation entre le taux de mortalité, les paramètres agro-physiologiques au champ

La matrice de corrélation de Pearson (Tableau XXIV) a permis de révéler les plus forts liens entre le taux de mortalité, les paramètres agro morphologiques et les paramètres physiologiques des jeunes cacaoyers. Les paramètres agro morphologiques tels que le diamètre, la hauteur des plants, le nombre de feuilles fonctionnelles, la surface foliaire ont été négativement corrélés au taux de mortalité respectivement (-0,99), (- 0,95), (- 0,99), (-0,99) exceptée la masse spécifique foliaires (0,99).

Les paramètres physiologiques tels que la couleur, l'aspect et la teneur en eau foliaire ont été négativement corrélés au taux de mortalité avec des valeurs respective (-0,78), (-0,90), (-0,97), excepté l'indice de nécrose (0,95). De même, la masse spécifique foliaire a été négativement corrélée aux paramètres agro morphologiques. Les plus forts liens ont été observés avec le diamètre au collet (-0,98), la hauteur (-0,92), le nombre de feuilles fonctionnelles (-0,99), à la surface foliaire totale (-0,84). Elle a été également corrélée négativement à la couleur des feuilles (-0,72), à l'aspect des feuilles (-0,86), à la teneur en eau foliaire (-0,98), excepté l'indice de nécrose (0,91).

Tableau XXIX : Matrice de corrélation de Pearson entre les variables agro-physiologiques et le taux de mortalité au champ

Variables	Taumort	Diam	Haut	Nff	Sft	Msf	Coul	Aspt	Indcro	Tef
Taumort	1									
Diam	-0,99	1								
Haut	-0,95	0,99	1							
Nff	-0,99	0,99	0,97	1						
Sft	-0,88	0,94	0,98	0,92	1					
Msf	0,99	-0,98	-0,92	-0,99	-0,84	1				
Coul	-0,78	0,86	0,94	0,83	0,98	-0,73	1			
Aspt	-0,90	0,96	0,99	0,94	0,99	-0,87	0,97	1		
Indcro	0,95	-0,98	-0,99	-0,97	-0,99	0,92	-0,94	-0,99	1	
Tef	-0,97	0,99	0,99	0,99	0,97	-0,95	0,90	0,98	-0,99	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 avec un niveau de signification $p < 0,000$. Taumort=taux de mortalité, diam= diamètre au collet ; haut=hauteur des plants, nff = Nombre feuilles fonctionnelles, sft= surface foliaire totale, msf=masse spécifique foliaire, coul= couleur de feuilles, aspt=aspect des feuilles ; indcro=indice de nécrose, tef =teneur en eau foliaire.

L'indice de nécrose (paramètres physiologique) a été négativement corrélé au diamètre (-0,98), à la hauteur des plants (-0,99), au nombre de feuilles fonctionnelles (-0,97), à la surface foliaire totale (-0,99) à la couleur des feuilles (-0,94), l'aspect des feuilles (-0,99) et à la teneur en eau foliaire (-0,99). La teneur en eau (paramètre physiologique) a été positivement corrélé au paramètre agro-morphologique tels que le diamètre au collet (0,99), à la hauteur des plants (0,99), au nombre de feuilles fonctionnelles (0,99), à la surface foliaire totale (0,97), à la couleur des feuilles (0,90) ; à l'aspect des feuilles (0,97), exceptés la masse spécifique (-0,95) et l'indice de nécrose (-0,99). Cependant, des corrélations positives ont été observées entre les paramètres agro morphologiques d'une part, et d'autre part, entre les paramètres agro-morphologiques et physiologiques. Le diamètre au collet a été positivement corrélé à la hauteur des plants (0,99), au nombre de feuilles fonctionnelles (0,99), à la surface foliaire totale (0,94), à la couleur des feuilles (0,86), à l'aspect des feuilles (0,96) et à la teneur en eau foliaire (0,99). Quant à la hauteur des plants, elle a été corrélé au nombre de feuilles fonctionnelles (0,97), à la surface foliaire totale (0,98), à la couleur des feuilles (0,94), à l'aspect des feuilles (0,99) et à la teneur en eau foliaire (0,99). Le nombre de feuille a été corrélé positivement à la surface foliaire (0,92), à la couleur des feuilles (0,83), à l'aspect des feuilles (0,94) et à la teneur en eau foliaire (0,99). La surface foliaire totale a montré une corrélation positive avec la couleur des feuilles (0,98), l'aspect des feuilles (0,99) et la teneur en eau foliaire (0,97).

3.1.1.5. Structuration des performances agro-morphologiques et physiologiques des familles d'hybrides de cacaoyers de 9 ans au champ

3.1.1.5.1. Structuration des familles d'hybrides dans la zone à pluviométrie normale de Divo

L'analyse en composantes principales (ACP) des 23 familles d'hybrides a fait ressortir deux composantes principales (Tableau XXX) qui expriment l'ensemble de la variance totale pour une contribution de 62, 91 %. La composante F1, contribuant pour 36,19 % de la variabilité totale avec une valeur propre de 2,34 est la composante de la physiologie. Elle est expliquée par les variables, teneur relative en eau (Tre), Perte en eau (Ped) et la surface foliaire totale avec des coefficients de corrélation respectifs de 0,72, 0,9, et 0,71. La composante F2, contribuant pour 26,72 % de la variabilité totale avec une valeur propre de 1,72 est la composante de la vigueur expliquée par la hauteur et la section du tronc avec des coefficients de corrélation de 0,80 et 0,82 respectivement (Figure 21).

Tableau XXX : Valeur propre, variance exprimée et contribution des variables à la formation des composantes de l'analyse en composantes principales des hybrides de 9 ans dans la zone de Divo.

Composantes	F1	F2
Valeur propre	2,34	1,72
Variabilité (%)	36,19	26,72
% cumulé	39,01	62,91
Haut	-0,31	0,8
Msf	-0,67	0,25
Section	-0,31	0,82
Sft	0,71	0,28
Tre	0,72	0,5
Ped	0,9	0,17

Haut=hauteur des plants, Msf=masse spécifique foliaire, section= section du tronc, Sft= surface foliaire totale, Tre=teneur relative en eau, Ped=perte en eau.

La classification ascendante hiérarchique (CAH) (Figure 22) a indiqué trois (03) groupes d'hybrides dans la zone de Divo. Le premier groupe est composé de la seule famille d'hybride F8. Ce groupe a été caractérisé par de fortes valeurs pour les variables hauteurs des cacaoyers, section du tronc, masse spécifique foliaire et des valeurs faibles pour les variables teneur relative en eau, surface foliaire totale et perte en eau. Le deuxième groupe a été constitué des familles d'hybrides F17, F14, F9, F20, F3, F6, F7 et F2. Ce groupe a été caractérisé par des faibles valeurs pour tous les variables discriminantes. Le troisième groupe est composé des familles d'hybrides F21, F15, F13, F22, F4, F10, F5, F19, F16, F25, F11, F1, F12 et F24. Ce groupe est caractérisé par de fortes valeurs pour les variables surface foliaire totale, teneur relative, en eau perte en eau et de faibles valeurs pour la section, hauteur et masse spécifique foliaire.

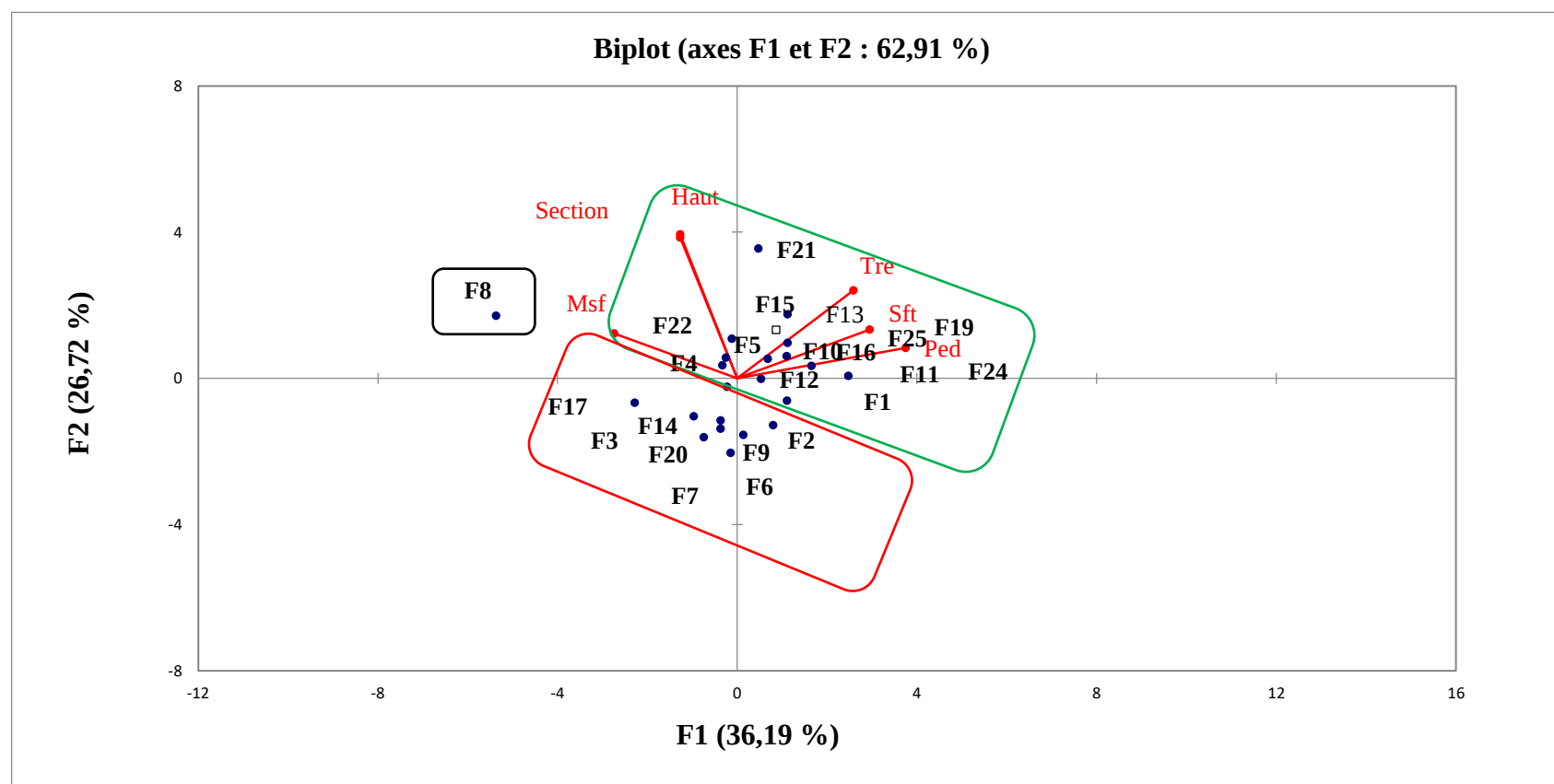
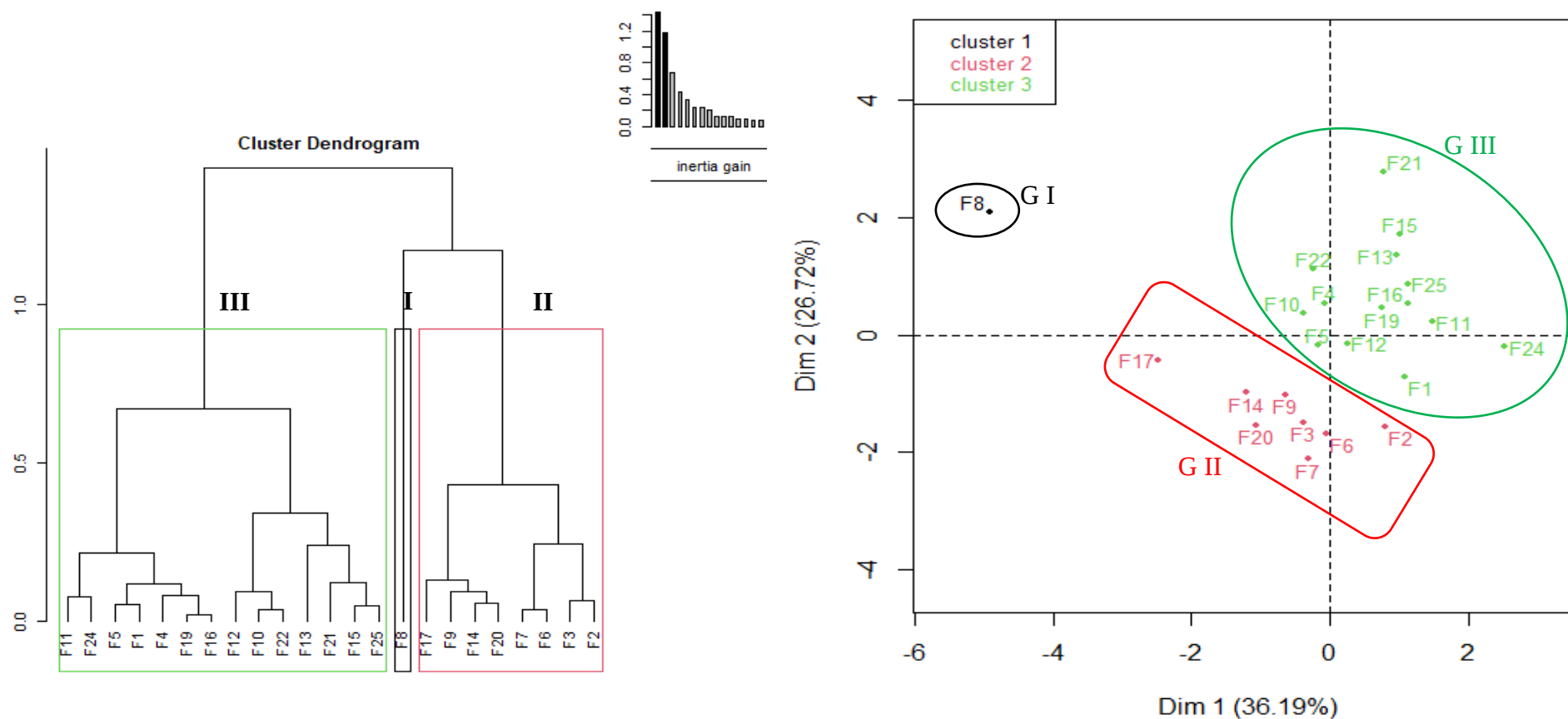


Figure 21 : Biplot de corrélation de l'analyse en composantes principales indiquant les relations entre les variables agro-physiologiques et les familles d'hybrides de cacaoyers de 9 ans dans la zone de Divo.

Haut=hauteur des plants, Msf=masse spécifique foliaire, section= section du tronc, Sft= surface foliaire totale, Tre=teneur relative en eau, Ped=perte en eau.

 : Famille de la classe I
 : Famille de la classe II
 : Famille de la classe III
 ● Point observation, ● Point variable. La distance entre 2 observations est approximation de la distance de Mahalanobis. Les familles sont regroupées suivant le critère d'agrégation de Ward.



A : Dendrogramme de la Classification ascendante hiérarchique

B : Projection des familles d'hybrides dans le plan 1-2.

Figure 22 : Structuration des familles d'hybrides de cacaoyers de cacaoyers de 9 ans par groupe homogène selon les variables agro-physiologiques évaluée dans la zone de Divo

3.1.1.5.2. Structuration des familles d'hybrides dans la zone à pluviométrie déficitaire de Toumodi

L'analyse en composantes principales (ACP) des 23 familles d'hybrides a fait ressortir deux composantes principales qui expriment l'ensemble de la variance totale pour une contribution de 71,65 % (Tableau XXXI).

Tableau XXXI : Valeur propre, variance exprimée et contribution des variables à la formation des composantes de l'analyse en composantes principales des hybrides de 9 ans dans la zone de Toumodi

Composantes	F1	F2
Valeur propre	2,04	1,58
Variabilité (%)	40,42	31,23
% cumulé	40,75	71,65
Haut	0,06	0,88
Section	-0,04	0,87
Sft	0,74	0,04
Tre	0,84	0,13
Ped	0,87	-0,18

Haut=hauteur des plants, section= section du tronc, Sft= surface foliaire totale, Tre=teneur relative en eau, Ped=perte en eau

La composante F1, contribuant pour 40,42 % de la variabilité totale, avec une valeur propre de 2,04 est la composante de la physiologie expliquée par les variables, teneur relative en eau (Tre), Perte en eau (Ped) surface foliaire totale (Sft) avec des coefficients de corrélation respectifs de, 0,85 ; 0,86 ; 0,74. La composante F2, contribuant pour 31,23 % de la variabilité totale avec une valeur propre de 1,58, est celle de la vigueur. Elle est expliquée par la hauteur et la section du tronc avec des coefficients de corrélation respectifs de 0,86 et 0,87. Dans l'ensemble, les deux premiers axes (F1 et F2) qui ont eu une contribution de 71,65 % sont considérés pour la projection des familles d'hybrides dans le plan factoriel (Figure 23).

La classification ascendante hiérarchique (CAH) (Figure 24) a indiqué quatre (04) groupes d'hybrides dans la zone de Toumodi. Le premier groupe est encore composé de la seule famille d'hybride F8. Ce groupe a été caractérisé par de fortes valeurs pour les variables hauteurs des cacaoyers, section du tronc et des valeurs faibles pour les variables teneur relative en eau, surface foliaire totale et perte en eau. Le deuxième groupe, a été constitué des familles d'hybrides F17, F14, F9, F20, F3, F6 et F7. Ce groupe a été caractérisé par de faibles valeurs sur l'ensemble des variables agro-physiologiques. Le troisième groupe est composé des

familles d'hybrides F21, F15, F13, F22, F10, F25 et F12. Ce groupe est caractérisé par de fortes valeurs pour les variables hauteurs n section de tronc, surface foliaire totale, teneur relative en eau. Le quatrième groupe (F5, F2, F19, F16, F11, F1, F4 et F24) est caractérisé par de fortes valeurs pour les variables surface foliaire totale, teneur relative en eau et perte en eau foliaire.

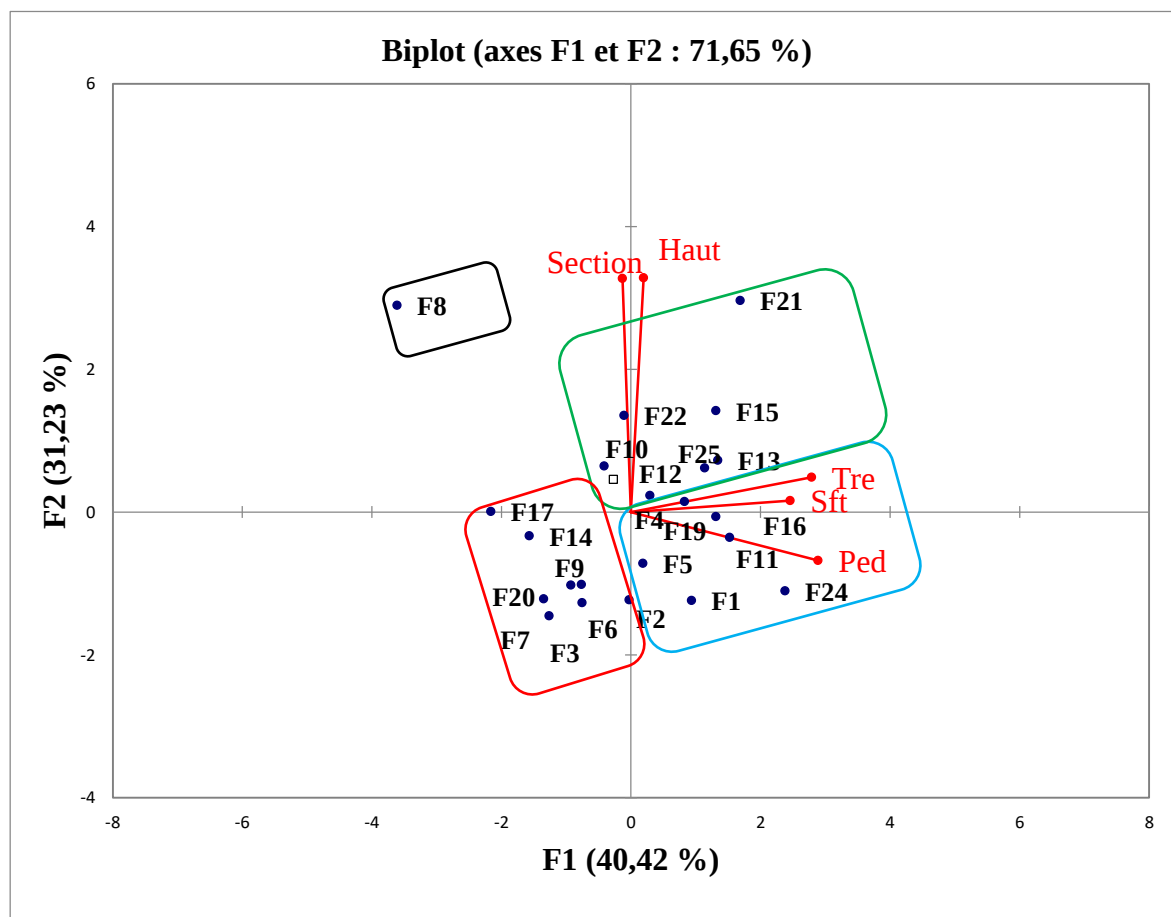
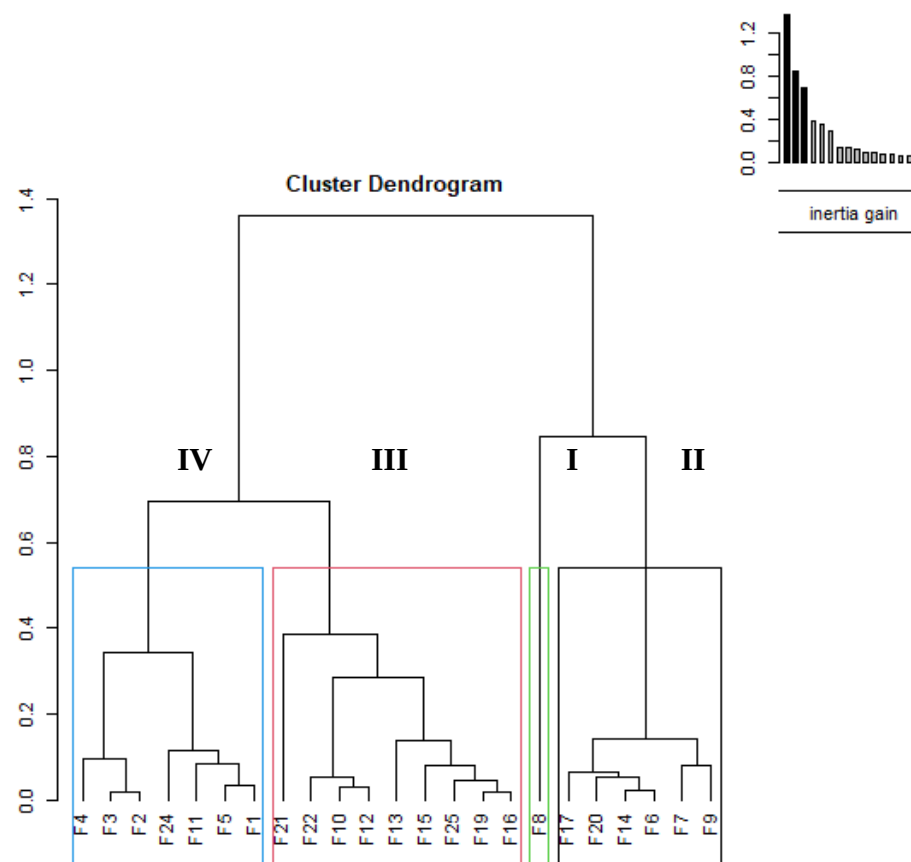


Figure 23 : Biplot de corrélation de l'analyse en composantes principales indiquant les relations entre les variables et les familles d'hybrides de cacaoyers de 9 ans dans la zone de Toumodi.

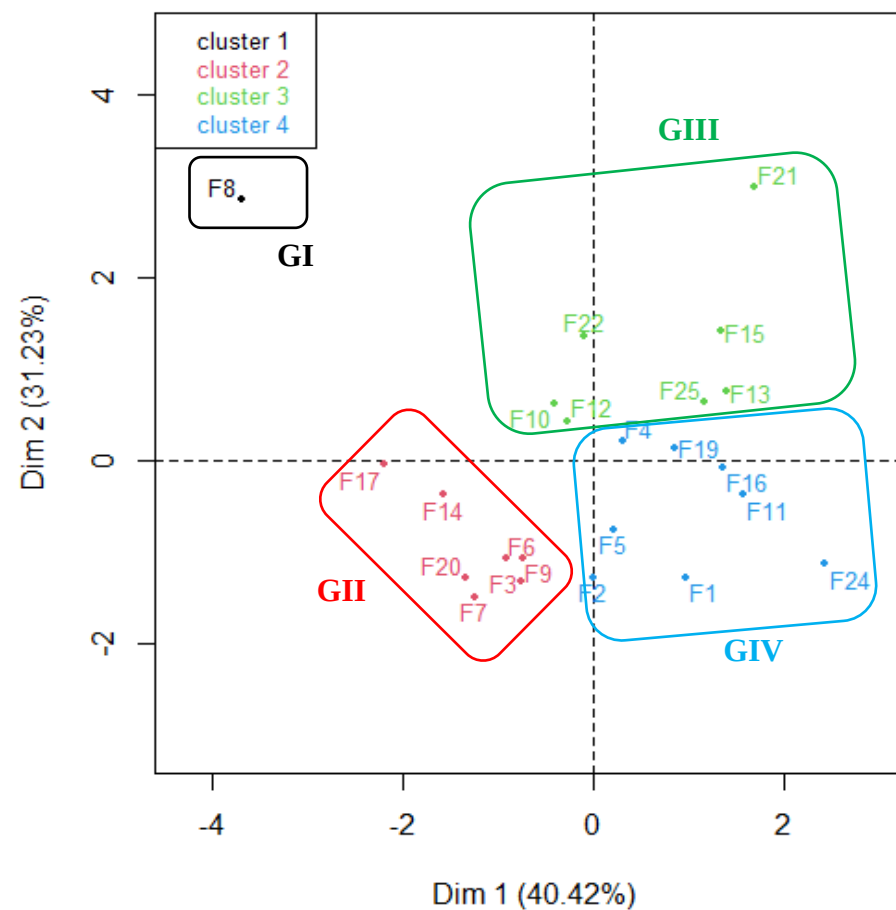
Haut=hauteur des plants, section= section du tronc, Sft= surface foliaire totale, Tre=teneur relative en eau, Ped=perte en eau.

□ Famille de la classe I □ : Famille de la classe II □ : Famille de la classe III □ : Famille de la classe IV

● Point observation, ● Point variable. La distance entre 2 observations est approximation de la distance de Mahalanobis. Les familles sont regroupées suivant le critère d'agrégation de Ward.



A Dendrogramme de la Classification ascendante



B : : Projection des familles d'hybrides dans le plan 1-2.

Figure 24 : Structuration des familles d'hybrides de cacaoyers de 9 ans par groupe homogène selon les variables agro-physiologiques évaluée dans la zone de Toumodi

3.1.1.6. Evaluation des paramètres morphologiques des cabosses et de production des familles d'hybrides de 9 ans au champ

3.1.1.6.1. Paramètres morphologiques des cabosses

Tous les paramètres morphologiques des cabosses des 23 familles d'hybrides ont montré des différences significatives entre les zones et entre les familles d'hybrides avec des interactions zone*famille significatives (Tableau XXXII).

Les valeurs moyennes enregistrées sur l'ensemble des hybrides pour la variable épaisseur de cortex ont été de 1,51 cm dans la zone de Divo contre 1,11 cm dans la zone de Toumodi.

Les familles F13 (1,77 cm) et F20 (1,51 cm) ont présenté les plus grandes épaisseurs de cortex de cabosses respectivement dans les zones de Divo et Toumodi. Par contre, les plus petites épaisseurs de cortex ont été présentées par les familles F5 (1,36 cm) dans la zone de Divo et F9 (0,71 cm) dans la zone de Toumodi

Pour la forme et la taille des cabosses, les moyennes obtenues dans la zone de Divo ont été respectivement de 2,51 et 188,1 cm², contre 1,92 et 137,49 cm² dans la zone de Toumodi. Les familles F17 (2,78), F8 (2,77), F15 (2,76), F9 (2,73), ont obtenu les grandes formes de cabosses dans la zone de Divo et F15 (2,53) dans la zone de Toumodi. Les plus petites formes de cabosses ont été obtenues par les familles F3 (2,29), F4 (2,8) dans la zone de Divo et F10 (1,7) dans la zone de Toumodi.

Les meilleures tailles des cabosses ont été obtenues par les familles F25 (237,69 cm²) dans la zone de Divo et F20 (172,1 cm²), F15 (171,03 cm²) et F19 (169,33 cm²) dans la zone de Toumodi. Les plus faibles tailles de cabosses ont été obtenues par les familles F2 (162,3 cm²) dans la zone de Divo et F9 (115,9 cm²) dans la zone de Toumodi.

Pour le volume de cabosses, les moyennes obtenues ont été 739,38 cm³ dans la zone de Divo, contre 532,5cm³ dans la zone de Toumodi. Les plus grands volumes de cabosses ont été obtenus par les familles F25 (1045,45 cm³) dans la zone de Divo et F20 (742,65 cm³) dans la zone de Toumodi, les plus petits volumes de cabosses par les familles F2 (616,28 cm³) dans la zone de Divo et F9 (384,36 cm³) dans la zone de Toumodi.

Tableau XXXII : Comparaison des familles d'hybrides selon les paramètres morphologiques des cabosses dans les différentes zones

Famille	Epaisseur du cortex cabosse (cm)		Forme des cabosses		Taille des cabosses (cm ²)		Volume des cabosses (cm ³)	
	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
F1	1,44±0,1 ^{JHIK}	1,08±0,5 ^{EDC}	2,41±0,01 ^{GH}	2,07±0,04 ^{CBD}	185,05±2,15 ^{FHGI}	134,05±8,14 ^{BDAC}	735,27±12,2 ^{GDFCE}	495,96±52,2 ^{EBDCF}
F2	1,51±0,1 ^{FHIG}	1,10±0,3 ^{EBDC}	2,32±0,01 ^{IJ}	1,84±0,02 ^{FEDG}	162,3±1,90^L	118,01±2,63 ^{DC}	616,28±10,5^J	427,44±13,7 ^{EF}
F3	1,49±0,1 ^{FHIG}	1,13±0,6 ^{EBDC}	2,29±0,01^J	1,83±0,18 ^{FEDG}	179,27±2,14 ^{HI}	162,18±6,92 ^{BAC}	718,58±11,5 ^{GDFHE}	688,74±50,7 ^{BAC}
F4	1,45±0,1 ^{JHIK}	0,99±0,3 ^{EDF}	2,28±0,01^J	1,877±0,05 ^{FCEDG}	170,34±1,87 ^{KJ}	137,65±8,36 ^{BDAC}	666,14±10,1 ^{IH}	535,1±44,2 ^{EBDACF}
F5	1,36±0,1^L	0,97±0,3 ^{EDF}	2,39±0,01 ^H	1,74±0,01 ^{FG}	166,34±2,13 ^{KL}	121,79±3,11 ^{DC}	634,0±12,27 ^{IJ}	458,93±16,3 ^{EDCF}
F6	1,54±0,1 ^{FE}	1,29±0,5 ^{BDAC}	2,52±0,01 ^{ED}	2,073±0,03 ^{CBD}	208,66±2,51 ^B	166,67±5,7 ^{BA}	861,97±15,13 ^B	672,86±31,7 ^{BDAC}
F7	1,46±0,1 ^{JHIK}	0,88±0,1 ^{EF}	2,46±0,01 ^{GF}	1,91±0,02 ^{FCEDG}	177,98±1,94 ^{JI}	119,86±2,36 ^{DC}	685,71±10,3 ^{GH}	429,64±11,1 ^{EF}
F8	1,51±0,1 ^{FHIG}	1,14±0,8 ^{EBDC}	2,77±0,01^A	2,08±0,1 ^{CBD}	191,02±2,11 ^{FE}	139,33±7,36 ^{BDAC}	721,04±11,4 ^{GDFHE}	519,95±38,1 ^{EBDACF}
F9	1,43±0,1 ^{JK}	0,71±0,7^F	2,73±0,01^A	2,21±0,06 ^B	187,7±2,09 ^{FHGE}	115,9±5,25^P	704,96±11,2 ^{GFHE}	384,36±26,1^F
F10	1,49±0,1 ^{FHIG}	1,03±0,4 ^{EDFC}	2,36±0,01 ^{IH}	1,67±0,04^G	176,43±1,60 ^{JI}	136,9±5,63 ^{BDAC}	689,76±8,8 ^{GFH}	562,02±31,6 ^{EBDACF}
F11	1,66±0,2 ^B	1,27±0,1 ^{BDAC}	2,5±0,01 ^{EF}	2,15±0,06 ^{CB}	202,73±2,42 ^{CB}	132,4±19,52 ^{BDAC}	828,98±14,1 ^B	471,73±10,3 ^{EDCF}
F12	1,60±0,1 ^{CBD}	1,15±0,1 ^{EBDC}	2,40±0,01 ^{GH}	1,95±0,02 ^{FCEDG}	200,38±2,08 ^{CD}	159,91±9,33 ^{BDAC}	827,87±12,1 ^B	666,54±58,9 ^{EBDAC}
F13	1,77±0,1^A	1,08±0,07 ^{EDC}	2,61 ±0,01 ^{CB}	1,81±0,05 ^{FEDG}	195,86±1,99 ^{CDE}	125,22±6,26 ^{BDAC}	771,55±11,3 ^{DC}	470,8±29,6 ^{EDCF}
F14	1,39±0,1 ^{JK}	0,97±0,4 ^{EDF}	2,59±0,01 ^{CB}	1,92±0,03 ^{FCEDG}	183,33±2,32 ^{FHGI}	132,49±4,74 ^{BDAC}	705,02±13,2 ^{GFHE}	502,37±25,2 ^{EBDCF}
F15	1,48±0,1 ^{FHIG}	1,21±0,1 ^{EBDAC}	2,76±0,02^A	2,53±0,06^A	196,51±2,46 ^{CDE}	171,03±11,87^A	754,75±13,1 ^{DCE}	647±65,6 ^{EBDAC}
F16	1,48±0,1 ^{FHIG}	1,03±0,1 ^{EDFC}	2,33±0,01 ^{IJ}	2,01±0,10 ^{FCEDG}	180,32±1,97 ^{HGI}	160,01±15,09 ^{BDAC}	719,13±11,3 ^{GDFHE}	646,74±75,2 ^{EBDAC}
F17	1,49±0,2 ^{FHIG}	1,3±0,7 ^{BDAC}	2,78±0,01^A	2,05±0,05 ^{CEBD}	176,01±2,37 ^{JI}	151,24±9,37 ^{BDAC}	638,52±12,1 ^{IJ}	588,46±52,2 ^{EBDACF}
F19	1,44±0,2 ^{JK}	1,46±0,9 ^{BA}	2,5±0,02 ^{EF}	2,09±0,05 ^{CBD}	192,31±2,80 ^{FDE}	169,33±13,07^A	769,48±15,6 ^{DC}	719,25±78,2 ^{BA}
F20	1,38±0,1 ^{LK}	1,51±0,6^A	2,64±0,01 ^B	1,93±0,03 ^{FCEDG}	188,68±2,31 ^{FGE}	172,1±8,48^A	725,6±12,3 ^{GDFE}	742,65±56,1^A
F21	1,59±0,1 ^{CED}	1,3±0,3 ^{BDAC}	2,62±0,00 ^{CB}	1,99±0,03 ^{FCEDG}	196,03±1,80 ^{CDE}	154,4±5,47 ^{BDAC}	768,68±10,4 ^{DC}	616,66±29,9 ^{EBDACF}
F22	1,65±0,1 ^{CB}	1,28±0,3 ^{BDAC}	2,58±0,01 ^{CD}	1,8±0,02 ^{FEDG}	196,76±2,20 ^{CDE}	156,14±4,91 ^{BDAC}	780,38±12,8 ^C	661,07±27,1 ^{EBDAC}
F24	1,5±0,1 ^{FHIG}	1,07±0,3 ^{EDC}	2,54±0,01 ^{ED}	1,94±0,03 ^{FCEDG}	178,79±1,86 ^{HJI}	121,44±4,33 ^{DC}	679,56±10,1 ^{GIH}	438±21,91 ^{EDF}
F25	1,62±0,1 ^{CB}	1,29±0,5 ^{BDAC}	2,53±0,01 ^{ED}	1,87±0,04 ^{FCEDG}	237,69±2,84^A	159,12±8,65 ^{BDAC}	1045,45±18,3^A	667,86±48,7 ^{EBDAC}
Moyenne	1,51 ^A	1,11 ^B	2,51 ^A	1,92 ^B	188,10 ^A	137,49 ^B	739,38 ^A	532,50 ^B
CV (%)	20,07	26,74	10,05	12,45	19,44	24,6	28,11	34,83
P <0,05	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
Zone*famille	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

3.1.1.6.2. Paramètres de production

3.1.1.6.2.1. Effet des années de récoltes sur les paramètres de production

Les années de récoltée ont montré des différences significatives ($P < 0,0001$) entre elles pour tous les paramètres de production évalués sur l'ensemble des familles (Tableau XXXIII).

Le nombre total moyen de cabosses par famille évalué au cours des quatre (04) années a été plus élevé en 2020 avec une moyenne de 37,72 cabosses par famille, contre une moyenne de 18,51 cabosses par famille en 2019. Pour le nombre de cabosses saines par famille, la moyenne la plus élevée qui est de 25,75 cabosses saines par famille, a été obtenue en 2020. Par contre, la plus faible moyenne de cabosses saines par famille (11,20) a été obtenue en 2019.

Pour ce qui concerne la masse moyenne de cabosses saines par famille, les plus fortes valeurs (457,21 g), (444,42 g) ont été enregistrées respectivement en 2019 et 2021 et la plus petite valeur (335,74 g) en 2018. Le taux moyen de cabosses pourries par famille le plus élevé a été enregistré en 2018 avec une valeur de 4,48 % puis a subi une régression progressive pour atteindre la valeur de 1,41 % en 2021.

Les rendements potentiels moyens par famille ont été plus élevés en 2020 et 2021 avec des valeurs moyennes respectives de 1894,33 kg/ha et de 1879,13 kg/ha. Par contre, les plus faibles rendements potentiels ont été obtenus en 2018 et 2019 avec des valeurs respectives de 1162,6 kg/ha et 1108,73 kg/ha. Quant au rendement réel, il a été plus important pour les années 2020 et 2021 avec des valeurs respectives de 1307,51 kg/ha et 1258,2 kg/ha et moins important en 2019 avec une valeur de 684,24 kg/ha.

Tableau XXXIII : Influence des années de récoltes sur les paramètres de production

Années	Paramètres de production					
	Tot	Ncab	Mmcab (g)	Tcp (%)	Rdtp (kg/ha)	Rdtr (kg/ha)
Année 2018	27,51±0,94 ^C	20,37±0,71 ^C	335,74±0,01 ^C	4,48±0,30^A	1162,60±40,58 ^B	877,90±31,95 ^B
Année 2019	18,51±0,67 ^D	11,20±0,45 ^D	457,21±0,01^A	3,73±0,28 ^B	1108,73±38,52 ^B	684,24±26,59 ^C
Année 2020	37,72±1,13^A	25,75±0,82^A	411,88±0,01 ^B	2,33±0,22 ^C	1894,33±57,46^A	1307,51±42,67^A
Année 2021	34,55±1,02 ^B	23,07±0,71 ^B	444,42±0,01^A	1,41±0,17 ^D	1879,13±56,19^A	1258,20±39,03^A
Moyenne	29,547	20,085	412,13	2,99	1509,34	1030,865
CV (%)	45,8	48,99	11,88	73,59	51,82	55,12
p ≤ 0,05	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Tot= nombre total de cabosse (saine, pourrie, rongée et autre), Ncab=nombre de cabosses saines, Mmcab= masse moyenne de cabosse, Tcp= taux de cabosse pourrie, Rdtp=rendement potentiel, Rdtr=rendement réel.

3.1.1.6.2.2. Effet des années de récoltes sur les paramètres technologiques

Les années de récolte ont montré des différences significatives ($P < 0,0001$) entre elles pour tous les paramètres technologiques évalués sur l'ensemble des familles d'hybrides (Tableau XXXIV). La masse moyenne de fèves fraîches par cabosse a été meilleure en 2019 avec une moyenne de 117,10 g et faibles en 2020 et 2021 avec des moyennes comprises entre 103,04 g et 105,25 g. Concernant la masse de fèves sèches ou cacao marchand, la meilleure moyenne (1,39 g) a été obtenue en 2020 et la faible moyenne en 2021. Quant aux dimensions des fèves sèches, les meilleures longueurs des fèves sèches ont été obtenues en 2020 et les faibles longueurs en 2021 avec des moyennes respectives de 2,39 cm et 2,37 cm. Cependant, les meilleures largeurs moyennes des fèves sèches (1,24 cm) ont été obtenues en 2021 et les plus faibles moyennes (1,01 cm) en 2020.

Tableau XXXIV : Influence des années de récoltes sur les paramètres Technologiques

Années	Pmff/cab (g)	Pmfs (g)	Longfs (cm)	Largfs (cm)
Année 2019	117,10±0,00 ^A	1,38±0,00 ^B	*	*
Année 2020	103,04±0,00 ^B	1,49±0,00^A	2,39±0,01^A	1,01±0,01 ^B
Année 2021	105,25±0,00 ^B	1,29±0,00 ^C	2,37±0,00 ^B	1,24±0,00^A
Moyenne	81,14	1,34	2,38	1,21
CV (%)	5,45	14,98	8,36	11,57
p ≤ 0,05	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Pmff=poids de fèves fraîches par cabosse, Pmfs=poids moyen d'une fève sèche, Longfs= longueur moyenne d'une fève sèche, Largfs= largeur moyenne d'une fève sèche, *= données non collectées.

3.1.1.6.3. Effet des zones sur le cumul des paramètres de production des 23 familles d'hybrides

3.1.1.6.3.1. Nombre de cabosses, masse moyenne de cabosse, taux de cabosses pourries de cabosses

Les résultats des analyses ont montré des différences significatives entre les hybrides dans chaque région (Tableau XXXV). Le nombre total de cabosses produites (tot) a été en moyenne de 38,57 cabosses dans la zone de Divo, contre 10, 51 cabosses dans la zone de Toumodi. Les familles d'hybrides F10 (52,88 cabosses totales), F9 (52,59 cabosses totales) et F7 (26,42 cabosses totales) ont produit plus de cabosses respectivement dans la zone de Divo et de Toumodi. Par contre, les familles hybrides F25 (21,3 cabosses totales), F5 (5,29 cabosses totales) et F16 (4,6 cabosses totales) ont produits moins de cabosses totales dans la zone de Divo et dans la zone de Toumodi respectivement.

Pour le nombre de cabosses saines, la moyenne obtenue sur l'ensemble des hybrides a été de 25,62 cabosses saines dans la zone de Divo, contre une moyenne de 8,74 cabosses saines dans la zone de Toumodi. La famille F10 a produit plus de cabosses saines avec une moyenne de 37,91 cabosses, contre 16,82 cabosses saines produites par la famille F25 dans la zone de Divo. Par contre, dans la zone de Toumodi, le nombre de cabosses saines le plus élevé a été produit par la famille F7 avec une moyenne de 19,10 cabosses saines et les familles F4, F5 et F16 ont produit moins de cabosses saines avec des moyennes respectives de 4,38, 3,95 et de 3,88 cabosses saines.

La masse moyenne de cabosses saines enregistrées dans la zone de Divo a été 429,51 g, contre une moyenne de 366,84 g à Toumodi. La famille F25 (584,39 g) a obtenu la meilleure masse de cabosses saines. Par contre, les familles F9 (352,53 g) et F5 (347,83 g) ont présenté les plus faibles masses de cabosses saines à Divo. Dans la zone de Toumodi, la famille F6 (533,7 g) a obtenu la meilleure masse moyenne de cabosses et la famille F5 (185,05 g) a obtenu les plus faibles masses moyennes de cabosses.

Concernant le taux de cabosses pourries, les valeurs moyennes enregistrées ont été de 7,16 % dans la zone de Toumodi, contre 1,05 % dans la zone de Divo. La famille F5 a obtenu plus de cabosses pourries (14,53 %) et la famille F14 en a obtenu moins, avec un taux de 0,61 % dans la zone de Toumodi. Par contre, dans la zone de Divo, les familles F11 et F5 ont obtenu plus de cabosses pourries avec des taux respectifs de 2,73 % et de 2,7 %. Les familles F2, F21, F3, F8, F20, F16, F7 et F10 ont présenté moins de cabosses pourries avec des taux respectifs de 0,47%, 0,42 %, 0,22 %, 0,21 %, 0,19 %, 0,18 % et 0,14 %.

Tableau XXXV : Cumul du nombre, de la masse moyenne et du taux de cabosses pourries des hybrides dans les zones expérimentales durant les quatre (04) années de récoltes

	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
Familles	Tot	Tot	Ncab	Ncab	Mmcab (g)	Mmcab (g)	Tcp (%)	Tcp (%)
F1	38,267±3,24 ^{EDFC}	7,77±3,11 ^{CD}	24,57±2,28 ^{EFDC}	6,77±2,71 ^{CD}	390,49±0,01 ^{FEG}	274,35± 0,07 ^{EDF}	2,22±0,66 ^{BA}	13,75±2,26 ^{BA}
F2	30,37±2,34 ^{EGF}	12,32±3,19 ^{CD}	18,48±1,68 ^{EF}	8,5±1,98 ^{CD}	396,57± 0,01 ^{FEGD}	374,49±0,03 ^{EBDACF}	0,47±0,24 ^B	5,21±1,53 ^{EDCF}
F3	40,20±2,54 ^{EBDFC}	7,2±2,95 ^{CD}	25,56±2,01 ^{EFDC}	5,55±2,18 ^{CD}	395,2±0,01 ^{FEGD}	260,6±0,06 ^{EF}	0,22±0,01 ^B	12,55±2,85 ^{BAC}
F4	35,173±2,85 ^{EDF}	5,75±1,07 ^{CD}	23,82±2,19 ^{EFDC}	4,38±0,72 ^D	409,1±0,01 ^{FCEGD}	336,26±0,03 ^{EBDACF}	1,165±0,47 ^{BA}	7,9±1,48 ^{EBDACF}
F5	30,54±3,08 ^{EGF}	5,29±1,70^D	20,86±2,32 ^{EFDC}	3,95±1,36 ^D	347,83 ±0,01^G	185,05±0,04^F	2,7±0,73^A	14,531±2,01^A
F6	34,14±2,81 ^{EDF}	8,69±2,86 ^{CD}	24,38±2,24 ^{EFDC}	6,63±2,11 ^{CD}	520,23±0,02 ^B	504,53±0,10^A	1,77±0,63 ^{BA}	6,34±2,78 ^{EBDCF}
F7	39,692±2,12 ^{EBDFC}	26,424±3,94^A	25,84±2,19 ^{EFDC}	19,10±2,88^A	412,87±0,01 ^{FCEGD}	427,68±0,02 ^{EBDAC}	0,18±0,02 ^B	2,66±0,98 ^{EF}
F8	45,37±2,95 ^{BDAC}	7,417±1,54 ^{CD}	27,57±2,19 ^{EDC}	5,42±1,24 ^{CD}	473,28±0,01 ^{CEBD}	483,2±0,03 ^{BDAC}	0,21±0,01 ^B	2,28±1,15 ^{EF}
F9	52,59 ± 4,84^A	12,571±3,97 ^{CD}	36,23±3,77 ^{BA}	6,89±1,76 ^{CD}	352,53±0,01^G	220,6 ± 0,04 ^{EF}	1,25±0,52 ^{BA}	11,713±2,38 ^{BDAC}
F10	52,88±3,26^A	7,619±1,40 ^{CD}	37,91± 2,55^A	6,84±1,24 ^{CD}	394,76±0,01 ^{FEGD}	342,35±0,03 ^{EBDACF}	0,14±0,01^B	7,22±1,42 ^{EBDACF}
F11	33,418±3,13 ^{EGDF}	7,65±2,248 ^{CD}	22,86±2,27 ^{EFDC}	6,73±1,97 ^{CD}	425,07±0,02 ^{FCEGD}	295,11±0,04 ^{EBDCF}	2,73±0,76^A	9,45±1,92 ^{EBDAC}
F12	31,878±2,42 ^{EGDF}	7,15±1,71 ^{CD}	21,77±1,86 ^{EFDC}	5,19±1,29 ^{CD}	477,66 ± 0,01 ^{CEBD}	401,39±0,05 ^{EBDAC}	1,23±0,49 ^{BA}	7,85±1,60 ^{EBDACF}
F13	44,08±3,41 ^{EBDAC}	7,24±1,48 ^{CD}	29,14±2,44 ^{BDC}	5,93±1,25 ^{CD}	451,5 ± 0,01 ^{FCEBD}	349,1±0,04 ^{EBDACF}	0,88±0,40 ^{BA}	8,87±1,63 ^{EBDAC}
F14	30,57±2,53 ^{EGF}	19,73±3,42 ^{BC}	20,32±1,96 ^{EFDC}	15,91±2,66 ^{BC}	403,49±0,02 ^{FCEGD}	491,36±0,02 ^{BAC}	1,94±0,62 ^{BA}	0,61±0,46^F
F15	36,1 ±2,65 ^{EDF}	6,55±1,38 ^{CD}	25,68±1,9 ^{EFDC}	5,52±1,14 ^{CD}	462,84±0,01 ^{FCEBD}	288,63±0,03 ^{EDCF}	0,68±0,34 ^{BA}	10,62±1,54 ^{BDAC}
F16	39,83±2,63 ^{EBDFC}	4,6±0,83^D	27,13±1,99 ^{EDC}	3,88±0,74^D	406,92±0,01 ^{FCEGD}	370,73±0,03 ^{EBDACF}	0,19±0,01 ^B	8,027±1,50 ^{EBDACF}
F17	43,03±2,84 ^{EBDAC}	18,17±5,49 ^{BCD}	26,44±2,12 ^{EFDC}	13,67±5,19 ^{BCD}	413,2± 0,01 ^{FCEGD}	329,76±0,04 ^{EBDACF}	0,67±0,34 ^{BA}	6,36±2,24 ^{EBDCF}
F19	28,43±2,35 ^{GF}	8,14±2,44 ^{CD}	18,17±1,54 ^{EF}	6,92±2,33 ^{CD}	456,84±0,01 ^{FCEBD}	398,74±0,04 ^{EBDAC}	0,93±0,40 ^{BA}	7,36±1,57 ^{EBDACF}
F20	39,8±2,72 ^{EBDFC}	12,46±3,51 ^{CD}	25,06±1,97 ^{EFDC}	10,31±2,68 ^{BCD}	420,98±0,01 ^{FCEGD}	335,86±0,05 ^{EBDACF}	0,19±0,01 ^B	8,72±2,36 ^{EBDAC}
F21	51,5±3,22 ^{BA}	10,54±2,09 ^{CD}	31,75±2,11 ^{BAC}	8,17±1,59 ^{CD}	467,69±0,01 ^{FCEBD}	394,63±0,03 ^{EBDAC}	0,42±0,23 ^B	5,69±1,22 ^{EDCF}
F22	39,66±4,08 ^{EBDFC}	14,17±2,43 ^{CD}	30,07±3,06 ^{BDC}	10,98±1,89 ^{BCD}	427,62±0,01 ^{FCEGD}	398,38±0,03 ^{EBDAC}	2,03±0,65 ^{BA}	7,491±1,43 ^{EBDACF}
F24	49,16±3,85 ^{BAC}	19,83±3,01 ^{BC}	29,71±2,45 ^{BDC}	13,8±2,03 ^{B^{CD}}	382,28±0,01 ^{FG}	389,27±0,02 ^{EBDACF}	1,19±0,50 ^{BA}	4,09±1,06 ^{EDF}
F25	21,3±1,78^G	10,51±1,78 ^{CD}	16,82±1,52^F	8,343±1,47 ^{CD}	584,39±0,02^A	382,34±0,03 ^{EBDACF}	0,88±0,40 ^{BA}	7,25±1,35 ^{EBDACF}
Moyenne	38,57 ^A	10,51 ^B	25,62 ^A	8,74 ^B	429,51 ^A	366,84 ^B	1,05 ^B	7,16 ^A
Cv (%)	39,59	70,98	43,17	70,17	40,349	16,14	73,4	69,97
p ≤ 0,05	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Tot=nombre total de cabosses produites (saines+rongées+pourries+autres), Ncab=nombre de cabosses saines, Mmcab=masse moyenne de cabosses saines, Tcp= taux de cabosses pourries

3.1.1.6.3.2. Nombre de fèves normales, de fèves plates et rendements des familles d'hybrides dans les zones expérimentales

Les résultats des analyses ont montré des différences significatives entre les familles d'hybrides (Tableau XXXVI). Sur l'ensemble des hybrides, le nombre de fèves normales par cabosse enregistré, a été de 40,53 fèves normales dans la zone de Divo, contre une moyenne de 26,57 fèves normales par cabosse dans la zone de Toumodi. La famille F25 (46,2 fèves normales) a obtenu plus de fèves normales par cabosse et la famille F24 (34,2 fèves normales) moins de fèves normales dans la zone de Divo. Par contre, dans la zone de Toumodi, la famille F22 a produit plus de fèves normales avec une moyenne de 39,53 et la famille F9 en a produit moins de fèves normales avec une moyenne de 8,78 fèves normales.

Pour les fèves plates, les valeurs moyennes enregistrées ont été de 1,5 dans la zone de Divo et de 0,73 dans la zone de Toumodi. La famille F22, a produit plus de fèves plates (2,8 fèves plates). Par contre, les familles F6 (0,83 fèves plates), F2 (0,77 fèves plates), F10 (0,67 fèves plates) et F25 (0,6 fèves plates) ont produit moins de fèves plates dans la zone de Divo. Dans la zone de Toumodi, les familles F5 (1,8 fèves plates) et F9 (1,8 fèves plates) ont produit plus de fèves plates par rapport à la famille F19 qui n'a produit aucune fève plate.

Pour ce qui concerne le rendement potentiel, la moyenne enregistrée a été de 1928,39 kg/ha dans la zone de Divo, contre une moyenne de 641,4 kg/ha dans la zone de Toumodi. Les meilleurs rendements potentiels à Divo ont été obtenus par les familles F21 (2808,4 kg/ha), F8 (2372,1 kg/ha) et F10 (2303,9 kg/ha) ; à Toumodi, par les familles F7 (1454 kg/ha) et F17 (1015 kg/ha). Par contre, les faibles rendements potentiels ont été obtenus par la famille F5 avec des moyennes de 1345,9 kg/ha dans la zone de Divo. Dans la zone de Toumodi, excepté les familles F14, F22 et F24, toutes les autres familles d'hybrides ont affiché de faibles rendements potentiels compris entre 261,1 kg/h et 757,3 kg/ha.

Quant au rendement réel, les valeurs moyennes enregistrées sur l'ensemble des familles d'hybrides ont été de 1276,52 kg/ha dans la zone de Divo, contre 506,52 kg/ha dans la zone de Toumodi. Les meilleurs rendements réels ont été obtenus par les familles F21 (1723,8 kg/ha) dans la zone de Divo et F7 (1119, kg/ha) dans la zone de Toumodi. Par contre, les faibles rendements réels ont été obtenus par les familles F2 (863,4 kg/ha) dans la zone de Divo. Dans la zone de Toumodi, l'ensemble des familles a un rendement faible variant de 208,1 kg/h à 525,5 kg/ha, sauf les familles F14, F17, F20, F22, F24 et F25.

Tableau XXXVI: Nombre de fèves et rendements des familles d'hybrides dans les zones expérimentales

	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
Famille	Nfn/cab	Nfn/cab	Nfp/cab	Nfp/cab	Rdtp (kg/ha)	Rdtp (kg/ha)	Rdtr (kg/ha)	Rdtr (kg/ha)
F1	39,03±1,56 ^{FGDE}	17,17±3,21 ^{LNMKJ}	2,23±0,70 ^{BAC}	0,7±0,38 ^{EBDC}	1905,5±164,62 ^{FCEBD}	448,1±170,52 ^C	1219,7 ±114,22 ^{EBDC}	394,3±151,42 ^C
F2	42,83±1,57 ^{BDAC}	32,88±3,11 ^{EBDAC}	0,77±0,20^P	0,9±0,36 ^{EBDAC}	1424,9± 15,25 ^{FE}	618,7±151,27 ^C	863,4±82,07^E	440,8±98,16 ^C
F3	39,3±1,93 ^{FGDE}	22,5±3,00 ^{LGIFKHJ}	1,13±0,52 ^{DC}	0,5±0,28 ^{EDC}	1846,3±121,22 ^{FCEBD}	358,4±135,28 ^C	1158,1±88,87 ^{EBDC}	278,4±98,69 ^C
F4	45,2±1,37 ^{BA}	39 ±2,46 ^{BA}	1,3±0,36 ^{BDC}	1,65±0,54 ^{BA}	1766±152,20 ^{FCEBD}	310,4±55,99 ^C	1206,5± 115,77 ^{EBDC}	240±38,19 ^C
F5	39,3±1,03 ^{FGDE}	18,18±3,47 ^{LIMKJ}	1,03±0,27 ^{DC}	1,8±0,65^A	1345,9±155,22^F	261,1±86,3 ^C	927,4±113,37 ^{ED}	208,1±72,29 ^C
F6	42,3 ±1,19 ^{BDAC}	37±2,34 ^{BAC}	0,83±0,17^D	0,93±0,36 ^{EBDAC}	2134,4±175,87 ^{CEBD}	670,5±237,96 ^C	1498,7±132,89 ^{BAC}	525,5±188,20 ^C
F7	43,73±1,40 ^{BAC}	38,77±1,39 ^{BA}	1,37±0,36 ^{BDC}	0,37±0,15 ^{EDC}	1831,4±156,90 ^{FCEBD}	1454±227,68^A	1177,7±80,35 ^{EBDC}	1119,9±195,49^A
F8	41,2±1,43 ^{FBDEC}	9,7±2,90 ^{NM}	2,5±0,88 ^{BA}	0,53±0,3 ^{EDC}	2372,1±153,84 ^B	395,7±83,15 ^C	1428,6±113,67 ^{BDAC}	286,9±62,81 ^C
F9	41±1,06 ^{FBDEC}	8,78±2,39^N	1±0,34 ^{DC}	1,8±0,61^A	2208,8±195,28 ^{CBD}	512,1±133,24 ^C	1485,6±145,42 ^{BAC}	301,8±70,39 ^C
F10	38,8±1,42 ^{FGDE}	28,93±3,67 ^{EGDFC}	0,67±0,19 ^D	0,13±0,09 ^{ED}	2303,9±145,4 ^B	426,3±74,25 ^C	1647,6±113,36 ^{BA}	388,6±66,38 ^C
F11	36±1,12 ^{GH}	14,67±3,43 ^{LNLM}	1,7±0,48 ^{BDAC}	0,3±0,16 ^{EDC}	1768,9±169,01 ^{FCEBD}	382±100,93 ^C	1209,9±119,71 ^{EBDC}	340,6±88,95 ^C
F12	43,6±1,68 ^{BAC}	31,4±3,08 ^{EBDAC}	1,3±0,41 ^{BDC}	0,63±0,23 ^{EDC}	1776,2±126,63 ^{FCEBD}	467±119,25 ^C	1197,7±96,08 ^{EBDC}	349,7±91,05 ^C
F13	40,13±1,41 ^{FGDEC}	26,08±2,66 ^{EGIFH}	1,07±0,26 ^{DC}	0,95±0,39 ^{EBDAC}	2244,5±164,57 ^{CB}	415,8±83,02 ^C	1502,1±122,57 ^{BAC}	339,4±70,71 ^C
F14	37,68±1,27 ^{FGH}	38,03±2,66 ^{BA}	1,1±0,26 ^{DC}	0,67±0,39 ^{EBDC}	1556,8±148,86 ^{FCED}	1014±141,65 ^{BC}	1037,1±111,92 ^{EDC}	831±112,32 ^{BC}
F15	38,03±1,8 ^{5FGEH}	20,37±1,54 ^{LIKHI}	2,3±0,75 ^{BAC}	0,3±0,29 ^{EDC}	1827,7±130,74 ^{FCEBD}	336,9±64,64 ^C	1298,2±93,27 ^{EBDAC}	286,3±53,99 ^C
F16	38,88±1,65 ^{FGDE}	28,23±3,34 ^{EGDFH}	1,83±0,50 ^{BDAC}	0,7±0,15 ^{EBDC}	1879,2±131,28 ^{FCEBD}	258,3±40,39 ^C	1272,7±98,87 ^{EBDAC}	217,8±36,24 ^C
F17	37,9±1,35 ^{FGEH}	16,77±3,66 ^{LNMK}	2,55±0,75 ^{BA}	1,03±0,31 ^{BDAC}	2152±156,90 ^{CBD}	1015±351,24 ^{BC}	1308,1±112,5 ^{EBDAC}	799,7±341,88 ^{BC}
F19	43,77±1,55 ^{BAC}	24,65±5,7 ^{EGIFKHJ}	1,83±0,54 ^{BDAC}	0±00^E	1500,3±124,62 ^{FED}	570,1±175,32 ^C	961,2±86,00 ^{ED}	493,3±162,33 ^C
F20	41,98±1,11 ^{BDEC}	21,83±3,49 ^{LGIKHI}	1,4±0,42 ^{BDC}	0,37±0,25 ^{EDC}	1900,7±145,34 ^{FCEBD}	757,3±217,58 ^C	1164,7±99,44 ^{EBDC}	626,4±166,42 ^{BC}
F21	42,67±1,29 ^{BDAC}	25,58±3,84 ^{EGIFHJ}	1,8±0,42 ^{BDAC}	0,53±0,26 ^{EDC}	2808,4 ± 176,03^A	617,4±108,28 ^C	1723,8±115,16^A	493,3±87,41 ^C
F22	38,63±1,88 ^{FGDE}	39,53±1,93^A	2,8±0,89^A	0,43±0,17 ^{EDC}	1995,5±182,12 ^{FCEBD}	919,5±152,85 ^{BC}	1496,5±136,55 ^{BAC}	717,4±121,08 ^{BC}
F24	34,2±2,04^H	38,5±1,57 ^{BA}	1,77±0,59 ^{BDAC}	0,5±0,17 ^{EDC}	2262,4±185,50 ^{CB}	988,5±150,25 ^{BC}	1353,2±112,55 ^{EBDAC}	722,2±117,69 ^{BC}
F25	46,3±1,78^A	33,03±3,00 ^{EBDAC}	0,6±0,16^P	0,77±0,32 ^{EBDC}	1560,7±150,65 ^{FCED}	691,8±120,81 ^C	1237,8±128,40 ^{EBDAC}	550,9±97,90 ^{BC}
Moyenne	40,53 ^A	26,57 ^B	1,5 ^A	0,73 ^B	1928,39 ^A	641,40 ^B	1276,52 ^A	506,52 ^B
CV (%)	20,46	47,12	56,75	58,68	43,68	45,92	46,76	46,83
P < 0,05	<,0001	<,0001	0,0193	0,0229	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Nfn/cab=nombre de fèves normales par cabosse, Nfp/cab=nombre de fèves plates par cabosse, Rdtp=rendement potentiel annuel, Rdtr =rendement réel annuel.

3.1.1.6.4. Effet des zones sur le cumul des paramètres technologiques des familles d'hybrides

3.1.1.6.4.1. Masse moyenne de fèves fraîches par cabosse, masse moyenne d'une fève sèche

Les masses moyennes de fèves fraîches par cabosse et les masse moyenne d'une fève sèches ont varié significativement ($p < 0,0001$) selon les zones (Tableau XXXVII). Sur l'ensemble des familles, la masse moyenne de fèves fraîches par cabosse enregistré a été de 83,61 g dans la zone de Toumodi, contre 79,9 g dans la zone de Divo. La famille F8 a obtenu les meilleures masses de fèves fraîches par cabosse à Toumodi (123,65 g) et la famille F5 (66,05 g) les plus faibles. Par contre, dans la zone de Divo, les arbres de la famille F20 ont produits les meilleures masses de fèves fraîches par cabosse (125,3 g) et ceux de la famille F24 ont enregistré les faibles masses de fèves fraîches par cabosse (66,05 g).

Pour la masse de fèves sèches ou cacao marchand, la moyenne obtenue a été de 1,38 g dans la zone de Divo, contre une moyenne de 1,27 dans la zone de Toumodi. La famille F6 (1,76 g) a obtenu les meilleures masses de cacao marchand et les plus faibles ont été obtenus par les familles F 22 (1,24 g), F19 (1,25 g), F9 (1,25 g) et F22 (1,29 g) dans la zone de Divo. Par contre, dans la zone de Toumodi, les familles F6 et F14 ont obtenu les meilleures masses de cacao marchand avec des valeurs respectives de 1,5 g et 1,47 g. Les faibles masses de cacao marchand ont été obtenues par les familles F 20 (1,1 g), F8 (1,09 g) et F9 (1,09 g).

3.1.1.6.4.2. Longueur et largeur moyennes des fèves sèches

Quant à la longueur et la largeur des fèves sèches (cacao marchand), les valeurs moyennes obtenues ont été de 2,43 cm et 1,28 cm respectivement dans la zone de Divo, contre 2,31 cm et 1,11 cm respectivement dans la zone de Toumodi. La famille F6 a obtenu les fèves sèches de grandes tailles respectivement 2,61 cm ; 1,49 cm et la famille F19 a obtenu les petites dimensions respectives de 2,30 cm et de 1,16 cm dans la zone de Divo. Dans la zone de Toumodi, les familles F6 (2,49 cm) et F21 (2,47 cm) ont enregistré les meilleures performances pour la longueur des fèves sèches et F6 (1,33 cm) pour la largeur des fèves sèches. Par contre, la famille F7 a obtenu les petites dimensions des fèves sèches avec des valeurs respectives de 2,11 cm et de 0,68 cm (Tableau XXXVII).

Tableau XXXVII : Cumul des paramètres technologiques des familles d'hybrides selon les zones expérimentales

	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
Familles	Mff/cab (g)	Mff/cab (g)	Mmfs (g)	Mmfs	Longfs (cm)	Longfs (cm)	Largfs (cm)	Largfs (cm)
F1	75,5 3±0,01 ^{BDC}	49,51±0,01 ^{BC}	1,54±0,01 ^C	1,38±0,02 ^C	2,38±0,02 ^{HEGF}	2,41±0,03 ^{CB}	1,38±0,04 ^C	0,82±0,03 ^K
F2	75,25±0,00 ^{BDC}	81,76±0,01 ^{BAC}	1,31±0,01 ^{JI}	1,21±0,00 ^{JI}	2,32±0,02 ^{JI}	2,37±0,01 ^{CEBD}	1,25±0,03 ^{GIH}	1,15±0,01 ^{CEB}
F3	78,64±0,00 ^{BDC}	82,97±0,02 ^{BAC}	1,41±0,01 ^F	1,24±0,01 ^{GIH}	2,50±0,02 ^{CB}	2,29±0,01 ^{GEFH}	1,34±0,04 ^{DE}	0,89±0,02 ^{FCJ}
F4	72,67±0,01 ^{BDC}	91,42±0,01 ^{BAC}	1,3±0,01 ^{HI}	1,35±0,01 ^D	2,42±0,03 ^{EDF}	2,39±0,01 ^{CBD}	1,32±0,04 ^E	1,23±0,02 ^{FCB}
F5	73,83±0,00 ^{BDC}	32,31±0,00^C	1,49±0,01 ^D	1,2±0,00 ^{HI}	2,45±0,02 ^{CD}	2,30±0,01 ^{GEFH}	1,40±0,05 ^B	1,18±0,02 ^{FCEBD}
F6	87,72±0,00 ^{BDAC}	111,17±0,02 ^{BA}	1,76±0,01^A	1,5±0,01^A	2,61±0,02^A	2,49±0,01^A	1,49±0,05^A	1,33±0,02^A
F7	78,35±0,01 ^{BDC}	83,86 ±0,01 ^{BAC}	1,44±0,01 ^E	1,21±0,01 ^{JI}	2,46±0,04 ^{EDF}	2,11±0,03^K	1,36±0,04 ^{DC}	0,68±0,02^L
F8	81,64±0,00 ^{BDAC}	123,65±0,01^A	1,33±0,01 ^{HI}	1,09±0,00 ^L	2,45±0,02 ^{CD}	2,24±0,01 ^{IH}	1,23±0,03 ^I	0,99±0,01 ^{FH}
F9	66,62±0,00 ^{DC}	062,68±0,01 ^{BAC}	1,25±0,01^K	1,09±0,00 ^L	2,347±0,02 ^{HJGI}	2,17±0,01 ^{KJ}	1,2±0,03 ^J	1,12±0,01 ^{FEG}
F10	76,28±0,01 ^{BDC}	75,28±0,01 ^{BAC}	1,28±0,01 ^J	1,28±0,01 ^{EF}	2,34±0,02 ^{HJI}	2,31±0,01 ^{GEFH}	1,24±0,04 ^I	1,13±0,02 ^{EGD}
F11	69,67±0,01 ^{DC}	58,23±0,01 ^{BC}	1,5±0,01 ^D	1,17±0,01 ^K	2,54±0,03 ^B	2,16±0,01 ^{KJ}	1,32±0,04 ^E	1,083±0,02 ^G
F12	83,92±0,00 ^{BDAC}	96,99±0,01 ^{BA}	1,37±0,01 ^G	1,31±0,01 ^{ED}	2,54±0,02 ^B	2,33±0,01 ^{GEFD}	1,28±0,03 ^F	0,88±0,01 ^J
F13	76,48±0,01 ^{BDC}	99,18±0,01 ^{BA}	1,30±0,01 ^{JI}	1,16±0,01 ^K	2,39±0,02 ^{HEGDF}	2,2±0,01 ^{IJ}	1,24±0,03 ^{IH}	1,12±0,01 ^{EG}
F14	77,8±0,01 ^{BDC}	98,09±0,01 ^{BA}	1,57±0,01 ^B	1,47±0,01^A	2,50±0,02 ^{CB}	2,26±0,01 ^{GIFH}	1,36±0,04 ^{DC}	1,2±0,01 ^B
F15	82,77±0,01 ^{BDAC}	61,83±0,00 ^{BAC}	1,4±0,01 ^F	1,42±0,01 ^B	2,37±0,03 ^{HEGIF}	2,34±0,01 ^{CEFD}	1,2±0,03 ^{GIFH}	1,21±0,01 ^{CB}
F16	80,18±0,01 ^{BDAC}	104,06±0,01 ^{BA}	1,35±0,01 ^{HG}	1,33±0,01 ^D	2,45±0,04 ^{CD}	2,31±0,01 ^{GEFH}	1,28±0,04 ^{GF}	1,19±0,01 ^{CEBD}
F17	80,14±0,00 ^{BDAC}	65,12±0,01 ^{BAC}	1,37±0,01 ^G	1,25±0,01 ^{GIH}	2,40±0,03 ^{EGDF}	2,22±0,01 ^{IJ}	1,25±0,04 ^{GIFH}	1,17±0,01 ^{CEBD}
F19	78,02±0,01 ^{BDC}	88,77±0,01 ^{BAC}	1,25±0,01^K	1,41±0,00 ^{CB}	2,30±0,02^J	2,37±0,01 ^{CEBD}	1,16±0,04^K	1,01±0,02 ^{CH}
F20	125,3±0,00^A	55,16±0,01 ^{BC}	1,3±0,01 ^{HI}	1,1±0,00^L	2,43±0,02 ^{ED}	2,16±0,01 ^{KJ}	1,26±0,03 ^{GIFH}	0,96±0,01 ^{FC}
F21	75,54±0,00 ^{BDC}	87,43±0,01 ^{BAC}	1,29±0,01^J	1,28±0,00 ^{GF}	2,49±0,02 ^{CB}	2,47±0,01^A	1,23±0,03 ^I	1,14±0,01 ^{FCED}
F22	77,15±0,00 ^{BDC}	96,7±0,01 ^{BA}	1,24±0,01^K	1,27±0,00 ^{GFH}	2,49±0,02 ^{CB}	2,34±0,01 ^{CEBD}	1,19±0,04 ^J	1,15±0,01 ^{FCED}
F24	66,05±0,00^D	88,92±0,01 ^{BAC}	1,25±0,01 ^K	1,2±0,00 ^J	2,37±0,02 ^{HGIF}	2,26±0,01 ^{GIH}	1,23±0,03 ^I	1,0 ±0,01 ^{FCH}
F25	99,4±0,01 ^{BA}	84,46±0,01 ^{BAC}	1,54±0,01 ^C	1,34±0,00 ^D	2,43±0,02 ^{ED}	2,42±0,01 ^B	1,32±0,04 ^E	1,16±0,01 ^{FCED}
Moyenne	79,9 ^B	83,61 ^A	1,38 ^A	1,27 ^B	2,43 ^A	2,31 ^B	1,28 ^A	1,11 ^B
Cv (%)	4,91	6,44	15,18	14,74	8,18	14,59	9,52	14,59
p ≤ 0,05	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Mff/cab=masse de fèves fraîches, Mmfs= masse de fèves fraîches, Longfs=longueur de fèves sèches, Largfs=largueur de fèves sèches

3.1.1.7. Structuration morphologiques des cabosses, technologiques et de production des familles d'hybrides dans les différentes zones

3.1.1.7.1. Structuration des familles d'hybrides dans la zone de Divo

L'analyse en composantes principales (ACP) des 23 familles d'hybrides a fait ressortir deux composantes principales qui expriment l'ensemble de la variance totale pour une contribution de 55,08 % (Tableau XXXVIII).

La composante F1 contribuant pour 33,08 % de la variabilité totale avec une valeur propre de 4,93 est la composante du rendement. Elle est expliquée par les variables tels que le nombre total de cabosses (Tot), le nombre de cabosses saines (Ncab), le rendement potentiel annuel (Rdtp) et le rendement réel annuel (Rdtr). Les coefficients de corrélation entre ces variables et la composantes F1 ont été respectivement 0,92 ; 0,88 ; 0,75 et 0,72.

La composante F2, contribuant pour 24,06 % de la variabilité totale avec une valeur propre de 4,04 est celle de la morphologie des cabosses. Elle est expliquée par les variables taille de cabosses (Taicab), volume de cabosses (Volcab), poids moyens de cabosses (Pmcab) avec coefficients de corrélation respectifs de 0,89 ; 0,82 et 0,83. Les deux axes (F1 et F2) qui ont eu une contribution de 55,08 % sont considérés pour la projection des familles d'hybrides dans le plan factoriel (Figure 25).

La classification ascendante hiérarchique (Figure 26) a indiqué trois (03) groupes de familles d'hybrides dans la zone de Divo. Le premier groupe est composé des familles d'hybrides F21, F8, F13, F22, F15, F17, F10, F9 et F24. Ce groupe a été caractérisé par de fortes valeurs pour les variables de rendement et de faibles valeurs pour les variables morphologiques des cabosses. Le deuxième groupe est constitué des familles d'hybrides F20, F16, F3, F7, F1, F4, F2 et F5. Ce groupe a été caractérisé par de fortes valeurs pour la variable taux de cabosses pourries et largeurs de fèves sèches.

Le troisième groupe est composé des familles d'hybrides F25, F6, F12 et F11. Ce groupe est caractérisé par de fortes valeurs pour les variables morphologiques des cabosses, poids moyens de cacao marchand et de faibles valeurs pour les variables du rendement et taux de cabosses pourries.

Tableau XXXVIII : Valeur propre, variance exprimée et contribution des variables de production à la formation des composantes de l'analyse en composantes principales des hybrides dans la zone Divo

Composantes	F1	F2
Valeur propre	4,93	4,04
Variabilité (%)	33,08	26,06
% cumulé	30,79	56,01
Epcortex	0,07	0,67
Forcab	0,5	0,44
Taicab	-0,31	0,89
Volcab	-0,46	0,82
Tot	0,92	0,09
Ncab	0,88	0,21
Mmcab	-0,41	0,83
Tcp	-0,29	0,68
Mff/cab	-0,34	0,53
Mmfs	-0,68	0,18
Longfs	-0,31	0,62
Largfs	-0,63	-0,06
Nfn	-0,56	0,23
Nfp	0,57	0,06
Rdtp	0,75	0,53
Rdtr	0,72	0,59

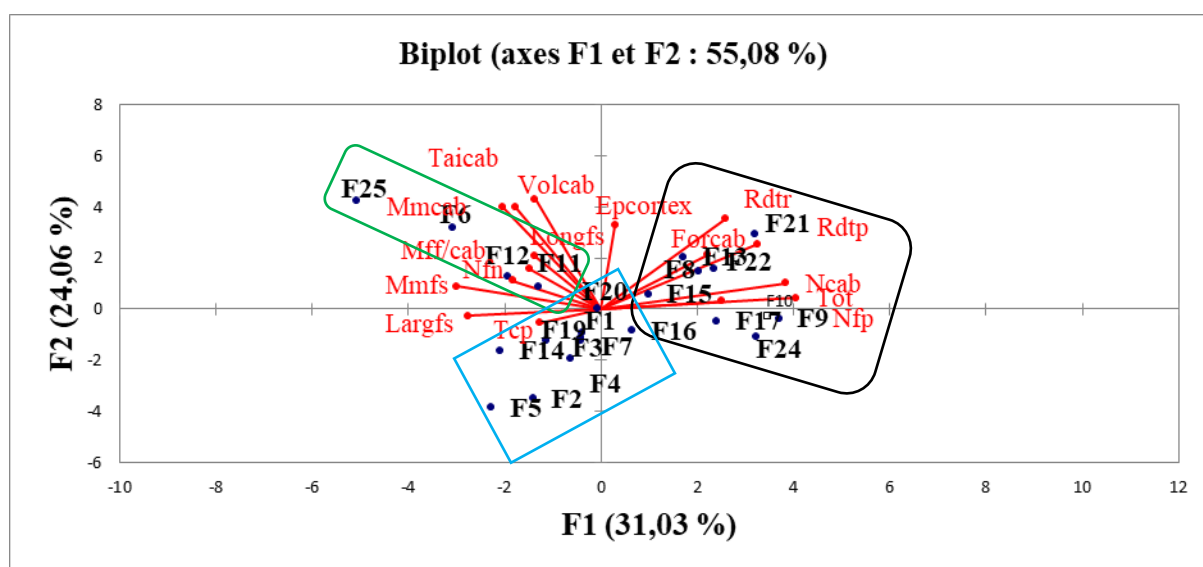


Figure 25 : Biplot de corrélation de l'analyse en composantes principales indiquant les relations entre les variables de production et les hybrides dans la zone de Divo

Epcortex= épaisseur de cortex, Forcab=forme cabosse, Taicab=taille cabosse, volcab= volume cabosse, Tot= cabosse totale, Ncab= nombre de cabosses saines, Mmcab=masse moyenne de cabosse, Tcp=taux cabosse pourrie, Mff/cab=masse de fèves fraîches par cabosse, Mmfs=masse moyenne de fèves sèches, Longfs= longueur de fèves sèches, Largfs=largueur de fèves sèches, Nfn=nombre de feves normales, Nfp= nombre de fèves plates, Rdtp=rendement potentiel annuel, Rdtr=rendement réel annuel.

□ : Famille de la classe I □ : Famille de la classe II, □ : Famille de la classe III

● Point observation, ● Point variable. La distance entre 2 observations est approximation de la distance de Mahalanobis. Les familles sont regroupées suivant le critère d'agrégation de Ward.

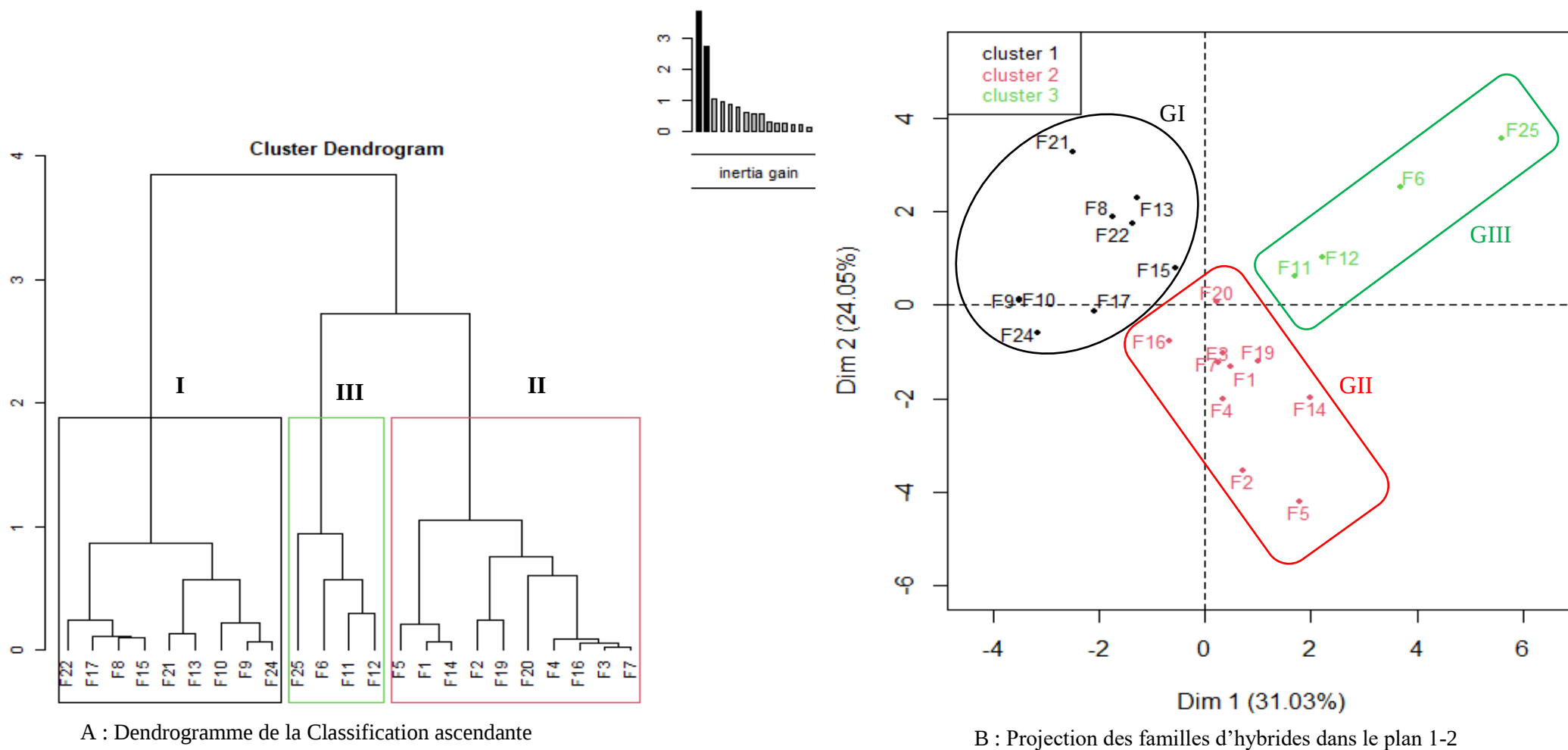


Figure 26 : Structuration des familles d'hybrides de 9 ans par groupe homogène selon les variables de production dans la zone de Divo

3.1.1.7.2. Structuration des familles d'hybrides dans la zone à pluviométrie déficitaire de Toumodi

L'analyse en composantes principales (ACP) des 23 familles d'hybrides a fait ressortir quatre composantes principales qui expriment l'ensemble de la variance totale pour une contribution de 58,60 % (Tableau XXXIX).

Tableau XXXIX: Valeur propre, variance exprimée et contribution des variables de production à la formation des composantes de l'analyse en composantes principales des hybrides dans la zone déficitaire de Toumodi

	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	5,27	4,01	2,19	1,36
Variabilité (%)	33,73	24,87	13,70	8,51
% cumulé	32,94	58,60	71,70	80,21
Epcortex	0,12	0,68	-0,52	-0,03
Forcab	-0,18	-0,36	0,15	0,02
Taicab	0,01	0,86	-0,42	-0,08
Volcab	0,05	0,85	-0,38	-0,08
Tot	0,86	-0,42	-0,11	-0,19
Ncab	0,90	-0,32	-0,16	-0,21
Mmcab	0,72	0,45	0,29	0,37
Tcp	-0,81	-0,12	-0,27	-0,38
Mff/cab	0,40	0,58	0,45	0,45
Mmfs	0,17	0,64	0,29	-0,47
Longfs	-0,17	0,70	0,39	-0,32
Largfs	-0,22	0,52	0,32	-0,24
Nfn	0,58	0,33	0,49	-0,26
Nfp	-0,40	-0,52	0,43	-0,30
Rdtp	0,93	-0,22	-0,14	-0,22
Rdtr	0,93	-0,15	-0,18	-0,24

Epcortex= épaisseur de cortex, Forcab=forme cabosse, Taicab=taille cabosse, volcab= volume cabosse, Tot= cabosse totale, Ncab= nombre de cabosses saines, Mmcab=masse moyenne de cabosse, Tcp=taux cabosse pourrie, Mff/cab=masse de fèves fraîches par cabosse, Mmfs=masse moyens de fèves sèches, Longfs= longueur de fèves sèches, Largfs=largueur de fèves sèches, Nfn=nombre de feves normales, Nfp= nombre de fèves plates, Rdtp=rendement potentiel annuel, Rdtr=rendement réel annuel.

La composante F1, contribuant pour 33,73 % de la variabilité totale avec une valeur propre de 5,27 est la composante du rendement. Elle est expliquée par le nombre total de cabosses (Tot), le nombre de cabosses saines (Ncab), la masse moyenne d'une cabosse (Mmcab), taux de cabosses pourries (Tcp), le rendement potentiel annuel (Rdtp) et le rendement réel annuel (Rdtr). Les coefficients de corrélation entre ces variables et la composante F1 ont été respectivement 0,86 ; 0,90 ; 0,72 ; -0,81 ; 0,93 et 0,93. La composante F2 contribuant pour 24,87 % de la variabilité totale avec une valeur propre de 4,01 est la composante de la morphologie des cabosses. Elle est expliquée par les variables taille de cabosses (Taicab), volume de cabosses (Volcab), longueur des fèves sèches (Longfs) avec coefficients de corrélation respectifs de 0,86, 0,85, et 0,70. Dans l'ensemble, les deux premiers axes (F1 et F2)

qui ont eu une contribution de 58,60 % sont considérés pour la projection des hybrides dans le plan factoriel (Figure 27).

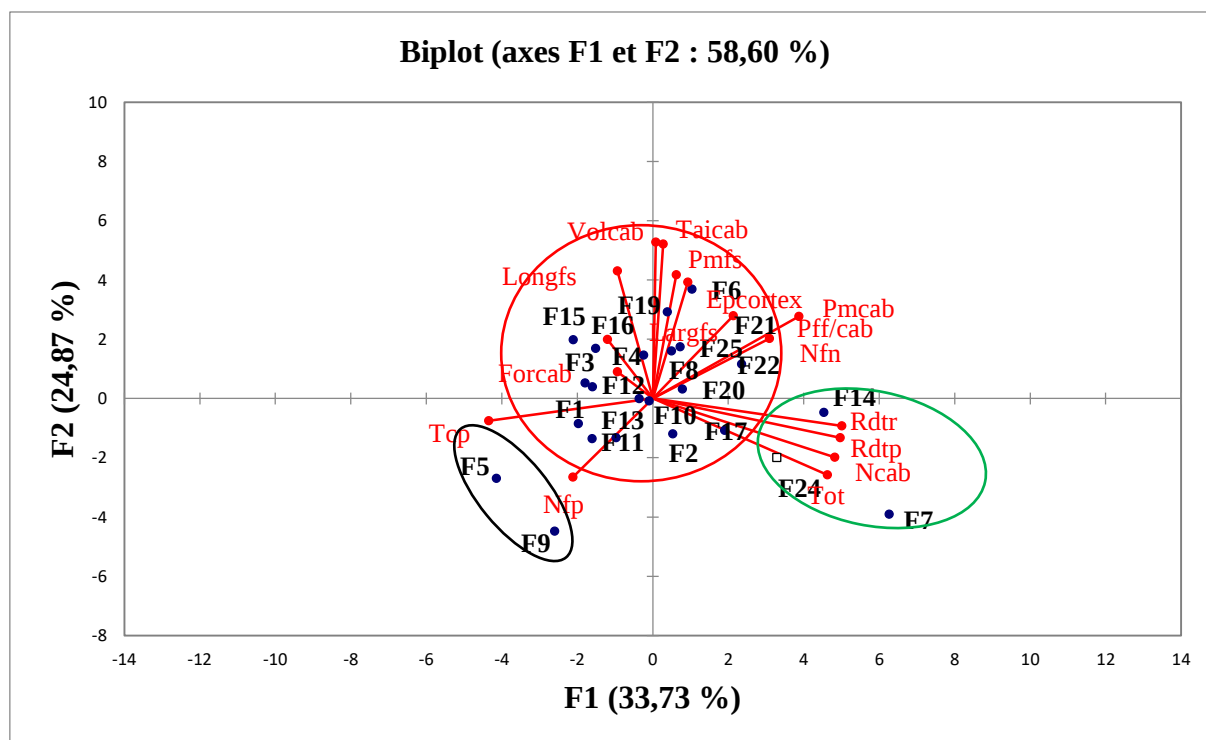


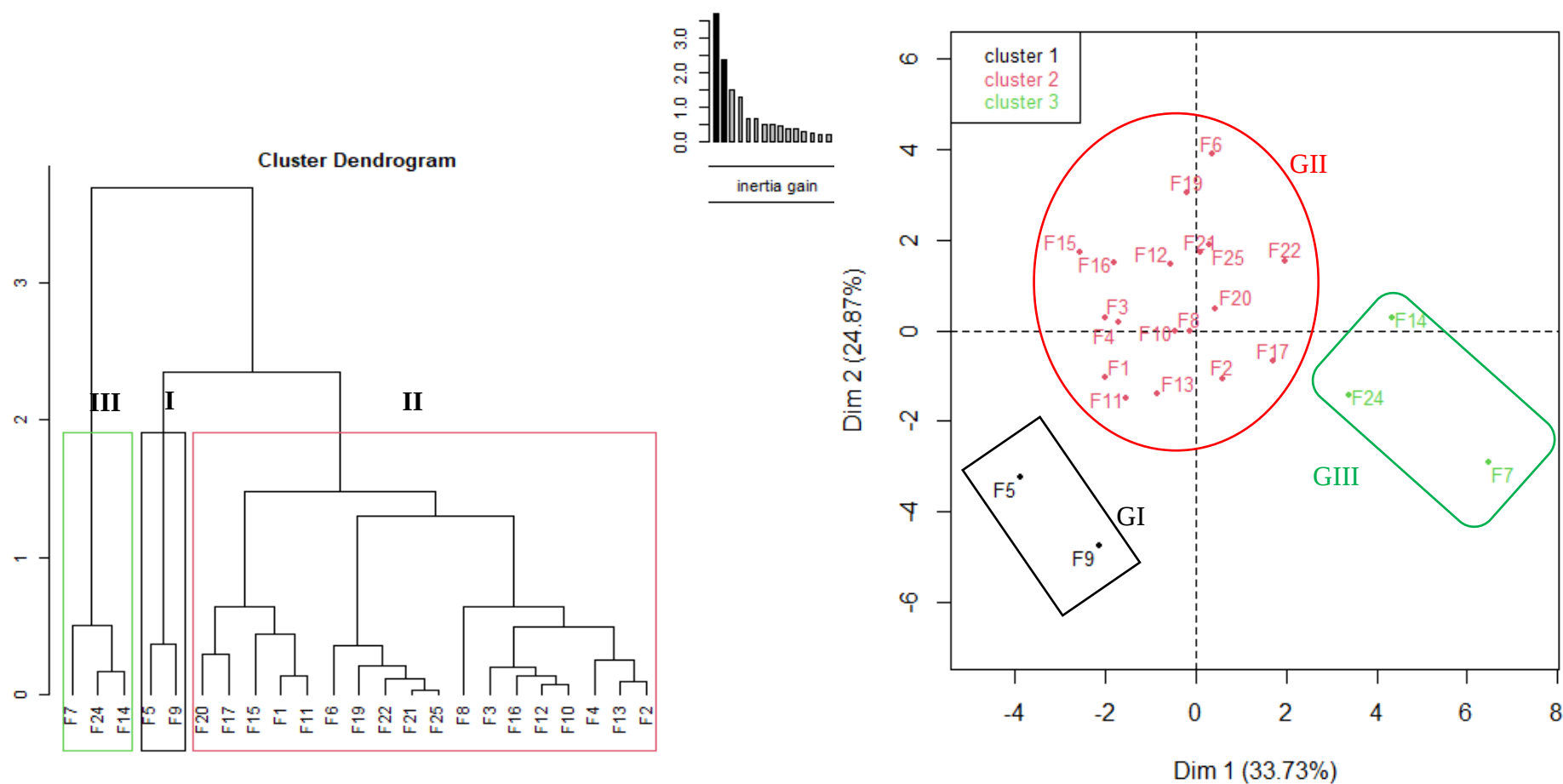
Figure 27 : Biplot de corrélation de l'analyse en composantes principales indiquant les relations entre les variables de production et les hybrides dans la zone déficitaire de Toumodi

Epcortex= épaisseur de cortex, Forcab=forme cabosse, Taicab=taille cabosse, volcab= volume cabosse, Tot= cabosse totale, Ncab= nombre de cabosses saines, Pmcab=poids moyen de cabosse, Tcp=taux cabosse pourrie, pff/cab=poids de fèves fraîches par cabosse, Pmfs= poids moyens de fèves sèches, Longfs= longueur de fèves sèches, Largfs=largueur de fèves sèches, Nfn=nombre de fèves normales, Nfp= nombre de fèves plates, Rdtp=rendement potentiel annuel, Rdtr=rendement réel annuel.

□ : Famille de la classe I □ : Famille de la classe II, □ : Famille de la classe III

● Point observation, ● Point variable. La distance entre 2 observations est approximation de la distance de Mahalanobis. Les familles sont regroupées suivant le critère d'agrégation de Ward.

La classification ascendante hiérarchique (Figure 28) a indiqué trois (03) groupes familles d'hybrides dans la zone à pluviométrie déficitaire de Toumodi. Le premier groupe composé des familles d'hybrides F5 et F9 a été caractérisé par de fortes valeurs pour les variables taux de cabosses pourries, nombre de fèves plates et de faibles valeurs pour les variables morphologiques des cabosses et rendement. Le deuxième groupe est constitué des familles d'hybrides F6, F19, F15, F16, F17, F3, F4, F10, F2, F8, F20, F12, F21, F1, F11, F13, F25 et F22. Ce groupe a été caractérisé par de fortes valeurs pour les variables morphologiques de cabosses et les dimensions des fèves. Le troisième groupe est composé des familles d'hybrides F14, F24 et F7. Ce groupe est caractérisé par de fortes valeurs pour les variables du rendement et de faibles valeurs pour les variables morphologiques des cabosses et du taux de cabosses pourries.



A : Dendrogramme de la Classification ascendante

B : Projection des familles d'hybrides dans le plan 1-2

Figure 28 : Structuration des familles d'hybrides de 9 ans par groupe homogène selon les variables de production dans la zone déficitaire de Toumodi

Conclusion partielle

Les résultats de l'influence de la variabilité pluviométrique dans les différentes zones agro écologiques ont montré des différences significatives entre les familles d'hybrides et leurs témoins à différents types d'âges des parcelles. Les paramètres agro-physiologiques tels que le diamètre, la hauteur des plants, la surface foliaire totale, la masse spécifique foliaire, la teneur en eau et la teneur relative en eau ont été les plus pertinents dans les classifications des familles d'hybrides de trois (03) ans et neufs (09) ans dans les différentes zones. Pour ces paramètres pertinents :

- Six (06) familles d'hybrides (F13, F4, F22, F19, F21 et F15) ont été performantes à la fois à Divo et Toumodi.

Les paramètres de production tels que le nombre total de cabosses produits, le nombre de cabosses, la masse moyenne de fèves fraîches par cabosse, la masse moyenne de fèves sèches, la tailles de fèves sèches, les rendements potentiels annuels et les rendements réels annuels ont mieux discriminé les familles d'hybrides âgées de neuf (09) ans dans les différentes zones.

- Huit (08) familles (F22, F17, F13, F8, F10, F24, F9, F21) ont présenté les meilleures performances dans la région de Divo ;
- Trois (03) familles (F24, F14 et F7) dans la zone déficitaire de Toumodi.
- Une (01) famille d'hybride (F6) a été meilleure à la fois à Divo et à Toumodi pour les paramètres technologiques.

3.1.2. Evaluation des paramètres biochimiques des familles d'hybrides après trois et neuf années de plantation dans les différentes zones.

3.1.2.1. Effet des zones sur la synthèse et l'accumulation des composés biochimiques.

La figure 29 indique les résultats de la synthèse des pigments chlorophylliens et de l'accumulation des métabolites secondaires dans les zones agro écologiques. Des différences significatives ont été observées entre les zones pour la teneur en chlorophylle (a) ($P=0,011$), la teneur en chlorophylle (b) ($P=0,031$), la chlorophylle (c) ($P=0,04$), les chlorophylles totales ($P=0,001$), la teneur en proline ($P<0,01$) et la teneur en phénols totaux ($p=0,044$). Toutes les teneurs en pigments chlorophylliens et celles des phénols totaux ont été plus importantes dans la zone Divo contrairement aux valeurs enregistrées dans la zone de Toumodi. A l'opposé, les teneurs en proline ont été plus importantes dans la zone de Toumodi que dans la zone de Divo.

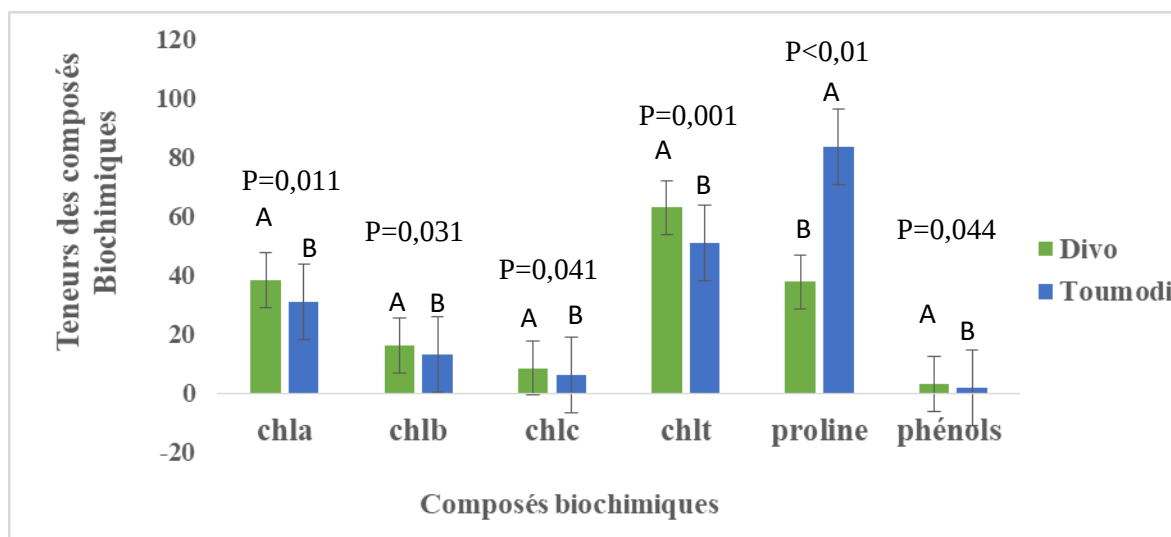


Figure 29 : Variation des teneurs des composés biochimiques selon les zones

3.1.2.2. Effet de l'âge des hybrides sur la synthèse et l'accumulation des composés biochimiques

A l'exception des teneurs en Chlorophylles (a) ($p=0,55$) et en phénols ($p=0,65$) où les teneurs ont été similaires entre l'âge des familles d'hybrides, l'analyse des résultats des autres composés biochimiques ont montré des différences significatives ($P<0,001$) entre des familles d'hybrides (Figure 30). En effet, les teneurs en chlorophylles (b), (c), chlorophylles (totales) et en proline, ont été plus importantes chez les familles d'hybrides âgées de 9 ans contrairement à celles de 3 ans sur l'ensemble des zones.

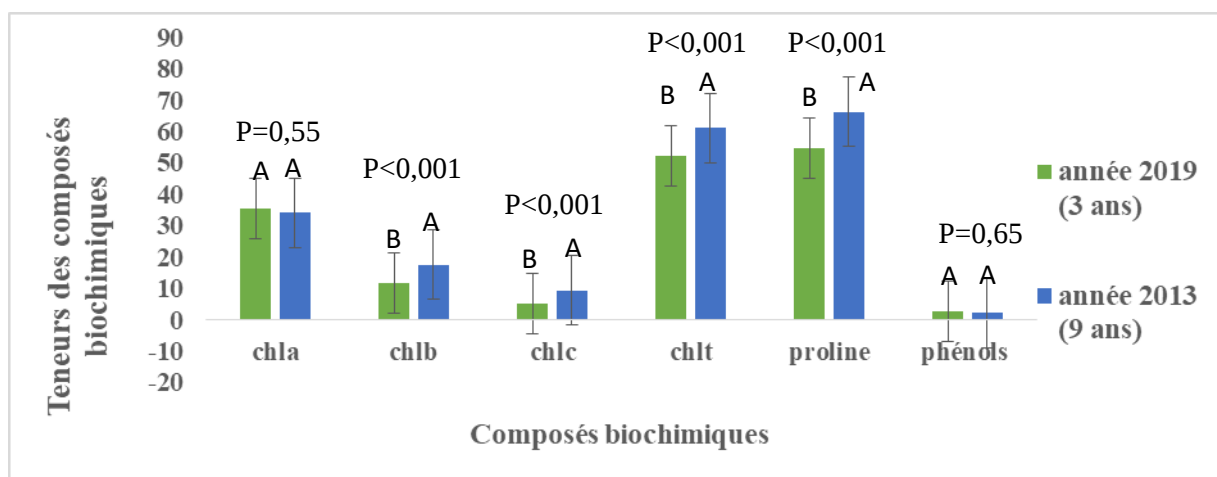


Figure 30 : Variation des teneurs des composés biochimiques selon l'âge des hybrides

3.1.2.3. Effet de l'âge des hybrides sur la synthèse et l'accumulation des composés biochimiques la zone à pluviométrie normale de Divo

Les résultats de l'effet de l'âge des hybrides sur la synthèse et l'accumulation des composés biochimiques ont montré des différences significatives ($P<0,001$) dans la zone à pluviométrie normale de Divo (Figure 31), excepté les phénols ($p=0,149$). Les teneurs de tous les composés biochimiques ont été plus importantes chez les hybrides de 9 ans et moins importantes chez eux de 3 ans contrairement à la teneur en phénols, où elle a été similaire.

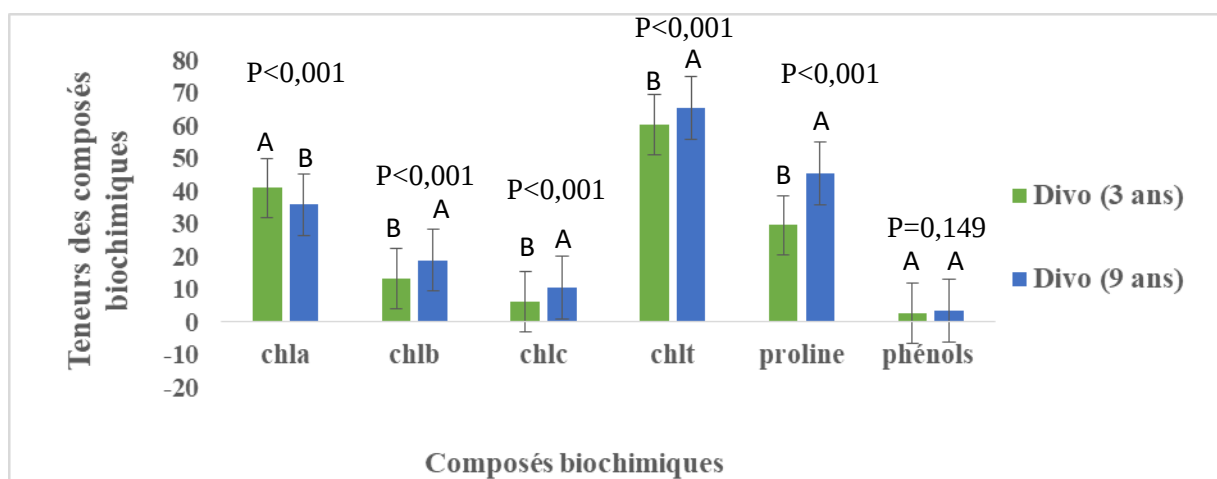


Figure 31 : Variation des teneurs des composés biochimiques selon l'âge des familles d'hybrides dans la zone de Divo

3.1.2.4. Effet de l'âge des hybrides sur la synthèse et l'accumulation des composés biochimiques dans la zone à pluviométrie déficitaire de Toumodi

En zone de pluviométrie déficitaire de Toumodi, les résultats des analyses pour le facteur âge des hybrides (Figure 32) ont significativement influencé la synthèse et l'accumulation des composés biochimiques ($P < 0,001$), excepté les phénols ($p = 0,349$). Les teneurs de tous les composés biochimiques ont été plus importantes chez les familles d'hybrides âgées de 9 ans contrairement à celles de 3 ans, excepté les teneurs en phénols totaux, où elles ont été similaires en fonction de l'âge des hybrides.

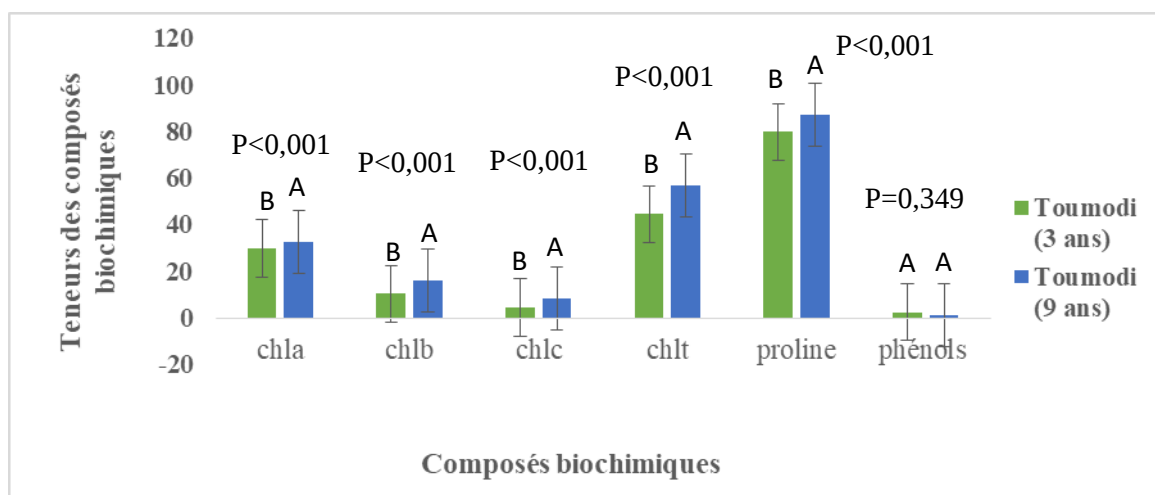


Figure 32 : Variation des composés biochimiques en fonction de l'âge des parcelles en zone sèche

3.1.2.5. Synthèse des pigments chlorophylliens et accumulation des métabolites secondaires des familles d'hybrides de 3 ans

3.1.2.5.1. Synthèse des pigments chlorophylliens des familles d'hybrides de 3 ans

Le Tableau XL présente les différents classements des familles d'hybrides de 3 ans en fonction des synthèses des pigments chlorophylliens. Des différences significatives ($p < 0,0001$) ont été observées entre les familles d'hybrides de 3 ans avec une interaction zone*famille ($p < 0,0001$) significative. Les valeurs moyennes enregistrées pour la teneur en chlorophylle (a), ont été de 40,86 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Divo et de 29,70 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Toumodi. Pour la chlorophylle (b), elles ont été de 29,70 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Divo et de 13,16 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Toumodi. Pour la chlorophylle (c), les moyennes ont été de 6,11 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Divo, contre 4,38 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Toumodi. Pour les chlorophylles totales, les moyennes enregistrées ont été de 59,71 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Divo et de 44,40 dans la zone de Toumodi.

Les arbres de la famille F22 (62,30 $\mu\text{g/g}$ MF) ont obtenu les teneurs de chlorophylle (a) dans la zone de Divo et ceux de la famille F20 les plus faibles (23,99 $\mu\text{g/g}$ MF).

Tableau XL : Synthèse des pigments chlorophylliens des hybrides de 3 ans selon les zones expérimentales

famille	Chlorophylles A (µg/g MF)		Chlorophylles B (µg/g MF)		Chlorophylles C (µg/g MF)		Chlorophylles totales ((µg/g MF)	
	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
F1	49,89±9,99 ^{BDAC}	20,14±1,12 ^{CD}	18,50±4,45 ^{BA}	8,39±0,45 ^{DCE}	13,05±3,36 ^{BA}	2,71±0,17 ^{FED}	81,45±17,80 ^{BA}	31,24±1,74 ^{GHFI}
F2	50,86±7,13 ^{BAC}	27,43±3,17 ^{BCD}	14,71±4,10 ^{BA}	11,67±1,09 ^{DC}	5,46±1,54 ^{CD}	2,68±0,29 ^{FED}	71,05±12,29 ^{BDAC}	41,79±4,52 ^{GHFEI}
F3	49,13±2,72 ^{BDAC}	36,42±7,23 ^{BC}	15,99±1,75 ^{BA}	18,57±2,39 ^B	5,19±0,45 ^{CD}	5,85±0,64 ^{BCD}	70,31±4,47 ^{BDAC}	60,85±7,03 ^{CBD}
F4	29,58±3,68 ^{BDC}	17,59±0,19 ^{CD}	9,32±1,02 ^B	3,18±0,11 ^{GF}	3,23±0,51 ^{CD}	3,01±0,13 ^{FECD}	42,13±3,29 ^{BDC}	23,78±1,31 ^{HI}
F5	44,02±6,32 ^{BDAC}	25,09±1,64 ^{BCD}	18,6±4,12 ^{BA}	2,27±0,18^G	6,29±1,31 ^{CD}	6,02±1,48 ^{BC}	68,9±5,20 ^{BDAC}	33,37±1,93 ^{GHFEI}
F6	41,84±4,36 ^{BDAC}	23,19±1,65 ^{BCD}	11,81±0,25 ^{BA}	2,64±0,34 ^{GF}	4,03±0,27 ^{CD}	4,39±0,39 ^{FECD}	57,69±4,83 ^{BDC}	30,23±2,37 ^{GHFI}
F7	43,07±4,24 ^{BDAC}	21,91±0,95 ^{CD}	11,33±4,39 ^{BA}	2,70±0,26 ^{GF}	9,54±2,92 ^{BC}	4,26±0,23 ^{FECD}	63,95±11,26 ^{BDC}	28,89±1,33 ^{GHI}
F8	26±1,17 ^{DC}	27,29±1,33 ^{BCD}	9,18±0,35 ^B	3,56±0,20 ^{GF}	2,82±0,29^D	5,42±0,20 ^{BECD}	38,01±1,75 ^{DC}	36,28±1,55 ^{GHFEI}
F9	31,91±4,68 ^{BDC}	18,95±0,99 ^{CD}	9,71±1,33 ^B	2,72±0,16 ^{GF}	3,36±0,51 ^{CD}	3,91±0,14 ^{FECD}	45±6,49 ^{BDC}	25,58±1,10 ^{HI}
F10	39,96±5,58 ^{BDAC}	33,41±3,71 ^{BC}	13,48±0,81 ^{BA}	12,19±2,03 ^{DC}	5,58±0,61 ^{CD}	3,95±0,57 ^{FECD}	59,04±6,92 ^{BDC}	49,56±6,04 ^{GCFED}
F11	28,74±3,95 ^{BDC}	8,25±0,57^D	8,94±0,90 ^B	11,39±0,84 ^{DC}	3,25±0,43 ^{CD}	3,52±0,23 ^{FECD}	40,95±5,24 ^{DC}	23,18±1,64^I
F12	31,89±1,18 ^{BDC}	56,88±15,97^A	10,06±0,27 ^B	5,32±2,30 ^{GFE}	4,07±0,27 ^{CD}	2,24±1,09 ^{FE}	45,98±0,95 ^{BDC}	64,44±12,85 ^{CB}
F13	36,77±2,72 ^{BDAC}	54,95±3,83^A	13,99±1,12 ^{BA}	25,68±1,56^A	8,60±0,70 ^{BCD}	8,45±1,83^A	59,37±4,55 ^{BDC}	89,09±5,60^A
F14	43,98±1,95 ^{BDAC}	19,63±1,60 ^{CD}	15,51±2,02 ^{BA}	7,18±0,55 ^{D^{FE}}	5,14±0,64 ^{CD}	2,07±0,04^F	64,64±4,37 ^{BDC}	28,88±2,20 ^{GHI}
F15	38,057±1,89 ^{BDAC}	25,85±2,27 ^{BCD}	14,22±0,97 ^{BA}	8,67±0,83 ^{DCE}	9,40±0,72 ^{BC}	2,84±0,23 ^{FECD}	61,69±3,47 ^{BDC}	37,37±3,31 ^{GHFEI}
F16	33,72±3,81 ^{BDC}	31,41±2,38 ^{BC}	9,17±2,04 ^B	10,13±0,60 ^{DCE}	4,26±1,04 ^{CD}	3,73±0,24 ^{FECD}	47,17±6,08 ^{BDC}	45,27±1,79 ^{GHFED}
F17	31,15±1,12 ^{BDC}	34,514±1,00 ^{BC}	10,05±0,56 ^B	21,55±0,40 ^B	6,54±0,31 ^{CD}	7,21±0,12 ^{BA}	47,75±1,98 ^{BDC}	63,28±0,97 ^{CBD}
F19	54,22±10,16 ^{BA}	44,34±1,11 ^{BA}	11,21±0,48 ^{BA}	21,30±1,23 ^B	4,36±0,27 ^{CD}	8,29±0,41^A	69,81±10,08 ^{BDAC}	73,94±1,94 ^B
F20	23,99±3,35^D	23,74±0,76 ^{BCD}	7,99±1,22 ^B	8,33±0,24 ^{DCE}	2,53±0,62 ^D	3,55±0,33 ^{FECD}	34,53±5,18^D	35,63±1,19 ^{GHFEI}
F21	38,42±9,22 ^{BDAC}	27,75±4,76 ^{BCD}	12,94±2,84 ^{BA}	9,80±1,37 ^{DCE}	4,40±1,04 ^{CD}	4,31±0,68 ^{FECD}	55,77±13,10 ^{BDC}	41,88±6,81 ^{GHFEI}
F22	62,30±3,77^A	34,378±2,36 ^{BC}	22,95±3,41^A	12,55±0,79 ^C	16,48±2,00^A	4,14±0,27 ^{FECD}	91,75±8,49^A	51,07±3,33 ^{CFED}
F24	45,93±3,12 ^{BDAC}	23,09±1,15 ^{BCD}	14,49±1,38 ^{BA}	8,02±0,36 ^{DCE}	4,72±0,49 ^{CD}	2,51±0,14 ^{FE}	65,15±2,93 ^{BDC}	33,62±1,67 ^{GHFEI}
F25	55,23±2,61 ^{BA}	35,99±1,49 ^{BC}	15,11±2,05 ^{BA}	11,66±0,58 ^{DC}	5,42±0,62 ^{CD}	5,15±0,24 ^{FBECD}	75,77±4,95 ^{BAC}	52,81±1,19 ^{CED}
Moyenne	40,86 ^A	29,70 ^B	13,16 ^A	10,30 ^B	6,11 ^A	4,38 ^B	59,71 ^A	44,40 ^B
Cv (%)	10,47	10,00	13,88	18,35	14,18	11,03	10,54	16,82
p≤0,05	<,0001	<,0001	0,0037	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
Zone*famille	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

Dans la zone de Toumodi, les familles F12 et F13 ont enregistré les teneurs en chlorophylles (a) avec des moyennes respectives de 56,88 µg/g MF et de 54,95 µg/g MF et les plus faibles teneurs par la famille F11 (8,25 µg/g MF).

Concernant la teneur en chlorophylle (b), les plus grandes moyennes dans la zone de Divo, ont été obtenues par la famille F22 (22,95 µg/g MF). Les plus faibles ont été obtenues par les familles F11, F12, F16, F17, F20, F4, F8 et F9 avec des moyennes comprises entre 7,99 µg/g MF et 10,06 µg/g MF. Dans la zone de Toumodi, les meilleures teneurs en chlorophylle (b), ont été obtenues par la famille F13 (25,68 µg/g MF) et les plus faibles par la famille F5 (2,27 µg/g MF).

Pour les teneurs en chlorophylle (c), la famille F22 (16,48 µg/g MF) dans la zone de Divo, a obtenu la plus grande moyenne et la famille F8 (2,82 µg/g MF), la plus faible moyenne. Dans la zone de Toumodi, les meilleures teneurs en chlorophylle (c), ont été obtenues par les familles F19 (8,29 µg/g MF), F13 (8,45 µg/g MF) et les faibles teneurs par la famille F14 (2,07 µg/g MF).

Au niveau des teneurs en chlorophylles totales, la famille F22 (91,75 µg/g MF) a obtenu la plus grande valeur dans la zone de Divo, et la plus petite valeur par la famille F20 (34,53 µg/g MF). Dans la zone de Toumodi, les plus grandes teneurs en chlorophylles totales ont été obtenues par la famille F13 (89,09 µg/g MF) et les plus faibles par la famille F11 avec une moyenne de 23,18 µg/g MF (Tableau XL).

3.1.2.5.2. Accumulation des métabolites secondaires des familles d'hybrides de 3 ans

Les résultats de l'analyse de variance ont montré des différences significatives entre les familles d'hybrides ($p < 0,0001$) avec une interaction zone*famille significative ($p < 0,0001$) pour l'accumulation des métabolites secondaires dans les différentes zones (Tableau XLI). Les valeurs moyennes enregistrées pour la teneur en phénols totaux, ont été de 2,68 µg/ml MF dans la zone de Divo et de 2,52 µg/ml MF dans la zone de Toumodi. Pour la teneur en proline ; les moyennes enregistrées ont été de 79,78 µmol/g ML dans la zone de Toumodi et de 26,7 µmol/g ML dans la zone de Divo.

Les meilleures teneurs en phénols totaux dans la zone de Divo, ont été obtenues par les arbres de la famille F12 (3,67 µg/ml MF) et les plus faibles par ceux de la famille F15 (1,89 µg/ml MF). Dans la zone de Toumodi, les arbres de la famille F15, ont présenté les plus fortes teneurs en phénols avec une moyenne de 3,99 µg/ml MF et les plus faibles moyennes par ceux de la famille F6 (1,07 µg/ml MF).

Pour la teneur en proline, les plus fortes teneurs dans la zone de Divo, ont été obtenues par la famille F6 (53,34 $\mu\text{mol/g ML}$) et les plus faibles par la famille F15 (9,81 $\mu\text{mol/g ML}$). Dans la zone de Toumodi, les familles d'hybrides F12 (174,71 $\mu\text{mol/g ML}$), F10 (168,5 $\mu\text{mol/g ML}$) ont obtenu les plus fortes teneurs en proline. Les plus faibles teneurs en proline, ont été obtenues par les familles F9, F4, F25 et F24 avec des valeurs moyennes comprises entre 19,83 $\mu\text{mol/g ML}$ et 27,44 $\mu\text{mol/g ML}$ (Tableau XLI).

Tableau XLI : Accumulation des métabolites secondaires des hybrides de 3 ans selon les zones expérimentales

Familles	Phénols totaux ($\mu\text{g/ml MF}$)		Proline ($\mu\text{mol/g ML}$)	
	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
F1	2,14 $\pm$ 0,24 ^{DC}	3,46 $\pm$ 0,24 ^{BA}	45,46 $\pm$ 0,04 ^{CB}	61,95 $\pm$ 0,08 ^{EFD}
F2	2,32 $\pm$ 0,03 ^{BDC}	2,14 $\pm$ 0,05 ^{FBDEC}	30,77 $\pm$ 0,03 ^{CEBD}	58,01 $\pm$ 0,01 ^{EFD}
F3	3,25 $\pm$ 0,001 ^{BAC}	1,55 $\pm$ 0,03 ^{FE}	27,70 $\pm$ 0,03 ^{CEBD}	34,78 $\pm$ 0,03 ^{EF}
F4	2,02 $\pm$ 0,04 ^{BDAC}	2,36 $\pm$ 0,10 ^{BDEC}	12,54 $\pm$ 0,06 ^{CEBD}	18,86$\pm$0,01^F
F5	2,29 $\pm$ 0,04 ^{BDC}	2,52 $\pm$ 0,02 ^{BDEC}	29,04 $\pm$ 0,05 ^{CEBD}	31,91 $\pm$ 0,06 ^{EF}
F6	2,51 $\pm$ 0,01 ^{BDC}	1,07$\pm$0,02^F	53,34$\pm$0,07^A	31,44 $\pm$ 0,02 ^{EF}
F7	2,99 $\pm$ 0,06 ^{BDAC}	2,02 $\pm$ 0,11 ^{FDEC}	35,78 $\pm$ 0,09 ^{CEBD}	42,06 $\pm$ 0,07 ^{EF}
F8	2,69 $\pm$ 0,08 ^{BDAC}	3,06 $\pm$ 0,15 ^{BDAC}	18,82 $\pm$ 0,07 ^{CED}	82,11 $\pm$ 0,01 ^{CEBD}
F9	2,96 $\pm$ 0,04 ^{BDAC}	2,58 $\pm$ 0,10 ^{BDEC}	27,77 $\pm$ 0,06 ^{CEBD}	19,83$\pm$0,01^F
F10	3,13 $\pm$ 0,17 ^{BAC}	1,40 $\pm$ 0,31 ^{FE}	25,23 $\pm$ 0,04 ^{CEBD}	168,5$\pm$0,02^A
F11	2,37 $\pm$ 0,49 ^{BDC}	3,23 $\pm$ 0,90 ^{BAC}	40,39 $\pm$ 0,03 ^{CEBD}	131,12 $\pm$ 0,02 ^B
F12	3,67$\pm$0,42^A	3,41 $\pm$ 0,04 ^{BA}	49,73 $\pm$ 0,01 ^B	174,71$\pm$0,01^A
F13	2,41 $\pm$ 0,01 ^{BDC}	2,57 $\pm$ 0,01 ^{BDEC}	16,69 $\pm$ 0,04 ^{CED}	110,29 $\pm$ 0,05 ^{CEBD}
F14	2,50 $\pm$ 0,24 ^{BDC}	2,35 $\pm$ 0,08 ^{BDEC}	18,22 $\pm$ 0,02 ^{CED}	90,46 $\pm$ 0,09 ^{CEBD}
F15	1,89$\pm$0,03^D	3,99$\pm$0,01^A	9,81$\pm$0,02^E	95,2 $\pm$ 0,01 ^{CEBD}
F16	3,04 $\pm$ 0,16 ^{BDAC}	1,89 $\pm$ 0,40 ^{FDE}	14,68 $\pm$ 0,03 ^{ED}	108,95 $\pm$ 0,03 ^{CEBD}
F17	2,21 $\pm$ 0,59 ^{DC}	3,29 $\pm$ 0,01 ^{BAC}	30,64 $\pm$ 0,03 ^{CEBD}	117,03 $\pm$ 0,003 ^{CB}
F19	2,81 $\pm$ 0,03 ^{BDAC}	2,29 $\pm$ 0,04 ^{BDEC}	16,35 $\pm$ 0,05 ^{CED}	66,89 $\pm$ 0,02 ^{CEFD}
F20	3,03 $\pm$ 0,008 ^{BDAC}	3,40 $\pm$ 0,52 ^{BA}	18,69 $\pm$ 0,09 ^{CED}	107,42 $\pm$ 0,01 ^{CEBD}
F21	3,42 $\pm$ 0,12 ^{BA}	3,05 $\pm$ 0,05 ^{BDAC}	18,49 $\pm$ 0,002 ^{CED}	101,28 $\pm$ 0,05 ^{CEBD}
F22	2,15 $\pm$ 0,04 ^{DC}	2,18 $\pm$ 0,07 ^{FBDEC}	11,14 $\pm$ 0,003 ^{ED}	68,03 $\pm$ 0,01 ^{CEFD}
F24	2,66 $\pm$ 0,05 ^{BDAC}	2,66 $\pm$ 0,02 ^{BDEC}	30,77 $\pm$ 0,01 ^{CEBD}	27,44$\pm$0,01^F
F25	3,33 $\pm$ 0,37 ^{BAC}	1,51 $\pm$ 0,04 ^{FE}	32,24 $\pm$ 0,09 ^{CEBD}	26,3$\pm$0,02^F
Moyenne	2,68 ^A	2,52 ^B	26,7 ^B	79,78 ^A
Cv (%)	14,49	17,89	33,26	23,85
p $\leq$ 0,05	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
Zone*famille	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %.

3.1.2.6. Synthèse des pigments chlorophylliens et accumulation des métabolites secondaires des familles d'hybrides de 9 ans

3.1.2.6.1. Synthèse des pigments chlorophylliens des familles d'hybrides de 9 ans

Les résultats de la synthèse des pigments chlorophylliens des familles d'hybride de 9 ans montrant des différences significatives ($p \leq 0,05$) avec des interactions zone*famille significatives ($p \leq 0,05$), sont consignés dans le Tableau XLII. Les valeurs moyennes enregistrées pour la teneur en chlorophylle (a), ont été de 35,86 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Divo et de 32,41 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Toumodi. Pour la chlorophylle (b), elles ont été de 18,94 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Divo et de 16,18 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Toumodi. Pour la chlorophylle (c), les moyennes ont été de 10,69 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Divo, contre 8,14 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Toumodi. Pour les chlorophylles totales, les moyennes enregistrées ont été de 64,13 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Divo et de 56,74 $\mu\text{g/g}$ MF dans la zone de Toumodi.

Pour la teneur en chlorophylle (a) dans la zone de Divo, les arbres de la famille F8 (64,7 $\mu\text{g/g}$ MF) ont obtenu les plus fortes teneurs et ceux des familles F10, F11, F12, F13, F21, F22, F24 et F9, ont obtenu les plus faibles avec des moyennes variant de 20,22 $\mu\text{g/g}$ MF à 31,77 $\mu\text{g/g}$ MF). Dans la zone de Toumodi, aucune différence pour la teneur en chlorophylle (a) n'a été observée entre les familles d'hybrides, qui ont obtenu une moyenne de 32,41 $\mu\text{g/g}$ MF.

Pour la teneur en chlorophylle (b), la plus grande moyenne dans la zone de Divo, a été obtenue par la famille F6 (29,53 $\mu\text{g/g}$ MF) et la plus faible, par la famille F12 (12,47 $\mu\text{g/g}$ MF). Dans la zone de Toumodi, la meilleure teneur en chlorophylle (b), a été obtenue par la famille F22 (29,29 $\mu\text{g/g}$ MF) et les plus faibles par les familles F14, F13, F15, F21, F6 et F20 avec de moyennes comprises entre 10,94 $\mu\text{g/g}$ MF et 11,88 $\mu\text{g/g}$ MF.

Pour la teneur en chlorophylle (c), une homogénéité entre les familles d'hybrides a été observée dans la zone de Divo avec une moyenne de 10,69 $\mu\text{g/g}$ MF. Dans la zone de Toumodi, la meilleure teneur en chlorophylle (c), a été obtenue par les familles F22 (20,55 $\mu\text{g/g}$ MF) et les faibles teneurs, ont été obtenues par les autres familles (excepté les familles F14, F2, F21, F25, F9) avec des moyennes comprises entre 3,68 $\mu\text{g/g}$ MF et 9,08 $\mu\text{g/g}$ MF.

Au niveau des teneurs en chlorophylles totales, la famille F8 (90,94 $\mu\text{g/g}$ MF) a obtenu la plus grande moyenne dans la zone de Divo, et les plus faibles moyennes par les familles F10, F11, F12, F13, F14, F17, F2, F20, F21, F22, F24, F7 et F9 avec des moyennes comprises entre 44,69 $\mu\text{g/g}$ MF et 65,31 $\mu\text{g/g}$ MF. Dans la zone de Toumodi, aucune différence entre les familles d'hybrides, qui ont cependant une moyenne de 56,74 $\mu\text{g/g}$ MF (Tableau XLI)..

Tableau XLII : Synthèse des pigments chlorophylliens des familles d'hybrides de 9 ans selon les zones expérimentales

Famille	Chlorophylles A (µg/g MF)		Chlorophylles B (µg/g MF)		Chlorophylles C (µg/g MF)		Chlorophylles totales (µg/g MF)	
	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
F1	44,35±10,93 ^{BA}	37,68±4,98 ^A	21,56±4,33 ^{BA}	23,20±2,12 ^{BA}	10,81±1,51 ^A	8,294±1,08 ^B	76,73±16,77 ^{BA}	69,19±7,43 ^A
F2	36,67±6,70 ^{BA}	37,02±2,74 ^A	17,49±0,91 ^{BA}	18,27±1,08 ^{BA}	11,14±0,92 ^A	10,80±0,58 ^{BA}	65,31±7,82 ^B	66,08±4,38 ^A
F3	39,66±7,87 ^{BA}	38,71±10,27 ^A	20,86±5,30 ^{BA}	19,29±2,37 ^{BA}	11,01±1,47 ^A	8,50±5,63 ^B	71,55±7,61 ^{BA}	66,52±18,18 ^A
F4	46,49±5,05 ^{BA}	27,55±5,53 ^A	21,62±4,34 ^{BA}	12,87±2,75 ^{BA}	11,63±1,50 ^A	3,68±0,73 ^B	79,75±9,99 ^{BA}	44,12±9,00 ^A
F5	40,48±1,05 ^{BA}	25,30±4,53 ^A	20,02±0,13 ^{BA}	15,53±5,22 ^{BA}	10,43±0,08 ^A	5,57±1,72 ^B	70,94±0,95 ^{BA}	46,41±9,81 ^A
F6	36,07±3,09 ^{BA}	31,78±4,27 ^A	29,53±7,71^A	11,58±0,40^B	12,65±2,07 ^A	5,23±0,45 ^B	78,27±9,37 ^{BA}	48,6±4,50 ^A
F7	34,62±3,90 ^{BA}	25,33±2,56 ^A	18,70±1,21 ^{BA}	12,54±2,28 ^{BA}	9,67±0,53 ^A	4,33±0,63 ^B	62,99±5,51 ^B	42,21±5,28 ^A
F8	64,70±10,25^A	34,76±0,71 ^A	25,77±4,04 ^{BA}	14,32±1,42 ^{BA}	20,46±9,70 ^A	4,39±0,61 ^B	90,94±2,52^A	53,49±1,34 ^A
F9	25,19±1,14 ^B	31,48±2,94 ^A	15,54±0,43 ^{BA}	17,65±3,07 ^{BA}	9,02±0,18 ^A	13,52±5,01 ^{BA}	49,76±1,75 ^B	62,66±8,09 ^A
F10	31,39±4,26 ^B	34,45±1,15 ^A	16,06±1,38 ^{BA}	14,01±0,70 ^{BA}	9,73±0,92 ^A	5,096±0,28 ^B	57,19±6,57 ^B	53,57±2,04 ^A
F11	25,23±1,47 ^B	32,73±6,11 ^A	14,71±0,52 ^{BA}	23,07±2,69 ^{BA}	9,19±0,33 ^A	6,466±0,97 ^B	49,14±2,23 ^B	62,28±9,72 ^A
F12	25,71±4,11 ^B	30,35±4,35 ^A	12,47±3,02^B	13,67±4,70 ^{BA}	10,04±1,03 ^A	5,958±2,22 ^B	48,23±5,99 ^B	49,98±11,26 ^A
F13	27,72±5,08 ^B	24,95±2,72 ^A	16,25±1,79 ^{BA}	11,12±1,18 ^B	9,07±0,37 ^A	6,341±0,67 ^B	53,06±7,24 ^B	42,41±4,57 ^A
F14	32,49±2,48 ^{BA}	25,91±2,98 ^A	16,57±0,88 ^{BA}	10,94±3,50^B	9,72±0,09 ^A	11,75±1,87 ^{BA}	58,79±3,39 ^B	48,62±1,97 ^A
F15	39,84±11,44 ^{BA}	29,66±4,00 ^A	20,55±3,95 ^{BA}	11,26±0,48^B	10,23±1,51 ^A	7,795±0,28 ^B	70,64±16,91 ^{BA}	48,72±4,37 ^A
F16	48,04±5,39 ^{BA}	30,17±3,87 ^A	21,95±2,38 ^{BA}	12,06±0,47 ^{BA}	11,52±0,68 ^A	3,70±0,15 ^B	81,52±2,39 ^{BA}	45,94±3,81 ^A
F17	35,09±9,11 ^{BA}	35,01±4,07 ^A	14,02±1,49 ^{BA}	14,82±2,27 ^{BA}	8,47±0,77 ^A	9,08±1,64 ^B	57,59±7,07 ^B	58,92±7,05 ^A
F19	33,23±3,33 ^{BA}	39,15±5,24 ^A	25,49±4,50 ^{BA}	17,24±4,63 ^{BA}	12,48±1,51 ^A	6,621±1,57 ^B	71,22±4,36 ^{BA}	63,03±11,18 ^A
F20	37,73±8,26 ^{BA}	35,14±15,94 ^A	17,23±0,46 ^{BA}	11,88±2,89^B	9,39±0,28 ^A	5,66±1,75 ^B	64,36±7,61 ^B	52,69±20,41 ^A
F21	20,22±2,23 ^B	45,56±9,46 ^A	15,31±0,95 ^{BA}	11,44±1,98^B	9,81±1,67 ^A	10,92±5,91 ^{BA}	45,35±3,04 ^B	67,92±13,68 ^A
F22	21,49±1,88 ^B	46,05±0,99 ^A	14,66±0,97 ^{BA}	29,29±5,34^A	8,53±0,16 ^A	20,55±1,94^A	44,69±2,74 ^B	95,89±4,03 ^A
F24	31,77±3,56 ^B	27,90±6,52 ^A	17,96±1,52 ^{BA}	19,97±6,40 ^{BA}	9,30±0,66 ^A	7,04±2,19 ^B	59,04±5,75 ^B	54,93±14,65 ^A
F25	46,62±11,69 ^{BA}	18,88±5,40 ^A	21,26±2,81 ^{BA}	26,12±7,45 ^{BA}	11,61±1,33 ^A	16,06±4,84 ^{BA}	79,51±15,53 ^{BA}	61,07±17,70 ^A
Moyenne	35,86 ^A	32,41 ^B	18,94 ^A	16,18 ^B	10,69 ^A	8,14 ^B	64,13 ^A	56,74 ^B
Cv (%)	14,12	15,24	12,44	17,57	13,49	24,40	11,15	15,32
p≤0,05	0,0043	0,2407	0,0334	0,0087	0,3415	0,0020	0,0021	0,1411
Zone*famille	0,0034	0,0034	0,0023	0,0023	0,0004	0,0004	0,0006	0,0006

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

3.1.2.6.2. Accumulation des métabolites secondaires des familles d'hybrides de 9 ans

Les résultats de l'analyse de variance ont montré des différences significatives entre les familles d'hybrides avec des interactions zone*famille significatives ($p < 0,0001$) pour les protéines solubles, la proline, les phénols totaux et une homogénéité entre les familles ($p > 0,05$) pour l'azote foliaire avec une interaction zone*famille ($p = 0,0034$) significative (Tableau XLIII). Les valeurs moyennes enregistrées pour la teneur en azote foliaire ont été de 51,43 unités de SPAD dans la zone de Divo et de 47,43 unités de SPAD dans la zone de Toumodi. Pour les protéines solubles, elles ont été de 4,79 $\mu\text{g/ml}$ MF dans la zone de Divo et de 4,69 $\mu\text{g/ml}$ MF dans la zone de Toumodi. Pour les phénols totaux, elles ont été de 3,53 $\mu\text{g/ml}$ MF dans la zone de Divo et de 0,99 $\mu\text{g/ml}$ MF dans la zone de Toumodi. Pour la teneur en proline ; les moyennes enregistrées ont été de 45,44 $\mu\text{mol/g}$ ML dans la zone de Divo et de 87,24 $\mu\text{mol/g}$ ML dans la zone de Toumodi.

Pour la teneur en azote foliaire, aucune différence n'a été observée entre les familles d'hybrides dans la zone de Divo et celle de Toumodi avec des moyennes respectives de 51,43 unités de SPAD et 47,43 unités de SPAD.

Pour la teneur en protéines solubles, la plus grande moyenne dans la zone de Divo, a été obtenue par la famille F20 (6,64 $\mu\text{g/g}$ MF) et la plus faible, par la famille F8 (3,35 $\mu\text{g/g}$ MF). Dans la zone de Toumodi, la meilleure teneur protéines solubles, a été obtenue par la famille F6 (5,51 $\mu\text{g/g}$ MF) et les plus faibles par les familles F24, F25 avec des moyennes respectives de 3,74 $\mu\text{g/g}$ MF et de 3,7 $\mu\text{g/g}$ MF.

Les meilleures teneurs en phénols totaux dans la zone de Divo, ont été obtenues par les arbres de la famille F11 (7,55 $\mu\text{g/ml}$ MF) et les plus faibles par ceux de la famille F14 (1,39 $\mu\text{g/ml}$ MF) et F1 (1,34 $\mu\text{g/ml}$ MF). Dans la zone de Toumodi, les arbres de la famille F16, ont présenté les plus fortes teneurs en phénols avec une moyenne de 2,12 $\mu\text{g/ml}$ MF et les plus faibles moyennes par ceux des familles F5, F6 et F4 avec des moyennes respectives de 0,47 $\mu\text{g/ml}$ MF, de 0,62 $\mu\text{g/ml}$ MF et de 0,65 $\mu\text{g/ml}$ MF.

Pour la teneur en proline, les plus fortes teneurs dans la zone de Divo, ont été obtenues par la famille F7 (137,93 $\mu\text{mol/g}$ ML) et les plus faibles par les familles F20, F21, F24, F25 et F8 avec des moyennes comprises entre 10,95 $\mu\text{g/ml}$ MF et 20,9 $\mu\text{g/ml}$ MF. Dans la zone de Toumodi, les familles d'hybrides F8 (175,93 $\mu\text{mol/g}$ ML), F12 (173,97 $\mu\text{mol/g}$ ML) ont obtenu les plus fortes teneurs en proline. Les plus faibles teneurs en proline, ont été obtenues par les arbres de la famille F11 avec une moyenne de 24,10 $\mu\text{g/ml}$ MF (Tableau XLIII).

Tableau XLIII : Accumulation des métabolites secondaires des hybrides de 9 ans selon les zones expérimentales

Familles	Azote foliaire unité de SPAD		Protéines solubles (µg/ml MF)		Proline (µmol/g MF)		Phénols totaux (µg/ml MF)	
	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
F1	49,67±2,92 ^A	48,53±0,07 ^A	4,72±0,07 ^{FEH} DG	5,18±0,05 ^{BAC}	41,99±0,07 ^{DC}	51,80±0,01 ^{IHJ}	1,34±3,52^G	1,40±0,02 ^{BA}
F2	46,48±1,05 ^A	44,47±4,04 ^A	5,43±0,04 ^{FCE} BD	4,95±0,02 ^{BDAC}	90,06±0,01 ^{BC}	34,38±0,04 ^{IJ}	3,03±0,99 ^{FED} G	1,01±0,11 ^{BA}
F3	53,01±3,46 ^A	43,77±2,71 ^A	5,08±0,63 ^{FCE} BDG	5,14±0,08 ^{BAC}	46,4±0,04 ^{DC}	31,71±0,01 ^{IJ}	3,58±1,10 ^{FBED} CG	0,84±0,19 ^{BA}
F4	51,41±4,59 ^A	48,52±7,66 ^A	5,63±0,27 ^{CBD}	5,31±0,10 ^{BA}	30,84±0,01 ^{DC}	109,48±0,01 ^{CFED}	6,01±0,22 ^{BAC}	0,65±0,19 ^B
F5	48,92±2,63 ^A	45,02±3,44 ^A	5,67±0,04 ^{CBD}	5,31±0,01 ^{BA}	47±0,03 ^{DC}	82,38±0,06 ^{GF}	2,69±0,18 ^{FED} G	0,47±0,11 ^B
F6	55,15±2,55 ^A	48,41±1,13 ^A	3,37±0,03 ^K	5,51±0,09^A	40,79±0,05 ^{DC}	56,27±0,01 ^{IH}	3,90±0,08 ^{FBED} CG	0,62±0,13 ^B
F7	54,13±1,45 ^A	49,5±3,34 ^A	5,04±0,32 ^{FCE} H ^{HD} G	5,16±0,05 ^{BAC}	137,93±0,07^A	116,43±0,02 ^{CED}	2,08±0,14 ^{FE} G	0,82±0,17 ^{BA}
F8	44,75±3,92 ^A	45,51±2,81 ^A	3,35±0,03^K	5,06±0,61 ^{BAC}	10,95±0,003^D	175,17±0,06^A	2,46±0,05 ^{FED} G	0,85±0,08 ^{BA}
F9	54,38±0,72 ^A	50,86±1,21 ^A	4,31±0,40 ^{IHJ} G	4,52±0,03 ^{FDE} C	64,29±0,01 ^{DC}	103,74±0,02 ^{FED}	3,38±0,04 ^{FED} CG	1,11±0,01 ^{BA}
F10	48,93±5,21 ^A	47,24±3,00 ^A	4,03±0,04 ^{IKHJ}	4,68±0,02 ^{FBDE} C	51,61±0,02 ^{DC}	30,77±0,04 ^{IJ}	4,47±0,96 ^{FBED} C	0,71±0,11 ^{BA}
F11	51,4±0,90 ^A	46,98±3,00 ^A	4,49±0,04 ^{FIH} G	4,39±0,03 ^{FDE}	124,04±0,02 ^{BA}	24,10±0,01^J	7,55±0,96^A	0,87±0,18 ^{BA}
F12	52,75±1,34 ^A	47,02±1,83 ^A	4,52±0,09 ^{FIH} E ^H G	4,72±0,02 ^{BDE} C	49±0,01 ^{DC}	173,97±0,01^A	3,12±0,37 ^{FED} G	0,91±0,16 ^{BA}
F13	48,4±4,78 ^A	48,87±2,82 ^A	4,39±0,03 ^{IHJ} G	4,58±0,01 ^{FDE} C	49,4±0,01 ^{DC}	126,44±0,02 ^{CBD}	2,24±0,40 ^{FED} G	0,96±0,18 ^{BA}
F14	57,43±3,69 ^A	49,81±2,02 ^A	4,77±0,01 ^{FEH} DG	5,02±0,08 ^{BDAC}	43,53±0,01 ^{DC}	132,11±0,02 ^{CB}	1,39±0,55^G	1,11±0,20 ^{BA}
F15	55,7±1,47 ^A	46,5±2,97 ^A	4,94±0,03 ^{FCE} H ^{HD} G	4,15±0,06 ^{FGE}	31,18±0,03 ^{DC}	150,21±0,03 ^B	1,76±0,71 ^{FG}	0,70±0,10 ^{BA}
F16	48,8±3,34 ^A	50,43±1,83 ^A	3,55±0,16 ^{KJ}	4,88±0,11 ^{BDAC}	30,11±0,05 ^{DC}	89,72±0,04 ^{GFE}	4,38±0,77 ^{FBED} C	2,12±0,83^A
F17	55,14±3,94 ^A	47,27±4,36 ^A	5,50±0,02 ^{CE} BD	4,99±0,02 ^{BDAC}	32,58±0,03 ^{DC}	89,85±0,04 ^{GFE}	3,97±0,12 ^{FBED} CG	1,28±0,04 ^{BA}
F19	52,78±5,01 ^A	46,07±1,56 ^A	5,81±0,01 ^{CB}	4,37±0,03 ^{FDE}	28,24±0,03 ^{DC}	129,91±0,03 ^{CBD}	5,02±0,83 ^{BED} C	0,87±0,14 ^{BA}
F20	51,02±4,87 ^A	47,08±3,01 ^A	6,64±0,14^A	4,23±0,01 ^{FGE}	20,9±0,01^D	63,49±0,05 ^{GH}	5,19±0,69 ^{BDC}	1,46±0,02 ^{BA}
F21	52,54±4,28 ^A	42,23±4,49 ^A	6,08±0,41 ^B	4,06±0,05 ^{FG}	19,83±0,01^D	89,72±0,03 ^{GFE}	2,78±0,05 ^{FED} G	0,79±0,19 ^{BA}
F22	48,66±4,89 ^A	48,28±2,20 ^A	3,724±0,22 ^I KJ	4,18±0,03 ^{FGE}	28,71±0,04 ^{DC}	30,71±0,02 ^{IJ}	6,17±0,37 ^{BA}	0,74±0,10 ^{BA}
F24	53,15±0,13 ^A	47,38±2,94 ^A	4,43±0,02 ^{FIHJ} G	3,74±0,06^G	13,95±0,01^D	84,25±0,05 ^{GF}	2,78±0,58 ^{FED} G	0,69±0,12 ^{BA}
F25	48,31±2,43 ^A	51,15±1,51 ^A	4,78±0,02 ^{FEH} DG	3,70±0,09^G	11,82±0,02^D	29,77±0,04 ^{IJ}	1,77±0,74 ^{FG}	1,75±0,75 ^{BA}
Moyenne	51,43 ^A	47,43 ^B	4,79 ^A	4,69 ^B	45,44 ^B	87,24 ^A	3,53 ^A	0,99 ^B
Cv (%)	11,47	11,97	7,72	5,13	2,00	13,39	13,53	13,17
p≤0,05	0,6090	0,9688	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0178
Zone*famille	0,0034	0,0034	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Dans chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 %

3.1.2.7. Structuration des performances biochimiques des familles d'hybrides de cacaoyers dans les différentes zones

3.1.2.7.1. Structuration des familles d'hybrides dans la zone de Divo

Trois principales composantes ont contribué pour 75,03 % de l'inertie totale sur l'ensemble de la variance totale expliquée (Tableau XLIV).

Tableau XLIV : Valeur propre, variance exprimée et contribution des variables biochimiques à la formation des composantes de l'analyse en composantes principales des hybrides dans la zone de Divo

Composantes	F1	F2	F3
Valeur propre	3,62	1,38	1,01
Variabilité (%)	58,58	20,10	4,35
% cumulé	45,21	62,56	75,03
Chla	0,92	-0,03	-0,01
Chlb	0,87	-0,02	0,17
Chlc	0,87	-0,14	0,18
Chlt	0,95	-0,02	0,04
Azte	0,07	0,86	-0,16
Prosble	-0,32	-0,72	-0,19
Proli	-0,77	0,31	0,36
Phetot	-0,86	-0,1	0,27

Chla=chlorophylle A ; Chlb=chlorophylleB, Chlc=chlorophylle C, Chlt=chlorophylle totales, azte=azote, prosble= Proteines solubles, proli=Proline, Phetot= Phénols totaux.

La composante F1 a contribué pour 50,58 % de la variabilité totale avec une valeur propre de 3,62. Six variables ont été liées à cet axe dont majoritairement les pigments chlorophylliens Chla, Chlb, Chlc, chlt avec des coefficients de corrélations positifs respectifs de 0,92 ; 0,87 ; 0,87 ; 0,95. Les variables proline et phénols totaux ont été négativement corrélés à cet axe avec des coefficients respectifs -0,77 et -0.86.

La composante F2, contribuant pour 20,10 % de la variabilité totale avec une valeur propre de 1,38 est expliquée par les variables protéines solubles, azotes foliaire avec des coefficients de corrélation respectifs -0,72 et 0,869. Dans l'ensemble, les deux premiers axes (F1 et F2) qui ont eu une contribution de 62,56 % sont considérés pour la projection des familles d'hybrides dans le plan factoriel (Figure 33).

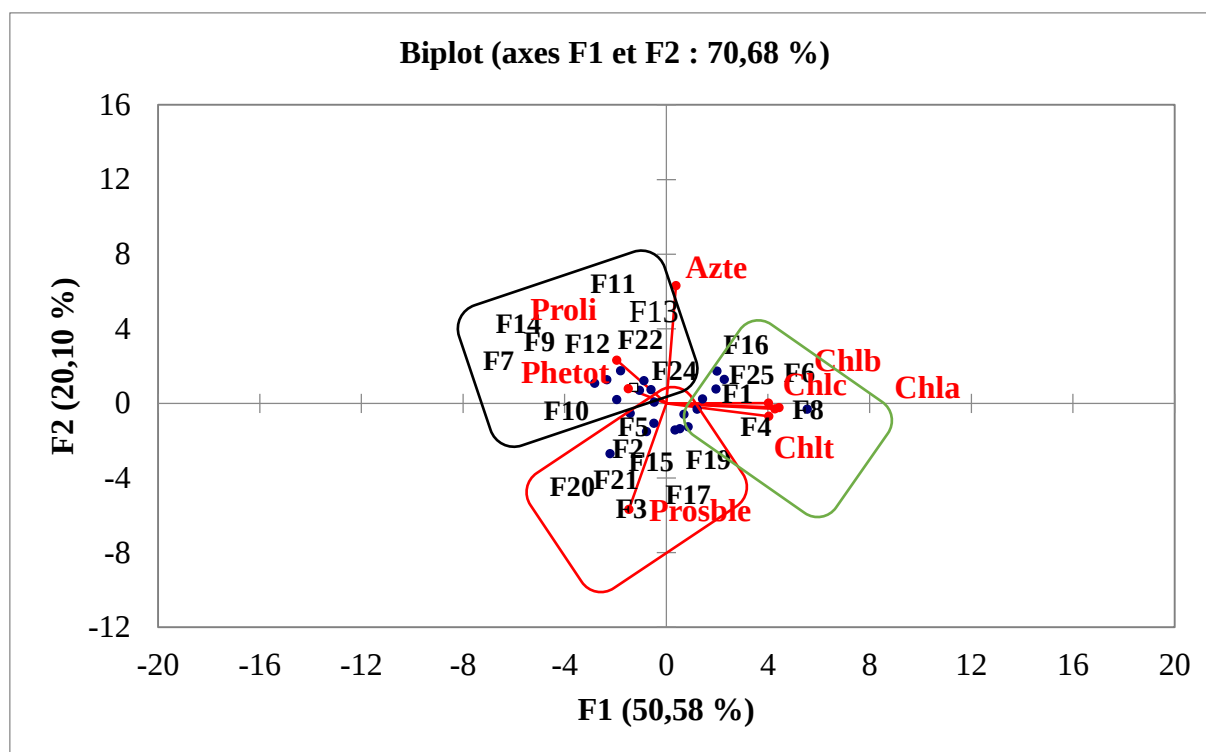


Figure 33: Biplot de corrélation de l'analyse en composantes principales indiquant les relations entre les variables biochimiques et les hybrides dans la zone de Divo.

Chla=chlorophylle A ; Chlb=chlorophylle B, Chlc=chlorophylle C, Chlt=chlorophylle totales, azte=azote, prosble= Proteines solubles, proli=Proline, Phetot= Phénols totaux

□ : Famille de la classe I □ : Famille de la classe II □ : Famille de la classe III

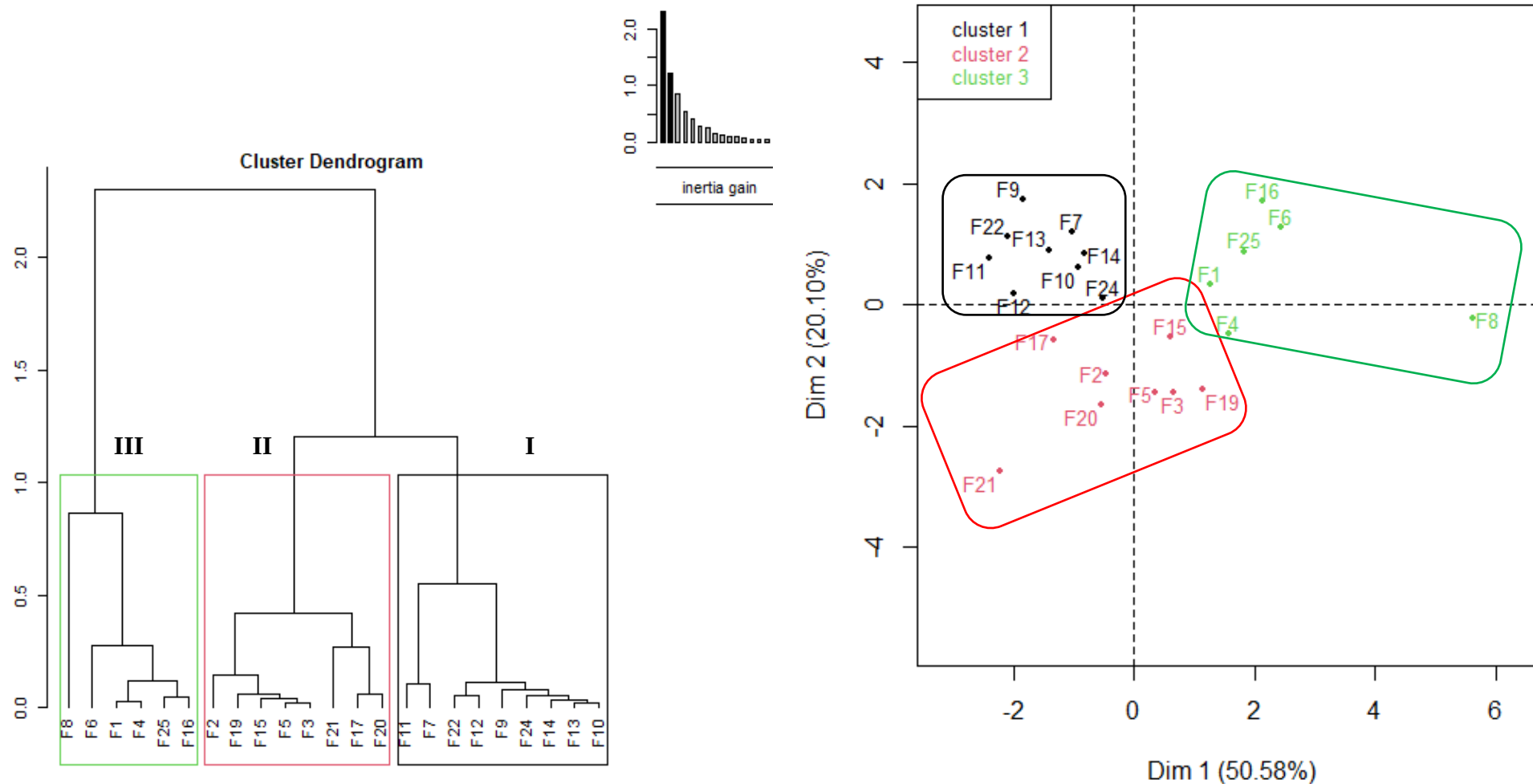
● Point observation, ● Point variable. La distance entre 2 observations est approximation de la distance de Mahalanobis. Les familles sont regroupées suivant le critère d'agrégation de Ward

La classification ascendante hiérarchique suivant la distance de Mahalanobis et la méthode d'agrégation de Ward a révélé les mêmes classes familles d'hybrides que l'analyse en composantes principales (ACP) dans la zone de Divo. Trois (03) classes de familles d'hybrides ont été indiquées (Figure 34).

La classe I est composée des familles d'hybrides F11, F22, F9, F12, F10, F13, F7, F14 et F24. Cette classe est caractérisée par de fortes valeurs pour les teneurs en proline et en azotes foliaires.

La classe II est constituée des familles d'hybrides F21, F20, F2, F5, F3, F19 et F17. Elle est caractérisée par de fortes valeurs pour les variables protéines solubles et phénols totaux.

La classe III composée des familles d'hybrides F1, F25, F6, F16, F15, F4 et F8, est caractérisée par de fortes valeurs pour les variables chlorophylliennes.



A : Dendrogramme de la Classification

B : Projection des familles d'hybrides dans le plan 1-2.

Figure 34 : Structuration des familles d'hybrides de 9 ans par groupe homogène selon les variables biochimiques évaluées dans la zone de Divo

3.1.2.7.2. Structuration des familles d'hybrides en fonction des variables biochimiques dans la zone déficitaire de Toumodi

Trois principales composantes ont aussi contribué pour 73,17 % de l'inertie totale sur l'ensemble de la variance totale expliquée (Tableau XLV). La composante F1, a contribué pour 42,58 % de la variabilité totale avec une valeur propre de 3,41. Cinq variables ont été liées à cet axe dont majoritairement les pigments chlorophylliens Chlorophylle b (Chlb), Chlorophylle c (Chlc), Chlorophylle totales (Chlt) avec des coefficients de corrélations positifs respectifs de 0,86, 0,80, 0,95. La variable proline (proli) a été négativement corrélée à cet axe avec un coefficient de -0,68.

La composante F2, contribuant pour 16,28 % de la variabilité totale, avec une valeur propre de 1,30, est expliquée par les variables Chlorophylle a (Chla), azote foliaire (Azte), phénols totaux (Phetot) avec des coefficients de corrélation respectifs de -0,66, -0,77 et 0,76.

La composante F3, avec une valeur propre de 1,14 est liée à la teneur en protéines solubles (Prosble) pour un coefficient de corrélation de -0,50. Dans l'ensemble, les deux premiers axes (F1 et F2) qui ont eu une contribution de 62,56 % sont considérés pour la projection des hybrides dans le plan factoriel (Figure 35).

Tableau XLV : Valeur propre, variance exprimée et contribution des variables biochimiques à la formation des composantes de l'analyse en composantes principales des hybrides dans la zone déficitaire de Toumodi

Composantes	F1	F2	F3
Valeur propre	3,41	1,3	1,14
Variabilité (%)	42,58	16,28	14,31
% cumulé	42,58	58,86	73,17
Chla	0,53	-0,66	-0,12
Chlb	0,86	0,15	-0,08
Chlc	0,8	0,08	0,41
Chlt	0,95	-0,25	0,04
Azte	-0,3	-0,77	-0,23
Prosble	-0,44	-0,48	-0,5
Proli	-0,68	-0,01	0,3
Phetot	0,14	0,76	-0,17

Chla=chlorophylle A ; Chlb=chlorophylle B, Chlc=chlorophylle C, Chlt=chlorophylle totales, azte=azote, prosble= Proteines solubles, proli=Proline, Phetot= Phénols totaux

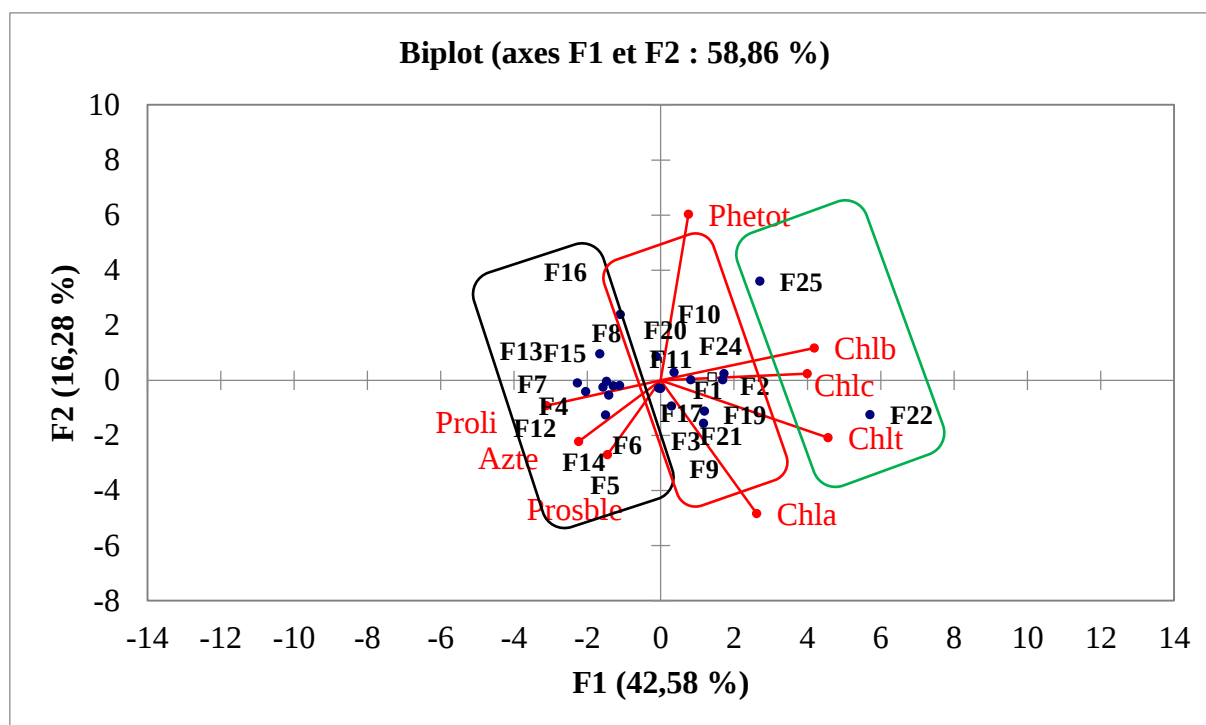


Figure 35 : Biplot de corrélation de l'analyse en composantes principales indiquant les relations entre les variables biochimiques et les hybrides dans la zone déficitaire de Toumodi.

Chla=chlorophylle a ; Chlb=chlorophylle b, Chlc=chlorophylle c, Chlt=chlorophylle totales, azte=azote, prosble= Proteines solubles, proli=Proline, Phetot= Phénols totaux

□ : Famille de la classe I □ : Famille de la classe II □ : Famille de la classe III

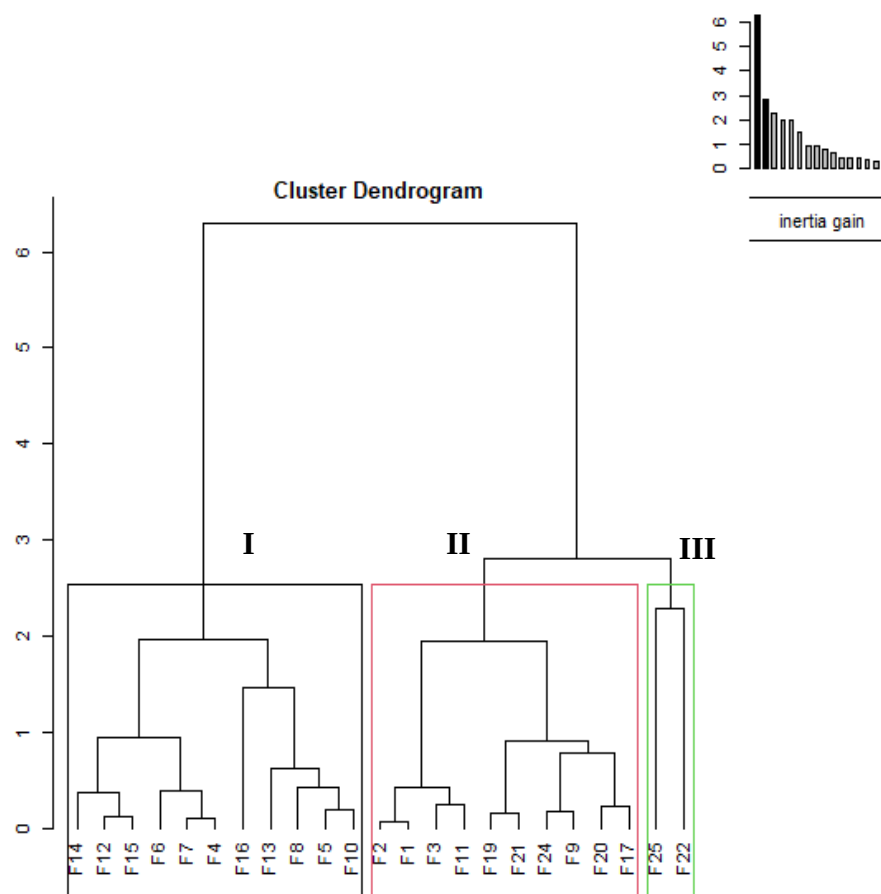
● Point observation, ● Point variable. La distance entre 2 observations est approximation de la distance de Mahalanobis. Les familles sont regroupées suivant le critère d'agrégation de Ward.

La classification ascendante hiérarchique suivant la distance de Mahalanobis et la méthode d'agrégation de Ward a révélé trois (03) classes familles d'hybrides (Figure 36).

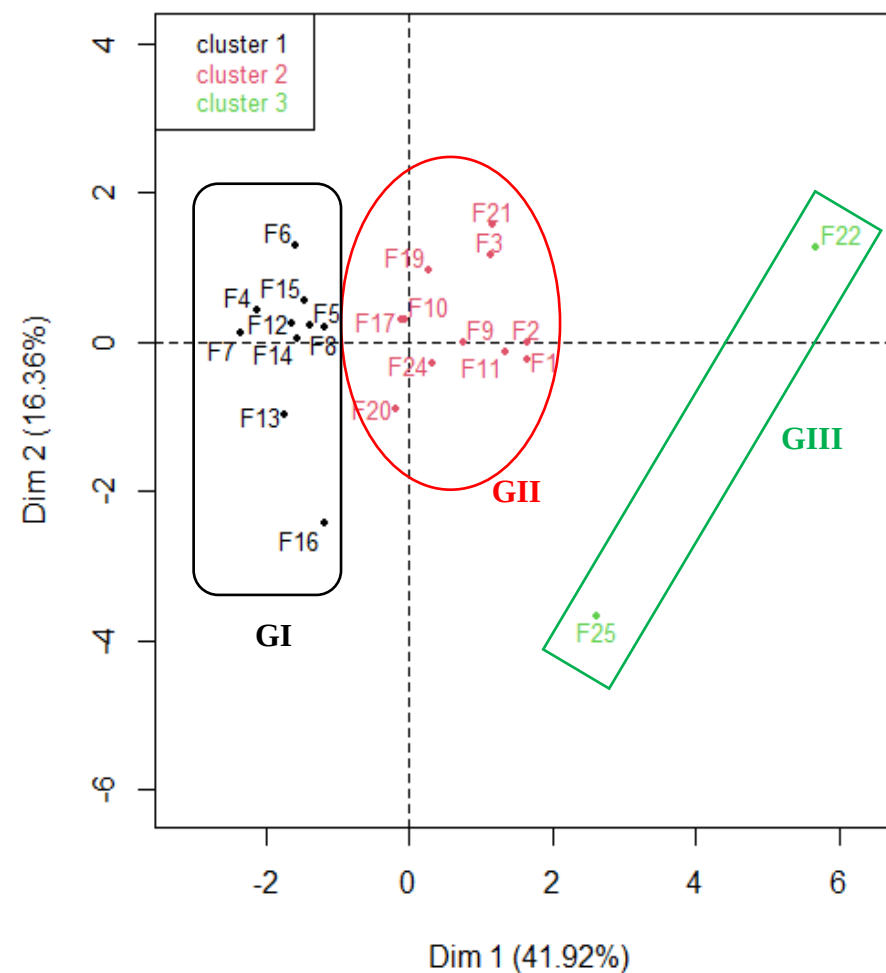
La classe I est composée des familles d'hybrides F7, F16, F13, F12, F14, F15, F6, F5, F4, F10 et F8. Cette classe est caractérisée par de fortes valeurs pour les teneurs en proline, phénols totaux et azotes foliaires.

La classe II est constituée des familles d'hybrides F21, F3, F19, F17, F24, F20, F9, F2, F11 et F1. Cette classe est caractérisée par de fortes valeurs pour la variable chlorophylle a.

La classe III est composée des familles d'hybrides F22 et F25, caractérisée par de fortes valeurs pour les variables chlorophylliennes et phénols totaux.



A : Dendrogramme de la Classification ascendante hiérarchique



B : Projection des familles d'hybrides dans le plan 1-2.

Figure 36 : Structuration des familles d'hybrides de 9 ans par groupe homogène selon les variables biochimiques évaluées dans la zone déficitaire de Toumodi.

Conclusion partielle

Les paramètres biochimiques tels que les teneurs en chlorophylles totales, en azote foliaire, en protéines solubles, en proline et en phénols totaux ont été les plus pertinents dans la discrimination des familles d'hybrides de trois (03) ans et neufs (09) ans dans les différentes zones.

Dans la parcelle de 9 ans dans la zone marginale de Toumodi :

- 02 familles d'hybrides F25 et F22 ont présenté des teneurs en pigments chlorophylliens et phénols totaux élevés et de faibles teneurs en prolines;
- 10 familles d'hybrides : F21, F3, F19, F17, F24, F20, F9, F2, F11 et F1 ont présenté des teneurs intermédiaires pour tous les paramètres biochimiques
- 11 familles d'hybrides F7, F16, F13, F12, F14, F15, F6, F5, F4, F10 et F8 ont présenté les fortes teneurs en proline, en protéines solubles, en azotes foliaires et les faibles teneurs en pigments chlorophylliens.

3.1.3. Etude des paramètres génétiques impliqués dans la résistance des familles d'hybrides au déficit hydrique.

3.1.3.1. Composantes de la variance, coefficients de variation génotypique et phénotypique

L'évaluation de 30 familles d'hybrides issues de croisements diallèles 6x6 sans les autofécondations a permis d'analyser les variances femelles, mâles et l'interaction « femelles x mâles » dans les différentes zones d'études (Tableau XLVI).

Dans la zone de Divo, l'effet « femelle » a été significatif au seuil $\alpha = 5\%$ avec des F compris entre 3,87 et 30,33 pour tous les variables évaluées sauf la variable (Tre) qui a été non significative (0,97). Les effets « mâles », à l'exception de la variable azote (0,56) et d'interaction « femelles x mâles » ont été pour la plupart significatifs avec des valeurs de F comprises entre 1,7 et 17,15 pour le premier et entre 2,1 et 15,3 pour le second. Toutes les variables agro physiologiques et biochimiques ont eu les effets d'interaction significatifs avec des F comprises entre 2,28 (Sft) et 10,2 (Haut) pour les variables agro-morphologiques, entre 2,1 (Tre) et 2,62 (Tef) pour les variables physiologiques, entre 4,14 (Azote) et 15,3 (Phénols) pour les variables biochimiques.

Dans la zone de Bongouanou, l'effet « femelle » avec un seuil de significativité $\alpha = 5\%$, a eu des F compris entre 1,07 et 11,34. Les effets « mâles » ont été significatifs avec des valeurs de F comprises entre 1,18 et 15,11 et les effets d'interaction « femelles x mâles » de 1,34 à 40,17. Les variables agro-morphologiques, physiologiques et biochimiques ont eu les effets d'interaction significatifs avec des F comprises entre 2,85 (Srft) et 6,94 (Haut) pour les variables agro-morphologiques, entre 2,16 (Tef) et 3,43 (Tre) pour les variables physiologiques, 1,37 (Chlot) et 40,17 (Proline) pour les variables biochimiques.

Dans la zone de Bouaflé, l'effet « femelle » avec des F compris entre 1,28 et 12,21 a été significatif au seuil $\alpha = 5\%$. Les effets « mâles » et d'interaction « femelles x mâles » ont été significatifs avec des valeurs de F comprises entre 1,52 et 10,99 pour le premier et entre 1,9 et 7,52 pour le second. Toutes les variables agro morphologiques et physiologiques ont eu les effets d'interaction significatifs avec des F comprises entre 2,55 (Sft) et 7,52 (Nff) pour les variables agro-morphologiques, entre 1,90 (Tre) et 2,82 (Tef) pour les variables physiologiques et 4,09 (Azote) pour la variable biochimiques.

Tableau XLVI : Effets génétiques des caractères agro-physiologiques et biochimiques des hybrides issues de croisements diallèles 6x6 sans les autofécondations après transformation racine carrée des données dans les différentes zones

zones	variables	source de variation					
		« Femelle »		« Mâle »		« Femelle*Mâle »	
		CM	F	CM	F	CM	F
Zone de Divo	Diam	1,64	3,87*	0,82	1,94*	1,56	3,69*
	Haut	14991,9	16,73**	3627,4	4,05*	9142,69	10,2*
	Nff	671,58	9,6*	199,63	2,85*	414,31	5,92*
	Sft	35047,76	10,67**	7698,58	2,34*	7497,29	2,28*
	Msf	8029,48	9,86*	9831,18	12,08**	3686,43	4,53*
	Tef	4735593,8	4,62*	4000733	3,91*	2679344,5	2,62*
	Tre	90,92	0,97ns	159,54	1,7*	197,23	2,1*
	Azote	301,13	8,31*	20,38	0,56 ns	150,15	4,14*
	Chlot	2057,02	11,95**	2180,81	12,59**	1209,15	6,98*
	Proline	4841,74	19,17**	2483,72	9,83*	3504,22	13,87**
	Phénols	1,02	30,33**	0,58	17,15**	0,51	15,3**
Zone de Bongouanou	Diam	7,79	7,29**	13,53	12,67**	7,28	6,81*
	Haut	22446,52	11,34**	23519,27	11,88**	13741,81	6,94*
	Nff	10289,38	9,12*	3766,45	3,34*	4886,04	4,33*
	Sft	1654,52	1,07*	2450,33	1,58*	4399,93	2,85*
	Msf	4264,55	4,84**	1760,58	2*	4953,19	5,62*
	Tef	963045,99	1,53*	2310270	3,67*	1360637,5	2,16*
	Tre	479,92	3,41*	185,28	2,34*	271,58	3,43*
	Azote	463,94	11,28**	143,28	3,48*	121,74	2,96*
	Chlot	579,02	2,24*	304,15	1,18*	345,13	1,34*
	Proline	3328,43	3,51*	1532,33	1,61*	2863,15	3,02*
	Phenols	0,6	9,89**	0,926	15,11*	2,46	40,17***
Zone de Bouaflé	Diam	1,87	4,22*	1,91	4,29*	1,45	3,25*
	Haut	2204,29	7,39*	668,28	2,24*	1985,36	6,66*
	Nff	918,09	12,21**	826,37	10,99**	565,4	7,52*
	Sft	1781,12	1,28*	3472,93	2,50*	3538,38	2,55*
	Msf	2453,6	6,54*	570,48	1,52**	2574,12	6,86*
	Tef	486273,07	1,01*	2613092	5,42*	1361634,6	2,82*
	Tre	287,33	8,64*	72,8	2,19*	63,11	1,90*
	Azote	161,64	3,34*	205,37	4,24*	198,39	4,09*
	Chlot	-	-	-	-	-	-
	Proline	-	-	-	-	-	-
	Phénols	-	-	-	-	-	-

Probabilité de Fischer (F) mettant en évidence des différences significatives entre les variances : ns, *, **, *** : test non significatif ou significatif à 5%, 1%, 0,01% respectivement ; diamètre au collet à deux ans de plantation (DIam) ; hauteur de l'arbre à deux ans de plantation (Haut), Nombre de feuilles fonctionnelles (Nff) ; surface foliaire totale (Sft); Masse spécifique Foliaire (Msf) ; Teneur en eau foliaire (Tef); Teneur relative en eau (Tre), Teneur en azote (Azote) ; Chlorophylles totales (Chlot) ; phénols totaux (phénols), (-) = données non collectées.

Les décompositions des variances phénotypiques en leurs composantes additives, de dominance et résiduelles des différentes zones sont présentées dans le Tableau XLVII.

Dans la zone de Divo, l'essentiel de la variance génétique totale est dû à la variance de dominance avec des valeurs comprises entre 0,01 pour (Diam) et 20,3 pour la teneur en eau foliaire (TEF) contre 0,00 (DIAM, TRE, Phénols) à 8,87 (TEF) pour les variances d'additivité correspondantes. Dans la variance phénotypique totale, la variance environnementale a eu les proportions les plus élevées pour les variables diamètre (0,02), surface foliaire totale (3,82), masse spécifique foliaire (1,16), teneur en eau foliaire (56,35), teneur relative en eau (0,37), et la teneur en azote foliaire (0,23). Cependant, la variance génétique a été plus élevée pour les variables hauteur (2,45), nombre de feuille fonctionnelle (0,43), teneur en chlorophylles totales (4,94), teneur en proline (19,18) et teneur en phénols totaux (0,07).

Dans la zone de Bongouanou, la variance de dominance a été la plus importante dans la variance génétique totale par rapport à la variance d'additivité. Les valeurs de la variance de dominance ont été comprises entre 0,08 pour le diamètre et 9,62 pour la teneur en eau foliaire, contre 0,00 pour (SFT, MSF, phénols totaux) et 1,46 pour la hauteur pour la variance d'additivité. Pour ce qui concerne la variance phénotypique totale, la variance génétique a été plus importante pour les variables diamètre (0,09), hauteur (7,92), nombre de feuille fonctionnelle (5,06), proline (9,37) et phénols totaux (0,23). La variance environnementale a été plus importante pour les variables surface foliaire (2,84), masse spécifique foliaire (1,14), teneur en eau foliaire (40,69), teneur relative en eau (0,34), teneur en azote (1,35).

Dans la zone de Bouaflé, la variance génétique totale est due à la variance de dominance avec des valeurs comprises entre 0,01 pour (Diam) et 20,3 pour la teneur en eau foliaire (TEF) contre 0,00 pour le diamètre et l'azote foliaire à 4,45 (TEF) pour les variances d'additivité. Dans la variance phénotypique totale, la variance environnementale a eu les proportions les plus élevées pour les variables diamètre (0,02), nombre de feuilles fonctionnelles (0,8), surface foliaire totale (2,66), masse spécifique foliaire (1,16), teneur en eau foliaire (30,16), teneur relative en eau (0,14) et la teneur en azote foliaire (0,39). Cependant, la variance génétique a été plus élevée pour les variables hauteur (2,22), masse spécifique foliaire (0,71).

Tableau XLVII : Composantes de la variance des paramètres agro- physiologiques et biochimiques des hybrides dans les différentes zones

Variables	Composante de la variance														
	Zone de Divo					Zone de Bongouanou					Zone de Bouaflé				
	$\sigma^2 A$	$\sigma^2 D$	$\sigma^2 G$	$\sigma^2 E$	$\sigma^2 P$	$\sigma^2 A$	$\sigma^2 D$	$\sigma^2 G$	$\sigma^2 E$	$\sigma^2 P$	$\sigma^2 A$	$\sigma^2 D$	$\sigma^2 G$	$\sigma^2 E$	$\sigma^2 P$
DIAM	0	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,08	0,09	0,04	0,13	0	0,01	0,01	0,02	0,02
HAUT	0,24	2,21	2,45	1,72	4,18	1,46	6,46	7,92	3,94	11,86	0,01	2,21	2,22	0,92	3,94
NFF	0,07	0,36	0,43	0,33	0,75	0,8	4,25	5,06	4,3	9,35	0,07	0,36	0,43	0,8	0,76
SRFT	1,16	1,16	2,32	3,82	6,15	0	0,79	0,79	2,84	3,63	0,27	1,16	1,43	2,66	5,25
MSF	0,24	0,69	0,93	1,16	2,09	0	0,99	0,99	1,14	2,13	0,02	0,69	0,71	1,16	1,87
TEF	8,87	20,3	29,17	56,35	85,52	0,84	9,62	10,46	40,69	51,15	4,45	20,3	24,75	30,16	81,1
TRE	0	0,08	0,08	0,37	0,46	0,01	0,14	0,16	0,34	0,5	0,05	0,08	0,13	0,14	0,51
AZOTE	0,02	0,08	0,1	0,23	0,33	0,08	0,16	0,24	0,31	0,55	0	0,08	0,08	0,39	0,31
CHLOT	0,45	4,49	4,94	0,57	5,51	0,06	0,62	0,68	1,35	2,03	-	-	-	-	-
PROLINE	1,14	18,04	19,18	1,4	20,58	0,73	8,64	9,37	2,79	12,16	-	-	-	-	-
PHENOLS	0	0,07	0,07	0	0,07	0	0,23	0,23	0,01	0,23	-	-	-	-	-

$\sigma^2 A$ = variance d'additivité ; $\sigma^2 D$ = variance de dominance ; $\sigma^2 G$ =variance génétique ; $\sigma^2 E$ = variance de l'erreur, $\sigma^2 P$ =Variance phénotypique, (-) = données non collectées.

3.1.3.2. Coefficients de variation génétique et phénotypique et valeurs en croisement

Les coefficients de variation génétique (CVG), phénotypique (CVP) et les écarts entre les variations génétique (CVG) et phénotypique (CVP) ont été estimés dans toutes les zones d'étude (Tableau XLVIII). Dans la zone de Divo, les coefficients de variation génétique (CVG), phénotypique (CVP) sont estimés par des valeurs faibles (0,11) à des valeurs élevées (146,86).

Les coefficients de variation génétiques, ont varié de 0,11 à 146,86 % contre une variation de 0,19 à 152,13 % pour les variations phénotypiques supérieurs (Tableau XLVIII). Ces deux coefficients ont eu les plus fortes valeurs au niveau des variables proline et phénols totaux. Les écarts entre les CVP et CVG ont été plutôt élevés pour l'ensemble des variables agro morphologiques avec une variation de 30,50 % (hauteur) à 74,76 % (diamètre), des variables physiologiques de 71,23 (Teneur en eau foliaire) à 136,74 % (teneur relative en eau) et seulement pour la teneur en azote avec un coefficient de 82,22 % (variable biochimique). Cependant, les plus faibles écarts entre CVP et CVG ont été observés au niveau des variables biochimiques (phénols totaux, proline et chlorophylles totales), avec des valeurs comprises entre 2,43 et 5,63 %.

Dans la zone de Bongouanou, les coefficients de variation génétique (CVG), phénotypique (CVP) sont aussi estimés par des valeurs faibles à des valeurs élevées. Les coefficients de variation génétiques, ont varié de 0,08 à 25 % contre une variation de 0,18 à 25,68 % pour les variations phénotypiques (Tableau XLVIII). Ces deux coefficients ont eu les plus fortes valeurs au niveau de la variable phénols totaux. Les écarts entre les CVP et CVG ont été plutôt élevés pour l'ensemble des variables agro-morphologiques avec une variation de 22,26 % (diamètre) à 113,81 % (surface foliaire totale), des variables physiologiques de 78,92 (Teneur relative en eau) à 121,92 % (Teneur en eau foliaire), des variables biochimiques de 13,90 (proline) à 72,47 (chlorophylles totales). Cependant, les plus faibles écarts entre CVP et CVG ont été observés au niveau de la variable biochimique phénols totaux (1,51 %).

Dans la zone de Bouaflé, les coefficients de variation génétique (CVG), phénotypique (CVP) ont été estimés seulement par des valeurs faibles. Les coefficients de variation génétiques ont varié de 0,13 (teneur en eau foliaire) à 3,28 % (nombre de feuilles fonctionnelles) contre une variation de 0,24 % (teneur en eau foliaire) à 4,94 % (diamètre) pour les variations phénotypiques (Tableau XLVIII). Les écarts entre les CVP et CVG ont été plutôt élevés pour toutes les variables avec une variation de 32,46 % (nombre de feuilles fonctionnelles) à 97,78 % (azote).

Tableau XLVIII : Coefficients de variation génétique et phénotypique des paramètres agro- physiologiques et biochimiques des hybrides dans les différentes zones

	Coefficients de variation génétique et phénotypique								
	Zone de Divo			Zone de Bongouanou			Zone de Bouaflé		
	CVG (%)	CVP (%)	$100 \times \frac{CVP - CVG}{CVP} (\%)$	CVG (%)	CVP (%)	$100 \times \frac{CVP - CVG}{CVP} (\%)$	CVG (%)	CVP (%)	$100 \times \frac{CVP - CVG}{CVP} (\%)$
DIAM	1,85	3,23	74,76	7,12	8,70	22,26	2,85	4,94	72,98
HAUT	1,22	1,59	30,50	2,45	2,99	22,39	1,86	2,47	33,32
NFF	1,29	1,71	32,73	5,15	7,01	36,02	3,28	4,34	32,46
SRFT	0,75	1,22	62,72	0,65	1,39	113,81	0,95	1,81	91,73
MSF	0,59	0,89	50,22	0,52	0,76	46,51	0,42	0,68	62,61
TEF	0,11	0,19	71,23	0,08	0,18	121,15	0,13	0,24	81,02
TRE	0,42	0,99	136,74	0,65	1,16	78,92	0,61	1,20	96,13
AZOTE	0,79	1,44	82,22	1,48	2,23	50,63	0,84	1,65	97,78
CHLOT	2,79	2,95	5,63	1,70	2,92	72,47	-	-	-
PROLINE	146,86	152,13	3,58	4,53	5,16	13,90	-	-	-
PHENOLS	12,98	13,30	2,43	25,30	25,68	1,51	-	-	-

CVG= coefficient de variation génétique ; CVP= coefficient de variation phénotypique. Les CVP et CVG inférieurs à 10% sont faibles, ceux compris entre 10 et 20 % sont modérés et ceux supérieurs à 20 % sont considérés comme élevés ; d'après Cheserek *et al.*, 2020. DIAM = Diamètre, HAUT= Hauteur, NFF=Nombre de feuilles fonctionnelle, SRFT= Surface foliaire totale, MSF= Masse spécifique foliaire, TEF= Teneur en eau foliaire, TRE= Teneur relative en eau, Azote= teneur en azote foliaire, Chlot=chlorophylles totales, Proline= teneur en proline, Phénols= Teneur en phénols totaux, (-) = données non collectées.

3.1.3.3. Héritabilités des caractères dans les différentes zones

Les valeurs d'héritabilité au sens strict, estimées pour toutes les variables, ont été dans l'ensemble faibles, variant entre 0,00 (Tre) et 0,19 (Srft) dans la zone de Divo ; entre 0,00 (Srft, Msf, Phénols) et 0,12 (Haut) dans la zone de Bongouanou ; entre 0,00 (azote) et 0,10 (Nff, Tre) dans la zone de Bouaflé (Tableau XLIX). Cependant, l'héritabilité au sens large a été plutôt exprimée par des valeurs élevées pour la quasi-totalité des variables variant de 0,18 (Tre) à 0,95 (phénols) dans la zone de Divo ; de 0,20 (Tef) à 0,97 (phénols) dans la zone de Bongouanou et de 0,26 (Tre, azote) à 0,57 (Nff) dans la zone Bouaflé (Tableau XLIX).

Tableau XLIX : Héritabilités au sens strict et au sens large des paramètres agro- physiologiques et biochimiques des hybrides dans les différentes zones

Variables	Héritabilité					
	Zone de Divo		Zone de Bongouanou		Zone de Bouaflé	
	h ²	H ²	h ²	H ²	h ²	H ²
DIAM	0,01	0,33	0,06	0,67	0,02	0,33
HAUT	0,06	0,59	0,12	0,67	0,03	0,56
NFF	0,09	0,57	0,09	0,54	0,10	0,57
SRFT	0,19	0,38	0,00	0,22	0,05	0,27
MSF	0,11	0,44	0,00	0,47	0,01	0,38
TEF	0,10	0,34	0,02	0,20	0,05	0,31
TRE	0,00	0,18	0,03	0,31	0,10	0,26
AZOTE	0,06	0,30	0,15	0,44	0,00	0,26
CHLOT	0,08	0,90	0,03	0,34	-	-
PROLINE	0,06	0,93	0,06	0,77	-	-
PHENOLS	0,06	0,95	0,00	0,97	-	-

h²= héritabilité au sens strict ; H²= héritabilité au sens large. DIAM = Diamètre, HAUT= Hauteur, NFF=Nombre de feuilles fonctionnelle, SRFT= Surface foliaire totale, MSF= Masse spécifique foliaire, TEF= Teneur en eau foliaire, TRE= Teneur relative en eau, Azote= teneur en azote foliaire, Chlot=chlorophylles totales, Proline= teneur en proline, Phénols= Teneur en phénols totaux, (-) = données non collectées.

3.1.3.4. Aptitudes générales et spécifiques à la combinaison des géniteurs dans les différentes zones

3.1.3.4.1. Aptitudes générales à la combinaison des géniteurs dans les différentes zones

L'analyse de l'aptitude générale à la combinaison (AGC) concerne 6 géniteurs dans un diallèle incomplet (les autofécondations ont été réalisées) dans trois zones agro écologiques. Les géniteurs ont eu des AGC positives et significatives mais aussi des AGC négatives pour toutes les variables agro-morphologiques, physiologiques et biochimiques dans les différentes zones (Tableau L).

Tableau L : Aptitudes générales à la combinaison des géniteurs pour les caractères agro-physiologiques et biochimiques dans les différentes zones

Zones	Géniteurs	DIAM	HAUT	NFF	SFT	MSF	TEF	TRE	AZOTE	CHLT	PROLINE	PHENOLS
Divo	IFC1	-0,09	-7,55	-2,91	-20,59	3,24	-312,92	-0,13	-0,89	-0,99	-8,70	0,05
	IMC67	0,00	0,29	0,82	6,97	-4,25	-2,67	1,69	-0,46	2,97	4,30	0,21
	POR	-0,03	-1,89	1,12	10,19	10,38	40,78	1,14	0,57	-14,62	2,45	-0,02
	SCA6	0,08	5,85	0,56	-9,90	-15,14	273,89	1,91	1,05	12,20	0,68	-0,24
	T60/887	0,07	7,97	-0,42	7,16	6,12	-44,09	-2,14	0,23	-3,88	18,52	0,12
	UPA409	-0,03	-4,67	0,82	6,17	-0,36	45,01	-2,46	-0,50	4,32	-17,25	-0,12
Bongouanou	IFC1	0,00	-4,89	-9,02	1,23	0,78	135,41	2,18	-1,80	-4,89	9,99	0,12
	IMC67	-0,03	-0,80	-0,12	1,69	-5,66	-83,91	-0,57	-1,82	1,95	-0,31	0,07
	POR	-0,36	-15,41	-5,15	-3,34	4,26	72,00	-0,80	-0,04	6,28	1,16	-0,02
	SCA6	0,06	8,51	7,42	-2,38	1,09	87,94	1,18	1,22	-2,99	1,76	-0,16
	T60/887	0,55	21,98	11,11	-1,49	1,30	-80,60	-0,42	2,31	-3,07	-10,69	-0,03
	UPA409	-0,22	-9,38	-4,25	4,29	-1,77	-130,85	-1,57	0,12	2,72	-1,90	0,02
Bouaflé	IFC1	-0,10	-2,99	-1,13	3,95	2,93	99,95	1,83	-0,84	-	-	-
	IMC67	-0,06	-0,91	-0,92	5,10	-5,20	-129,66	-1,05	-1,12	-	-	-
	POR	0,09	0,26	2,78	-7,02	3,16	156,14	-0,81	0,68	-	-	-
	SCA6	0,13	4,49	2,55	-5,91	3,87	-69,07	0,89	1,06	-	-	-
	T60/887	-0,07	-1,53	-1,55	1,02	-4,24	93,70	0,61	-0,84	-	-	-
	UPA409	0,00	0,68	-1,73	2,85	-0,51	-151,07	-1,46	1,06	-	-	-

Les valeurs en caractères gras indiquent les AGC positives ; Dam= diamètre à 10 cm du sol ; Haut= Hauteur de l'arbre ; NFF= nombre de feuilles fonctionnelles, SFT = surface foliaire totale, MSF=masse spécifique foliaire ; AZOTE= teneur en azote foliaire, TEF=teneur en eau foliaire, TRE=Teneur relative en eau, CHLT= chlorophylle totales, PHENOLS = phénols totaux(-) = données non collectées.

Dans la zone de Divo, deux (02) géniteurs SCA6 (0,08 cm) et T60/887 (0,07 cm) ont eu des AGC positives avec contre des AGC négatives obtenues par trois (03) autres géniteurs POR (-0,03 cm), UPA409 (-0,03 cm) et IFC1 (-0,09 cm) pour la variable diamètre. La hauteur des arbres a eu des AGC positives pour trois géniteurs T60/887 (7,97 cm), SCA6 (5,85 cm) et IMC67 (0,29 cm). Par contre, les géniteurs IFC1 (-7,55 cm), POR (-1,89 cm), UPA409 (-4,67 cm) ont obtenu des AGC négatives. Pour le nombre de feuilles fonctionnelles, quatre (04) géniteurs IMC67 (0,82), POR (1,12), UPA409 (0,82) et SCA6 (0,56) ont obtenu des AGC positives et deux géniteurs IFC1 (-2,91), T60/887 (-0,42) ont eu des AGC négatives. Pour la surface foliaire, quatre (04) géniteurs IMC67, POR, T60/887 et UPA409, ont obtenu des AGC avec des valeurs respectives de 6,57 cm², de 10,19 cm², de 7,16 cm² et de 6,17 cm². Les AGC négatives ont été obtenues par les géniteurs IFC1 (-20,59 cm²) et SCA6 (-9,90 cm²). Trois (03) géniteurs POR (10,38 mg/cm²), T60/887 (6,12 mg/cm²), IFC1 (3,24 mg/cm²) ont enregistré les meilleures AGC pour la masse spécifique. Les faibles AGC ont été cependant enregistré par les géniteurs IMC67 (- 4,25 mg/cm²), SCA1 (-15,14 mg/cm²), et UPA409 (- 0,36 mg/cm²).

Pour ce qui concerne des paramètres physiologiques, trois (03) géniteurs POR, UPA409 et SCA6 ont enregistré les meilleures AGC avec des valeurs respectives de 40,78 mg/g, de 45,01 mg/g et de 273,89 mg/g. Par contre, les géniteurs IFC1 (-312,92 mg/g), T60/887 (-44,09 mg/g), et IMC67 (-2,67 mg/g) ont enregistré les plus faibles AGC. Les meilleures AGC pour la teneur relative en eau ont été obtenues par les géniteurs SCA6 (1,91 %), IMC67 (1,69 %) et POR (1,14 %) et les plus faibles par les géniteurs IFC1 (-0,13 %), T60/887 (-2,14 %) et UPA409 (-2,46 %).

Quant à l'ensemble des variables biochimiques, les meilleures AGC de l'azote foliaire ont été enregistrées par trois géniteurs POR, SCA6 et T60/887 avec des valeurs respectives de 0,57 unite de spard, de 1,05 unités de spard, de 0,23 unités de spard. Les géniteurs IFC1 (-0,89 unités de spard), IMC67 (-0,46 unités de spard) et UPA409 (-0,50 unités de spard), ont enregistrés les AGC négatives. Pour les chlorophylles totales, les géniteurs IMC67 (2,97 µg/g), SCA6 (12,20 µg/g), UPA409 (4,32 µg/g), ont présenté les AGC positives et celles qui étaient négatives par les géniteurs IFC1 (-0,99 µg/g), POR (-3,88 µg/g) et T60/887 (-3,88 µg/g). Au niveau de la proline, les géniteurs IMC67, POR, SCA6, T60/887, ont obtenus des AGC positives comprises entre 0,68 et 18, 52 µmol/g. Les AGC négatives ont été obtenues par IFC1 (-8,70 µmol/g) et UPA409 (-17,25 µmol/g). Concernant les phénols totaux, les géniteurs IFC1 (0,05 µg/g), IMC67 (0,21 µg/g), T60/887 (0,12 µg/g) ont enregistré les valeurs positives

d'AGC. Les géniteurs POR, SCA6, UPA409, ont présenté les AGC négatives variant de (-0,24 µg/g) à (-0,02 µg/g).

Dans la zone de Bongouanou, deux géniteurs SCA6 et T60/887 ont obtenu les meilleures AGC pour les variables diamètre, hauteur, nombre de feuilles fonctionnelle, avec des valeurs respectives de 0,06 cm, de 8,51 cm, de 7,42 feuilles pour SCA6 ; de 0,55 cm, de 21,98 cm, de 11,11 feuilles pour T60/887. Les autres géniteurs ont présenté des AGC négatives dont les valeurs sont comprises entre (-0,03 cm et -0,36 cm) pour le diamètre, (-15,41cm et -0,80 cm) pour la hauteur, (-9,02 et -0,12 feuilles) pour le nombre de feuilles fonctionnelles. Pour la surface foliaire totale, les AGC positives ont été enregistrées au niveau de IFC1 (1,23 cm²), IMC67 (1,69 cm²), UPA409 (4,29 cm²) et les AGC négatives au niveau des géniteurs POR (-3,34 cm²), SCA6 (-2,38 cm²) et T60/887 (-1,49 cm²). Au niveau de la masse spécifique foliaire, les géniteurs IFC1, POR, SCA6 et T60/887, ont obtenu les meilleures AGC avec les valeurs comprises entre 0,78 mg/cm² et 4,26 mg/cm². Concernant les variables physiologiques, les géniteurs IFC1 (135,41 mg/g), POR (72 mg/g) et SCA6 (87,94 mg/g), ont présenté les meilleures AGC pour la variable teneur en eau foliaire. Par contre, les géniteurs IMC67, T60/887 et UPA409, ont présenté les AGC négatives variant de (-130,85 mg/g) à (-80,60 mg/g). Pour la teneur relative en eau, IFC1 (2,18 %) et SCA6 (1,18 %), ont obtenu les AGC positives et les autres géniteurs, les AGC négatives dont les valeurs sont comprises entre (-1,57 %) et (-0,42 %). Quant aux variables biochimiques, les géniteurs SCA6, T60/887 et UPA409 ont obtenu les meilleures AGC avec des valeurs respectives de 1,22 unité de spard, de 2,31 unités de spard et de 0,12 unité de spard. Les AGC négatives, ont été obtenue par géniteurs IFC1 (-1,8 unité de spard), IMC67 (-1,82 unité de spard) et POR (-0,04 unité de spard). Pour les chlorophylles totales, les géniteurs IMC67 (1,95 µg/g), POR (6,28 µg/g) et UPA409 (2,72 µg/g) ont affiché des AGC positives et les AGC négatives, par les géniteurs IFC1 (-4,89 µg/g), SCA6 (-2,99 µg/g) et T60/887 (-3,07 µg/g). Pour la proline, trois géniteurs IFC1, POR et SCA6 ont obtenu les AGC positives avec des valeurs respectives de 9,99 µmol/g, de 1,16 µmol/g et de 1,76 µmol/g. Les trois autres géniteurs IMC67 (-0,31 µmol/g), T60/887 (-10,69 µmol/g) et UPA409 (-1,90 µmol/g) ont présenté des AGC négatives. Au niveau des phénols totaux, les meilleures AGC ont été obtenues par IFC1 (0,12 µg/g), IMC67 (0,07 µg/g) et UPA409 (0,02 µg/g). Les trois autres géniteurs ont présenté des valeurs négatives d'AGC variant de (-0,16 µg/g) à (-0,02 µg/g) (Tableau L).

Dans la zone de Bouaflé, deux géniteurs POR (0,09 cm), SCA6 (0,13 cm) pour le diamètre, POR (0,26 cm), SCA6 (4,49 cm), UPA409 (0,68 cm) pour la hauteur, POR (278), SCA6 (2,55)

pour le nombre de feuilles fonctionnelles ont encore réitérés les meilleures AGC. Pour la surface foliaire totale, quatre géniteurs (IFC1, IMC67, T60/887 et UPA409) avec des valeurs comprises entre 1,02 cm² et 5,10 cm², ont enregistré les meilleures AGC. Au niveau de la masse spécifique foliaire, trois géniteurs (IFC1, POR, SCA6) ont présenté des valeurs d'AGC positives variant de 2,93 à 3,87 mg/cm². Concernant la teneur en eau foliaire, les géniteurs IFC1 (99,95 mg/g), POR (156,14 mg/g), T60/887 (93,70 mg/g), ont obtenu les valeurs positives d'AGC. Pour la teneur relative en eau, trois géniteurs (IFC1, SCA6, T60/887) ont obtenu les valeurs positives d'AGC comprises entre 0,89 % et 1,83 %. Quant à l'azote foliaire, les valeurs positives d'AGC ont été obtenues par les géniteurs POR (0,68 unités de spard), SCA6 (1,06 unités de spard), UPA409 (1,06 unités de spard). Les géniteurs non cités au niveau de chaque variable dans la zone de Bouaflé, ont présenté des valeurs négatives d'AGC (Tableau L).

3.1.3.4.2. Aptitudes spécifiques à la combinaison des croisements dans les différentes zones

3.1.3.4.2.1. Aptitude spécifique à la combinaison des croisements dans la zone de Divo

Le croisement diallèle entre les 6 géniteurs a permis d'estimer les aptitudes spécifiques à la combinaison dans la zone de Divo (Tableau LI).

Au niveau des caractères agro-morphologiques, l'aptitude spécifique à la combinaison (ASC) a varié de -0,36 à 0,47 cm pour le diamètre ; de -42,32 à 34,14 cm pour la hauteur, de -20,29 à 5,72 pour le nombre de feuilles fonctionnelles, de -54,13 à 53,18 cm² pour la surface foliaire totale et de -98,67 à 79,28 mg/cm² pour la masse spécifique foliaire.

Pour l'ensemble des six (06) variables agro-morphologiques, les meilleures ASC ont été obtenues par les descendances issues des croisements IFC1 X SCA6 ; POR X T60/887 ; T60/887 X POR ; UPA409 X POR. Pour quatre (04) variables agro-morphologiques sur l'ensemble des six (06), ce sont les descendances des croisements IFC1 X T60/887 ; IMC67 X SCA6 ; T60/887 X SCA6 et UPA409 X IFC1, qui ont donné les meilleures ASC. Les descendances des croisements IMC67 X T60/887 ; POR X IFC1 ; SCA6 X IMC67 ; SCA6 X UPA409 ; UPA409 X SCA6 et UPA409 X T60/887, ont meilleures pour trois variables. Par contre, les descendances issus des croisements IMC67 X IFC1 ; POR X UPA409 ; SCA6 X IFC1 ; T60/887 X IMC67 et T60/887 X UPA409 ont eu les valeurs négatives d'ASC sur l'ensemble des variables.

Tableau LI : Aptitudes spécifiques à la combinaison des croisements pour les caractères agro-physiologiques et biochimiques dans la zone de Divo

Croisements	Variables agro-physiologiques et biochimiques dans la zone Divo										
	DIAM	HAUT	NFF	SFT	MSF	TEF	TRE	AZOTE	CHLT	PROLINE	PHENOLS
IFC1 X MC67	-0,09	-1,45	5,72	9,4	-8,49	-55,22	-2,26	-1,23	2,2	9,71	0,18
IFC1 X POR	-0,22	-10,39	1,62	11,97	-17,02	518,57	-1,28	2,01	-5,74	-11,15	0,26
IFC1 X SCA6	0,08	19,35	3,91	12,76	13,79	-182,44	-0,48	1,9	10,22	7,11	-0,12
IFC1X T60/887	0,25	24,97	4,93	35,57	-20,02	311,53	5,13	-0,47	-24,1	-14,19	-0,33
IFC1 X UPA409	-0,22	-10,72	0,02	15,02	-17,36	-16,06	0,01	2,06	27,18	8,96	-0,48
IMC67 X IFC1	-0,32	-19,32	-5,27	-37,87	79,28	392,22	1,52	-3,49	-37,8	-20,47	-0,05
IMC67 X POR	-0,31	-15,92	2,44	9,98	-6,19	17,61	1,71	-1,68	-12,9	-28,49	-0,2
IMC67 X SCA6	0,47	30,84	-0,13	22,78	21,4	-216,93	-1,1	2,68	-2,71	-21,53	-0,54
IMC67 X T60/887	0,02	-1,37	1,93	-4,11	17,04	187,95	5,28	1,35	30,05	120,6	-0,07
IMC67 X UPA409	-0,05	-0,28	1,2	21,32	0,62	6,99	-1,21	0,01	-10,1	-7,73	0,06
POR X IFC1	0,22	-13,07	2,86	-22,81	21,64	-533,35	-1,38	3,11	-5,74	-11,15	0,26
POR X IMC67	0,18	10,79	-1,51	-26,91	-1,44	-385,57	-0,72	-0,5	-5,67	-11	-0,11
POR X SCA6	-0,09	-7,31	-0,54	-24,42	-0,87	311,55	-3,95	-3,5	3,2	21,38	0,51
POR X T60/887	0,05	3,96	2,94	16,41	30,13	73,15	1,09	-1,69	-8,45	-19,68	-0,2
POR X UPA409	-0,32	-13,93	-3,84	-0,66	-0,52	286,86	6,38	2,67	-11,7	-8,01	0,14
SCA6 X IFC1	-0,26	-42,32	-0,62	-18,18	-23,65	377,3	2,36	-4,76	10,22	7,11	-0,12
SCA6 X IMC67	0,23	18,63	-2,11	20,37	-98,67	171,81	-0,89	3,69	27,7	-19,18	0,22
SCA6 X POR	-0,16	-6,74	-3,91	10,58	9,37	-85,94	-3,68	-1,93	2,6	25,46	0,32
SCA6 X T60/887	-0,36	-17,55	-0,93	7,21	13,31	-229,93	5,65	-3	-10,3	-10,57	-0,43
SCA6 X UPA409	0,16	4,84	3,32	-33,2	10,28	-226,28	0,37	-1,46	-31,1	-8,11	-0,06
T60/887 X IFC1	0,1	26,27	-20,29	-54,13	-17,83	-1089,1	-2,01	0,44	-5,59	-2,31	0,97
T60/887 X IMC67	-0,03	-9,59	0,91	-4,56	-10,18	-36,84	-4,27	-2,09	30,26	-14,79	0,15
T60/887 X POR	0,27	14,69	2,54	53,18	9,39	-417,72	3,35	0,46	-26,4	49,85	-0,15
T60/887 X SCA6	0	4,87	4,44	-9,44	15,27	548,26	0,14	1,54	-6,58	-20,45	-0,11
T60/887 X UPA409	-0,19	-26,24	0,92	-4,32	0,14	-123,47	-24,87	-1,05	-9,66	-24,6	0,33
UPA409 X IFC1	0,28	11,58	1,32	7,1	-3,86	-349,24	-1,84	-0,1	27,18	8,96	-0,48
UPA409 X IMC67	-0,12	-11,74	-1,53	3,58	-1,85	-87,37	5,34	-1,93	-15,1	1,49	0,78
UPA409 X POR	0,29	34,14	0,2	13,15	1,79	63,27	0,01	1,24	14,72	-0,55	-0,67
UPA409 X SCA6	0,08	7,08	-2,3	-8,27	9,5	80,39	5,42	3,86	21,08	20,13	-0,16
UPA409 X T60/887	0,02	-4,08	2,33	-1,36	0,51	454,92	5,49	0,92	-3,87	-25,07	0,29

Les valeurs en caractères gras indiquent les ASC positives ; Dam= diamètre à 10 cm du sol ; Haut= Hauteur de l'arbre ; Nff= nombre de feuilles fonctionnelles, Sft = surface foliaire, Msf=masse spécifique foliaire ; AZOTE= teneur en azote foliaire, TEF=teneur en eau foliaire, TRE=Teneur relative en eau, Chlot= chlorophylle totales, Phénols= Phénols totaux.

Au niveau des variables physiologiques, l'ASC a varié de -1089,13 mg/g à 548,26 mg/g pour la teneur en eau foliaire, de -24,87 à 6,38 % pour la teneur relative en eau. Les descendances des croisements IFC1X T60/887 ; IMC67 X IFC1 ; IMC67 X POR ; IMC67 X T60/887 ; POR X T60/887 ; POR X UPA409 ; POR X UPA409 ; T60/887 X SCA6 ; UPA409 X POR ; UPA409 X SCA6 et UPA409 X T60/887, ont enregistré les meilleures ASC. Cependant, les descendances des croisements IFC1 X MC67 ; IFC1 X POR ; IFC1 X SCA6 ; IMC67 X SCA6 ; POR X IFC1 ; POR X IMC67 ; SCA6 X POR ; T60/887 X IFC1 ; T60/887 X IMC67 ; T60/887 X UPA409 ; UPA409 X IFC1 et UPA409 X IMC67 ont eu des valeurs négatives.

Les bonnes affinités pour les variables biochimiques ont été enregistrées pour les descendances issues des croisements IFC1 X MC67 ; IFC1 X SCA6 ; IFC1 X UPA409 ; IMC67 X T60/887 ; POR X SCA6 ; SCA6 X POR et UPA409 X SCA6. Leurs valeurs d'ASC ont varié de 0,01 à 3,86 unités de spard pour la teneur en azote foliaire ; de 2,2 à 30,05 µg/g pour les chlorophylles totales ; de 1,49 à 120,6 µmol/g pour la teneur en proline et de 0,06 à 0,97 µg/ml pour la teneur en phénols totaux. Par contre, les valeurs négatives d'ASC ont varié de -4,76 à -0,10 unités de spard pour la teneur en azote foliaire ; de -37,8 à -2,71 µg/g pour les chlorophylles totales, de -28,49 et -0,55µmol/g pour la proline et de -0,67 et -0,07 µg/ml pour les phénols totaux. Ces faibles valeurs d'ASC ont été enregistrées chez les descendances des croisements IFC1X T60/887 ; IMC67 X IFC1 ; IMC67 X POR ; POR X IMC67 ; POR X T60/887 ; SCA6 X T60/887 ; SCA6 X UPA409 et SCA6 X UPA409 (Tableau LI).

3.1.3.4.2.2. Aptitudes spécifiques à la combinaison des croisements dans la zone de Bongouanou

Au niveau des caractères agro-morphologiques, l'aptitude spécifique à la combinaison (ASC) a varié de de -1,19 à 2,22 cm pour le diamètre ; de -62,02 à 48,66 cm pour la hauteur ; de -28,48 à 29,08 pour le nombre de feuilles fonctionnelles ; de -23,18 à 35,18 cm² pour la surface foliaire et de -21,02 à 62,39 mg/cm² pour la masse spécifique foliaire. Les meilleures descendances pour l'ASC ont été issues des croisements IFC1 X MC67 ; IMC67 X UPA409 ; POR X SCA6 et SCA6 X T60/887, contre les descendances des croisements IFC1 X POR ; IMC67 X IFC1 ; IMC67 X T60/887 ; POR X UPA409 ; SCA6 X IMC67 ; SCA6 X POR et UPA409 X IMC67, qui ont eu les faibles ASC (Tableau LII).

Pour les variables physiologiques, l'ASC a varié de -664,41 mg/g à 602,01 mg/g pour la teneur en eau foliaire et de -6,88 à 8,00 % pour la teneur relative en eau.

Tableau LII : Aptitudes spécifiques à la combinaison des croisements pour les caractères agro-physiologiques et biochimiques dans la zone de Bongouanou

Variables agro-physiologiques et biochimiques dans la zone Bongouanou											
Croisements	Diam	Haut	Nff	Sft	Msf	Tef	Tre	Azote	Chlt	Proline	Phénols
IFC1 X MC67	0,55	37,35	23,15	12,91	0,60	165,29	8,00	1,05	9,10	-11,92	-0,89
IFC1 X POR	-0,69	-34,15	-11,70	-18,12	-13,77	-187,79	-3,48	-0,41	4,91	-18,47	-0,11
IFC1 X SCA6	-0,11	12,50	3,45	0,97	3,07	538,61	-1,56	0,54	2,34	16,18	-0,34
IFC1X T60/887	0,07	24,90	12,62	5,34	-10,04	244,51	0,79	-2,55	-0,88	-37,66	0,65
IFC1 X UPA409	-0,17	1,21	2,71	-5,42	-3,16	-199,72	-4,07	0,39	-5,46	43,87	-0,29
IMC67 X IFC1	-0,25	-12,73	-0,85	-10,76	-11,94	71,57	-0,18	0,38	-4,71	16,05	0,74
IMC67 X POR	-0,58	-30,70	-12,42	35,18	2,31	151,28	-1,15	4,84	15,28	-40,35	-0,88
IMC67 X SCA6	0,16	-9,34	0,60	-6,95	17,52	21,63	0,23	-1,60	5,12	38,89	-0,32
IMC67 X T60/887	-1,19	-62,02	-28,48	-6,23	-11,78	-0,07	-2,75	0,86	-4,70	-28,89	0,97
IMC67 X UPA409	0,49	16,46	7,65	19,04	23,80	-51,32	5,73	-1,86	-11,31	-25,00	-0,30
POR X IFC1	-0,45	-20,17	-0,55	2,08	62,39	-150,93	3,93	1,10	4,91	-18,47	-0,11
POR X IMC67	0,65	45,51	20,09	-15,74	-13,56	184,38	-2,34	-1,71	6,71	69,34	2,24
POR X SCA6	0,20	8,51	-0,69	-11,41	-10,34	602,01	7,43	2,07	-16,70	11,72	-0,06
POR X T60/887	0,31	24,15	21,94	1,39	4,04	204,47	0,60	0,87	0,08	16,56	-0,75
POR X UPA409	-0,38	-24,49	-12,35	-14,21	-21,02	91,63	-5,39	-5,83	6,01	8,24	-0,18
SCA6 X IFC1	-0,78	-39,07	-26,28	9,34	-14,73	217,76	3,04	-0,91	2,34	16,18	-0,34
SCA6 X IMC67	-0,23	-6,49	-10,77	-11,10	-4,70	-664,41	-6,88	-2,12	-4,92	2,84	-0,36
SCA6 X POR	-0,68	-42,71	-26,92	-13,91	-7,23	-376,11	-2,05	-0,39	7,27	-23,67	-0,78
SCA6 X T60/887	0,22	6,08	26,97	15,81	1,37	-178,17	-0,01	1,51	-8,71	-29,03	-0,34
SCA6 X UPA409	1,05	48,66	29,08	9,88	-11,02	130,70	0,46	-0,70	2,67	-41,36	0,07
T60/887 X IFC1	2,22	29,47	-13,55	-3,11	-2,32	-276,19	-0,98	-3,56	-16,87	-29,65	1,22
T60/887 X IMC67	0,49	29,91	11,66	-4,63	-1,49	25,45	0,45	-1,29	0,61	16,57	-0,90
T60/887 X POR	0,44	29,27	-12,57	14,08	12,10	-365,87	-1,42	-2,43	-6,62	14,36	0,36
T60/887 X SCA6	0,09	28,50	20,21	-4,69	5,20	18,32	-0,55	2,25	9,27	22,64	0,10
T60/887 X UPA409	-0,72	-22,70	-9,75	1,26	-6,31	-26,82	-1,07	-0,65	15,48	16,56	-0,61
UPA409 X IFC1	-0,40	-9,07	-7,05	9,22	-8,54	-152,30	-1,14	0,37	-5,46	43,87	-0,29
UPA409 X IMC67	-0,16	-9,56	-10,88	-8,34	-12,09	-71,63	-2,25	-2,20	-7,28	-38,15	-0,15
UPA409 X POR	0,46	13,95	12,30	13,03	-3,24	-25,01	0,27	0,55	-0,03	-17,53	0,37
UPA409 X SCA6	0,20	10,39	-0,82	7,29	23,05	-134,46	2,23	1,80	-4,66	-10,86	2,02
UPA409 X T60/887	-0,84	-43,61	-19,40	-23,18	15,00	177,22	2,11	8,36	15,48	16,56	-0,61

Les valeurs en caractères gras indiquent les ASC positives ; Diam= diamètre à 10 cm du sol ; Haut= Hauteur de l'arbre ; Nff= nombre de feuilles fonctionnelles, Sft = surface foliaire, Msf=masse spécifique foliaire ; AZOTE= teneur en azote foliaire, TEF=teneur en eau foliaire, TRE=Teneur relative en eau, Chlt= chlorophylle totales, Phénols totaux.

Les descendants issus des croisements IFC1 X MC67 ; IFC1X T60/887, IMC67 X SCA6, POR X SCA6 ; POR X T60/887 ; SCA6 X IFC1 ; SCA6 X UPA409 ; T60/887 X IMC67 et UPA409 X T60/887 ont eu des ASC positives sur la quasi-totalité des variables physiologiques. Cependant, ceux issus des croisements IFC1 X UPA409 ; IMC67 X T60/887 ; SCA6 X IMC67 ; SCA6 X POR ; SCA6 X T60/887 ; T60/887 X POR ; T60/887 XUPA409 ; UPA409 X IFC1 et UPA409 X IMC67, ont eu des valeurs d'ASC négatives sur l'ensemble des variables physiologiques.

Les résultats obtenus pour les paramètres biochimiques ont montré de bonnes affinités pour les descendants issus des croisements T60/887 X SCA6 ; IFC1 X SCA6 ; IMC67 X IFC1 ; POR X IMC6 ; POR X T60/887 et UPA409 X T60/887. Leurs valeurs d'ASC ont varié de 0,39 unités spad à 8,36 unités spad (azote) ; de 0,08 à 15,48 µg/g (chlorophylle totales) ; de 2,84 et 69,34 µmol/g (proline) et de 0,07 à 2,24 µg/ml (phénols). Par contre, les valeurs négatives d'ASC variant de -5,83 à -0,39 unités de spad pour l'azote ; de -16,7 à -0,03 µg/g pour les chlorophylles totales ; de - 41,36 à -10,86 µmol/g pour la proline et de - 0,90 à - 0,06 µg/ml pour les phénols totaux, ont été enregistrées chez les descendants issus des croisements UPA409 X IMC67 sur l'ensemble des variables biochimiques (Tableau LII).

3.1.3.4.2.3. Aptitudes spécifiques à la combinaison des croisements dans la zone de Bouaflé

Dans la zone de Bouaflé, les ASC ont varié de -0,03 cm à 1,14 cm pour le diamètre ; de -23,01 à 19,01 cm pour la hauteur ; de -9,43 à 24,51 pour le nombre de feuilles fonctionnelles, de - 26,40 à 64,48 cm² pour surface foliaire totale et de -28,04 à 65,47 mg/cm² pour la masse spécifique foliaire (Tableau LIII). Les descendances ayant obtenu des ASC positives pour au moins quatre variables agro-morphologiques sont issues des croisements IMC67 X POR, POR X IFC1 ; SCA6 X T60/887 ; T60/887 X SCA6 ; UPA409 X IFC1 ; UPA409 X SCA6 et UPA409 X T60/887. Par contre, les descendances issus des croisements IFC1 X POR ; POR X UPA409 ; SCA6 X POR, ont eu les faibles ASC sur l'ensemble des variables agro-morphologiques.

Au niveau des variables physiologiques, l'ASC a varié de -772,47mg/g à 753,11 mg/g pour la teneur en eau foliaire et de -4,53 à 9,26 % pour la teneur relative en eau. Les descendances issues des croisements IFC1 X T60/887 ; IFC1 X UPA409 ; IMC67 X IFC1 ; IMC67 X SCA6 ; IMC67 X UPA409 ; POR X IMC67et POR X SCA6, ont obtenu des ASC positives. Cependant, les valeurs négatives des ASC ont été enregistrées chez les familles d'hybrides issues des croisements IFC1 X MC67 ; IFC1 X POR ; IFC1 X SCA6 ; IMC67 X POR ; SCA6 X IMC67 ; SCA6 X POR ; T60/887 X UPA409 ; UPA409 X IMC67 et UPA409 X POR.

Pour la seule variable biochimique, l'ASC a varié de - 4,78 à 6,92 unités SPAD pour azote. Les meilleures ASC ont été obtenues par les familles issues des croisements IMC67 X POR ; IMC67 X T60/887 ; POR X IFC1 ; POR X SCA6 ; SCA6 X IMC67 ; T60/887 X SCA6 ; T60/887 X UPA409 ; UPA409 X IFC1 ; UPA409 X IMC67 ; UPA409 X POR et UPA409 X SCA6. Les autres croisements ont donné les hybrides ayant les plus faibles ASC pour ladite variable.

Tableau LIII : Aptitude spécifique à la combinaison des croisements pour les caractères agro-physiologiques et biochimiques dans la zone de Bouaflé

Variables agro-physiologiques et biochimiques dans la zone Bouaflé								
Croisements	Diam	Haut	Nff	Sft	Msf	Tef	Tre	Azote
IFC1 X MC67	-0,02	1,37	-2,66	0,29	0,96	-124,89	-1,54	-4,59
IFC1 X POR	-0,10	-3,31	-1,20	-11,88	-11,13	-29,10	-3,98	0,87
IFC1 X SCA6	-0,06	5,41	-2,12	1,39	2,87	-424,39	-2,14	0,99
IFC1 X T60/887	-0,18	-5,99	-2,37	10,67	-29,53	476,53	1,93	-0,62
IFC1 X UPA409	0,05	8,88	-0,56	-16,44	7,34	81,16	1,90	-0,48
IMC67 X IFC1	-0,15	-4,71	2,82	-9,14	-12,81	466,77	1,89	-0,69
IMC67 X POR	0,23	17,96	3,09	64,48	2,88	-772,47	-2,17	6,92
IMC67 X SCA6	-0,31	-15,59	-5,11	-11,65	16,77	246,40	1,51	-3,13
IMC67 X T60/887	-0,06	-3,08	1,79	-3,55	-0,01	-247,34	-1,65	1,78
IMC67 X UPA409	-0,05	-7,84	-3,22	14,99	17,42	34,43	5,18	-4,78
POR X IFC1	0,44	1,64	7,95	-9,73	65,47	-121,39	5,82	2,42
POR X IMC67	-0,09	1,03	-3,16	-20,49	-14,62	748,10	1,77	-0,30
POR X SCA6	1,14	19,01	24,51	-16,96	-7,89	753,11	9,26	2,90
POR X T60/887	-0,09	0,26	-2,23	-15,76	3,66	-121,33	0,63	-1,47
POR X UPA409	-0,26	-4,03	-5,33	-26,40	-28,04	283,42	-4,53	-4,69
SCA6 X IFC1	-0,24	-6,88	-8,27	11,69	-9,50	28,09	-0,89	-1,76
SCA6 X IMC67	-0,01	4,44	3,21	-14,74	-3,03	-437,02	-4,51	2,23
SCA6 X POR	-0,53	-23,01	-9,43	-5,00	-3,28	-237,44	-1,54	-4,09
SCA6 X T60/887	0,08	7,00	-1,75	10,03	11,11	-40,73	2,56	-0,07
SCA6 X UPA409	-0,03	-1,36	-0,22	16,69	-13,91	237,84	-3,07	0,36
T60/887 X IFC1	-0,06	-2,72	2,37	4,98	-3,43	-51,02	0,00	0,06
T60/887 X IMC67	0,23	6,25	0,74	-1,39	-5,26	-30,50	0,39	-2,64
T60/887 X POR	-0,45	-15,10	-7,14	0,47	-11,18	658,96	-6,37	-4,34
T60/887 X SCA6	0,21	14,63	2,64	9,48	8,25	-212,98	0,26	3,01
T60/887 X UPA409	0,01	-7,06	-0,17	3,82	3,48	-90,44	-0,51	3,30
UPA409 X IFC1	0,12	0,33	1,77	26,07	-4,40	-101,85	0,67	2,12
UPA409 X IMC67	0,11	-1,65	0,66	-8,61	-12,71	-142,80	-2,97	2,94
UPA409 X POR	-0,11	6,04	-1,27	26,12	9,74	-624,37	-2,22	2,76
UPA409 X SCA6	0,00	5,32	1,65	-12,73	6,35	-51,00	0,34	1,67
UPA409 X T60/887	0,17	2,73	3,23	-17,82	13,71	71,46	2,27	-1,07

Les valeurs en caractères gras indiquent les ASC positives ; Diam= diamètre à 10 cm du sol ; Haut= Hauteur de l'arbre, Nff= nombre de feuilles fonctionnelles Sft = surface foliaire, Msf=masse spécifique foliaire ; AZOTE= teneur en azote foliaire.

3.1.3.5. Dominance des caractères dans les différentes zones

Les rapports entre les variances de l'aptitude générales à la combinaison (AGC) et l'aptitude spécifique à la combinaison (ASC), ont montré une prédominance de l'ASC sur l'AGC pour toutes les variables dans les différentes zones. Les rapports de ces deux aptitudes à la combinaison ont varié de 0,00 (diamètre) à 0,52 cm (chlorophylles totales) dans la zone de Divo, contre, une variation de 0,02 (phénols) à 0,40 (masse spécifique foliaire) et de 0,08 (hauteur) à 0,16 (surface foliaire, teneur relative en eau) respectivement dans les zones de Bongouanou et Bouaflé (Tableau LIV).

3.1.3.6. Corrélations entre les caractères

3.1.3.6.1. Corrélations génétiques

L'analyse statistique des données a permis de révéler les plus fortes corrélations génétiques significatives au seuil $\alpha < 0,05$ entre les couples de variables (Tableau LV). Le taux de mortalité a été négativement corrélé au reste des caractères agro-morphologiques et biochimiques. Les plus fortes corrélations ont été observées entre les couples de variables de Taumort/Diam, Taumort/Haut, Taumort/Srft, Taumort/Chlt avec des coefficients de corrélation respectifs -0,71, -0,54, -0,42, -0,42, -0,57 et -0,50.

Entre les variables agro-morphologiques, les corrélations ont été positives avec des coefficients de corrélations de 0,69 pour le couple Dim/Haut ; de 0,54 pour le couple Diam/Nff ; de 0,7 pour le couple Haut/Nff et négative pour le couple Msf/Srft (-0,56).

Divers types de corrélations ont été établis entre les paramètres physiologiques et les paramètres de vigueur. Ces corrélations sont significatives et positives pour les couples Tre/Haut, Tre/Nff avec les coefficients respectifs de 0,64 et 0,59. Il en est de même pour les variables biochimiques et les variables agro physiologiques dont les plus significatives sont les couples phénols/Haut, proline/Nff, phénols/Nff, Chlt/Msf, Azt/Tef, Azt/Tre avec des coefficients positifs et négatives respectivement 0,56, -0,58, -0,56, -0,71, -0,65 et -0,61.

Entre variables biochimiques, chez les couples Proline/azt, Chlt/phénols les corrélations ont été significatives et négatives avec des coefficients respectifs -0,59, -0,62 et positives pour le couple Proline/phénols (0,51).

Tableau LIV : Variances d'aptitudes générales et spécifiques à la combinaison des cacaoyers et leurs rapports

	zone de Divo			zone de Bongouanou			zone de Bouaflé		
variables	$\sigma^2 g$	$\sigma^2 s$	$\sigma^2 g / \sigma^2 s$	$\sigma^2 g$	$\sigma^2 s$	$\sigma^2 g / \sigma^2 s$	$\sigma^2 g$	$\sigma^2 s$	$\sigma^2 g / \sigma^2 s$
DIAM	0,004	41,65	0	0,1	0,45	0,22	0,01	0,09	0,1
HAUT	36,02	313,18	0,12	181,12	845,03	0,21	6,56	84,75	0,08
NFF	2,31	21,86	0,11	60,91	265,18	0,23	4,36	35,76	0,12
SRFT	152,8	507,22	0,3	0,03	0,13	0,24	0,01	0,05	0,16
MSF	80,63	731,18	0,11	2,68	6,69	0,4	1,07	8,33	0,13
TEF	35714,49	122875,2	0,29	12383	66285,79	0,19	17511,38	132027,31	0,13
TRE	3,69	31,86	0,12	1,95	11,19	0,17	1,69	10,82	0,16
AZOTE	0,55	5,13	0,11	0,03	0,14	0,23	0,01	0,13	0,09
CHLT	81,22	155,68	0,52	18,57	73,11	0,25	-	-	-
PROLINE	148,27	830,96	0,18	44,46	833,97	0,05	-	-	-
PHENOLS	0,03	0,14	0,19	0,01	0,62	0,02	-	-	-

$\sigma^2 g$: Variance de l'aptitude générale à la combinaison, $\sigma^2 s$: Variance de l'aptitude spécifique à la combinaison. Dam= diamètre à 10 cm du sol ; Haut= Hauteur de l'arbre, Nff= nombre de feuilles fonctionnelles, Sft = surface foliaire, Msf=masse spécifique foliaire ; Azote= teneur en azote foliaire, Chlt= teneur en chlorophylles totales, (-) = données non collectées.

Tableau LV : Corrélations génétiques entre les caractères des familles d'hybrides

	*Taumort	Diam	Haut	Nff	Srft	Msf	Azt	Tef	Tre	Chlt	Proline	Phénol
*Taumort		-0,71	-0,54	0,01	-0,42	0,37	-0,25	0	-0,24	-0,5	-0,58	0,03
Diam			0,69	0,54	0,14	-0,25	0,25	0,03	0,3	0,27	0,05	0,38
Haut				0,7	0,34	-0,25	0,03	0,47	0,64	0,33	0,27	0,5
Nff					0,36	0,39	0,25	0,37	0,59	-0,14	-0,58	-0,56
Srft						-0,56	0,13	-0,14	0,07	-0,03	-0,05	0,11
Msf							-,17	-0,09	0,33	-0,71	0,41	0,31
Azt								-0,65	-0,61	-0,18	-0,59	0,16
Tef									0,9	0,48	-0,18	-0,8
Tre										0,14	-0,03	-0,7
Chlt											-0,32	-0,62
Proline												0,51
Phenol												

Les valeurs en gras sont différentes de 0 au seuil de 0,05; Taux de mortalité (Taumort), Diamètre (Diam), Hauteur (Haut), Nombre de feuilles (Nff), Surface foliaire totale (Srft), Masse spécifique foliaire (Msf), Teneur en azote (Azt), Teneur en eau foliaire (Tef), Teneur relative en eau (Tre), Chlorophylles totales (Chlt), Teneur en proline (Proline), Teneur en phénols totaux (Phénol). (*) : Les signes négatifs indiquent que les deux variables évoluent favorablement pour la sélection

3.1.3.6.2. Corrélations phénotypiques

Les corrélations phénotypiques significatives, quoique plus faibles, sont plus nombreuses que les corrélations génétiques (Tableau LVI). Particulièrement, le diamètre a été corrélé positivement aux variables de vigueur (Hauteur), biochimique (Azote), avec les coefficients respectifs de 0,85 ; 0,5. La variable nombre de feuilles fonctionnelles a aussi été corrélé positivement à la surface foliaire totale (0,58) et à la Teneur en eau foliaire (0,55).

Par ailleurs, certaines corrélations génétiques entre les caractères biochimiques et les variables agro-morphologiques ont changé de signe au niveau phénotypique. C'est le cas des couples de variables phénol/Haut (-0,24) et phénols/srft avec la valeur de -0,24.

Tableau LVI : Corrélations phénotypiques entre les caractères des hybrides

	*Taumort	Diam	Haut	Nff	Srft	Msf	Azt	Tef	Tre	Chlt	Proline	Phénol
*Taumort												
Diam	-0,24											
Haut	-0,25	0,85										
Nff	-0,18	0,17	-0,03									
Srft	-0,22	0,19	0,27	0,58								
Msf	0,13	-0,1	-0,07	0	-0,05							
Azt	-0,27	0,5	0,51	0,15	0,21	-0,17						
Tef	-0,22	-0,08	-0,07	0,55	0,33	-0,05	0,07					
Tre	0,15	-0,13	-0,12	0,25	0,22	0,22	⁻ 0,13	0,46				
Chlt	-0,39	0,25	0,16	0,03	-0,02	-0,45	0,35	0,12	-0,14			
Proline	-0,16	0,18	0,21	0,03	0,14	0,26	0,13	0	0,17	0,24		
Phénol	0,03	-0,24	-0,24	-0,4	-0,24	0,17	⁻ 0,31	-,34	-0,19	-,25	0,07	

Les valeurs en gras sont différentes de 0 au seuil de 0,05; Taux de mortalité (Taumort), Diamètre (Diam), Hauteur (Haut), Nombre de feuilles (Nff), Surface foliaire totale (Srft), Masse spécifique foliaire (Msf), Teneur en azote (Azt), Teneur en eau foliaire (Tef), Teneur relative en eau (Tre), Chlorophylles totales (Chlt), Teneur en proline (Proline), Teneur en phénols totaux (Phénol). (*) : Les signes négatifs indiquent que les deux variables évoluent favorablement pour la sélection

Conclusion partielle

L'étude de la transmission des caractères pertinents ayant servi à la structuration des familles a montré des héritabilités au sens strict (h^2) très inférieures aux héritabilités au sens large (H^2) dans toutes les zones. Aussi, Les rapports entre les variances de l'aptitude générale à la combinaison (AGC) et l'aptitude spécifique à la combinaison (ASC), ont montré une prédominance de l'ASC sur l'AGC pour toutes les variables dans les différentes zones. Ces résultats révèlent donc que la transmission des caractères pertinents est de nature dominante et très influencés par l'environnement. Très peu de choix chez les géniteurs et faire plusieurs croisements afin de choisir les meilleures combinaisons ou hybrides.

3.2. DISCUSSION

3.2.1. Effet du déficit hydrique sur les paramètres agro-morphologiques des cacaoyers en serre et au champ.

Les paramètres agro-morphologiques (diamètre du tronc, hauteur du tronc, la section du tronc, la surface foliaire) des familles d'hybrides de cacaoyers évalués au stade juvénile en serre et au champ (3 ans et 9 ans), ont diminué en fonction du degré de sévérité du déficit hydrique déficitaire (50 et 20 % CC) et en zones de faible pluviométrie notamment à Djékanou, Toumodi et Yamoussoukro. Les familles d'hybrides F4, F21, F36, F15, F25 évalués en serre, et les familles d'hybrides F10, F12, F17, F21, F24, F25, F3 issues des parcelles de Djékanou, Yamoussoukro, Toumodi ont été moins affectées au niveau de la croissance du diamètre, de la hauteur, de la section du tronc et la surface foliaire totale par rapport aux autres familles d'hybrides dans les mêmes régimes hydriques déficitaires et dans les mêmes zones. Cette capacité d'accroissement des paramètres de vigueur et de croissance pourrait s'expliquer par la vigueur hybride (hétérosis) de ces familles à se développer en condition de stress hydrique. Les résultats sont en conformité avec ceux de M'bo (2015) et Kouamé *et al.* (2021), qui ont montré que la vigueur végétative (diamètre et hauteur) permettait de discriminer les variétés soumises au stress hydrique. L'effet dépressif du stress hydrique a été aussi observé au niveau de la surface foliaire totale qui a montré une variabilité entre les familles d'hybrides. Cette grande variabilité pour la variable surface foliaire totale a confirmé la sensibilité du cacaoyer à la moindre variation de l'humidité du sol. Selon Lebon *et al.* (2004), l'une des premières réactions des plantes au déficit hydrique est de réduire la surface foliaire ainsi que le nombre de feuilles fonctionnelles. Les résultats ont aussi confirmé ceux de Ferryra *et al.* (2004), Balasimha *et al.* (2008), Adra (2010), Apshara *et al.* (2013) et Kouamé *et al.* (2021) qui ont démontré que le développement végétatif sous conditions d'alimentation hydrique limitée, est fortement perturbé, principalement, par une diminution importante du nombre de feuilles fonctionnelles et de la surface foliaire. Cette diminution du développement végétatif foliaire semble être une des réponses des végétaux à la déshydratation afin de conserver les ressources en eau et de permettre la survie de la plante (Lebon *et al.*, 2004). Selon Granier *et al.* (2000), les feuilles des plantes soumises au déficit hydrique présentent des dimensions finales plus petites que celles des témoins, avec une nervation plus dense et des protections périphériques plus épaisses.

La masse spécifique foliaire est l'un des marqueurs importants dans la réponse des plantes à la contrainte hydrique. Elle peut être considérée comme un critère simple de sélection de génotypes présentant une efficacité élevée de l'utilisation de l'eau en conditions de déficit

hydrique (Ykhlef, 2001 et Zeghida *et al.*, 2004). La masse spécifique foliaire des familles d'hybrides de cacaoyers dans les régimes hydriques déficitaires (50 et 20 % CC) et dans les zones à faibles pluviométries (Djékanou, Yamoussoukro et Toumodi), a été plus importante qu'en conditions normales (régime hydrique 100% CC et à Divo, zone témoin). Ainsi, les génotypes des familles F4, F21, F36, F15, F25 évaluées en serre et ceux des familles F10, F12, F17, F21, F24, F25 et F3 issues des parcelles de Djékanou, Yamoussoukro et Toumodi ont obtenu les masses spécifiques foliaires les plus importantes par rapport aux autres familles d'hybrides stressées et aux familles d'hybrides témoins. De plus, le processus de réduction de la surface foliaire et de l'augmentation de la masse spécifique foliaire des familles d'hybrides dans les régimes hydriques déficitaires (50 et 20 % CC) et dans les zones à faible pluviométrie, auraient permis aux génotypes de se «confronter» au manque d'eau par la réduction de la transpiration en condition de stress sévère comme l'ont souligné aussi Ykhlef (2001) et Kouamé *et al.* (2021).

3.2.2 Effet du déficit hydrique sur la physiologie des familles d'hybrides évaluées en serre et au champ

L'évaluation des familles d'hybrides en condition contrôlée de serre et au champ dans des zones à pluviométries différentes, a montré l'effet dépressif du déficit hydrique sur les paramètres physiologiques des génotypes de cacaoyers. Le stress hydrique a modifié l'apparence visuelle des cacaoyers en condition contrôlée de serre sous régimes hydriques déficitaires (50 et 20 % CC) et dans les zones à pluviométrie déficitaire (Djékanou, Toumodi, Yamoussoukro) contrairement à ceux du régime hydrique témoin (100 % CC) et de la zone témoin de Divo. Parallèlement, la couleur des feuilles est passée du vert pur au vert-clair avec des plages de jaunissement apparues à partir de l'extrémité apicale des feuilles qui se sont déployées vers l'intérieur de celles-ci. Ce phénomène concerne le début de l'installation du manque d'eau et/ou à la mauvaise circulation de l'eau dans les cacaoyers. Lorsque l'apport en eau est réduit, comme dans les régimes déficitaires 50 % CC et 20% CC, les jeunes cacaoyers subissent un stress hydrique. Le manque d'eau réduit l'efficacité de la photosynthèse et peut entraîner une diminution de la production de chlorophylle, ce qui explique la perte de la couleur verte. À 50 % CC, la couleur reste verte, mais plus claire, car la production de chlorophylle est diminuée, mais pas encore complètement stoppée. À 20 % CC, la réduction de chlorophylle est plus marquée, et la couleur des feuilles peut devenir plus claire, voire jaune, car la dégradation des chloroplastes et la réduction de la photosynthèse augmentent. Suivant la durée et le degré du stress hydrique, les nécroses se sont de plus en plus accentuées (nécrose marginale et centrale)

rendant difficile le maintien de la turgescence cellulaire au niveau des feuilles des cacaoyers. Cette situation a entraîné la perte des fonctions et la mort des cellules foliaires, provoquant des taches brunes et sèches qui se propagent rapidement à partir de l'apex jusqu'à la racine dont la mort des cacaoyers. Cependant, les familles d'hybrides F21, F39, F29, F1, F30, F26 et F28 évaluées en serre, les familles F15, F10, F22 et F9 de la parcelle de trois années de la zone Yamoussoukro, les familles F2, F13, F19, F12, F14, F7, F16, F10, F15, F22, F4, F25, F21 et F24 de la parcelle de neuf années dans la zone de Toumodi ont été moins affectées avec les plus faibles taux de mortalité (inférieur à 50 %). Les résultats de l'étude ont révélé une réduction de la teneur en eau foliaire et de la teneur relative en eau des génotypes en condition contrôlée de serre sous régimes hydriques déficitaires 50 % CC et 20 % CC et aux champs (zones à faible pluviométrie) contrairement aux témoins qui sont dans les conditions normales. En effet, pour répondre à un manque d'eau dans les zones déficitaires, les plantes réagissent par un abaissement du potentiel hydrique graduel des feuilles permettant l'absorption de l'eau. Cette baisse du potentiel en eau s'expliquerait par une accumulation des solutés dans le cytosol qui permet la rétention de l'eau et le maintien du potentiel hydrique des cellules (Delauney & Verma, 1993 ; Feng *et al.*, 1994). Selon Huang *et al.* (2000) et Jonsen *et al.* (2000), le mécanisme de rétention de l'eau dans les cellules foliaires diffère selon les espèces et les variétés au cours des périodes de manque d'eau. Les résultats ont montré que les familles d'hybrides F8, F12, F19, F7, F25 F36, F35, F15, F33, F38, F9, F31 et F27 sont tolérants au stress hydrique déficitaire induit en serre et au stade juvénile (3 ans). Les familles F13, F1, F4, F22, F11 et F8, au stade adulte au champ dans la zone de Toumodi ont été meilleurs que les autres. Cette capacité de rétention en eau dans les cellules foliaires a permis de sélectionner les cacaoyers pour la tolérance à la sécheresse au champ (Balashimha *et al.*, 1991). Ce potentiel en eau foliaire aurait permis d'assurer la nutrition des génotypes, favorisant le maintien de l'état de turgescence des cellules et des tissus pour la croissance et le développement des génotypes de cacaoyers dans les différentes conditions d'évaluation. Les résultats corroborent aussi ceux d'Albouchi *et al.* (2003), qui ont montré que le stress hydrique induisait chez les plantes stressées une diminution du contenu relatif en eau. Selon Bajji *et al.* (2001), la teneur en eau des génotypes de cacaoyers semble diminuer proportionnellement avec la réduction d'eau contenue dans le sol, qui serait plus rapide chez les génotypes sensibles que chez les génotypes résistants (Adra, 2010). D'autre part, Nouri (2002) avait montré que les génotypes de cacaoyers qui maintiennent une teneur en eau élevée en présence du stress hydrique sont des génotypes tolérants. Selon Bayoumi *et al.* (2008), la chute de la teneur relative en eau des génotypes sensibles serait due à la perte de pouvoir d'accumulation des métabolites pour l'ajustement

osmotique pour le maintien de la turgescence cellulaire et des activités physiologiques. Le stress en eau paraît clairement comme un élément déterminant pour la croissance des plantes. Il s'exprime par un ralentissement progressif de la croissance primaire (Adra, 2010 ; Mbo, 2015), marqué par la réduction de la turgescence des cellules foliaires et une perte trop importante d'eau peut conduire à la mort des cellules et par ricochet, celle des génotypes de cacaoyers (Chaves *et al.*, 2002 ; Bouchabke *et al.*, 2006).

3.2.3. Influence du déficit hydrique sur les paramètres de production et de rendements des familles d'hybrides

Les paramètres morphologiques des cabosses et les paramètres de production évalués ont été impactés par le déficit hydrique. Les résultats ont montré une grande variabilité au sein des familles d'hybrides pour tous les paramètres liés aux cabosses et les paramètres de production. Cette grande variabilité est d'abord caractéristique de l'espèce *Theobroma cacao*. Pour les familles évaluées, l'étude a montré que les valeurs de l'épaisseur moyenne du cortex des cabosses, de la taille, de la forme des cabosses, du volume moyen des cabosses, du nombre moyen de fèves normales et de fèves plates des cabosses ont été plus élevées dans la zone à pluviométrie normale de Divo (zone témoin) que dans la zone à pluviométrie déficitaire de Toumodi. Pour la section de la cabosse, la valeur moyenne obtenue à Divo a été significativement différente de celle obtenue à Toumodi ($Pr < 0,0001$). Ainsi, dans la zone à pluviométrie déficitaire de Toumodi, les familles d'hybrides F6, F19, F15, F16, F3, F4, F10, F2, F8, F20, F12, F21, F25 et F22 ont présenté de fortes valeurs aussi bien pour les variables morphologiques de cabosses que pour les dimensions des fèves. Quant aux paramètres de production, les familles d'hybrides F14, F17, F24 et F7 ont présenté dans la zone à pluviométrie déficitaire de Toumodi, les meilleurs rendements potentiels et réels et de faibles valeurs pour les variables morphologiques des cabosses et de taux de cabosses pourries. Cependant, dans la zone à pluviométrie normale de Divo, les familles F25, F6, F12 et F11 ont présenté de fortes valeurs pour les variables morphologiques des cabosses et des masses moyennes de cacao marchand. Pour les paramètres de rendement, les familles d'hybrides F21, F8, F13, F22, F15, F17, F10, F9 et F24 ont été en tête du classement. En effet, ces résultats pourraient s'expliquer par le fait que l'étude a été menée dans deux zones contrastées. La zone de Divo est une zone à pluviométrie normale où les quantités annuelles de pluie sont d'au moins 1200 mm et bien réparties, ce qui permet aux cacaoyers de disposer de la quantité d'eau nécessaire pour assurer le bon développement des fruits. A l'opposé, la zone de Toumodi est une zone à pluviométrie déficitaire caractérisée par des périodes de sécheresse pouvant durer jusqu'à trois voire quatre

mois consécutifs, ce qui est préjudiciable non seulement au bon établissement au champ des jeunes cacaoyers mais aussi comme le montrent les résultats, impactent le volume des cabosses, le poids des cabosses, l'épaisseur du cortex des cabosses, le nombre de cabosses, le poids moyen de fèves fraîches, la longueur et la largeur des fèves. S'agissant de la masse moyenne d'une fève de cacao marchand, l'analyse a révélé dans cette étude, une différence significative entre la moyenne obtenue à Divo (1,38 g) et celle obtenue à Toumodi (1,27 g), ce qui est en conformité avec les résultats de certains auteurs. En effet, étudiant la masse moyenne d'une fève de cacao de 15 familles hybrides plantées à Divo (zone de pluviométrie normale) et à Abengourou (une zone de faible pluviométrie), Tahi et *al.* (2019) avaient trouvé que la masse moyenne d'une fève de cacao marchand des familles hybrides était plus faible dans la zone d'Abengourou que dans la zone de Divo, mettant ainsi en exergue l'impact négatif des zones de culture du cacaoyer à faible pluviométrie sur la masse des fèves de cacao marchand.

Cependant, la capacité pour ces familles de réduire dans cette zone à faible pluviométrie, le nombre de cabosse sur l'arbre et leur nombre de fèves dans la cabosse, aurait favorisé le bon développement des fèves à l'intérieur des cabosses et justifierait ainsi le bon rendement des Familles d'hybrides F14, F17, F24 et F7. Lachenaud (1991) a montré qu'il existe une concurrence intra arbre entre nombre de cabosse, masse de cabosse et par extension masse de fèves par cabosse. L'augmentation de l'un pourrait dans des conditions environnementales défavorables entraîner la réduction de l'autre. Cette compétition aurait également lieu à l'intérieur même de la cabosse entre nombre de fèves et masse moyen de fèves (Lachenaud, 2014). Selon Falalou (2000), les familles d'hybrides F14, F17, F24 et F7 ont été résistantes au déficit hydrique en termes agronomiques par leurs capacités de produire lorsque leur transpiration ne peut répondre que partiellement à la demande évaporative de l'atmosphère en raison des disponibilités insuffisantes d'absorption et de transfert d'eau.

3.2.4. Influence de la variation de la pluviométrie sur la synthèse des pigments chlorophylliens et l'accumulation des métabolites secondaires des génotypes de cacaoyers

Les pigments chlorophylliens sont des molécules grâce auxquelles les plantes réalisent la photosynthèse aboutissant à la synthèse des glucides à partir des molécules minérales sous l'action de la lumière visible. Leurs teneurs sont utilisées dans plusieurs études pour détecter les différences génotypiques en réponse au stress hydrique chez les plantes. Dans cette étude, les teneurs en chlorophylles a, b, c et totales se sont révélées peu importantes chez les cacaoyers

sous stress hydrique au champ dans la zone à pluviométrie déficitaire de Toumodi par rapport aux cacaoyers témoins de la zone à pluviométrie normale de Divo. Cette diminution est due principalement aux dommages causés aux chloroplastes par les espèces réactives d'oxygène (ROS) tels que l'O₂⁻ et l'H₂O₂, ce qui peut conduire à une peroxydation lipidique et, par conséquent, à la destruction de la chlorophylle. En agissant ainsi, les cacaoyers sous stress hydrique sévère ont développé des mécanismes de protection contre les dommages liés aux activités photosynthétiques sous des températures très élevées. Ces mêmes observations ont été faites par Pukacki & Kaminska (2005) puis Liu *et al.* (2006), qui ont constaté une diminution ou encore une stabilité du niveau chlorophyllien pendant des périodes de sécheresse selon sa durée et sa sévérité. Par ailleurs, la diminution des teneurs chlorophylliennes totales pourrait aussi s'expliquer par l'augmentation de la teneur en proline foliaire sous l'effet du stress hydrique. En effet, les résultats de Tahri *et al.* (1997) ont montré que la diminution de la teneur en pigments chlorophylliens totaux (Chlorophylles a, b et c) est suivie d'une augmentation de la teneur en proline foliaire sous l'effet du stress. Ainsi, la variété de cacaoyer qui accumule plus de proline est aussi celle qui connaît la plus forte diminution de ses teneurs en pigments chlorophylliens et vice versa. Cependant, les résultats de cette étude sont contraires à ceux de Murchie & Horton (1997), qui ont montré une augmentation de la teneur en chlorophylles a et b chez des cultivars de *Zea mays* sous déficit hydrique, puis à ceux de M'bo (2015) sur des variétés de cacaoyers indonésiens et malgaches évaluées au stade juvénile en serre.

L'homogénéité de la teneur en azote foliaire observée chez les familles d'hybrides évaluées dans les différentes zones, pourrait s'expliquer par une constance du contenu en azote des tissus à la fin de la croissance des organes des familles d'hybrides. En effet, l'azote contenu dans les protéines et de nombreux composés azotés sont soumis à un turn-over permanent (Gallais *et al.*, 2006), entre synthèse et dégradation. Les protéines des organes des plantes entrant en sénescence sont majoritairement dégradées et leur azote est remobilisé vers les organes en croissance (feuilles les plus jeunes au cours de la croissance végétative ou grains à partir du stade floraison (Pornon *et al.*, 2011). Cependant, la diminution de la valeur moyenne de la teneur en azote foliaire dans la zone à pluviométrie déficitaire de Toumodi pourrait s'expliquer par le fait que l'azote minéral en solution dans le sol (nitrate ou ammonium) reste en surface dans les horizons superficiels. Dès que s'assèchent les horizons superficiels où se trouvent ces ions, la transpiration sollicite des horizons profonds et plus pauvres en azote, tandis que le transport d'azote (par flux de masse et diffusion dans la phase liquide du sol) diminue fortement dans les horizons secs (Garwood & Williams, 1967). Cette réduction peut entraîner un déficit

par rapport à la demande de la croissance aérienne. Ces phénomènes dépendent donc en partie aussi de la distribution des racines dans le sol puisque l'on sait que la densité racinaire est l'un des paramètres de la capacité de la plante à capter l'eau et l'azote (Gonzalez Dugo *et al.*, 2005).

En ce qui concerne l'accumulation des métabolites secondaires, une baisse de la teneur en protéine soluble a été observée sous l'effet du stress hydrique dans cette étude. La réduction des teneurs en protéines solubles en conditions de stress par rapport aux plantes témoins, pourrait s'expliquer par la perte de la biomasse suite à la baisse du métabolisme des cacaoyers. En effet, les cacaoyers plus stressés ont un nombre réduit de feuilles donc en conséquence, ils produisent une faible quantité de biomasse à cause de leur photosynthèse qui est réduite. Wilkins *et al.* (1994) et Zhenzhu *et al.* (2007) ont révélé également une baisse des teneurs en protéines solubles sous contraintes abiotiques chez *Glycine max*. Cependant, Farshadfar *et al.* (2008) affirment qu'au cours d'un stress hydrique, les feuilles de blé dur augmentent leurs teneurs en protéines solubles de faibles poids moléculaires plus que celles de hauts poids moléculaires. Les familles d'hybrides F7, F16, F13, F12, F14, F15, F6, F5, F4 et F8, ont eu de fortes teneurs protéiques en condition de stress hydrique au champ (zone à pluviométrie déficitaire de Toumodi) comparativement aux autres génotypes testés dans les mêmes zones et leurs témoins dans la zone de Divo. Ces fortes teneurs seraient liées à une activation des gènes permettant une synthèse de protéines spécifiques associées aux stress «LEA» qui assurent une protection de l'ensemble vitale des protéines cellulaires et les protéines thermiques. Selon Baker *et al.* (1988), la synthèse protéique spécifique favorise le maintien des structures protéiques et membranaires de la cellule végétale.

En conditions défavorables, une accumulation importante de la teneur en proline par les végétaux est montrée par les travaux de Greenway & Munns (1980). Ces résultats concordent avec ceux de cette étude qui ont montré qu'en condition de stress hydrique déficitaire, les cacaoyers ont accumulé des teneurs élevées en proline. En effet, l'accumulation de proline entraîne une baisse du potentiel osmotique à des valeurs inférieures à celles du potentiel hydrique. Cette baisse favorise ainsi le maintien de la turgescence, permettant l'ouverture des stomates pour une bonne activité physiologique (Silva *et al.*, 1996). Par ailleurs, la forte accumulation de proline sous stress hydrique contribue à la résistance et /ou à la stabilité du cultivar considéré (Singh *et al.*, 1973). Ainsi, les familles d'hybrides F7, F16, F13, F12, F14, F15, F6, F5, F4 et F8 avec les fortes teneurs en proline, sont présentées comme les mieux adaptées au déficit hydrique. Tahri *et al.* (1997) ont montré que l'augmentation de la teneur en proline foliaire sous l'effet du stress hydrique sévère est suivie par un abaissement de la teneur

en pigments chlorophylliens totaux (Chlorophylles a, b et c). Cela voudrait dire que les familles d'hybrides F7, F16, F13, F12, F14, F15, F6, F5, F4 et F8 qui ont accumulé plus de proline ont été aussi celles qui ont connu la plus forte diminution de leurs teneurs en pigments chlorophylliens.

La concentration en phénols totaux des familles d'hybrides évaluées au champ en zone de faible pluviométrie (Toumodi trois années de plantation et Toumodi neuf années de plantation) est moins élevée que celle des témoins dans la zone de Divo. Cependant, les génotypes F1, F20, F12, F17, ont obtenu les meilleures teneurs en phénols totaux par rapport aux autres génotypes à la fois dans la jeune parcelle de trois années et dans celle de neuf années de plantation à Toumodi. Ces résultats pourraient s'expliquer par le fait que les phénols totaux ou Polyphénols bloqueraient l'auto oxydation et la génération de radicaux oxygénés actifs comme le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) lors du stress hydrique sévère. De plus, les composés phénoliques auraient permis à l'ensemble des familles d'hybrides en zone déficitaire de résister aux diverses agressions des organismes pathogènes (Macheix *et al.*, 2005).

3.2.5. Etude des mécanismes génétiques de la résistance des familles d'hybrides au déficit hydrique

Les expériences conduites dans cette étude ont abouti aux résultats portant sur la transmission des paramètres pertinents agro-physiologiques et biochimiques ayant servi à la structuration des familles d'hybrides en serre et au champ à travers un plan de croisement diallèle 6x6 incomplet (sans les autofécondations).

Les coefficients de variation phénotypique ont été plus importants que les coefficients de variation génétique pour tous les caractères étudiés. Ces résultats indiquent une faible variabilité génétique entre les génotypes. Toutefois, ces résultats ne renseignent pas sur le degré de la transmission des caractères. D'après plusieurs auteurs, dont Acquah (2007), la connaissance du coefficient de variation génétique couplée à l'héritabilité est plus efficace dans la prédiction des effets de sélection.

Les écarts entre les coefficients de variation phénotypique (CVP) et génotypique (CVG) ont été faibles pour les caractères biochimiques dans la zone de Divo par rapport à celle de Bongouanou. Les caractères agro-physiologiques ont eu des écarts plus ou moins élevés dans toutes les zones d'étude, mais avec des écarts plus faibles pour les caractères physiologiques dans les zones déficitaires. En d'autres termes, les variables agro-physiologiques et biochimiques sont beaucoup plus affectées par les effets environnementaux, mais en particulier,

les variables physiologiques et biochimiques sont beaucoup plus affectées que les variables de croissance et de développement. Ces résultats indiquent que les variables de vigueur végétative, physiologique et biochimique sont sous contrôle d'effets non additifs des gènes. D'après Gallais (2011), les caractères simples sont beaucoup plus affectés par les effets environnementaux que les caractères complexes. En effet, les caractères complexes sont le résultat d'interactions multiples au niveau de leurs composantes. Chacune de ces composantes serait contrôlée par un système polygénique dont les unités sont génétiquement indépendantes et strictement additives comme le suggère Williams (1960).

Pour les caractères de vigueur végétative, physiologique et biochimique, les héritabilités au sens strict ont été faiblement estimées par rapport aux héritabilités au sens large. Dans cette étude, les caractères avec des héritabilités moyennement élevées sont ceux liés à la vigueur pour la surface foliaire totale, masse spécifique foliaire, teneur en eau des feuilles ; dans la zone Divo. Dans la zone de Bongouanou, les héritabilités au sens strict ont été obtenues au niveau de la hauteur, la teneur en azote foliaire et dans la zone de Bouaflé au niveau du nombre de feuilles et la teneur relative en eau. Il est donc possible de sélectionner efficacement ces caractères chez les individus parentaux. Ces résultats suggèrent que les caractères de vigueur végétative, physiologiques et biochimiques sont beaucoup plus affectés par les effets environnementaux. La même tendance s'est déjà observée chez l'espèce *Theobroma cacao* où l'héritabilité au sens large est nettement supérieure à l'héritabilité au sens strict pour les variables agromorphologiques (Cilas *et al.*, 1996).

L'effet de l'aptitude spécifique à la combinaison est interprété comme l'écart d'un croisement par rapport à ce qui serait attendu sur la base de l'AGC du parent (Griffing, 1956). Lorsque les valeurs sont positives et négatives, c'est qu'il existe des preuves de dominance bidirectionnelle. Il existe donc des gènes qui rehaussent l'expression des autres tous aussi dominants selon Dos Santos *et al.* (2016). Ainsi, les valeurs négatives et élevées d'ASC pour certains croisements pour la plupart des caractères suggéraient que ces descendance peuvent présenter des facteurs favorables qui permettent la croissance et le développement des génotypes, même dans les conditions défavorables de disponibilité en eau.

D'une manière générale, les variances d'ASC prédominent sur les variances d'AGC pour tous les caractères pertinents. La prédominance des effets de dominance (ASC) sur les effets additifs (AGC) pour un caractère donné suggère que l'utilisation de ces parents dans un programme de sélection peut être une stratégie importante pour l'amélioration des cacaoyers dans la résistance au déficit hydrique (Dias et Kageyama, 1995). Les parents SCA6, IMC67 et T60/887 ont été

ceux avec les plus grandes valeurs d'AGC pour la plupart des caractères évalués quel que soit la zone d'étude. En revanche, les parents IFC1, UPA409 et POR ont montré des valeurs négatives plus élevées d'AGC. Le manque de performances de ces parents peut être associé à des facteurs génétiques, puisque leurs descendants ont montré de faibles valeurs pour certaines variables. La supériorité des effets d'ASC sur ceux de l'AGC serait probablement due aux effets de l'environnement. Ces résultats sont similaires à ceux de Mistro *et al.* (2007), Teixeira *et al.* (2017) et Carvalho *et al.* (2019) qui ont montré d'importants effets de dominance de l'ASC sur l'AGC dans la transmission des caractères agronomiques chez *C. canephora*.

L'étude des corrélations permet d'élaborer des stratégies d'amélioration de deux ou plusieurs caractères simultanément sachant l'effet qu'aura la sélection des uns sur les autres. D'une manière générale, les corrélations génétiques et phénotypiques ont été pour la plupart fortes entre tous les caractères de vigueur végétative. Il en est de même des corrélations entre les variables physiologiques, biochimiques et les caractères de vigueur végétative. En d'autres termes, la sélection pour une variable de vigueur influence positivement une autre variable de vigueur ou une autre variable physiologique ou biochimique. Dans un tel cas, deux phénomènes génétiques sous-jacents sont invoqués : la pléiotropie et le déséquilibre de liaison. Dans le premier cas, un gène exerce une influence sur plusieurs variables à la fois. Dans le second cas, l'existence d'un déséquilibre de liaison entre certains gènes contrôlant une variable de vigueur et certains gènes contrôlant l'autre variable de vigueur ou physiologique ou biochimique pourrait être à la base de cette corrélation génétique. Par ailleurs, les corrélations non significatives entre la plupart des variables offrent la possibilité d'une amélioration conjointe des caractères à partir des méthodes simples de sélection.

CONCLUSION GENERALE, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Conclusion générale

Pour les pays producteurs et consommateurs, le cacaoyer est d'une grande importance économique. Toutefois, sa culture est confrontée à des problèmes qui mettent en mal sa durabilité. En effet, le déficit hydrique dû à la sécheresse occupe une place importante dans la série des problèmes auxquels les systèmes de production agricole sont confrontés.

Cette étude a consisté à évaluer les paramètres agro-morphologiques, physiologiques, biochimiques et les paramètres génétiques impliqués dans la résistance des familles d'hybrides de cacaoyers (*Theobroma cacao* L) au stress hydrique induit en serre et au en champ aux stades juvénile (03 ans) et adulte (09 ans) après plantation.

Les principaux mécanismes agro-physiologiques et biochimiques analysés dans cette étude ont concerné les phénomènes de résistance et /ou de tolérance au déficit hydrique chez le cacaoyer. Les aspects agro-physiologiques et biochimiques ont été complétés par une étude génétique, dans le but de déterminer les héritabilités, les coefficients de variation génétique et phénotypique, les corrélations entre les caractères étudiés et les valeurs en croisement en vue du contrôle de leur expression dans la tolérance au déficit hydrique.

L'étude des paramètres de vigueur (diamètre, hauteur, masse spécifique foliaire, surface foliaire, nombre de feuilles émises et biomasse) des cacaoyers a permis de constater des différences significatives entre les plantes témoins et celles soumises à un stress hydrique déficitaire en serre, au champ quel que soit le stade d'évaluation des hybrides. Ainsi, le stress hydrique a conduit à une modification morphologique des familles d'hybrides de cacaoyers, une réduction de la croissance et le développement, de la biomasse, de la surface foliaire, du nombre de feuilles et à une augmentation du taux de mortalité et de la masse spécifique foliaire sous contrainte hydrique. Cette différence s'est accentuée avec le niveau de sévérité du stress hydrique déficitaire induit à 50 % CC et à 20% CC en serre, dans les zones de Toumodi et Yamoussoukro pour les parcelles de trois années et dans la zone Toumodi pour les parcelles de 9 ans.

L'étude des paramètres physiologiques (couleur et aspect des feuilles, teneur en eau, teneur relative en eau, perte d'eau) a montré les mêmes tendances que les paramètres agro morphologiques en serre et au champ.

L'étude des paramètres biochimiques a montré une diminution des teneurs en pigments chlorophylliens, des protéines solubles et des phénols totaux et une augmentation des teneurs

en proline dans les zones déficitaires en eau à Toumodi par rapport à la zone témoin de Divo. Les résultats saillants de ces travaux ont montré que :

- Paramètres agro-morphologiques et physiologiques :
 - Quatre (04) familles d'hybridés (F21, F20, F12 et F14) se sont révélées performantes à la fois dans les trois régimes hydriques (100, 50 et 20 % CC),
 - Six (08) familles d'hybrides (F21, F22, F10, F12, F13, F15, F25, F19 et F16) ont été performantes à la fois à Divo et Toumodi.
 - Les paramètres pertinents pour la structuration des performances agro-physiologiques ont été le diamètre, la hauteur, la masse spécifique foliaire, la teneur en eau foliaire et la surface foliaire (serre et au champ).
- Paramètres de production :
 - 08 familles (F22, F17, F13, F8, F10, F24, F9, F21) ont présenté les meilleurs rendements dans la région de Divo ;
 - 03 familles (F24, F14 et F7) ont présenté les meilleurs rendements dans la zone déficitaire de Toumodi ;
- Pour les paramètres technologiques :
 - Une (01) famille d'hybride (F6) a été meilleure à la fois à Divo et à Toumodi ;
- Paramètres biochimiques
 - Onze (11) familles d'hybrides (F7, F16, F13, F12, F14, F15, F6, F5, F4, F10 et F8) ont présenté les meilleures adaptations dans la zone de Toumodi.
 - Pour l'ensemble des paramètres agro-physiologiques, production et biochimiques au champ, cinq (05) familles d'hybrides F12, F14, F7, F6 et F15 ont présenté de bonnes aptitudes d'adaptation à la sécheresse au champ.

Quant aux paramètres génétiques, les variables agro-morphologiques, physiologiques et biochimiques, ont présenté des héritabilités au sens strict très inférieures aux héritabilités au sens large. Ces caractères ont été instables très influencés par les effets de l'environnement quel que soit le type d'hybride. Les rapports entre les variances de l'aptitude générale à la combinaison et l'aptitude spécifique à la combinaison ont été inférieurs à 1 dans toutes les zones. La transmission des caractères est donc de nature dominante et le choix se porte sur les meilleurs hybrides.

- Treize (13) croisements sont susceptibles de constituer une sortie variétale ou de composer les géniteurs de la prochaine génération de rétrocroisements une fois leurs paramètres de production étudiés. Ce sont : IFC1 X MC67 ; IFC1 X SCA6

; IFC1X T60/887 : IFC1 X UPA409 ; IMC67 X SCA6 ; T60/887 X IMC67 ;
POR X T60/887 : SCA6 X IMC67 : SCA6 X UPA409 ; POR X IFC1 ; T60/887
X POR ; T60/887 X SCA6 ; UPA409 X SCA6).

Les hypothèses assignées dans cette étude :

1) les familles d'hybrides de cacaoyers présentent des caractéristiques agro- physiologiques pour résister au déficit hydrique ; 2) les familles d'hybrides de cacaoyers synthétisent et accumulent des composés biochimiques dans la résistance au déficit hydrique ; 3) les paramètres génétiques contrôlent les expressions des gènes responsables de la résistance au déficit hydrique, ont toutes été vérifiées.

Perspectives

Les résultats de cette étude ouvrent sur les perspectives suivantes :

Au niveau agronomique et physiologique :

- évaluer au champ dans un essai de validation multi-locale en zones de faibles pluviométries, les familles d'hybrides de cacaoyers présentant une tolérance au stress hydrique en serre afin de confirmer leur niveau de tolérance à la sécheresse ;
- étudier à l'aide de marqueur morpho-physiologique biochimique et moléculaire identifié, le niveau de sensibilité à la sécheresse d'autres cacaoyers.

Au niveau biochimique :

- étudier les signaux hormonaux comme l'ABA et l'éthylène impliqués dans les mécanismes de contrôle de l'état hydrique des cacaoyers ;
- étudier les activités enzymatiques de la superoxyde dismutase, de la peroxydase et de la catalase impliquées dans la résilience des cacaoyers à la sécheresse,

Au niveau moléculaire :

- identifier de nouveaux marqueurs microsatellites polymorphes pour une sélection assistée,
- identifier les QTL (Quantitifs Traits locis) associés aux caractères morpho-physiologiques de la tolérance à la sécheresse ;
- utiliser les SNP (Simple Nucléotide Polymorphisme) dans la caractérisation moléculaire de la tolérance des cacaoyers à la sécheresse.

Recommandations

Les recommandations essentielles sont les suivantes :

- A l'endroit de la recherche (CNRA) :
 - ✓ Confirmer dans d'autres zones à pluviométrie déficitaire, la stabilité de la résistance au déficit hydrique, des familles d'hybrides sélectionnées,
 - ✓ Evaluer de nouvelles familles d'hybrides parmi celles présentant un potentiel élevé de production dans la perspective de sélectionner d'autres croisements avec des niveaux élevés de résistance au déficit hydrique.
- Aux politiques :
 - ✓ Prendre désormais en compte le zonage climatique dans la distribution des semences améliorées aux producteurs, en orientant le matériel résistant dans les zones les plus touchées par la sécheresse.
- Aux producteurs :
 - ✓ Adopter les familles d'hybrides résistantes au déficit hydrique (proposées par la recherche agronomique) ;
 - ✓ Respecter les techniques agricoles pour maximiser le potentiel de résistance des familles d'hybrides recommandées par la recherche.

REFERENCES

- Abbas F., Civantos F., Benedetto P. & Soloway M. S. (1995). Small cell carcinoma of the bladder and prostate. *Urology*, 46 (5) : 617-630.
- Achour A., Bidai Y & Belkhodja M. (2015). L'impact de la salinité sur le comportement hydrique et métabolique d'une variété de Gombo (*Abelmoschus esculentus* L.) *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 12 : 943-953.
- Acquaah G. (2007). Principles of Plant Genetics and Breeding. Cambridge University Press, 2nd Edition, Wiley-Blackwell, Hoboken. Cambridge, Angleterre 569 p.
- Adou K. E. (2004). Etude des paramètres génétiques des caractères technologiques chez *Coffea canephora* Pierre. Etude de l'héritabilité familiale en test en fonction de la taille des descendance. Mémoire de DEA de Génétique et Amélioration des espèces végétales, UFR Biosciences, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 32 p.
- Adra M. (2010). Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress hydrique. Thèse de doctorat. Faculté de biologie, Département de Biologie Végétale et Écologie : Mentouri, Constantine 118 p.
- Aguilar P., Paulin D., Kehou Y., N'Kamleu G., Raillard A., Deheuvels O., Petithuguenin P. & Gockowski J. (2003). L'évolution des vergers de cacaoyers en Côte d'Ivoire entre 1995 et 2002. *Actes de la 14ème conférence internationale sur la recherche cacaoyère*, 18-23 octobre 2003, Accra, Ghana, pp 11167-11175.
- Aké-Assi L. (1984). Flore de la Côte d'Ivoire : Etude descriptive et biogéographique avec quelques notes ethnobotaniques, Thèse de Doctorat d'Etat des Sciences Naturelles, Faculté des Sciences et Techniques, Université Nationale, Abidjan, Côte d'Ivoire, 665p.
- Albouchi A., Béjaoui, Z., & El Aouni, M. H. (2003). Influence d'un stress hydrique modéré ou sévère sur la croissance de jeunes plants de *Casuarina glauca* Sieb. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 14(3) : 137-142.
- Alverson W. S., Whitlock B., A., Nyffeler R., Bayer C. & Baum D., A. (1999). Phylogeny of the core Malvales : Evidence from *ndhF* sequence data. *American Journal of Botany* 86(10) : 1474–1486.

- Alvim P. D. T. & Havis J. R. (1954). An improved infiltration series for studying stomatal opening as illustrated with coffee. *Plant Physiology*, 29 (1) :97.
- Alvim P. T. (1965). Ecophysiology of the cacao tree, *1ère Conférence Internationale sur les Recherches Cacaoyères*, 15-20 Novembre, 1965, Abidjan, Côte d'Ivoire : 23-25.
- Alvim P. T. (1977). Ecological and physiological determinants of cacao yield. *Proceedings, V International Cocoa Research Conference*. 1 January 1979, Bahia, Brazil : 25-38.
- Anonyme (2012). FAO, Bulletin online, the world cocoa economy : past and present 43 p. <https://www.icco.org/wp-content/uploads/2019/07/>. Consulté le 15 Septembre 2019.
- Apshara S. E., Rajesh M. K., & Balasimha D. (2013). Assessment of morphological, physiological and molecular characteristics of cocoa accessions from Central and South America in relation to drought tolerance. *Journal of Plantation Crops*, 41 (3) : 389-397.
- Argout X., Salse J., Aury J. M., Guiltinan M. J., Droc G., Gouzy J., Allegre M., Chaparro C., Legavre T. & Maximova S. N. (2011). The genome of *Theobroma cacao*. *Nature Genetics*, 43: 101-108.
- Aroca R., Irigoyen J. J. & Sanchez-Diaz M. (2003). Drought enhances maize chilling tolerance, II, Photosynthetic traits and protective mechanisms against oxidative stress. *Physiology Plant Journal*, 117(4) :540-549.
- Asch F., Dingkuhn M., Dörffling K. & Mieza K. (2000). Leaf K/Na ratio predicts salinity induced yield loss in irrigated rice. *Euphytica*, 113:109-118.
- Aspinall D. & Paleg L. G. (1981). Proline accumulation : physiological aspects. In : Paleg LG, Aspinall D, eds. *The physiology and biochemistry of drought resistance in plants* : Academic Press Sydney, Australia : 205 - 241.
- Assiri A. A., Deheuvels O., Keli Z. J., Kebe B. I., Konan A. & Koffi N. (2016). Identification des caractéristiques agronomiques pour le diagnostic et la prise de décision de régénération des vergers de cacaoyers en Côte d'Ivoire. *African Crop Science Journal*, 24 (3) : 223-234.

- Assiri A. A., Yoro G. R., Deheuvels O., Kébé B. I., Keli Z. J., Adiko A. & Assa A. (2009). Les caractéristiques agronomiques des vergers de cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire, *Journal of Animal & Plant Sciences*, 2 (1) : 55-56.
- Bajji M., Lutts S. & Kinet J. M. (2001). Water deficit effects on solute contribution to osmotic adjustment as a function of leaf ageing in three durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars performing differently in arid conditions. *Plant Sciences*. 160: 669 -681.
- Baker J., Dennsteel C. H. & Dure I. L. (1988). Sequence and characterization of 6 LEA proteins and their genes from cotton. *Plant Molecular Biology*, 11 (3) : 277-291.
- Balasimha D. & Rajagopal V. (1988). Stomatal responses of cocoa to changes in climatic factors, *Journal of Agricultural Science*, 58: 213-216.
- Balasimha D. (1989). Light penetration patterns through arecanut canopy and leaf physiological characteristics of intercrops. *Journal of Plantation Crops*, 16: 61-67.
- Balasimha D., Anil K. V. & Ananda K. S. (2008). Photosynthetic characteristics and yield in cocoa hybrids. *Journal of Plantation Crops*, 36: 8 - 11.
- Balasimha D., Daniel E. V. & Bhat P. G. (1991). Influence of environmental factors on photosynthesis in cocoa trees. *Agriculture and Forest Meteorology*, 55: 15 - 21.
- Baradat P. (1982). La génétique quantitative : modèles statistiques et génétiques de base. INRA, recherches forestières, laboratoire amélioration, Cestas (France), 205 p.
- Baradat P., Labbé T. & Bouvet J.M. (1995). Conception d'index pour la sélection récurrente réciproque : aspects génétiques, statistiques et informatiques. In : In : Traitements statistiques des essais de sélection : stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Séminaire de biométrie et de génétique quantitative, 12 au 14 Septembre 1994, Montpellier, France, 101-150.
- Barrau J. (1979). Sur L'origine du cacaoyer, *Theobroma cacao* L. sterculiacées. *Journal d'Agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquée*, 26 (3-4) : 171-180.
- Barry A. B. & Sivakumar M. V. K. (1997). Agroclimatologie de l'Afrique de l'ouest : la Guinée. Rapport ICRISAT-ACMAD, Direction Nationale de la Météorologie, France 85p.

- Bayoumi T. Y., Eid M. H. & Metwali E. M. (2008). Application of physiological and biochemical indices as a screening technique for drought tolerance in wheat genotypes. *African Journal of Biotechnology*, 7 (14) :2341-2352.
- Bensari M., Calmes J. & Viala G. (1990). Répartition du carbone fixé par photosynthèse entre l'amidon et le saccharose dans la feuille de soja. Influence d'un déficit hydrique. *Plant Physiology and Biochemistry*, 28 (1) : 113-121.
- Bergman J. F. (1969). The distribution of cacao cultivation in pre-Columbian America. *Annals of the Association of American Geographers*, 59 : 85-96.
- Bernard F. (2006). Les SIC une discipline de l'ouverture et du décloisonnement. La communication organisationnelle en débat. Champs, concepts, perspectives le Harmattan. Paris, France, 33-46.
- Blum L. A. (1988). Gilligan and Kohlberg : Implications for moral theory. *Ethics*, 98(3), 472-491.
- Bogaert G. (1990). Effects of ontogenesis and drought-stress on cytological morphological, anatomical and Eco physiological CO₂ assimilation determining leaf characteristics of C₃ and C₄ plants, Ph. D. University of Ghent, Belgium, 359 p.
- Boni D. (1978). Aspects géographiques du Binôme Café Cacao dans l'économie ivoirienne, Nouvelles Editions Africaines, Abidjan, Côte d'ivoire, 96 p.
- Bootsma A., Boisvert J. B., de Jong R. & Baier W. (1996). La sécheresse et l'agriculture canadienne : une revue des moyens d'action. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 7(4) : 277-285.
- Bors W., Heller W., Michel C. & Stettmarier K. (1996). Flavonoids and polyphenols : Chemistry and Biology. In : Cadenas, A., Packer, L. (eds). Handbook of antioxidants. Marcel Dekker, Inc., New York : 409 - 466.
- Bouchabke O., Tardieu F. & Simonneau T. (2006). Leaf growth and turgor in growing cells of maize (*Zea mays* L.) respond to evaporative demand under moderate irrigation but not in water-saturated soil. *Plant, Cell & Environment*, 29(6) : 1138-1148.

- Bousba R., Ykhlef N. & Djekoun A. (2009). Water use efficiency and flag leaf photosynthetic in response to water deficit of durum wheat (*Triticum durum* Desf). *World Journal of Agricultural Sciences*, 5: 609-616.
- Bradford M. M. (1976). A rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein "dye" binding. *Analytical Biochemistry*, 7 (72) : 248-254.
- Braudeau J. (1969). Le cacaoyer. GP, Maisonneuve et Larose, Ed, Paris, France, 304 p.
- Bray H. G., & Thorpe W. (1954). Analysis of phenolic compounds of interest in metabolism. *Methods of Biochemical Analysis*, 1: 27-52.
- Brou Y. T. (2010). Variabilité climatique, déforestation et dynamique agro-démographique en Côte d'Ivoire. *Sécheresse*, 21 (1) : 1-6.
- Brou Y. T., Akindès F. & Bigot S. (2005). La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cahiers Agricultures*, 14(6), 533–540.
- Brou Y. T., N'Goran J. A., K., Bicot S. & Servat E. (2003). Risque climatique et production agricole en Côte d'Ivoire : effet des variations pluviométriques sur la production cacaoyère, *In* : Actes de la 14ème conférence internationale sur la recherche cacaoyère, 18 - 23 octobre 2003, Accra, Ghana 259-267.
- Cameron K. D., Teece M. A. & Smart L. B. (2006). Increased accumulation of cuticular wax and expression of lipid transfer protein in response to periodic drying events in leaves of tree tobacco. *Plant Physiology*, 140 (1) : 176 - 183.
- CCC (2024). Estimation du bulletin trimestriel statistique. (1) :4, 2024.
- Carletto J. (1973). Expedición Internacional à l'Amazonia Ecuatoriana, para colectar material botánico de cacao. *Revista Theobroma*, 3 : 41-47.
- Caroline N. (2007). Variabilité climatique passée, changement climatique futur : que peut-on réellement observer ? Deuxième semestre. *Air Pur*, 72 : 5-12.

- Carvalho H. F., Da Silva F. L., De Resende M. D. V. & Bhering L. L. (2019). Selection and genetic parameters for interpopulation hybrids between Kouilou and Robusta coffee. *Bragantia Campinas*, 78 (1) : 52-59.
- Casals M. L. (1996). Introduction des mécanismes de résistance à la sécheresse dans un modèle dynamique de croissance et de développement, du blé dur. Sciences du Vivant, Unité Biotechnologie. Institut National Agronomique Paris Grignon, France 93p.
- Chaves M. M., Pereira J. S., Maroco J., Rodrigues M. L., Ricardo C. P. P., Osório M. L. & Pinheiro C. (2002). How plants cope with water stress in the field ? Photosynthesis and growth. *Annals of Botany*, 89 (7) :16-907.
- Chen F. J., Wu G. & Ge F. (2004). Impacts of elevated CO₂ on the population abundance and reproductive activity of aphid *Sitobion avenae* Fabricius feeding on spring wheat *Journal of Applied Entomology*, 128 : 723 - 730.
- Cheserek J.J., Ngugi K., Muthomi J.W. & Omondi C.C. (2020). Genetic variability, heritability and correlation of quantitative traits for Arabusta coffee (*C. arabica* L. X Tetraploid *C. canephora* Pierre). *Journal of Plants Breeding Crop Sciences*, 12 (1) : 50-57.
- Cilas C. (1991). Estimation de quelques paramètres génétiques pour différents plans de croisement chez le cacaoyer. *Café-Cacao-Thé*, 35 (1) : 3-14.
- Cilas C., Duchemin C. & Lotodé R. (1989). L'amélioration génétique de la qualité du cacao : étude de la granulométrie. *Café, Cacao, Thé*, 33: 3-8.
- Cilas C., Paulin D., Clément D. & Baradat P. (1996). Sélection multi-caractères dans un plan factoriel de croisements en Côte d'Ivoire. Définition d'un index de sélection. In Efficacité de la production cacaoyère et la qualité du cacao au 21^e. Actes. Lagos : Cocoa Producers' Alliance. Conférence internationale sur la recherche cacaoyère. 17 au 23 Novembre 1996, Salvador de Bahia, Brésil : 6p.
- Cilas C., Verschave P. & Berry D. (1995). Recherche d'un index de sélection pour deux caractères (production et résistance à la pourriture brune des cabosses) chez le cacaoyer. In Traitements statistiques des essais de sélection. Stratégies de sélections des plantes pérennes (Colloques). Séminaire de biométrie et de génétique quantitative, 12 au 14 Décembre 1994, Montpellier, France, 8p.

- Clark P.J. & Kempthorne O. (1957). An introduction to genetic statistics. *Journal of Mammalogy*, 39 (2) : 1-313.
- Clement J. L., & Penelope S. J. (1994). Antibacterial silver. *Metal-based Drugs*, 1 (5-6) : 467-482.
- Cope F.W. (1958). Incompatibility in *Theobroma cacao*. *Nature*, 181: 279-280.
- Coudret A. & Ferron F. (1977). Plant transpiration : mode of action of antitranspirants. *Annales de l'Amélioration des Plantes*, 27(6) : 613-638.
- Coulibaly K., Aka R. A., Camara B., Kassin E. K., Koffie K., Kébé B. I., Koffi K. N., Tahi G. M., N'Guessan W. P., Guiraud S. B., Assi M. E., Koné B., N'Guessan F. K. & Daouda K. (2018). Molecular Identification of *Phytophthora palmivora* in the Cocoa Tree Orchard of Côte d'Ivoire and Assessment of the Quantitative Component of Pathogenicity. *International Journal of Sciences*, 4(8) : 7-15.
- Coulibaly K., Kébé I.B., Koffi N.K., Mpika J. & Kone D. (2013). Caractérisation des isolats de *Phytophthora* spp du verger cacaoyers de Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 70(1) : 5567-5579.
- Cuatrecasas J. (1964). Cacao and its allies : a taxonomic revision of the genus *Theobroma*, Contribution from the United States. *Herbarium*, 35: 379-614.
- Daymond A., Tricker P. J. & Hadley P. (2011). Genotypic variation in photosynthesis in cacao is correlated with stomatal conductance and leaf nitrogen. *Biologia Plantarum*, 55: 99-104.
- De Raïssac M. (1992). Mécanismes d'adaptation à la sécheresse et maintien de la productivité des plantes cultivées. *Agronomie Tropicale*, 46: 29 -39.
- Delauney A. J. & Verma D. P. S. (1993). Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *The Plant Journal*, 4(2) : 215-223.
- Demarly Y. (1977). Génétique et Amélioration des plantes. *Collection Scientifique Agronomique*. Ed Masson, Paris (France), 287 p.

- Demol H., Fratelli M., Puype M., Casagrande S., Eberini I., Salmona, M. & Ghezzi P. (2002). Identification by redox proteomics of glutathionylated proteins in oxidatively stressed human T lymphocytes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(6) : 3505-3510.
- Dias L. A. S. & Kageyama P. Y. (1995). Combining-ability for cacao (*Theobroma cacao* L.) yield components under southern Bahia conditions. *Theoretical and Applied Genetics*, 90 : 534-541.
- Djé K.B. (2007) : Impacts des phénomènes ENSO sur la pluviométrie et leurs incidences sur la production cacaoyère en Côte d'Ivoire. Conférence Internationale pour la Réduction de la Vulnérabilité des Systèmes Naturels Economiques et Sociaux en Afrique de l'Ouest face aux changements climatiques, 24 au 27 Janvier 2007, Ouagadougou Burkina Faso, 7p.
- Djekoun A. & Planchon C. (1992). Stomatal conductance, photosynthesis and acetylene reduction rate in soybean genotypes. *Canadian Journal of Plant Science*, 72(2), 383-390.
- Dorin B. (2003). De la fève ivoirienne de cacao à la plaquette française de chocolat noir, Rapport final CIRAD-AMIS, France, 62 p.
- Dos Santos E. A., Almeida A. A. F. D., Ahnert D., Branco M. C. D. S., Valle R. R. & Baligar V. C. (2016). Diallel Analysis and Growth Parameters as Selection Tools for Drought Tolerance in Young *Theobroma cacao* Plants, *PLoS ONE* 11(8) : 22 p.
- Dreier W. & Goring M. (1974). Influence of nutrient deficiency on proline accumulation in the cytoplasm of *Zea Mays* L. Seedlings. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 174(1) : 9-16.
- Dutuit P., Pourrat Y. & Dutit J.M. (1994). La notion de sécheresse de la cellule à l'écosystème. *Sécheresse*, 1 (5) : 23 -31.
- Ehounou J. N., Kouamé, B., Tahi, M. G., Kassin, E. K., Kotaix, J. A. A., Dékoula, C. S., & Soro, N. (2019). Impact of Local Global Warming on Rainfall and Annual Cocoa Water Requirements in the Regions of Lôh-Djiboua and Gôh in West-central Côte d'Ivoire. *International Journal of Environment and Climate Change*, 9: 503–517.

- Eskes A. & Lanaud C. (1997). Le cacaoyer. In : L'amélioration des Plantes Tropicales, CIRAD, Montpellier, France : 141-170.
- Eskes A. B., Paulin D., Clement D., N'goran J. A. K., Sounigo O., Lachenaud Ph., Cilas C., Berry D. & Yagmpam A. (1995). Selection methods applied and genetic knowledge generated in cocoa breeding in Côte d'Ivoire and Cameroun, *In: International workshop on cocoa breeding strategies*, 18 au 19 Octobre 1994, Kuala Lumpur, Malaisie: 17 p.
- Evi J.B., Yavo W., Barro-Kiki., Menan E.H.I. & Koné M. (2007). Helminthoses intestinales en milieu scolaire dans six villes du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 100 (3) : 176 - 177.
- Facon B., Jarne P., Pointier J. P. & David P. (2005). Hybridization and invasiveness in the freshwater snail *Melanoïdes tuberculata* : hybrid vigour is more important than increase in genetic variance. *Journal of Evolutionary Biology*, 18 : 524-535.
- Falalou H. (2000). Réponse physiologique du niébé (*Vigna unguiculata* L. Walp) au déficit hydrique s'exerçant au cours de deux stades de développement, début floraison et début formation des gousses. Sciences naturelles et agronomie. Mémoire DEA. Université de Ouagadougou, (Ouagadougou burkina faso) 62 p.
- Falconer D. S. & Mackay T. F. C. (1996). Introduction to quantitative genetics. *Harlow, Essex* : Addison Wesley Longman, (Edinburg, New York), 464 p.
- CICG (2022). Portail du gouvernement www.gouv.ci, produit CICG du 17-05-2022.
- Farshadfar E. & Ghasempour V. (2008). Molecular aspects of drought tolerance in bread wheat (*T. aestivum*). *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11: 118-122.
- Feng Y., Li X. & Boersam L. (1994). Roles of osmotic adjustment and turgor potential in leaf area expansion. *Plant Physiology*, 90: 1- 8.
- Ferryra R., Sellés G., Ruiz R.S. & Sellés I.M. (2004). Effect of water stress induced at different growth stages on grapevine cv. Chardonnay on production and wine quality. *Acta Horticulturae*, 664: 233- 236.

- Figueira A & Janick J. (1993). Development of nucellar somatic embryos of *Theobroma cacao*. *Acta Horticulturae*, 336: 231-238.
- Fitter A. H. & Hay R. K. (1981). Environmental physiology of plants. Academic Press. Plant species cover by means of image analysis. *Journal of Vegetal Science*, (7) : 131p.
- Forestier J. (1979). Inventaire pour une étude de la résistance à la sécheresse du riz pluvial. Laboratoire d'Agronomie, ORSTOM, Abidjan, Côte d'Ivoire. 42 p.
- Foyer C. H. & Noctor G. (2000). Oxygen processing in photosynthesis : regulation and signaling. *New Phytology*, 146: 359-388.
- Freud E.H., Petithuguenin P. & Richard J. (2000). Les champs de cacao : un défi de compétitivité Afrique Asie. Editions Karthala et CIRAD, Paris, France, 207 p.
- Gallais A. (1978). Amélioration des populations, méthodes de sélection et création de variétés. III. Bases théoriques pour l'étude de la sélection récurrente réciproque. *Annales de l'Amélioration des Plantes*, 28 : 637-666.
- Gallais, A., Coque M., Quilléré I., Prioul J. L., & Hirel B. (2006). Modelling postsilking nitrogen fluxes in maize (*Zea mays*) using 15N-labelling field experiments. *New Phytol.* 172, 696–707. doi:10.1111/j.1469-8137.2006.01890.x.
- Gallais A. (2011). Méthodes de création de variétés en amélioration des plantes. *Ed. Quae* Versailles (France), 278 p.
- Garwood E. A. & Williams T.E. (1967) : Growth, water use and nutrient uptake from the subsoil by grass swards, *Journal of Agricultural. Sciences*, 69: 125-130.
- Geigenberger P., Reimholz R., Geiger M., Merlo L., Canale V. & Stitt M. (1997). Regulation of sucrose and starch metabolism in potato tubers in response to short-term water deficit. *Planta*, 201(4) : 502-518.
- Genolini C., Alacoque X., Sentenac M. & Arnaud C., (2015). Kml and kml3d : R packages to cluster longitudinal data. *Journal of Statistical Software*, 65: 1–34.
- Gorka E., Juan J. I., Manuel S. D., Jean-Christophe A. & Alain O. (2007). Effect of drought, elevated CO₂ and temperature on accumulation of N and vegetative storage proteins

- (VSP) in taproot of nodulated alfalfa before and after cutting. *Plant Science*, 172: 903–912.
- Gonzalez Dugo V., Durand J. L., Gastal F., Picon Cochard C. (2005) : Short term response of the nitrogen nutrition status of tall fescue and italian ryegrass swards under water deficits”, *Australian Journal of Agricultural Research*, 56 : 1269-1276.
- Granier C., Inzé D. & Tardieu F. (2000). Spatial distribution cell division rate can be deduced from that of P34cdc2 kinase activity in maize leaves grown in contrasting conditions of temperature and water status. *Plant Physiology*, 124:1393-1402.
- Greenway H. & Munns R. (1980). Mechanism of salt tolerance in non-halophytes. *Annual Revue Plant Physiology*, 31: 149-190.
- Gregory P. H. (1974). *Phytophthora disease of cocoa*, The Aberdeen University Press, London, England, 348 p.
- Griffing B. (1956). Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences*, 9 (4) : 463-493.
- Gupta V.P. & Singh K.P. (1973). Combining ability for yield and its components in pearl millet. *Journal of Genetics and Plants Breeding*, 33: 183-186.
- Hallauer A. R. & Miranda Filho, J. B. (1981). Quantitative genetics in maize breeding. Iowa State University Press, Ames. United States, 468 p.
- Hare B. Call J. & Tomasello M. (1998). Communication of food location between human and dog (*Canis familiaris*). *Evolution of Communication*, 2 (1) : 137-159.
- Hare P. D. & Cress W. A. (1997). Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants. *Plant Growth Regulation*, 21: 79-102.
- Hare P. D., Cress W. A., Van Staden J. (1998). Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant Cell Environ*, 21 : 535–553.
- Huang X. H., Huang H. B. & Gao F. F. (2000). The growth potential generated in citrus fruit under water stress and its relevant mechanisms. *Science Horticulture*, 83: 227-240.

- ICCO (2024). International cocoa organization, Quarterly Bulletin of cocoa statistic. (1) Cocoa year 2023/2024. Abidjan, Côte d'Ivoire, 2 p.
- Jeffrey S. W. and G. F. Humphrey (1975) : New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c~ and c 2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemical Physiology Pflanzen*, 167: 191-194.
- Jones R. (1992). The development of conceptual frameworks of accounting for the public sector. *Financial Accountability & Management*, 8 (4) : 249-264.
- Jonsen C. R., Jacobsen S. E., Andersen M. N., Nunez N., Andersen S. D., Rasmussen L. & Mogenson V. O. (2000). Leaf gas exchange and water relation characteristics of field quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) during soil drying. *European Journal of Agronomy*, 13 : 11-25.
- Kassambara A. & Mundt F., (2017). Factoextra : Extract and visualize the results of multivariate data analyses. *R Package Version 1.0.5*. Disponible en ligne sur : <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>
- Kassin K. E., Doffangui K., Kouamé B., Yoro R. G., & Assa A. (2008). Variabilité pluviométrique et perspectives pour la replantation cacaoyère dans le Centre Ouest de la Côte d'Ivoire, *Journal of Applied Biosciences*, 12 : 633-641.
- Katerji N., Hamdy, A., Raad A., & Mastrorilli M. (1991). Conséquence d'une contrainte hydrique appliquée à différents stades phénologiques sur le rendement des plantes de poivron. *Agronomie*, 11(8) : 679-687.
- Kavi K. P. B., Sangam S., Amrutha R. N., Laxmi P. S., Naidu K. R., Rao K. R. S., Rao S., Reddy S., Theriappan K. J. & Sreenivasulu P. (2005). Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants : its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. *Current Science*, 88 : 424 - 438.
- Kébé B. I. & N'guessan K. F. (2003). Rapport de la mission de prospection du swollen shoot, CNRA -Divo, Côte d'Ivoire, 7 p.
- Kébé I. B., N'Goran J. A., Tahi, G. M., Paulin D., Clément D., & Eskes A. B. (1999). Pathology and breeding for resistance to black pod in Côte d'Ivoire. In : Proceedings of the

- International workshop on the contribution of disease resistance to cocoa variety improvement, 24 au 26 Novembre 1996, Salvador, Brésil, 135-139.
- Kébé I., Mpika J., N'guessa K. F., Hebbar P. K., Samuels G. S., & Ake S. (2009). Isolement et identification de microorganismes indigènes de cacaoyères en côte d'ivoire et mise en évidence de leurs effets antagonistes vis-à-vis de *Phytophthora palmivora*, agent de la pourriture brune des cabosses. *Sciences & Nature*, 6:71-82.
- Kenten R. H. & Legg J. T. (1967). Some properties of cocoa mottle leaf virus. *Journal of General Virology*, 1(4) : 465-470.
- Knight R. & Rogers H. H. (1955). Recent introductions to West Africa of *Theobroma cacao* and related species. I. A review of the first ten years. *Empire Journal of Experimental Agriculture*, (23) : 113-25.
- Koffié R. M., Farrar C. T., Saidi L. J., William C. M., Hyman B. T., & Spires-Jones T. L. (2011). Nanoparticles enhance brain delivery of blood–brain barrier-impermeable probes for in vivo optical and magnetic resonance imaging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(46) : 18837-18842.
- Koko I. K. D., Djego J., Gbenou J., Hounzangbé-Adoté S. M., & Sinsin B. (2011). Etude phytochimique des principales plantes galactogènes et emménagogues utilisées dans les terroirs riverains de la Zone cynégétique de la Pendjari. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5(2). 618-633.
- Kosma D. K., Bourdenx B., Bernard A., Parsons E. P., Lü S., Joubès J. & Jenks M. A. (2009). The impact of water deficiency on leaf cuticle lipids of arabidopsis. *Plant Physiology*, 151: 1918-1929.
- Kossel A. (1891). On the chemical composition of the cell. *Archives of Physiology* : 181-186.
- Koua S. H., Coulibaly N. A. M-D., Alloue-Boraud W. A. M. (2018). Caractérisation des vergers et des maladies de cacao de la Côte d'Ivoire : cas des départements d'Abengourou, Divo et Soubré. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 35 (3), 5706-5714.
- Kouakou K. (2014). Diversité moléculaire du CSSV (cocoa swollen shoot virus) et épidémiologie de la maladie du Swollen shoot du cacaoyer (*theobroma cacao* l.) en

- Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat, UFR Biosciences, Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY (Abidjan, Côte d'Ivoire), 153 p.
- Kouakou K., Kébé, B. I., Kouassi N., Anno A. P., Aké S., & Muller E. (2011). Impact de la maladie virale du swollen shoot du cacaoyer sur la production de cacao en milieu paysan à Bazré (Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, 43: 2947-2957.
- Kouamé B., Kone D. & Yoro G.R. (2007). La pluviométrie en 2005 et 2006 dans la moitié sud de la Côte d'Ivoire. Bulletin Le CNRA en 2006, document technique. Abidjan, Côte d'Ivoire : 12-13.
- Kouamé N., N'Guessan F., N'Guessan H., N'Guessan P. & Tano Y. (2015). Variations saisonnières des populations de mirides du cacaoyer dans la région de l'Indénie-Djuablin en Côte d'Ivoire, *Journal of Applied Biosciences*, 83 : 7595.
- Kouamé S. T., Tahi M. G., Sekou A., Cilas C., & Akaffou S. D. (2021). Evaluation of New High-Producing Hybrids of Cocoa Trees in Marginal Crop Areas in Côte d'Ivoire. *Agricultural Sciences*, 12(12) :1508-1526.
- Laberche J. C. (2004). La nutrition de la plante In BiologieVégétale. Dunod. 2e (éd). Paris, France : 154-63.
- Lachenaud Ph. & Motamayor J. C. (2017). The Criollo cacao tree (*Theobroma cacao* L.) : A review. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 64: 1807-1820.
- Lachenaud Ph. & Sallée B. (1993). Les cacaoyers spontanés de Guyane. Localisation, écologie et morphologie. *Café, Cacao, Thé*, 37 (2) : 101-114.
- Lachenaud Ph. (1984). Une méthode d'évaluation de la production de fèves fraîches applicable aux essais entièrement « randomisés ». *Café, Cacao, Thé*, 28 (2) : 83-88.
- Lachenaud Ph. (1991). Facteurs de la fructification chez le cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) Influence sur le nombre de graine par fruit. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris (France), 186 p.
- Lachenaud Ph. (2014). Guide d'identification des cacaoyers. Agritrop.cirad.fr. (Martinique, france) 15 p.

- Lachenaud Ph. Eskes A. B., N'goran J.A.K., Clement D., Kebe I., Tahi G.M. & Cilas C. (2001). Premier cycle de sélection récurrente en Côte d'Ivoire et choix des géniteurs du sond cycle. In : Proceedings of the 13th International Conference on Cocoa Research, KotaKinabalu, 9 Octobre 2000/14 Octobre 200, Sabah (Malaysia), 11-22.
- Lachenaud Ph., Mooleedhar, V., & Couturier, C. (1997). Les cacaoyers spontanés de Guyane. Nouvelles prospections. *Plantations, Recherche, Développement*, 4 (1) : 25-32.
- Laloë D. (2011). La genèse et le développement des concepts de l'évaluation génétique classique. In : Numéro spécial, Amélioration génétique. Mulsant P., Bodin L., Coudurier B., Deretz S., Le Roy P., Quillet E., Perez J.M. (Eds). *INRA Production. Animals*, 24: 323-330.
- Lamaze C. & Schmid S. L. (1995). The emergence of clathrin-independent pinocytic pathways. *Current opinion in cell biology*, 7(4) : 573-580.
- Lam-Sánchez A., Fornasieri F. D., Pedroso P. A. C. & Badin H. (1987). Evaluation of drought tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) *Cultivars with the Use of Mannitol* : 115-125.
- Lanaud C. (1986). Utilisation des marqueurs enzymatiques pour l'étude génétique du cacaoyer : *Theobroma cacao* L. Contrôle génétique et "linkage" de neuf marqueurs génétiques. *Café Cacao Thé*, 30 : 259-270.
- Lanaud C. (1987). Nouvelles données sur la biologie du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) : diversité des populations, système d'incompatibilité, haploïdes spontanés, Leurs conséquences pour l'amélioration génétique de cette espèce. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Paris XI, Paris, France, 106 p.
- Lanaud C., Fouet O., Legavre T., Lopes U., Sounigo O., Eyango M. C. & Clément D. (2017). Deciphering the *Theobroma cacao* self-incompatibility system : from genomics to diagnostic markers for self-compatibility. *Journal of Experimental Botany*, 68 (17) : 4775-4790.
- Lanaud C., Hamon P., & Duperray C. (1992). Estimation of nuclear DNA content of *Theobroma cacao* L. by flow cytometry. *Café Cacao Thé*, 36: 3-8.

- Lass R.A. (1985). Disease. In : Cocoa, (G, A, R Wood and R, A, Lass editors). 4th edition, Longman, London, England, 265-365.
- Lê S., Josse J. & Husson F., (2008). FactoMineR : an R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software* 25, 1–18.
- Lebon E., Pellegrino A., Tardieu F. & Lecoœur J. (2004). Shoot development in grapevine is affected by the modular branching pattern of the stem and intra and inter-shoot trophic competition. *Annals of Botany*, 93: 263 - 274.
- Lerceteau E., Crouzillat D. & Petiard V. (1992). Use of random amplified polymorphic DNA (RAPD) and restriction length polymorphism (RFLP) to evaluate genetic variability within the *Theobroma* genus. Intl. Cocoa Genetic : Resource Workshop, 13-17 September 1992. Trinidad, Tobago, Spain. 12 p.
- Leroy T. & Charrier A. (1989). Mise en place d'un programme de sélection récurrente réciproque chez *Coffea canephora* Pierre. *13e colloque scientifique international sur le café*. 1989/08/21-25.ASIC, Paipa (Colombia), 457-465.
- Leroy T. (1993). Diversité, paramètres génétiques et amélioration par sélection récurrente réciproque du caféier *Coffea canephora* P. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, (France), 147p.
- Levitt J. (1972). Responses of plants to environmental stresses. Academic press, New York, America 698 p.
- Levitt J. (1980). Water stress in “response of plant to environmental stress, water radiation, salt and other stresses”. Academic Press New York, America, 225-282.
- Liu W. J., Yuan S., Zhang N. H., Lei T., Duan H. G., Liang H. G. & Lin H. H. (2006). Effect of water stress on photosystem 2 in two wheat cultivars. *Biologia Plantarum*, 50: 597-602.
- Lockwood G., Lim D. & Yeow R., (1994). Plantation cocoa : Prospects for the second 21st century. *Malaysian international Cocoa Conference*, 13-17 September 1994, Kuala Lumpur, Malaysia, 5-7.

- Lotode R, & Lachenaud, PH, (1988), Méthodologie destinée aux essais de sélection du cacaoyer. *Café Cacao Thé*. Disponible en ligne sur : <http://agritrop.cirad.fr/452988/> Consulté le 25 Mai 2018.
- Luna C. M., Pastori G. M., Driscoll S., Groten K., Bernard S. & Foyer C. H. (2004). Drought controls on H₂O₂ accumulation, catalase (CAT) activity and CAT gene expression in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 56: 417-423.
- M'bo K. A. A., Apshara S., Hebbar K. B. & Tahi G. M. (2015). Potential of antioxidant enzymes in depicting drought tolerance in cocoa genotypes at young age. *African Journal of Science and Research*, 4 (5) :18-23.
- Macheix J. J., Fleuriet A., & Jay-Allemand C. (2005). Les composés phénoliques des végétaux : un exemple de métabolites secondaires d'importance économique. PPUR presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 121-216.
- Madhava Rao K.V., Raghavendra A.S. & Janardhan Reddy K. (2006). Printed in the Netherlands. *Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants*. Springer : 1-14.
- MAE-CIRAD (2002). *Mémento de l'agronome*. Edition Paris, Paris, France. 1691 p.
- Mainget M. (1995). L'homme et la sécheresse. Edition Paris, Masson, France, 335 p.
- Manurung A., Subronto S., & Lubis S. (1988). Forecasting variables in bulk cocoa yield based on climatic components. *Buletin Perkebunan*, 19. 2-9.
- Meunier J., & Gascon J. P. (1972). Le schéma général d'amélioration du palmier à huile à l'IRHO. *Oléagineux*, 27 (1) : 1-12.
- Miller T. M., Moulder K. L., Knudson C. M., Creedon D. J., Deshmukh M., Korsmeyer S. J., & Johnson Jr E. M. (1997). Bax deletion further orders the cell death pathway in cerebellar granule cells and suggests a caspase-independent pathway to cell death. *The Journal of Cell Biology*, 139 (1) : 205.
- Mistro J. C., Fazuoli L. C., Gallo P. B., de Oliveira A. C. B., Toma-Braghini M., & Silvarolla M. B. (2007). Estimates of genetic parameters in Arabic coffee derived from the Timor hybrid. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 7 (2) :141-147.

- Monneveux P. & This D. (1997). La génétique face au problème de la tolérance des plantes cultivées à la sécheresse : espoirs et difficultés. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 8 (1) : 29-37.
- Monneveux P. (1991). Quelles stratégies pour l'amélioration génétique de la tolérance au déficit hydrique des céréales d'hiver. L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. John Libbey Eurotext Paris, France, 165-185.
- Montagnon C. (2000). Optimisation des gains génétiques dans le schéma de sélection récurrente réciproque de *Coffea canephora* P. Thèse Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. (Montpellier, France), 133p.
- Mossu G. (1990). Le cacaoyer. Collection le technicien d'Agriculture Tropicale, Maisonneuse et Larose, Paris (France), 159 p.
- Motamayor J.C., Lachenaud P., Wallace J., Llorca G., Kuhn D. N., Brown J. S. & Schnell II. R. J. (2008). Geographic and genetic population differentiation of the Amazonian chocolate tree (*Theobroma cacao* L), *PloS one*, 3: 3311-3321.
- Mouhouche B. & Boulassel A. (1997). Gestion rationnelle des irrigations de complément des cultures de légumineuses alimentaires et des céréales. *Recherche Agronomique*, 1: 21-31.
- Mourid E. I. M. (1988). Performance of Wheat and Barley cultivars under different soil moisture regimes in semi-arid region, Iowa State University Ames, Iowa, USA, 229 p.
- Murchie E. H. & Horton P. (1997). Acclimation of photosynthesis to irradiance and spectral quality in British plant species : chlorophyll content, photosynthetic capacity and habitat preference. *Plant Cell Environment*, 20: 438-448.
- Noctor G. & Foyer C. H. (1998). Ascorbate and glutathione : keeping active oxygen under control. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49: 249-279.
- Nouri L. (2002). Ajustement osmotique et maintien de l'activité photosynthétique chez le blé dur (*Triticum durum*, Desf), en condition de déficit hydrique. Thèse de Magistère en Biologie végétale University of Mentouri. Constantine, France, 77p.

- Nouri L., Ykhlef N. & Djekoun A. (2002). Adjustement osmotique et comportement hydrique chez certaines variétés de blé dur : relation avec la tolérance à la sécheresse. Actes de séminaire' IIIème journées Scientifiques sur le blé (éd). Université Mentouri. Constantine, France, 35 p.
- Olunloyo O. A. (2003). A general overview of cocoa viruses in West Africa in Plant Virology in Sub-Saharan Africa: Proceedings of a Conference Organized by IITA International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria, 137 pages.
- Opoku I. Y., Akrofi A. Y. & Appiah A. A. (2002). Shade trees are alternative hosts of the cocoa pathogen *Phytophthora megakarya*. *Crop Protection*, 21(8) : 629-634.
- Paradis L. I. (1979). Le cacao précolombien : monnaie d'échange et breuvage des dieux. *Journal d'Agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquée*, 26: 181-199.
- Parvais J.P., De Reffye P. & Lucas P. (1977). Observations sur la pollinisation libre chez *Theobroma cacao* : analyse mathématique des données et modélisation. *Café Cacao Thé*, 21 (4) : 253-261.
- Paulin D. & Eskes A. B. (1995). Le Cacaoyer : stratégies de sélection, *Plantations, Recherche, Développement*, 2: 5-18.
- Paulin D. (1990). Analyse d'essais d'hybrides de cacaoyer en Côte d'Ivoire pour la production, la vigueur et la sensibilité à la pourriture brune. Mémoire de DEA, Université Paris XI, Orsay, France, 58 p.
- Paulin D., Decazy B. & Coulibaly N. (1984). Étude des variations saisonnières des conditions de pollinisation et de fructification dans une cacaoyère. *Café Cacao Thé*, 27 (3) : 165-175.
- Peter H. R., Ray F. E. & Susan E. E. (2007). Biologie végétale. 2e édition de Boeck Supérieur, Amazone, France, 870 p.
- Pokou D. N., Fister A. S., Winters N., Tahi M., Klotioloma C., Sebastian A., & Guiltinan M. J. (2019). Resistant and susceptible cacao genotypes exhibit defense gene polymorphism and unique early responses to *Phytophthora megakarya* inoculation. *Plant Molecular Biology*, 99 : 499-516.

- Pornon, A., Marty, C., Winterton, P., and Lamaze, T. (2011). The intriguing paradox of leaf lifespan responses to nitrogen availability. *Functional Ecology*, 25, 796–801. doi:10.1111/j.1365-2435.2011.01849.x.
- Poujardieu B. & Mallard J. (1992). Les bases de la génétique quantitative : Les méthodes d'estimation de l'héritabilité et des corrélations génétiques. *INRAE Productions Animales*, 5 : 87-92.
- Premachandra C. S., Saneoka H., Fuj Ta K., & Ogata S. (1992). Osmotic adjustment and stomatal response to water deficits in maize. *Journal Experimental Botanic*, 43:1451-1456.
- Pukacki P. M. & Kaminska-Rozek E. (2005). Effect of drought stress on chlorophyll a fluorescence and electrical admittance of shoots in Norway spruce seedlings. *Trees*, 19: 539-544.
- R Core Team (2017). R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en ligne sur : <http://www.R-project.Org/>. Page R Foundation for Statistical Computing
- Rebetzke G. J. Condon A. G., Farquhar G. D., Appels R., & Richards R. A. (2008). Quantitative trait loci for carbon isotope discrimination are repeatable across environments and wheat mapping populations. *Theoretical and Applied Genetics*, 118:123-137.
- Reyes H. (1992). Criollo cacao germplasm in Venezuela, in : International Workshop on Conservation, Characterisation and Utilisation of Cocoa Genetics Ressources in the 21th Century. 1992/07/12-18 Port of Spain, Trinidad and Tobago, Spain, 244–252.
- Ross J. M. & Brookson C. W. (1966). Progress of breeding investigations with *Hevea brasiliensis*. III. Further data on the crosses made in the years. *Journal of the Rubber Research Institute of Malaya*, 19 (3) : 158-172.
- Royaert S., Phillips-Mora W., Arciniegas Leal A. M., Cariaga K., Brown J. S., Kuhn D. N. & Motamayor J. C. (2011). Identification of marker-trait associations for self-compatibility in a segregating mapping population of *Theobroma cacao* L. *Tree Genetics & Genomes*, 7 : 1159-1168.

- Ruf F. & Allangba K. (2001). Décisions de plantation et replantation cacaoyère, Le cas de migrant Baoulé à Oumé (Côte d'Ivoire), *In* : Actes de la Conférence sur l'Avenir des Cultures Pérennes, 5-9 Novembre 2001, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 38 p.
- Ruf F., (2000) Déterminants économiques et sociaux de la replantation. *Oléagineux Crops Gras Lipides*, 7 (2) : 189-196.
- Sairam R. K. & Tyagi A. (2004). Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. *Current science*, 407-421.
- Sakamoto T. & Murata N. (2002). The role of glycine betaine in the protection of plants from stress : clues from transgenic plants. *Plant Cell Environment*, 25: 163–171.
- Santoro M. M., Liu Y., Khan S. M. A., Hou L. X. & Bolen D. W. (1992). Increased thermal stability of proteins in the presence of naturally occurring osmolytes. *Biochemistry*, 25: 5278-5283.
- Searle S.R. (1971). Linear Models ; Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. *John Wiley & Sons*, New York (USA), 532 p.
- Sena Gomes A. R. & Kozłowski T. T. (1987). Effects of temperature on growth and water relations of cacao (*Theobroma cacao* var. Comum) seedlings. *Plant and Soil*, 103: 3-11.
- Seo P. J., Lee S. B., Suh M. C., Park M. J., Go Y. S. & Park C.M. (2011). The MYB96 Transcription Factor Regulates Cuticular Wax Biosynthesis under Drought Conditions in *Arabidopsis*. *Plant Cell*, 23: 1138 -1152.
- Servat E., Paturel J., Kouame B., Boyer J. F., Lubes H. & Masson J. M. (1995). La sécheresse en Afrique de l'ouest non sahélienne (Côte d'Ivoire, Togo, Bénin). *Sécheresse*, 6: 95-102.
- Sgherri C., Pinzino C. & Navarri-Izzo F. (1996). Sunflower seedlings subjected to increasing stress by water deficit : changes in O₂- production related to the composition of thylakoid membranes. *Physiologia Plantarum*, 96: 446-452.
- Shinozaki K., Yamaguchi-Shinozaki, K. (2007). Gene networks involved in drought stress response and tolerance, *Journal of Experimental Botany*, 58: 221–227.

- Sié R.S. (1998). Étude de la diversité et des paramètres génétiques du Colatier *Cola nitida* vent. Schott et Endlicher de la Collection de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR Biosciences, Université de Cocody (Cocody, Côte d'Ivoire), 143 p.
- Silva Da D. L. R., Honour S. J. & Manfield T. A. (1996). Estimation of concentrations of K⁺ and Ca²⁺ in the vicinity of stomatal guard cells. *New Phytologist*, 134: 463-469.
- Singh T. N., Paleg L. G. & Aspinall D. (1973). Stress metabolism. Variation in responses to water deficit in barley plant. *Australia Journal of Biology Science*, 26: 65-75.
- Solomon C., Hallu T. & Singh H. (2009). Genetic variability, heritability and traits relationships in recombinant inbred lines of tef [*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter]. *Research Journal of Agriculture and Biological Science*, 5 (4) : 474-479.
- Soria V. J. (1970). Principal varieties of cocoa cultivated in tropical America. *Cocoa Growers' Bulletin*, (15) : 21 p
- Sprague G. F. & Tatum L. A. (1942). General and specific ability in single crosses of corn. *Journal of the American Society of Agronomy*, 34: 923-932.
- Tahi G. M. (2003). Evaluation sur feuilles de cacaoyer (*Theobroma cacao* L) de la résistance à *Phytophthora palmivora* (Butler) Bulter, agent de la pourriture brune des cabosses : influence de certains facteurs et étude de l'hérabilité du caractère. Thèse de doctorat, UFR Biosciences, Université Félix HOUPHOUËT- BOIGNY (Abidjan, Côte d'Ivoire), 193 p.
- Tahi G. M., Lachenaud P., N'Guessan K. F., N'Goran N. K. J., Pokou D., Kébé I. B., Paulin D., Cilas C. & Eskes A. B. (2011). Selection of new varieties on-station and on-farm in Côte d'Ivoire, Final Report of the CFC/ICCO/Bioversity International Project on "Cocoa Productivity and Quality improvement : a Participatory Approach. Côte d'Ivoire, 17 p.
- Tahi G. M., Lachenaud, P., N'Goran, J. A., & Eskes, A. (2012). Comportement et utilité des géniteurs Guyanais dans le programme d'amélioration génétique du cacaoyer en Côte d'Ivoire. 17th Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère, Yaounde, Cameroun, 15 - 20 Octobre 2012. Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère, Yaoundé (Cameroun), 11p.

- Tahi G. M., Lachenaud, P., N'Goran, J. A., Kébé, I. S., Paulin, D., N'Guessan, K. F., & Eskes, A. (2010). Second cycle de selection recurrente du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire : bilan à mi-parcours et propositions de sorties variétales. *Euphytica*, 215 : 1-12.
- Tahi G. M., Trebissou C., Ribeyre F., Guiraud B. S., Pokou D. N., & Cilas C. (2019). Variation in yield over time in a cacao factorial mating design : changes in heritability and longitudinal data analyses over 13 consecutive years. *Euphytica*, 215, 1-12.
- Tahi G. M., Trébissou I. C., Guiraud S. B., Ribeyre F., Lachenaud Ph., Pokou N. D., N'Guessan K. F., Walet P. N., Aka A. R., Coulibaly K, Kébé B. I., Assi E. M., Koné B., Kassin K. E., & Cilas C (2017). Second cycle de sélection récurrente du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire : paramètres génétiques chez les deux populations constitutives après treize années d'observation, In : Proc, International Symposium on Cocoa Research (ISCR), 12-18 Octobre 2017 (Lima, Peru), 1-12.
- Tahi G.M., Kébé I.S., Eskes A., Ouattara S., Sangaré A. & Mondeil F., (2000).- Rapid screening of cacao genotypes for field resistance to *Phytophthora palmivora* using leaves, twigs and roots. *European Journal of Plant Pathology*, 106: 87-94.
- Tahri E., Belabed A. & Sadki K. (1997). Effet d'un stress osmotique sur l'accumulation de proline, de chlorophylle et des ARNm codant pour la glutamine synthétase chez trois variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Bulletin de l'Institut Scientifique*, 21 : 81 - 89.
- Tamini Z. (1997). Etude ethnobotanique et analyses morphophysiologiques du développement de la lentille de terre (*Macrotyloma geocarpum* « Harms ») Maréchal et Baudet. Thèse de Doctorat d'Etat. Faculté des sciences et des techniques, Université de Ouagadougou, Burkina Faso, 110 p.
- Tan G. Y., & Tan W. K. (1990). Additive inheritance of resistance to pod rot caused by *Phytophthora palmivora* in cocoa. *Theoretical and Applied Genetics*, 80: 258-264.
- Tardieu F. & Hubert M. (1986). Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II. Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. *Agronomie*, 6 : 415-425.

- Tardieu F. (2004). Virtual plants : modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. *Trends in Plant Science*, 8: 9-14.
- Tardieu F., Cruiziat P., Durand J. L., Triboi E. & Zivy M. (2006). Perception de la sécheresse par la plante. Conséquences sur la productivité et sur la qualité des produits récoltés ESCo. *Sécheresse et Agriculture*, 1 : 49-67.
- Teixeira A. L., Souza F.F., Rocha R. B., Vieira J. R., Torres J. D., Rodrigues K. M., de Morales M. S., Silva C. A., de Oliveira V.E.G. & Lourenço J.L.R. (2017). Performance of intraspecific hybrids (Kouilou x Robusta) of *Coffea canephora* Pierre. *African Journal of Agricultural Research*, 12 (35) : 2675-2680.
- Thorold C. A. (1975). Black pod disease. In Diseases of cocoa, Oxford University Press (ed), Oxford, USA, 423 p.
- Thresh J. M., Owusu G. L. K., & Ollennu L. A. A. (1988). Cocoa swollen shoot : An archetypal crowd disease/Afrikanische Sproßschwellung an Kakaobäumen : Eine archetypische "crowd"-Krankheit. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz/Journal of Plant Diseases and Protection*, 428-446.
- Toxopeus H. (1969). Cacao, *Theobroma cacao* L, In: Outlines of perennial crop breeding in the tropics, F, P, Ferwerda et F, Wit éd., Veenman & Zonen, Wageningen, Pays-Bas: 79-109.
- Trinchant J. C., Boscari A., Spennato G., Van de Sype G., & Le Rudulier D. (2004). Proline betaine accumulation and metabolism in alfalfa plants under sodium chloride stress. Exploring its compartmentalization in nodules. *Plant Physiology*, 135(3) : 1583-1594.
- Trotel-Aziz. P., Niogret M. F., Deleu C., Bouchereau A., Aziz A. & Larher F. R. (2003). The control of proline consumption by abscisic acid during osmotic stress recovery of canola leaf discs. *Physiologia Plantarum*, 117 (2) : 213-221.
- Turner N. C. & Jones M. M. (1980). Osmotic adjustment in expanding and fully expanded leaves of sunflower in response to water deficits. *Functional Plant Biology*, 7(2) : 181-192.

- Turner N. C. (1997). Further progress in crop water relation. *Advance in Agronomy*, 58: 293-338.
- Vijayakumar B. G., Devaru G. B., Balashima D., Khader K. B. & Ranganna (1991). Influence of weather on arecanut and cocoa yield. *Journal of plant Crops*, 19 : 33-36.
- Vogel M. (1975). Recherche du déterminisme du rythme de croissance du cacaoyer. *Café Cacao, Thé*, 4 : 265-290.
- Wahid A. & Close. T. J. (2007). Expression of dehydrins under heat stress and their relationship with water relations of sugarcane leaves. *Biologia Plantarum*, 51:104-109.
- Wahid A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants : an overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3) : 199-223.
- Wickham H., (2016). Ggplot2 : Elegant Graphics for Data Analysis. *Springer International Publishing*. (2) : 32p.
- Wilkins D., Vna Oosten J. J., Bestford R. T. & Scarascia M. G. E., (1994). Effect of elevated CO₂ on growth and chloroplast protein in *Prunus avium*. *Tree Physiology*, 14: 769 - 779.
- Williams W. (1960). Heterosis and the genetics of complex characters. *Heredity*, 15: 327-328.
- Wood G. R. A. (1985). History and development, In *Cocoa*, Longman (ed), London, England 620 p.
- Ykhlef N. (2001). Photosynthèse, activité photochimique et tolérance au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). Thèse de doctorat d'Etat. Biologie et Génomique Végétale, Université de Mentourie. Constantine, 146 p.
- Zeghida A., Amrani, R., Djennadi F., Ameroun R., Khldoun A. A. & Belloucif M. (2004). Etude de la variabilité de réponse des plantules de blé dur (*Triticum durum* Desf) à la salinité. *Céréaliculture. ITGC*, 42 p.
- Zhang J., Nguyen H, T. & Blum A. (1999). Genetic analysis of osmotic adjustment in crop plants. *Journal of Experimental Botanic*, 50: 291-302.

- Zhenzhu X., Guangsheng Z. & Yuhui W. (2007). Combined effects of elevated CO₂ and soil drought on carbon and nitrogen allocation of the desert shrub *Caragana intermedia*. *Plant Soil*, 301: 87–97.

ANNEXES

Annexe 1 : Croisements entre les géniteurs pour la création des hybrides évalués en serre et au champ

Hybrides de 6 mois évalués en serre				Hybrides de 03 ans évalués au champ				Hybride de 09 ans évalués au champ			
Croisements		Codes des descendants		Croisements		Codes des descendants		Croisements		Codes des descendants	
Femelles	Mâles			Femelles	Mâles			Femelles	Mâles		
UPA402	X	UF676	F1	UPA402	X	UF676	F1	UPA402	X	UF676	F1
UPA409	X	IFC1	F2	UPA409	X	IFC1	F2	UPA409	X	IFC1	F2
UPA413	X	IFC1	F4	UPA608	X	IFC412	F3	UPA608	X	IFC412	F3
UPA603	X	UF667	F5	UPA413	X	IFC1	F4	UPA413	X	IFC1	F4
UPA409	X	POR	F6	UPA603	X	UF667	F5	UPA603	X	UF667	F5
T85/799	X	IFC15	F7	UPA409	X	POR	F6	UPA409	X	POR	F6
SCA6	X	ICS1	F8	T85/799	X	IFC15	F7	T85/799	X	IFC15	F7
PA150	X	IFC5	F9	SCA6	X	ICS1	F8	SCA6	X	ICS1	F8
T79/501	X	IFC5	F10	PA150	X	IFC5	F9	PA150	X	IFC5	F9
IMC67	X	IFC1	F12	T79/501	X	IFC5	F10	T79/501	X	IFC5	F10
MOQ413	X	SCA6	F13	IFC720	X	ICS46	F11	IFC720	X	ICS46	F11
POR	X	T60/887	F14	IMC67	X	IFC1	F12	IMC67	X	IFC1	F12
PA150	X	POR	F15	MOQ413	X	SCA6	F13	MOQ413	X	SCA6	F13
SCA6	X	LAF1	F17	POR	X	T60/887	F14	POR	X	T60/887	F14
T60/887	X	IMC67	F19	PA150	X	POR	F15	PA150	X	POR	F15
PA150	X	T60/887	F20	IFC303	X	IFC1	F16	IFC303	X	IFC1	F16
P7	X	GU175A	F21	SCA6	X	LAF1	F17	SCA6	X	LAF1	F17
P7	X	GU284 A	F22	T60/887	X	IMC67	F19	T60/887	X	IMC67	F19
P7	X	IMC67	F25	PA150	X	T60/887	F20	PA150	X	T60/887	F20
P7	X	SCA6	F26	P7	X	GU175A	F21	P7	X	GU175A	F21
T60/887	X	IFC5	F27	P7	X	GU284 A	F22	P7	X	GU284 A	F22
NA32	X	IFC1	F28	IFC303	X	GU284 A	F24	IFC303	X	GU284 A	F24
PA150	X	T79/501	F29	P7	X	IMC67	F25	P7	X	IMC67	F25
T60/887	X	POR	F30	-							
UPA413	X	SCA6	F31								
P7	X	T60/887	F32								
P7	X	PA150	F33								
IMC67	X	T60/887	F35								
POR	X	PA150	F36								
PA150	X	GU175A	F38								
PA150	X	GU284A	F39								

Annexe 2 : Descendances issues du croisement diallèle 6 x 6 sans les autofécondations

Croisements		Mâles					
		SCA6	IMC67	T60/887	IFC1	UPA409	POR
Femelles	SCA6	-	F40	F41	F42	F43	F44
	IMC67	F45	-	F35	F12	F46	F47
	T60/887	F48	F19	-	F49	F50	F30
	IFC1	F51	F52	F53	-	F54	F55
	UPA409	F56	F57	F58	F2	-	F6
	POR	F59	F60	F14	F61	F62	-

Annexe 3 : Liste de matériels techniques et leur rôles en serre et au champ

Matériel	Rôles
Le pied à coulisse	Mesure de la longueur, diamètre et épaisseur des cabosses
La balance électronique	Détermination des masses de cabosses, de fèves fraîches et séchées.
Le sécateur	Prélèvement des échantillons
L'émondoir	Récolte des cabosses
Les épingles	Etiquetage des cabosses
Le sac jute	Ramassage des cabosses
Un seau	Micro-fermentation
Le filet de fermentation	Micro-fermentation
Le mètre ruban	Mesure de la longueur et la largeur des feuilles
Manchons	Isolement des boutons floraux
Pince	Pollinisation des fleurs épanouies isolées
Etuve	Séchage des échantillons
Appareil photo	Capture des images

Annexe 4: Images de principaux matériels techniques utilisés au champ et au laboratoire



Sécateur



Pince de pollinisation



Manchons



Appareil photo



Balance électronique



Peson



Spectrophotomètre



Congélateur (-80 ° C)



Ruban métallique



Pieds à coulisse



Centrifugeuse



Bain-marie



Etuve



Mettre ruban



Agrafeuse

Annexe 5 : Disposition des sachets remplis de terreaux (A) et germination des fèves après semis (B)



Annexe 6 : Croissance et développement des plants à la pépinière pour l'évaluation en serre et au champ.



Annexe 7 : Disposition des plants en serre



Annexe 8 : Dispositif expérimental pour les essais issus du plan de croisement simple

Essai de sélection des hybrides simples de cacaoyers à la sécheresse.
superficie : 0,86 ha ; 3 blocs de 12 arbres, une bordure périphérique.

Ecartement 3 m entre les lings et 2,5 m entre les plants.

Bloc 3	A13	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
	A12	B	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	B
	A11	B	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	B
	A10	B	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	B
	A9	B	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	B
	A8	B	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	B
	A7	B	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	B
	A6	B	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	B
	A5	B	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	B
	A4	B	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	B
	A3	B	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	B
	A2	B	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	B
A1	B	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	B	
Bloc 2	A12	B	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	B
	A11	B	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	B
	A10	B	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	B
	A9	B	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	B
	A8	B	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	B
	A7	B	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	B
	A6	B	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	B
	A5	B	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	B
	A4	B	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	B
	A3	B	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	B
	A2	B	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	B
	A1	B	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	B
Bloc 1	A13	B	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	B
	A12	B	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	B
	A11	B	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	B
	A10	B	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	B
	A9	B	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	B
	A8	B	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	B
	A7	B	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	B
	A6	B	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	B
	A5	B	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	B
	A4	B	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	B
	A3	B	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	B
	A2	B	F11	F2	F7	F22	F15	F10	F3	F12	F13	F6	F19	F25	F4	F24	F16	F21	F5	F20	F1	F9	F14	F8	F17	B
A1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18	L19	L20	L21	L22	L23	L24	L25	

Essai de sélection des hydrides de cacaoyers issus du diallèles 6 x 6 sans les autofécondations la sécheresse. Date de création : Juin 2020																																			
superficie : 0,86 ha ; 3 blocs de 12 arbres, une bordure périphérique. Ecartement 3 m entre les linges et 2,5 m entre les plants.																																			
A13	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
A12	B	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42	F50	F41	F45	F3	F57	F35	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	B	B
A11	B	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42	F50	F41	F45	F3	F57	F35	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	B	B
A10	B	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42	F50	F41	F45	F3	F57	F35	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	B	B
A9	B	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42	F50	F41	F45	F3	F57	F35	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	B	B
A8	B	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42	F50	F41	F45	F3	F57	F35	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	B	B
A7	B	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42	F50	F41	F45	F3	F57	F35	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	B	B
A6	B	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42	F50	F41	F45	F3	F57	F35	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	B	B
A5	B	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42	F50	F41	F45	F3	F57	F35	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	B	B
A4	B	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42	F50	F41	F45	F3	F57	F35	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	B	B
A3	B	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42	F50	F41	F45	F3	F57	F35	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	B	B
A2	B	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42	F50	F41	F45	F3	F57	F35	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	B	B
A1	B	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42	F50	F41	F45	F3	F57	F49	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	B	B
	B																																		B
A12	B	F3	F57	F35	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42	F50	F41	F45	B	B
A11	B	F3	F57	F35	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42	F50	F41	F45	B	B
A10	B	F3	F57	F35	F51	F12	F59	F46	F53	F44	F54	F6	F47	F14	F49	F30	F52	F19	F56	F40	F61	F8	F62	F48	F55	F60	F43	F2	F58	F42					

Annexe 10 : Processus de formation de des fèves fraîches

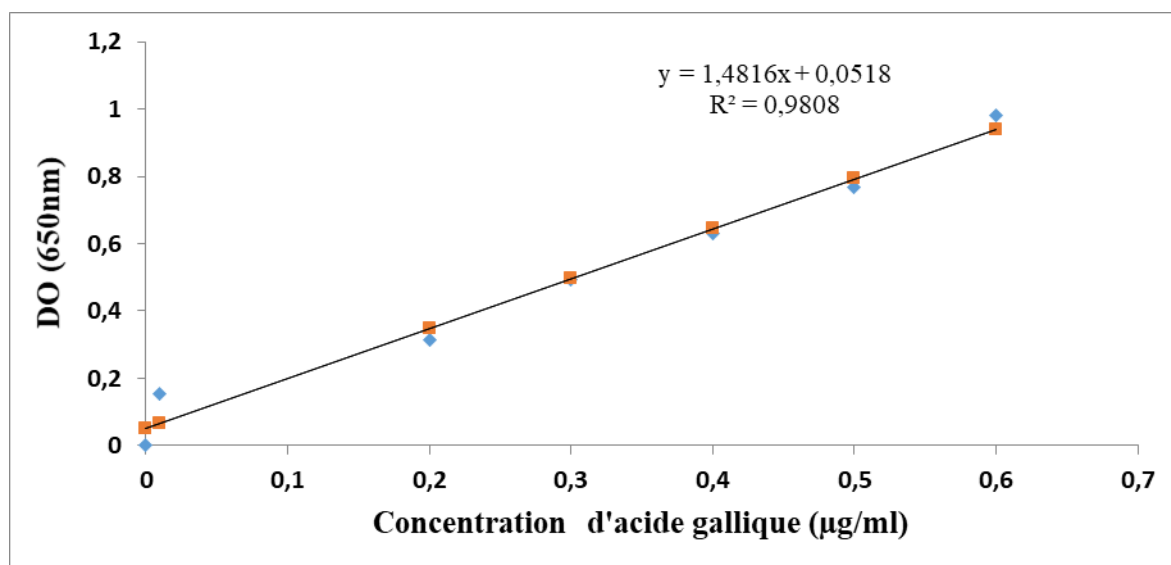
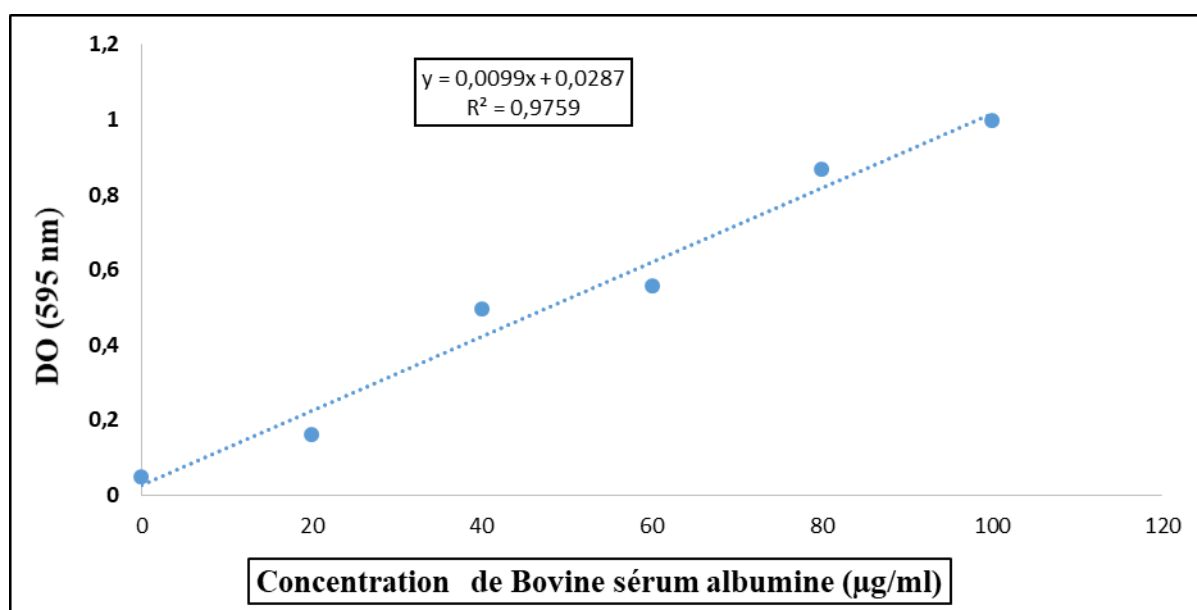


Annexe 11 : séchage des fèves fermentées en plein soleil durant 7 jours



Annexe 12 : Collecte d'échantillons de feuilles semi-aoutées depuis le champ jusqu'au laboratoire



Annexe 13 : Courbe d'étalonnage de l'acide gallique pour la détermination des Phénols totaux**Annexe 14** : Courbe étalon du dosage de Protéines solubles

PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES

Evaluation of New High-Producing Hybrids of Cocoa Trees in Marginal Crop Areas in Côte d'Ivoire

Stanislas T. Kouame^{1,2*}, Mathias G. Tahi², Aïdara Sekou², Christian Cilas³, Selastique D. Akaffou¹

¹Laboratory for Agricultural Production Improvement, Agroforestry Research and Training Unit, Jean Lorougnon Guédé University, Daloa, Côte d'Ivoire

²Laboratory of Genetics, Divo Research Station, National Center for Agronomic Research (CNRA), Divo, Ivory Coast

³CIRAD, Center for International Cooperation in Agricultural Research for Development, Montpellier, France

Email: *stane.kouame@gmail.com

How to cite this paper: Kouame, S.T., Tahi, M.G., Sekou, A., Cilas, C. and Akaffou, S.D. (2021) Evaluation of New High-Producing Hybrids of Cocoa Trees in Marginal Crop Areas in Côte d'Ivoire. *Agricultural Sciences*, 12, 1508-1526.

<https://doi.org/10.4236/as.2021.1212096>

Received: August 30, 2021

Accepted: December 20, 2021

Published: December 23, 2021

Copyright © 2021 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

A study was carried out on 31 new hybrids in rain-deficient areas of Côte d'Ivoire. These areas were the regions of Djekanou, Toumodi and Yamoussoukro. The Divo region (favourable zone) was used as a control. The aim of this study was to determine the behaviour of these hybrids under drought conditions. The experimental setup was a Fischer block for each region. The treatments were the 31 families, with 3 replications and when the four regions were taken together, the study was a two-factor (region and family) trial. Drought caused increased mortality and specific leaf mass and reduced growth and development of progeny in rain-deficient areas. Five (5) progenies were found to be jointly successful in Divo, Djekanou and Yamoussoukro (F30, F15, F19, F31, and F33). On the other hand, 3 other families (F16, F36 and F29) also performing well in Divo were found in Toumodi.

Keywords

Drought, Resistant Hybrids, *Theobroma cacao*, Côte d'Ivoire

1. Introduction

In recent years, with the onset of drought due to climate change, cocoa cultivation has been severely hampered in some areas in Côte d'Ivoire. The drought caused the deterioration of cocoa growing conditions with high mortality and a drop in production [1].

In this context of drought, the efforts of producers were in vain due to the lack of suitable plant material [2] [3]. When the minimum conditions for cocoa cul-

tivation are met again in these marginal areas, then the return of this cultivation will be a great opportunity to reduce the pressure on the forest. Indeed, Ivorian forest cover has deteriorated considerably over the past 25 years with a conservation rate dropping from 16 million to 3.5 million hectares or 21.88% [4].

The cocoa program of the National Agronomic Research Center (CNRA) of Côte d'Ivoire, has produced high-performance varieties [5]. While these varieties tolerate certain biotic hazards such as diseases [6], their behavior in the face of drought linked to climate change is not understood. The purpose of this study is to assess the drought behavior of 31 new hybrids. Specifically, this involves determining mortality and evaluating the development and growth of hybrids.

2. Material and Methods

2.1. Plant Material

The plant material consists of 31 progenies obtained by controlled fertilization (Table 1). Thirty-six (36) plants were evaluated per progeny. A total of 4092 genotypes spread over 4 plots in four experimental sites with different rainfall patterns were monitored. These plants were installed on trial in 2018. They were 2 years old after planting at the time of the assessments.

Table 1. Descendants resulting from crosses between the parents.

Manual crossing			Progenies codes
Females		Males	
UPA402	X	UF676	F1
UPA409	X	IFC1	F2
UPA608	X	IFC412	F3
UPA603	X	UF667	F5
T85/799	X	IFC15	F7
SCA6	X	ICS1	F8
PA150	X	IFC5	F9
T79/501	X	IFC5	F10
IFC720	X	ICS46	F11
IMC67	X	IFC1	F12
MOQ413	X	SCA6	F13
POR	X	T60/887	F14
PA150	X	POR	F15
IFC303	X	IFC1	F16
SCA6	X	LAF1	F17
T60/887	X	IMC67	F19
PA150	X	T60/887	F20
P7	X	GU175A	F21

Continued

P7	X	GU284 A	F22
IFC303	X	GU284 A	F24
P7	X	IMC67	F25
P7	X	SCA6	F26
T60/887	X	IFC5	F27
NA32	X	IFC1	F28
PA150	X	T79/501	F29
T60/887	X	POR	F30
UPA413	X	SCA6	F31
P7	X	T60/887	F32
P7	X	PA150	F33
IMC67	X	T60/887	F35
POR	X	PA150	F36

2.2. Methods**2.2.1. Study Sites**

The study was undertaken in four sites: Divo, Djekanou, Toumodi, and Yamoussoukro (**Figure 1**). The first site belongs to the favorable zone of cocoa culture in Côte d'Ivoire while the three later were found in unfavorable (marginal zone). Choice of plots for the study in the marginal zone was made by following the classification scale of favorable zones to cocoa cultivation. Four areas were chosen. These are Djekanou, Toumodi, Yamoussoukro (unfavorable area) and Divo (favorable area to cocoa cultivation and normal rainfall) which serves as a witness in our experiment. **Table 2** presents the climatic characteristics (rainfall and temperature) of these sectors.

2.2.2. Experimentation

The experimental design was a Fischer block for each region. The treatments were the 31 families, with 3 replicates of 12 trees each, for a total of 36 trees per family, for Divo, Djekanou and Toumodi and 3 replicates of 8 trees for Yamoussoukro. The standard density of 1333 trees per hectare (3 m between the rows and 2.5 m between the plants) was respected. When the four regions were taken together, the study was a two-factor (region and family) trial. A total of 4092 genotypes were evaluated.

2.2.3. Crop Management

The transfer of the seedlings to the different study sites was carried out after six months of residence of the seedlings in the nursery. Planting concerned vigorous plants. Plot maintenance consisted of manual weeding and the use of insecticide products (Califan super solicao and pyricol) as soon as symptoms of parasitism appeared, and of foliar fertiliser (califere) at a rate of 100 ml of insecticide in a 10-litre water sprayer.

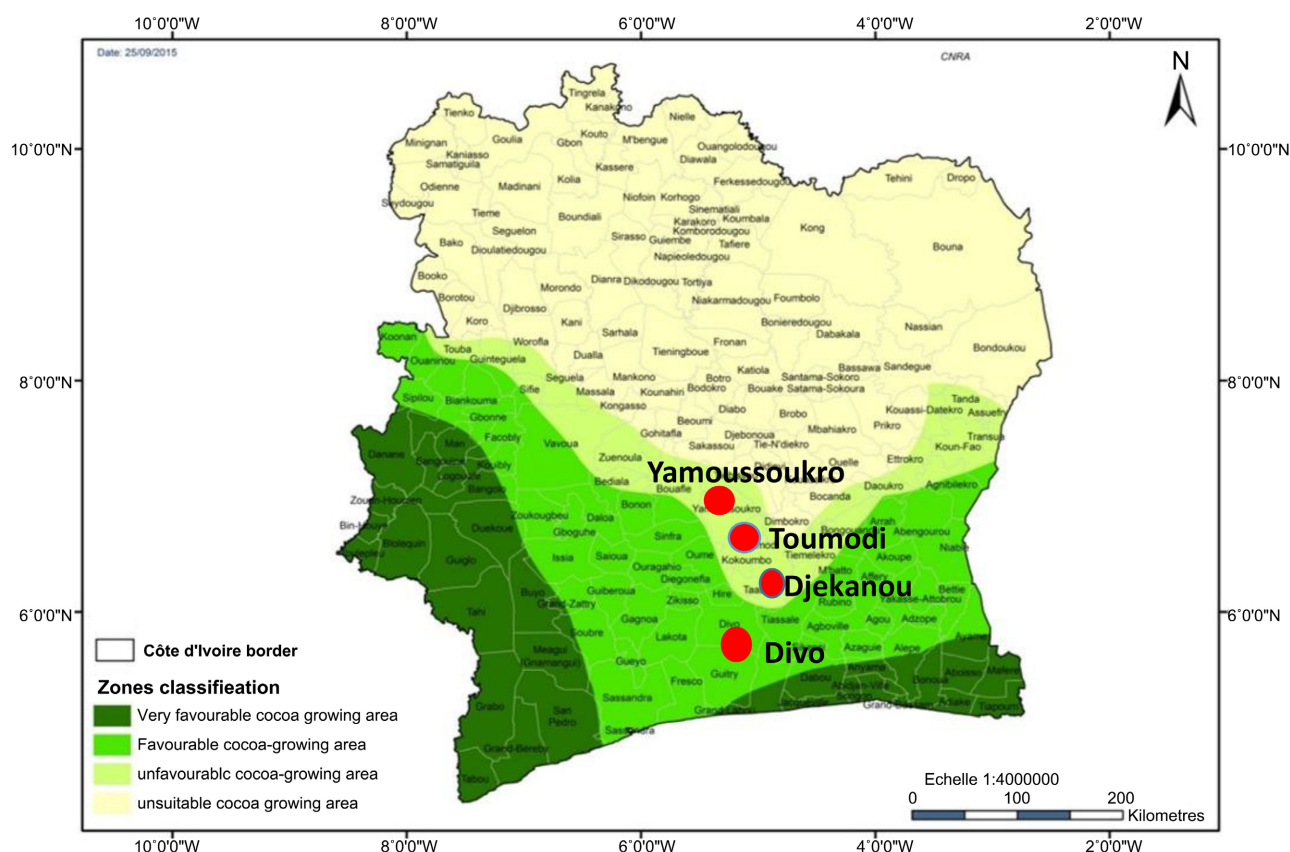


Figure 1. Study area.

Table 2. Rainfall and temperature of regions hosting the study sites.

	Rainfall (mm)			Temperatures (°C)		
	Mini	Maxi	Mean	Mini	Maxi	Mean
Divo	24	249	1469	24.5	27.6	26.2
Djekanou	12	182	1092	25.2	28.3	26.6
Toumodi	12	180	1091	25.5	28.4	26.5
Yamoussoukro	12	170	1118	25.5	28.8	26.9

2.2.4. Parameters Assessed

Three types of parameters were evaluated: mortality rate, growth and development, and physiological parameters.

✓ Mortality Rate

The mortality rate was calculated 24 months after field planting. It is expressed as a percentage and corresponds to the ratio between the number of dead plants and the number of plants planted.

✓ Growth and Development

This is the collar diameter, the height of the plants, the crown rate and the leaf dimensions.

The collar diameter was measured at 10 cm from the ground with a caliper.

Plant height was measured from the ground to the apex of the trunk with a tape measure. The crown rate, expressed as a percentage, is the ratio of the number of crowned plants to the number of plants planted. The crown is the part of the cocoa tree that consists of a structured set of master branches or secondary shoots located at the top of the trunk. The height of the crown was measured with a tape measure; it is the length between the crown and the collar. The number of functional leaves per plant was counted. These are the green leaves, capable of photosynthesis. The dimensions, length and width of the leaves (three leaves per plant) were measured with a ruler and the leaf area was calculated according to the formula of [7]:

$$S(\text{cm}^2) = \frac{\pi ab}{4} \quad (1)$$

where $a = A/2$ and $b = B/2$; A = length, B = width. The total leaf area of the leaves was calculated by adding the elemental areas.

✓ **Physiological parameters** (water content and leaf density)

The water content of the leaves was calculated by the following formula:

$$TE(\text{mg/gMs}) = \frac{(MF - Ms)}{Ms} \quad (2)$$

with TE = water content; MF = fresh mass and Ms = dry mass.

The specific leaf mass (SLM) was determined by the formula of [8]:

$$SLM(\text{mg/cm}^2) = \frac{MF}{SF} \quad (3)$$

with MF = fresh mass and SF = leaf area.

2.2.5. Statistical Analysis of the Data

The comparison of the hybrid families was done by analysis of variance, with a threshold $p = 0.05$. Pearson correlation was used to estimate the relationships between the agro-morphological and physiological variables. Principal component analysis (PCA) and hierarchical ascending classification (HAC) were used to reveal the strongest correlations between the variables and to assess the most discriminating ones for efficient selection of cocoa varieties at a young age, both overall and within the regions. These analyses were performed with SAS 9.4 (SAS Institute, 2018) and XLSTAT version 2014.

3. Results

3.1. Influence of Areas on the Behaviour of Young Cocoa Trees

The regions on all the families showed significant differences between them for all the parameters evaluated. The region * family interactions were significant for the parameters diameter at the collar, plant height, number of living leaves with a probability < 0.0001 and mortality rate with a probability of 0.01047. On the other hand, region * family interactions were not significant for the parameters crown rate (0.4847), crown height (0.8265), leaf area (0.9683), water content

(0.9961) and leaf specific gravity (0.8993) (**Table 3**). The mortality rate of young cocoa plants, twenty-four months after their establishment in the field, varied significantly according to the agro-climatic zones. It averaged 12.7% in Divo, which recorded the lowest average for all 31 families, compared to 68.01% for the Yamoussoukro zone, which showed the highest rate. Djekanou and Toumodi had intermediate averages of 21.9% and 49.7% respectively. The largest collar diameters were obtained by Divo with 1.64 cm and Toumodi with 1.6 cm. On the other hand, the smallest collar diameters were presented by the regions of Djekanou with 1.36 cm and Yamoussoukro with 1.28 cm. For plant height, Divo region had the highest value with 103.05 cm, and Yamoussoukro region the lowest with 70.26 cm. The number of living leaves was highest in Divo with 28.14 leaves, Djekanou with 23.86 leaves and Yamoussoukro with 22.77 leaves. On the other hand, the Toumodi region, with 9.58 live leaves, had the lowest number. For the crown rate, the regions of Djekanou with 14.39%, Divo with 12.44% and Toumodi with 10.48% were the best. The Yamoussoukro region with 3.80% had the lowest crowning rate. In terms of crown height, Divo with 70.87 cm and Djekanou with 67.05 cm were the best. The Yamoussoukro region with 13.36 cm had the lowest crown height. For leaf area, Divo region had the largest with 108.96 cm² and Yamoussoukro (51.32 cm²) and Toumodi (43.15 cm²) regions had the smallest areas. The highest water content was presented by the Divo region with 3951.5 mg/g and the lowest by the Yamoussoukro (1129.8 mg/g) and Toumodi (746.6 mg/g) regions. The highest specific leaf mass was obtained by the Yamoussoukro region with 7713 mg/cm² and the lowest by the Divo region with 656.6 mg/cm² (**Table 3**). The regions of Djekanou and Toumodi presented intermediate averages of 1600 mg/cm² and 1380.2 mg/cm² respectively.

Table 3. Comparison of experimental areas according to growth and development parameters of cocoa plants.

Area	Growth and development parameters							Physiological parameters	
	Rates of mortality %	Collar Diameter (cm)	height of plants (cm)	Rates of crown (%)	height of crown (cm)	number of living leaves	Total leaf area (cm ²)	Water Content (mg/g)	Specific leaf mass (mg/cm ²)
Divo	12.7 ± 10 ^a	1.64 ± 0.25 ^a	103.05 ± 10.66 ^a	12.44 ± 6.4 ^a	70.87 ± 33 ^a	28.14 ± 10.47 ^a	108.96 ± 35.53 ^a	3951.5 ± 1195.95 ^a	656.6 ± 11.54 ^c
Djekanou	21.9 ± 9 ^b	1.36 ± 0.16 ^b	87.89 ± 11.94 ^c	14.39 ± 8.92 ^a	67.05 ± 32.35 ^a	23.86 ± 8.43 ^b	67.52 ± 19.02 ^b	2306.7 ± 490.05 ^b	1600.8 ± 24.34 ^b
Toumodi	49.7 ± 17 ^c	1.60 ± 0.25 ^a	95.19 ± 13.08 ^b	10.48 ± 7.65 ^a	47.73 ± 23.32 ^b	9.58 ± 4.54 ^d	43.15 ± 27.72 ^c	746.6 ± 348.17 ^c	1380.2 ± 23.37 ^b
Yamoussoukro	68.01 ± 14.6 ^d	1.28 ± 0.29 ^c	70.26 ± 21.35 ^c	3.80 ± 6.03 ^b	13.36 ± 20.42 ^c	22.77 ± 17.58 ^c	51.32 ± 34.95 ^{cb}	1129.8 ± 674.77 ^c	7713 ± 75.47 ^a
Mean	38	1.51	93.66	11.06	48.74	22.36	76.57	2497.59	1710.8
CV (%)	49.52	36.56	34.14	13.93	81.56	43.15	133.91	154.24	103.25
p ≤ 0.05	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0045	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Region * family	0.01047	<0.0001	<0.0001	0.4847	0.8265	<0.0001	0.9683	0.9961	0.8993

In each column, the means followed by the same letter are not statistically different at the 5% level.

3.2. Growth and Development of Cocoa Trees in All Regions with Non-Significant Region * Family Interactions

The parameters with non-significant region * family interactions were crown rate, crown height, leaf area, water content and leaf specific mass. For these parameters, the families across all regions showed significant differences between them. Thus, the rankings of the families across all regions are the same for each region. For the crown rate, families F25 with 29.84%, F29 with 19.32% and F19 with 17.32% had the best crown rates. On the other hand, the lowest rates were obtained by families F17 (5.93%), F1 (5.76%) and F2 (5.14%). For crown height, families F35 with 76.59 cm and F22 with 70.03 cm had the best crown heights. On the other hand, the lowest height was obtained by family F24 with 11.45 cm. In terms of leaf area, families F19 with 115.12 cm² and F36 with 108.04 cm² had the largest areas. On the other hand, the smallest area was obtained by family F10 with 38.94 cm². Families F1 with 3468.1 mg/g and F19 with 3428.5 mg/g had the highest water content and families F10 (1486.7 mg/g) and F28 (1582.4 mg/g) the lowest. Families F36 (8088 mg/cm²), F19 (8758 mg/cm²), F32 (8527 mg/cm²), F16 (8329 mg/cm²), F15 (8134 mg/cm²) had the highest specific leaf masses. On the other hand, families F13 (8.74 mg/cm²), F1 (10.84 mg/cm²) and F12 (12.37 mg/cm²) had the lowest masses (**Table 4**).

Table 4. Comparison of families across regions according to parameters with non-significant region * family interaction.

Family	Crown rate (%)	Crown height (cm)	Total leaf area (cm ²)	Water Content (mg/g)	Specific leaf mass (mg/cm ²)
F1	5.76 c	26.9 bc	89.92 ba	3468.1 a	10.84 c
F10	11.88 bc	35.35 bac	38.94 c	1486.7 c	19.75 bac
F11	10.2 bc	53.65 ba	68.34 bac	2820.4 ba	16.63 bac
F12	9.78 bc	53.82 ba	59.15 bac	1894.6 bc	12.37 c
F13	12.69 bac	66.8 ba	76.45 ba	2837.8 ba	8.74 c
F14	12.14 bac	31.32 bac	90.14 ba	2730.3 bac	20.46 bac
F15	12.82 bac	67.01 ba	87.01 ba	2908.7 ba	8134 a
F16	12.86 bac	64.34 ba	97.49 ba	2777.3 bac	8329 a
F17	5.93 c	35.21 bac	75.6 ba	2952.5 ba	7951 ba
F19	17.32 ba	62.73 ba	115.12 a	3428.5 a	8758 a
F2	5.14 c	26.92 bc	67.12 bac	2633.1 bac	6934 bac
F20	11.62 bc	65.58 ba	80.59 ba	2541.3 bac	7585 ba
F21	7.8 bc	48.17 bac	74.88 ba	2188 bac	6185 bac
F22	8.48 bc	70.03 a	69.14 bac	2597.1 bac	6690 bac
F24	14.6 bac	11.45 c	74.03 ba	2267.5 bac	6400 bac
F25	29.84 a	65.03 ba	70.06 ba	1971.6 bc	5405 bc
F26	12 bac	57.21 ba	79.76 bac	1911.6 bc	6159 bac

Continued

F27	10.4 bc	33.08 bac	60.04 bac	1934.7 bc	5818 bc
F28	6.64 bc	61.99 ba	39.75 bc	1582.4 c	4238 c
F29	19.32 ba	45.54 bac	71.06 ba	2341.9 bac	6575 bac
F3	14.72 bac	43.14 bac	77.63 ba	2245.2 bac	6598 bac
F30	10.47 bc	66.95 ba	97.51 ba	2726.4 bac	7880 ba
F31	12.41 bac	45.38 bac	76.63 ba	2688.2 bac	7236 ba
F32	7.76 bc	35.29 bac	88.29 ba	3097.8 ba	8527 a
F33	11.1 bc	49.74 bac	89.98 ba	2893.5 ba	7436 ba
F35	14.74 bac	76.59 a	76.68 ba	2531.3 bac	7038 ba
F36	12.95 bac	39.64 bac	108.04 a	2780 bac	8088 a
F5	8.64 bc	24 bc	63.85 bac	2085.4 bac	6723 bac
F7	11.05 bc	34.31 bac	50.59 bac	2014 bac	5581 bc
F8	15.07 ba	67.03 ba	80.42 ba	2608.8 bac	7558 ba
F9	12.95 bac	54.86 ba	73.67 ba	2595.7 bac	7383 ba
Mean	11.06	48.74	76.57	2490	7004.4
CV (%)	13.93	81.56	133.91	78.15	9.87
p ≤ 0.05	0.0045	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
region * family	0.4847	0.8265	0.9683	0.9961	0.8993

3.3. Growth and Development of Cocoa Trees Region by Region with Significant Region * Family Interactions

The parameters with significant region * family interactions were mortality rate, collar diameter, plant height and number of living leaves. For these parameters, family rankings were made by region. Mortality rate showed a significant difference between families in Divo and Toumodi and homogeneity in Djekanou and Yamoussoukro (**Table 5**). The highest mortality rates were obtained by family F19 (39%) in Divo and families F2 (80.67%), F7 (75%), F19 (83%) and F31 (78%) in Toumodi. On the other hand, the lowest mortality rates were presented by families F1 (4.05%), F5 (4.05%), F9 (4.05%), F10 (4.05%), F21 (2.08%), F22 (5.04%), F32 (3.56%) and F35 (2.08%) at Divo and family F29 (19.33%) at Toumodi.

Collar diameter showed a significant difference between families in all regions. The best collar diameters were obtained by family F19 (2.43 cm) in Divo, F31 (1.77 cm) in Djekanou, F14 (2.01 cm) and F16 (2.02) in Toumodi and F31 (2.15 cm) in Yamoussoukro. On the other hand, the smallest diameters at the collar were presented by families F7 (1.22 cm) and F17 (1.33 cm) in Divo, F1 (1.14 cm) and F28 (1.04 cm) in Djekanou, F1 (1.14 cm) and F13 (1.08 cm) in Toumodi and F1, F2, F3, F5, F7, F8, F9, F10, F11, F13, F14, F16, F17, F20, F21, F22, F25, F27, F32, F35 and F36 with values that varied from 1 to 1.28 cm in Yamoussoukro (**Table 5**).

Table 5. Comparison of families according to mortality rate and crown diameter (parameters with significant region * family interaction) within regions.

Family	Mortality rate (%)				Collar diameter (cm)			
	Divo	Djekanou	Toumodi	Yamoussoukro	Divo	Djekanou	Toumodi	Yamoussoukro
F1	4.05 dc	22.33 a	61 ba	73.22 a	1.74c bd	1.14 ef	1.14 ed	1.05 b
F10	4.05 dc	33.67 a	36 bac	50.14 a	1.40 cbd	1.31 edfc	1.47 ebdac	1.08 b
F11	8 bdc	30.67 a	69.33 ba	68.48 a	1.35 cbd	1.23 edfc	1.36 ebdc	1.04 b
F12	11 bdc	33.33 a	36 bac	72.62 a	1.42 cbd	1.23 edfc	1.77 bdac	1.35 ba
F13	7.05 bdc	9.03 a	52.67 bac	99.58 a	1.68 cbd	1.16 edf	1.08 e	1 b
F14	11.69 bdc	25.0 a	36.33 bac	60.14 a	1.63 cbd	1.35 edfc	2.01 a	1.26 b
F15	24.66 bdac	11.0 a	44.67 bac	37.67 a	1.88 cbd	1.47 ebdac	1.55 ebdac	1.34 ba
F16	33.33 ba	25.0 a	36 bac	77.48 a	2.04 b	1.40 ebdfc	2.02 a	1.22 b
F17	11.69 bdc	36.33 a	36.33 bac	85.81 a	1.33 cd	1.34 edfc	1.65 ebdac	1 b
F19	39 a	17.0 a	83 a	78.77 a	2.43 a	1.57 bac	1.6 ebdac	1.85 ba
F2	30.67 bac	41.67 a	80.67 a	72.62 a	1.49 cbd	1.27 edfc	1.5 ebdac	1.02 b
F20	11 bdc	17.36 a	41.33 bac	72.62 a	1.64 cbd	1.35 edfc	1.60 ebdac	1.07 b
F21	2.08 d	19.33 a	47.33 bac	65.14 a	1.62 cbd	1.41 ebdfc	1.74 bdac	1.11 b
F22	5.04 dc	13.54 a	42 bac	54.72 a	1.39 cbd	1.39 ebdfc	1.44 ebdac	1 b
F24	16.67 bdac	11.0 a	66.33 bac	50.67 a	1.53 cbd	1.21 edfc	1.78 bac	1.45 ba
F25	23 bdac	16.67a	58 bac	72.62 a	1.65 cbd	1.20 edfc	1.38 ebdac	1.02 b
F26	14.69 bdc	25a	55.67 bac	61.81 a	1.75 cbd	1.53 ebdac	1.75 bdac	1.86 ba
F27	11 bdc	27.67 a	36 bac	66.81 a	1.61 cbd	1.27 edfc	1.81 bac	1.18 b
F28	7.05 bdc	9.03 a	61.33 bac	83.44 a	1.36 cbd	1.04 f	1.59 ebdac	1.6 ba
F29	14.69 bdc	14.69 a	19.33 c	34.37 a	1.55 cbd	1.29 edfc	1.75 bdac	1.51 ba
F3	6.03 bdc	25.33 a	36 bac	65.14 a	1.89 cbd	1.33 edfc	1.63 ebdac	1.09 b
F30	6.03 bdc	13.67 a	38.67 bac	74.1 a	1.77 cbd	1.478 ebdac	1.22 ebdc	1.62 ba
F31	11 bdc	22.33 a	78 a	80.48 a	1.9 cbd	1.77 a	1.175 edc	2.15 a
F32	3.56 dc	13.02 a	50 bac	41.11 a	1.74 cbd	1.31 edfc	1.51 ebdac	1.19 b
F33	9.72 bdc	14.0 a	69.33 ba	83.44 a	1.86 cbd	1.47 ebdac	1.3 ebdc	1.37 ba
F35	2.08 d	36.0 a	52.67 bac	76.14 a	1.44 cbd	1.56 bdac	1.55 ebdac	1.26 b
F36	7.05 bdc	16.67 a	47.33 bac	63.81 a	1.96 cb	1.74 ba	1.51 ebdac	1.28 b
F5	4.05 dc	20.36 a	25.33 bc	85.29 a	1.47 cbd	1.24 edfc	1.8 ba	1.2 b
F7	33.33 ba	41.67 a	75 a	72.97 a	1.22 d	1.54 ebdac	1.178 edc	1.2 b
F8	16.33 bdac	25.0 a	22.33 bc	61.85 a	1.68 cbd	1.367 edfc	1.86 ba	1.2 b
F9	4.05 dc	11.0 a	47.33 bac	65.33 a	1.54 cbd	1.34 edfc	1.61 ebdac	1.03 b
moyenne	12.79	21.87	49.89	67.77	1.64	1.36	1.61	1.28
CV (%)	10.99	14.71	29.67	24.18	44.71	30.23	29.66	32.56
p ≤ 0.05	<0.0001	0.1522	<0.0001	0.9834	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

In each column, the means followed by the same letter are not statistically different at the 5% level.

Plant height showed a significant difference between families in all regions (**Table 6**). The greatest plant heights were obtained by families F13 (118.62 cm), F15 (124.79 cm), F19 (122.92 cm) and F31 (116.53 cm) in Divo, F31 (113 cm) and F36 (109.3 cm) in Djekanou, F8 (107.29 cm), F14 (112.78 cm), F16 (114.57 cm), F26 (114.44 cm), F28 (107.79 cm) and F29 (111.07 cm) in Toumodi and F19 (118 cm) and F31 (120.5 cm) in Yamoussoukro. On the other hand, the smallest plant heights were shown by families F7 (81.48 cm), F10 (87.16 cm), F17 (86.94 cm) and F35 (87.17 cm) in Divo, F2 (71.38 cm) F5 (72.35 cm), F11 (73.96 cm), F24 (70.69 cm) and F25 (71.07 cm) in Djekanou, F31 (64.38 cm) in Toumodi and F2 (36.5 cm), F13 (36.6 cm) and F22 (39.71 cm) in Yamoussoukro.

The number of live leaves showed a significant difference between families in all regions. The highest numbers of live leaves were obtained by families F19 (62.46 leaves) and F31 (49.81 leaves) in Divo, F19 (38.93 leaves), F31 (50.75 leaves) and F36 (36.76 leaves) in Djekanou, F14 (21.44 leaves) in Toumodi and F19 (67 leaves), F26 (49.63 leaves) and F31 (77 leaves) in Yamoussoukro. On the other hand, the smallest number of living leaves was presented by families F7 (12.67 leaves) in Divo, F1 (13.43 leaves) in Djekanou, F25 (1.8 leaves) and F28 (0.57 leaves) in Toumodi and F1, F2, F3, F5, F7, F9, F10, F11, F12, F13, F14, F15, F16, F17, F20, F21, F22, F25, F27, F28, F32, F35 and F36 with values that varied from 6.33 to 27 live leaves in Yamoussoukro (**Table 6**).

Table 6. Comparison of families according to height and number of living leaves parameters with significant region * family interaction) within regions.

Family	Plant heights (cm)				Number of living leaves			
	Divo	Djekanou	Toumodi	Yamoussoukro	Divo	Djekanou	Toumodi	Yamoussoukro
F1	100.05 bdac	82.46 bac	83.29 ba	61.25 ba	34.17 bcd	13.43 e	3.79 bc	10.5 c
F10	87.16 dc	78.85 bac	89.61 ba	59.82 ba	26.11 bcd	16.21 ed	10.13 bac	17.18 c
F11	97.14 bdac	73.96 c	87.55 ba	65.6 ba	19.70 cd	18.48 ced	12.636 bac	13.43 c
F12	94.57 bdc	82 bac	94.13 ba	68.08 ba	20.41 cd	21.13 cebd	7.30 bc	16.83 c
F13	118.62 ba	88.65 bac	75 ba	36.6 b	38.09 bcd	15.77 ed	3.71 bc	7.51 c
F14	95.40 bdc	80.48 bac	112.78 a	60.5 ba	26.81 bcd	18.11 ced	21.44 a	20.22 c
F15	124.79 a	101.03 bac	85.55 ba	73.46 ba	40.22 bc	29.81 cebd	8.7 bac	25.33 c
F16	110.98 bac	86.67 bac	114.57 a	74.6 ba	40.36 bc	33.19 cbd	13.48 bac	23 c
F17	86.94 dc	74.65 bc	101.52 ba	51.53 ba	21.47 cd	27.57 cebd	8.57 bac	11.33 c
F19	122.92 ba	97.2 bac	81.17 ba	118 a	62.46 a	38.93 b	6.67 bc	67 ba
F2	94.68 bdc	71.38 c	92.43 ba	36.5 b	17.88 cd	17.10 ed	9.57 bac	8.83 c
F20	104.59 bdac	89.87 bac	90.76 ba	50.83 ba	23.91 cd	20.33 ced	17.38 ba	6.33 c
F21	99.92 bdac	85.41 bac	97.11 ba	61.94 ba	23.61 cd	24.45 cebd	7.05 bc	12.38 c
F22	93.74 bdc	102.91 bac	101.43 ba	39.71 b	18.65 cd	29.67 cebd	4.29 bc	8 c
F24	101.09 bdac	70.69 c	104.92 ba	82.59 ba	25.5 bcd	16.56 ed	10.42 bac	38.82 bc
F25	99.49 bdac	71.07 c	74.2 ba	57.75 ba	23.96 cd	16.33 ed	1.8 c	7.5 c

Continued

F26	105.88 bdac	103.96 bac	114.44 a	102.38 ba	25.26 bcd	30.44 cebd	5.94 bc	49.63 bac
F27	110.75 bac	80.39 bac	101.91 ba	57.76 ba	28.97 bcd	21.73 cebd	11.91 bac	21.43 c
F28	96.22 bdac	74.97 bc	107.79 a	101 ba	17.29 cd	14.42 ed	0.57 c	27 c
F29	108.30 bdac	92.97 bac	111.07 a	83.65 ba	23.23 cd	17.84 ced	5.83 bc	32.33 bc
F3	106.36 bdac	88 bac	92.52 ba	63.56 ba	31.17 bcd	17.89 ced	9.09 bac	11.88 c
F30	105.45 bdac	104.61 bac	73.23 ba	93.28 ba	34.09 bcd	30.13 cebd	9.86 bac	52 bac
F31	116.53 ba	113 a	64.38 b	120.5 a	49.81 ba	50.75 a	5.13 bc	77 a
F32	106.69 bdac	83.76 bac	87.43 ba	70.11 ba	33.23 bcd	20.31 ced	10.87 bac	16.35 c
F33	103.80 bdac	98.61 bac	87.45 ba	87.83 ba	25.67 bcd	29.61 cebd	6.18 bc	31.33 bc
F35	87.17 dc	92.09 bac	88.12 ba	83.76 ba	26.26 bcd	28.91 cebd	6.94 bc	18 c
F36	115.77 bac	109.3ba	96.05 ba	78.56 ba	37.94 bcd	36.76 cb	8.68 bac	16.25 c
F5	100.22 bdac	72.35 c	102.52 ba	62.33 ba	19.91 cd	18.86 ced	12.48 bac	7.37 c
F7	81.48 d	96.90 bac	76.33 ba	56.38 ba	12.67 d	27.38 cebd	5.22 bc	21.5 c
F8	105.36 bdac	84.63 bac	107.29 a	57.4 ba	31.7 bcd	22.19 cebd	16.32 ba	29 bc
F9	113.85 bac	88.94 bac	92.68 ba	51.38 ba	16.94 cd	19.72 ced	11.37 bac	10.25 c
Mean	103.05	87.9	95.19	70.26	28.14	23.86	9.58	22.767
CV (%)	30.19	39.88	32.83	43.21	45.23	39.14	55.36	39.84
p ≤ 0.05	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

In each column, the means followed by the same letter are not statistically different at the 5% level.

3.4. Correlation between Mortality Rate, Development and Growth Parameters and Physiological Parameters

The Pearson correlation matrix (Table 7) revealed the strongest relationships between mortality rate, development and growth parameters and physiological parameters of young cocoa trees. Thus, development and growth parameters such as crown diameter, plant height, crown height, number of live leaves and leaf area were negatively correlated with mortality rate respectively (−0.52), (−0.72), (−0.89), (−0.96), (−0.5) and (−0.81). Similarly, leaf specific mass, a physiological parameter was negatively correlated with development and growth parameters respectively (−0.78), (−0.94), (−0.92), (−0.94) and (−0.47) except for the number of living leaves. Also, water content, a physiological parameter was negatively correlated with mortality rate (−0.87) and positively correlated with total leaf area (0.94).

3.5. Projection of Regions According to Development and Physiological Variables of Cocoa Genotypes in Design 1 and 2

The share of information returned by the two selected axes of the principal component analysis of the regions was 94.27%. Axis 1 expressed 77.67% of the total variability. The variables well represented on this axis were crown diameter, height, crown ratio, crown height, total leaf area and leaf water content with

Table 7. Pearson correlation matrix between developmental physiological and mortality variables.

variables	diam	haut	Tx cour	hautcou	nfv	sft	te	msf	tau mort
Diam	1								
Haut	0.77	1							
Tx Cour	0.49	0.53	1						
Hautcou	0.56	0.59	0.91	1					
Nfv	0.69	0.57	0.36	0.46	1				
Sft	0.49	0.4	0.21	0.28	0.53	1			
Te	0.4	0.33	0.15	0.22	0.47	0.94	1		
msf	-0.78	-0.94	-0.92	-0.94	0.48	-0.47	-0.50	1	
tau mort	-0.52	-0.72	-0.89	-0.96	-0.50	-0.81	-0.87	0.82	1

Values in bold are different from 0 with a significance level of $p < 0.000$. Diam=collar diameter; high = plant height; tx yard = crown rate. high yard = crown height. nfv = number of living leaves. sft = total leaf area. te = water content. msf = leaf specific gravity.

squared cosines ranging from 0.6758 to 0.9230. This axis was the axis of developmental, growth parameters. Axis 2 expressed 16.58% of the total variability. The variable that was well represented on this axis was the number of living leaves with a cosine square of 0.6668. This axis was the axis of a physiological parameter (leaf specific mass) and the mortality rate. The projection of the 4 regions according to the agro-morphological and physiological variables of the cocoa genotypes along axes 1 and 2 is presented in **Figure 2**. The hierarchical ascending classification of regions gave three classes. Thus the Divo region, which constituted the first class, was home to the progenies with the best development and growth (large diameters, large sizes with more crowns, large crown heights with more functional leaves, with the largest leaf areas, the highest water content), small specific leaf masses and the lowest mortality rate. The regions of Djekanou and Toumodi, which constituted the second class, were home to progenies with intermediate traits. The Yamoussoukro region, which constituted the third class, was home to progenies with poor development and growth except for mortality rate and specific leaf mass.

3.6. Projection of Progenies as a Function of Developmental and Physiological Variables of Cocoa Genotypes in Planes 1 and 2

The information returned by the two axes retained from the principal component analysis of the families expressed 64.84% of the observed variability. Axis 1 expressed 46.95% of the total variability. The variables collar diameter, plant height, number of living leaves, total leaf area, water content and specific leaf mass constructed this axis of physiological and vigour parameters with squared cosines that varied from 0.5739 to 0.8563. Axis 2 expressed 17.89% of the total variability. The variables crown rate with a squared cosine of 0.5123, crown height with a squared cosine of 0.3702 and mortality rate with a squared cosine

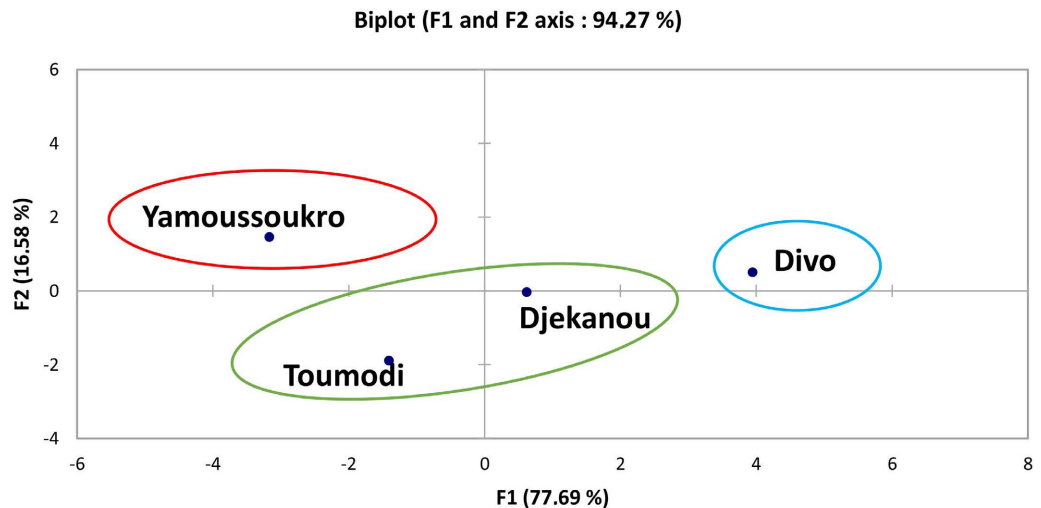


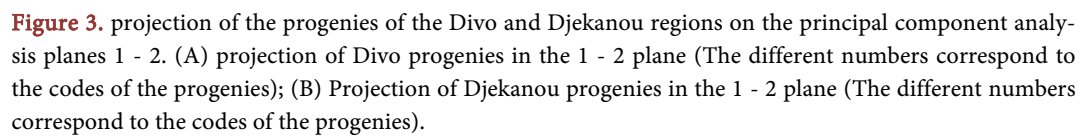
Figure 2. Projection of regions in the 1 - 2 plane according to agro-morphological and physiological parameters.

of 0.8070, constructed this axis of earliness and drought susceptibility (**Figure 3** and **Figure 4**). The results show that within each experimental site after the hierarchical ascending classification, the performance of the families varies significantly between them. Not all families performed equally well and did not rank equally across regions. Indeed, of the 15 best families that were characterised by large crown diameter, large height, large number of living leaves, large leaf area, high water content and low leaf density in Divo (**Figure 3(A)**), however, of these, only 5 (F30, F15, F19, F31, and F33) were also found to be among the best performers at Djekanou (**Figure 3(B)**) and Yamoussoukro (**Figure 4(A)**). None of them were found among the best performers in Toumodi. On the other hand, three other families (F16, F36 and F29) that also performed well in Divo were found in Toumodi (**Figure 4(A)**) and another (F24) was found to perform well in Yamoussoukro. In the end, the majority of families performing in Toumodi were not found performing in Divo, Djekanou and Yamoussoukro.

4. Discussion

The 31 progenies showed highly variable behaviour depending on the evaluation parameters considered.

Thus, the results obtained showed a depressive effect of drought on cocoa varieties. This depressive effect was observed in regions with deficient rainfall such as Toumodi and Yamoussoukro, unlike the control region in a normal rainfall zone (Divo). In this study, progenies showed a decrease in crown diameter and plant height in dry areas. Our results are in line with those of [9] [10] [11] and [7], who showed that vegetative growth (diameter and height) discriminated between water-stressed and drought-stressed varieties. In our study, progenies also showed a reduction in leaf density as well as leaf area in rainfall-deficient areas. [12] stated that one of the first reactions of plants to water deficit is to reduce



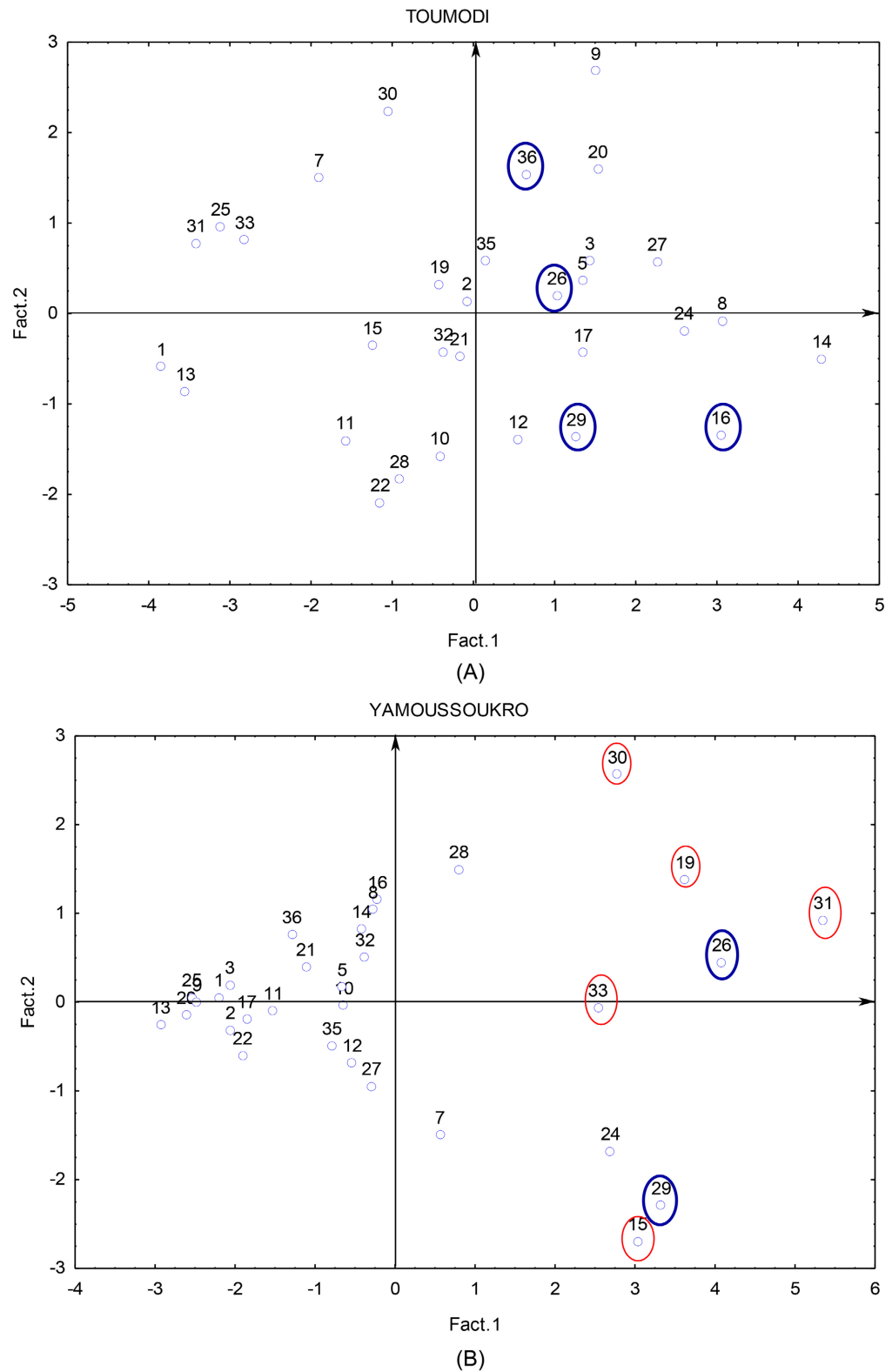


Figure 4. Projection of the progenies of the Toumodi and Yamoussoukro regions on the principal component analysis planes 1 - 2. (A) projection of Toumodi progenies in the 1 - 2 plane (The different numbers correspond to the codes of the progenies); (B) Projection of Yamoussoukro progenies in the 1 - 2 plane (The different numbers correspond to the codes of the progenies).

leaf area and the number of functional leaves. Our results also confirm those of [13], who demonstrated that vegetative development under conditions of limited water supply is strongly disturbed, mainly by a significant decrease in the number of functional leaves and leaf area. This decrease in vegetative development is one of the responses of plants to dehydration, in order to conserve water resources and allow the survival of the plant [12]. The effect of water stress due to drought can result, depending on the adaptive strategy of each progeny or variety, in morphological modifications. These modifications affect primary growth [7] [14] [15], thus reducing turgidity and consequently the expansive power of the leaves and favouring the proper development of the underground system [16]. According to [17], leaves of water-stressed plants usually reach smaller final sizes than those of the control.

Water stress due to drought is a determining factor for plant growth in semi-arid regions. It is expressed by a progressive slowing down of primary growth [7] [15], marked by the reduction of leaf cell turgidity. Our study revealed a reduction in leaf water content of progenies in rainfall-deficient areas in Toumodi and Yamoussoukro, in contrast to Divo, a normal rainfall area. Our results corroborate those of [18], who showed that water shortage due to drought induced a decrease in relative water content in stressed plants. [19], noted the same finding and suggested the use of water content as an indicator of the water status of the plant under stress. The water content of cocoa leaves seems to decrease proportionally with the reduction of water content in the soil [20]. [15] noted that this decrease in water content is more rapid in susceptible varieties than in resistant varieties. On the other hand, a high water content under stress conditions has been observed in soybean [21]. On the other hand, [22] showed that genotypes that maintain a high water content in the presence of water stress are tolerant genotypes. Thus, the best progenies from the Yamoussoukro region and the Toumodi region (drier areas) with the highest water content values would appear to be potentially drought tolerant.

The specific leaf mass is one of the important markers in the response of plants to water stress. It can be considered as a simple criterion for selecting genotypes with high water use efficiency under water deficit conditions [23]. The specific leaf mass of progenies in rainfall-deficient areas was higher than in normal rainfall areas. Our results are in line with those of [23] who showed the increase in leaf density in some plants under stress. According to the same author, the increase in specific leaf mass in plants under stress was highly correlated with the reduction in leaf area. Indeed, in this study, the negative correlation ($r = -0.47$) between specific leaf mass and leaf area confirms this assertion. Indeed, the process of reducing leaf area and increasing leaf specific mass allows plants to “confront” the lack of water by reducing transpiration [23].

5. Conclusion

The study of the response to drought in the 31 cocoa progenies tested revealed

the existence of a large variability for most of the parameters measured. The effect of drought was well marked between regions with deficient rainfall such as Toumodi and Yamoussoukro and those with normal rainfall such as Divo and Djekanou, which seems to be a transition region. Thus, mortality rate and specific leaf mass increased, crown diameter, plant height, leaf area and leaf water content decreased in cocoa trees tested in rainfall-deficient areas. Highly significant positive and negative correlations between agro-morphological and physiological variables were found. The F1, F11, F14, F16, F19, F21, F26, F30, F31, F32, F33 and F36 progenies behaved well in all 4 regions. The significance of the region * family interaction ($p = 0.001$) showed that the progeny behaved differently from one area to another, depending on the degree of drought severity. Thus, among the fifteen (15) best progenies in Divo (F1, F13, F15, F16, F19, F20, F29, F30, F31, F32, F33, F36, F3, F8 and F9), only five (F30, F15, F19, F31, and F33) repeated the same performance in Djekanou and Yamoussoukro. In addition, 3 other families (F16, F36 and F29) that also performed well in Divo were found in Toumodi. These progenies seemed to adapt well to the drought and were better respectively in Divo (normal rainfall zone) and Djekanou, Yamoussoukro and Toumodi (deficit rainfall zone).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

References

- [1] Jérôme, A.N., Arsène, D. and Guillaume, N'g.K. (2014) Crise de l'économie de plantation et modification du paysage agraire dans l'ancienne boucle du cacao: l'exemple de daoukro. *European Scientific Journal*, **10**, 25 p.
- [2] Tahi, G.M., Lachenaud, P., N'Guessan, K.F., N'Goran, N.K.J., Pokou, D., Kébé, I.B., Paulin, D., Cilas, C. and Eskes, A.B. (2011) Selection of New Varieties On-Station and On-Farm in Côte d'Ivoire. In: Albertus, E., Ed., *Collaborative and Participatory Approaches to Cocoa Variety Improvement: Final Report of the CFC/ICCO/Bioversity International Project on "Cocoa Productivity and Quality Improvement: A Participatory Approach"* (2004-2010), CFC, Amsterdam, 42-58.
<https://agritrop.cirad.fr/560755/>
- [3] Koua, S.H., Coulibaly, N.A.M.D. and Alloué-Boraud, W.A.M. (2018) Caractérisation des vergers et des maladies de cacao de Côte d'Ivoire: Cas des départements d'Abengourou. *Divo et Soubré*, **35**, 5706-5714. <http://www.m.elewa.org/IAPS>
- [4] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2017) Données forestières de base pour la REDD+ en Côte d'Ivoire. Cartographie de la dynamique forestière de 1986 à 2015. Publié par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et le Secrétariat Exécutif Permanent REED+, Abidjan, 32 p. <http://www.fao.org/publications>.
- [5] Mathias, T.G., Philippe, L., N'Goran Jeanne, A.K., Kébé Ismael, S., Paulin, D., N'Guessan, K.F., Cilas, C. and Eskes, A. (2010) Second cycle de sélection récurrente du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire: Bilan à mi-parcours et propositions de sorties variétales. *16th International Cocoa Research Conference. Proceed-*

- ings. *Towards Rational Cocoa Production and Efficient Use of a Sustainable World Cocoa Economy*, Bali, 16-21 November 2009, 3-12.
<http://publications.cirad.fr>
- [6] Mathias, T.G., Lachenaud, P., N'Goran Jeanne, A.K. and Eskes, A. (2012) Comportement et utilité des géniteurs Guyanais dans le programme d'amélioration génétique du cacaoyer en Côte d'Ivoire. *17th Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère*, Yaounde, 15-20 Octobre 2012, 11 p.
<http://publications.cirad.fr>
- [7] M'bo, K.A.A. (2015) Adaptation des cacaoyers [*Theobroma cacao* L. (malvaceae)] à la sécheresse: étude des paramètres morphologiques, physiologiques, biochimiques et des marqueurs moléculaires de la tolérance. Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, 239 p.
- [8] Zeghida, A., Amrani, R., Djennadi, F., Ameroun, R., Khldoun, A.A. and Belloucif, M. (2004) Etude de la variabilité de réponse des plantules de blé dur (*Triticum durum* Desf) à la salinité. *Céréaliculture*. ITGC, 42. Constantine, 5 p.
- [9] Boyer, J. (1971) Etude des principales composantes du microclimat d'une cacaoyère au Cameroun. Importance écologique des variations spatiales et saisonnières. *Café-Cacao-Thé*, **15**, 275-300.
- [10] Boyer, J. (1973) Etude particulière des facteurs hydriques de la croissance des cacaoyers. *Café Cacao Thé*, **17**, 189-204.
- [11] Alvim, P.T. and Alvim, R. (1978) Relation of Climate to Growth Periodicity in Tropical Trees. In: Tomlinson, P.B. and Zimmermann, M.H., Eds., *Tropical Trees as Living Systems*, Cambridge University Press, Cambridge, 445-464.
- [12] Lebon, E., Pellegrino, A., Tardieu, F. and Lecœur, J. (2004) Shoot Development in Grapevine Is Affected by the Modular Branching Pattern of the Stem and Intra and Inter-Shoot Trophic Competition. *Annals of Botany*, **93**, 263-274.
<https://doi.org/10.1093/aob/mch038>
- [13] Ferryra, R., Sellés, G., Ruiz, R.S. and Sellés, I.M. (2004) Effect of Water Stress Induced at Different Growth Stages on Grapevine cv. Chardonnay on Production and Wine Quality. *Acta Horticulturae*, **664**, 233-236.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.664.27>
- [14] Monneveux, P. and Memmar, M. (1986) Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le Blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et chez le Blé dur (*Triticum durum* Desf.): Étude de l'accumulation de proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*, **6**, 583-590. <https://doi.org/10.1051/agro:19860611>
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00884913>
- [15] Adra, M. (2010) Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress hydrique. Thèse de doctorat, University of Constantine 1, Constantine, 118 p.
- [16] Slama, A., Ben Salem, M., Ben Naceur, M. and Zid, E.D. (2005) Les céréales en Tunisie: Production effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. Institut national de la recherche agronomique de Tunisie (Inrat). Université de Tunis El Manar, Tunis.
http://www.john-libbeyeurotext.fr/fr/revues/agro_biotech/sec/e-docs/00/04/11/2E/t_elecharger.md
- [17] Granier, C., Inzé, D. and Tardieu, F. (2000) Spatial Distribution Cell Division Rate Can Be Deduced from that of P34^{cdc2} Kinase Activity in Maize Leaves Grown in Contrasting Conditions of Temperature and Water Status. *Plant Physiology*, **124**, 1393-1402. <https://doi.org/10.1104/pp.124.3.1393>

- [18] Albouchi, A., Sebei, H., Mezni, M.Y. and EL Aouni, M.H. (2000) Influence de la durée d'une alimentation hydrique déficiente sur la production de biomasse, la surface transpirante et la densité stomatique d'*Acacia cyanophylla*. *Annales de l'INRGREF*, **4**, 138-161.
- [19] Clark, J.M. and Mac-Caig, T.N. (1982) Excised Leaf Water Relation Capability as an Indicator of Drought Resistance of *Triticum* Genotypes. *Canadian Journal of Plant Science*, **62**, 571-576. <https://doi.org/10.4141/cjps82-086>
- [20] Bajji, M., Lutts, S. and Kinet, J.-M. (2001) Water Deficit Effects on Solute Contribution to Osmotic Adjustment as a Function of Leaf Ageing in Three Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Cultivars Performing Differently in Arid Conditions. *Plant Science*, **160**, 669-681. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(00\)00443-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00443-X)
- [21] De Raïssac, M. (1984) Réponse physiologique du soja à la sécheresse; étude de la variabilité génétique. Thèse de docteur-ingénieur: Sciences Agronomiques: Institut national polytechnique de Toulouse, ENSAT, Toulouse, 115 p.
- [22] Nouri, L. (2002) Ajustement osmotique et maintien de l'activité photosynthétique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf), en condition de déficit hydrique. Thèse de Magistère en Biologie végétale Univ Mentouri, Constantine, 77 p.
- [23] Ykhlef, N. (2001) Photosynthèse, activité photochimique et tolérance au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf). Thèse de doctorat, University of Constantine 1, Constantine.

Field response to drought resistance of new high producing cocoa hybrids in Côte d'Ivoire

KOUAME Tchrewa Stanislas^{1, 3*} • TAHI Gnion Mathias³ • Guiraud Sahin Brigitte³ • TREBISSOU Inago Caudou³ • ATCHI Yves Mathurin^{2, 3} • Gouré Bi Vanié Firmin^{1, 3} • ASSI Attiapo Pépin^{1, 3} • MINAKOU Okayo Sandrine^{1, 3} • Aïdara Sékou • AKAFFOU Doffou Sélastique¹

¹Laboratory for Agricultural Production Improvement, Agroforestry Research and Training Unit, Jean Lorougnon Guede University, Daloa BP 150, Cote d'Ivoire.

²Genetics Laboratory, UFR Biosciences, Félix Houphouët Boigny University, BP 582 Abidjan ³Laboratory of Genetics, Divo Research Station, National Center for Agronomic Research (CNRA), Divo BP 808, Côte d'Ivoire.

*Corresponding author. E-mail: stane.kouame@gmail.com.

Accepted 14th March, 2023.

Abstract. Drought due to climate change is caused by deforestation. It has altered rainfall, humidity and air temperature. This situation threatens the sustainability of cocoa growing in certain regions where rainfall is between 900 and 1200 mm. A study was carried out in an area with insufficient rainfall (Toumodi) and an area with normal rainfall (Divo). The aim of the study was to determine the impact of drought on 25 hybrid families through agro-morphological and production parameters. The experimental design was a factorial block (region and family). Drought caused an increase in mortality and a reduction in hybrid family development and production in the Toumodi zone. In the Divo zone, families F23, F22, F7, F19, F5, F18, F25, F15, F1, F16, F24 and F13 were better for vigour parameters; families F11, F22, F13, F23, F18, F21, F6, F12 and F25 for pod parameters and families F22, F17, F13, F8, F10, F24, F9, F21 for production. In the Toumodi area, families F1, F13, F19, F15, F4, F18, F12, F16, F7, F25, F14, F10, F22, F24, F21 and F23 were outstanding for vigour, families F16, F3, F12, F25, F18, F19, F20, F21, F22 and F6 for pod parameters and families F14, F23 and F7 for production. Among the best hybrid families evaluated, families F22, F13, F18, F6, F12, F25, F15 and F21 were better for most of the parameters studied in both zones. However, families F23, F14 and F7 performed better in the Toumodi zone. These three families are potentially drought resistant.

Keywords: cocoa, drought, resistant hybrid families, deforestation, climate change.

INTRODUCTION

The cocoa tree (*Theobroma cacao* L.) is a perennial plant belonging to the Malvaceae family. It is grown for its beans, which are the source of chocolate (Braudeau, 1969; Dorin, 2003). West Africa supplies around 76.3% of world production, estimated at around 4.8 million tonnes merchantable cocoa (ICCO, 2019). Côte d'Ivoire is the world's leading producer, with annual production estimated at 2,220,000 tonnes merchant cocoa (ICCO,

2021). This production generates 30 to 35% of GDP and accounts for around 40% export earnings (ICCO, 2012). Cocoa is grown on more than 2 million hectares and employs around 60% of Côte d'Ivoire's working population. Despite this impressive performance, cocoa farming in Côte d'Ivoire is currently facing several constraints: ageing orchards (Assiri et al., 2009; Koua et al., 2018), the low level of use of improved planting material (Tahi et al., 2011;

Table 1. Hybrid families resulting from crosses between genitors.

Manual hybrids			Hybrid family codes
Females		Males	
UPA402	X	UF676	F1
UPA409	X	IFC1	F2
UPA608	X	IFC412	F3
UPA413	X	IFC1	F4
UPA603	X	UF667	F5
UPA409	X	POR	F6
T85/799	X	IFC15	F7
SCA6	X	ICS1	F8
PA150	X	IFC5	F9
T79/501	X	IFC5	F10
IFC720	X	ICS46	F11
IMC67	X	IFC1	F12
MOQ413	X	SCA6	F13
POR	X	T60/887	F14
PA150	X	POR	F15
IFC303	X	IFC1	F16
SCA6	X	LAF1	F17
IFC29	X	IFC303	F18
T60/887	X	IMC67	F19
PA150	X	T60/887	F20
P7	X	GU175A	F21
P7	X	GU284 A	F22
IFC303	X	GU175A	F23
IFC303	X	GU284 A	F24
P7	X	IMC67	F25

Koua *et al.*, 2018), heavy pest pressure (Kouamé *et al.*, 2015; Koné and Kébé, 1998; Kébé and N'Guessan, 2003; Kouakou *et al.*, 2011) and drought. In recent decades, cocoa-growing areas in Côte d'Ivoire have been marked by high climatic variability (Brou *et al.*, 2005; Kassin *et al.*, 2008; Ehounou *et al.*, 2019). This climatic variability has resulted in rainfall falling below threshold values (1,200 mm) (Brou *et al.*, 2005), thus increasing the number of dry months per year (from 3 to 6 months). This situation has made it difficult to establish new cocoa farms in these areas, and has reduced yields due to wilting of the cherries, drying out of the pods, the beans sticking together inside the pods and a reduction in the size of the beans.

To overcome this problem, the Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) has developed productive varieties that combine good technological qualities with resistance to pathogens under suitable

growing conditions. Today, with the advent of climate change, the behaviour of these varieties under water deficit conditions should be studied.

The aim of this work is to study the impact of drought on the agro-morphological and production performance of 25 cocoa hybrid families (*Theobroma cacao* L.). Specifically, the 25 hybrid families planted in Divo (normal rainfall zone) and Toumodi (deficient rainfall zone) will be compared for agro-morphological and production parameters.

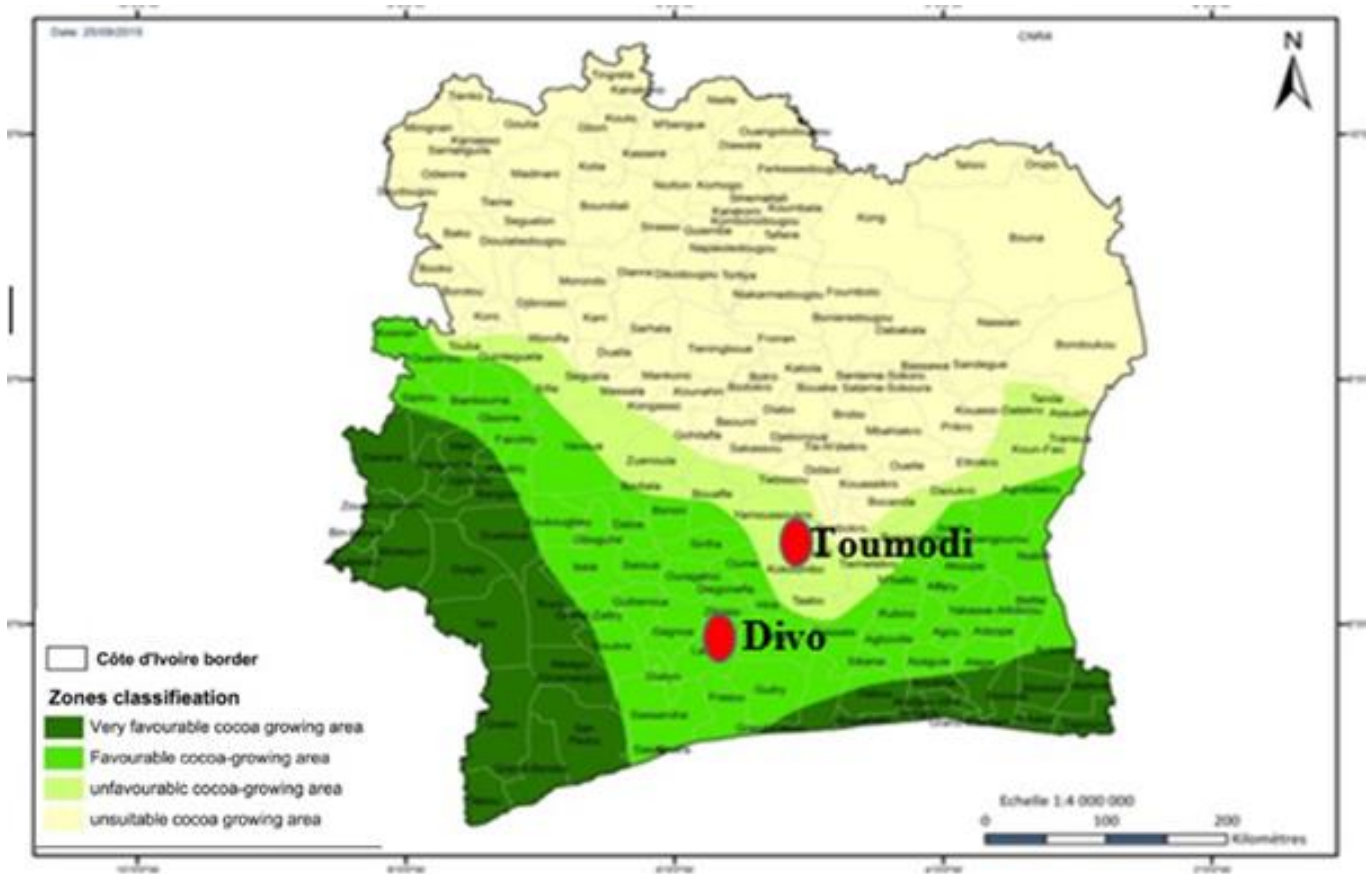
METHODOLOGY

PLANT MATERIAL

The plant material consisted of twenty-five (25) hybrid families obtained by controlled fertilisation (Table 1). Twenty-seven (27) plants were evaluated per hybrid

Table 2. Rainfall and temperatures in the areas hosting the study sites.

	Rainfall (mm)			Températures		
	Mini	Maxi	Mean	Mini	Maxi	Mean
Divo	24	249	1469	24.5	27.6	26.2
Toumodi	12	180	1091	25.5	28.4	26.5

**Figure 1.** Study area (Kouamé *et al.*, 2021).

family. A total of 1,450 genotypes from two (02) experimental sites with different rainfall levels were monitored. These plants were installed in trials in June 2013.

STUDY AREA

The choice of plots for the study in the marginal zone was made according to the classification scale of zones favourable to cocoa production (Figure 1). Two (02) zones were chosen for the experiment. These were the Toumodi zone, which is not very favourable to cocoa production and has long dry periods, and the Divo zone, which is favourable to cocoa production and has normal rainfall. The Divo zone was used as a control in the experiment because it has an average rainfall of over 1200 mm. Table

2 shows the climatic characteristics (rainfall and temperature) of these zones.

EXPERIMENTAL SET-UP

The experimental design was a Fischer block for each zone. Treatments were carried out on the twenty-five (25) hybrid families, with three (03) replicates of nine (09) trees each, i.e. a total of twenty-seven (27) trees per hybrid family, in the Divo zone and three (03) replicates of seven (07) trees including 21 trees for the Toumodi zone. The conventional density of 1,333 trees per hectare (3 m between rows and 2.5 m between trees) was respected. When the zones and hybrid families were taken together, the study was a two-factor trial (zone and family) for agromorphological, technological and pod-related parameters.

However, for production and yield parameters, the study was a three-factor trial (year, zone and family). A total of 4092 trees (genotypes) were evaluated.

PARAMETERS ASSESSED

Four types of parameter were assessed: 1) mortality rate, 2) growth and development parameters, 3) production parameters and 4) technological parameters.

MORTALITY RATE

The mortality rate was calculated nine (09) years after planting in the field. It is expressed as a percentage and corresponds to the ratio between the number of dead trees and the number of trees planted.

GROWTH AND DEVELOPMENT PARAMETERS

These are diameter at 30 cm from the ground, tree section and leaf dimensions. Diameter at the collar was measured at 30 cm from the ground using a caliper. The circumference was measured at 1.5 m from the ground and the cross-section was calculated using the following formula:

$$S (cm^2) = \frac{(Cir)^2}{4\pi} \quad (1)$$

Leaf dimensions (length and width) were measured with a graduated ruler on three (03) leaves per tree (genotype) and the unit area was calculated according to the formula by M'bo (2015).

$$S (cm^2) = \frac{\pi ab}{4} \quad (2)$$

Where $a = A/2$ and $b = B/2$; A = length, B = width. The total leaf area was calculated by adding together the elementary leaf area.

PRODUCTION PARAMETERS

PARAMETERS RELATED TO THE PODS

Four morphological parameters related to the pods were studied: pod thickness, pod volume, pod shape and size. For these four parameters, 30 pods were selected per hybrid family:

- The thickness of the cortex of each of the 30 pods per hybrid family was determined using a calliper.
- The volume of pods per hybrid family was determined by

measuring the length and diameter of each of the 30 pods using a calliper. The volume (cm^3) of the pod per family was then calculated using the formula:

$$V (cm^3) = \frac{L(\pi.D)2}{22} \quad (3)$$

Where L = length of the pod, and D = diameter of the pod.

- The average shape of the pods was determined by the ratio between the length of each of the 30 pods and their diameter.
- The average size of the pods (cm^2) was determined by the product of the length and diameter of each of the 30 pods.
- The number of normal fresh beans and the number of flat beans were determined in each of the 30 pods by counting;

PRODUCTION PARAMETERS

- the number of ripe healthy pods, rotten pods, pods with gnawing and others were determined by counting per tree and by hybrid family after harvesting; the weight of healthy pods (kg) was determined by tree and by hybrid family using a balance,
- The weight of fresh beans (kg) from healthy pods after shelling per tree and by hybrid family was determined using a scale,
- The weight of dry beans (kg) per tree and per family was determined using a scale;
- The rotten pod rate TCP (%), calculated as the ratio of the total number of rotten pods to the total number of pods produced by tree;

The potential annual yield ($Rdtp$) was calculated using the formula of (Lachenaud, 1991; Tahi *et al.*, 2017).

$$Rdtp (Kg/ha) = \frac{(\text{Tot cab} \times \text{Pmff Cab} \times 1333 \times 0,35)}{\text{Number of harvests by year}} \quad (4)$$

With $\text{Tot} = (\text{healthy pod} + \text{gnawed pod} + \text{rotten pod} + \text{others})$, PMFF cab = average weight of fresh beans per pod, 1333 corresponds to the number of trees by hectare and 0.35 is the coefficient for transforming the weight of fresh beans into marketable cocoa.

The annual real yield ($Rdtr$) was calculated using the modified formula of (Lachenaud, 1991; Tahi *et al.*, 2017).

$$Rdtr (Kg/ha) = \frac{(\text{nbre cab} \times \text{Pmff d' une Cab} \times 1333 \times 0,35)}{\text{Number of harvests by year}} \quad (5)$$

With Nbre cab = (number of ripe pods), PMFF cab = average weight of fresh beans per pod, 1333 corresponds to the number of trees per hectare and 0.35 is the coefficient for transforming the weight of fresh beans into

Table 3. Comparison of study areas according to mortality rate, growth parameters and cocoa tree development.

Zones	Mortality rate (%)	Growth and Development Parameters		
		Diameter 30 cm above ground (cm)	Cross-section at 1.5 m above ground (cm ²)	Total leaf area (cm ²)
Divo	6,15± 0,00 ^b	13,81±2,71 ^a	109,96±52,68 ^a	201,57±67,72 ^a
Toumodi	42,29±0,03 ^a	12,49±3,58 ^b	87,55±51,90 ^b	198,38±73,41 ^b
Mean	24,22	13,37	102,58	200,52
CV (%)	15,45	21,92	49,68	26,7
P < 0,05	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
Zone*family	0,0014	0,0241	0,0017	0,01876

*In each column, the means followed by the same letter are not statistically different at the 5% level.

marketable cocoa.

TECHNOLOGICAL PARAMETERS

The bean parameters studied were the weight, length and width of merchantable cocoa beans. To do this, the fresh beans from the 30 healthy, ripe pods from each hybrid family were mixed and then placed in labelled openwork cloth (fermentation net) before being fermented in specially designed wooden crates. After six days of fermentation, with stirring every 2 days, the beans were taken out of the fermentation crates on the seventh day and placed on racks to be dried in the sun. Sun drying lasted 7 days.

The weight (g), length (cm) and width (cm) of the dried beans were then determined using a precision balance (0.01) and a calliper, respectively. The average weight, average length and average diameter of a dried bean were determined from a sample of 60 standard cocoa beans by family.

STATISTICAL ANALYSIS OF DATA

Hybrid families were compared by analysis of variance, with a threshold of $p = 0.05$. Pearson correlation was used to estimate relationships between production variables. Principal component analysis (PCA) and hierarchical ascending classification (HAC) were used to reveal the strongest correlations between the variables and to assess the most discriminating ones for efficient selection of cocoa varieties in each zone. These analyses were carried out using SAS 9.4 (SAS Institute, 2018), XLSTAT version 2014 and R version 4.1.2.

RESULTS

INFLUENCE OF ZONES ON MORTALITY, GROWTH AND DEVELOPMENT OF COCOA TREES

The zones showed significant differences between them for all the parameters evaluated for all the families. The

zone*family interactions were significant for the mortality rate with a probability of 0.0014, the diameter at 30 cm from the ground (0.0241), the section at 1.5 cm from the ground (0.0017) and the total leaf area (0.01876) (Table 3). The mortality rate of cocoa trees, nine (09) years after planting in the field, varied very significantly depending on the agroclimatic zone. It averaged 6.15 % in the Divo zone, which recorded the lowest average for all 25 families, compared with 42.29 % in the Toumodi zone, which obtained the highest rate. The largest diameters at 30 cm from the ground were obtained in the Divo zone, at 13.81 cm. On the other hand, the smallest diameters were obtained in the Toumodi zone with 12.49 cm. For the height of the cocoa trees, the Divo zone had the highest value with an average of 5.60 m and the Toumodi zone had the lowest value with an average of 4.14 m. In terms of cross-sectional area, the Divo zone had the largest cross-sectional area at 109.96 cm² and the Toumodi zone had the smallest cross-sectional area at 87.55 cm². For leaf area, the Divo zone had the largest leaf area with an average of 201.57 cm² and the Toumodi zone the smallest at 198.38 cm².

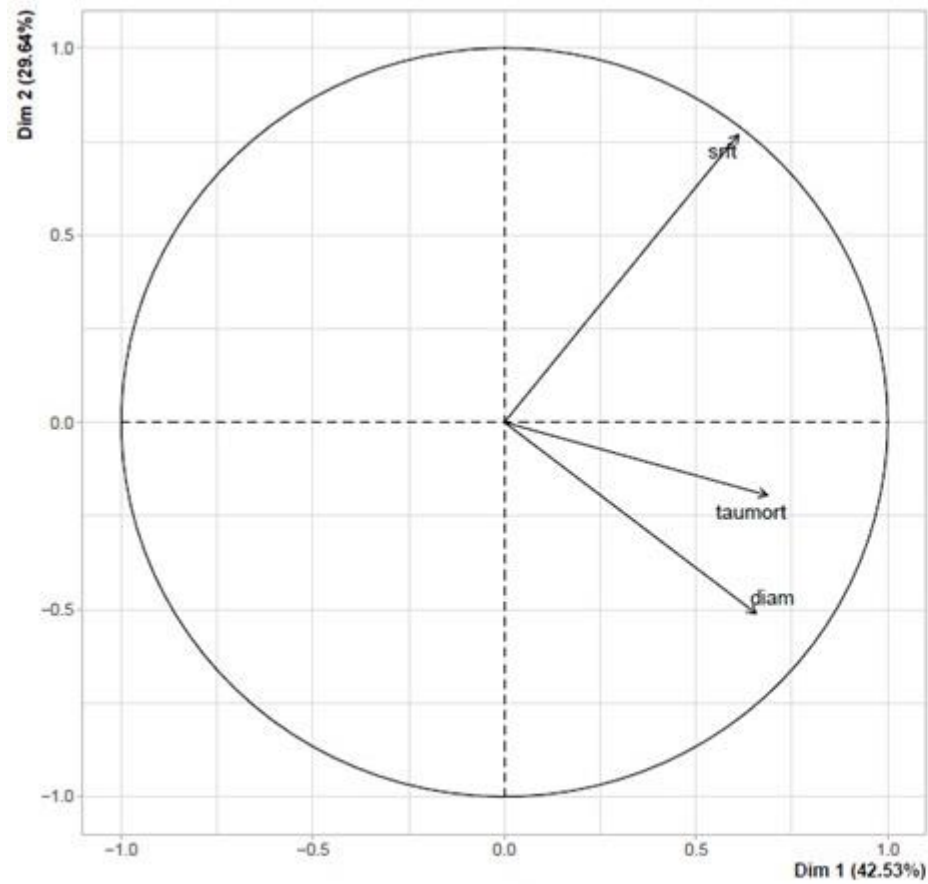
INFLUENCE OF ZONES ON COCOA TREE GROWTH AND DEVELOPMENT PARAMETERS

As the zone*family interaction was significant for all the parameters assessed, the family classifications were carried out by zone (Table 4). The mortality rate showed homogeneity in the Divo zone and a significant difference between hybrid families in the Toumodi zone. The highest mortality rates were obtained by the F6 family (81%) in the Toumodi zone and the lowest mortality rates were presented by the F21 and F24 families (16.71%). Diameter showed a significant difference between hybrid families in the Divo zone and homogeneity in the Toumodi zone. The largest diameter was obtained by the F10 family (15.76 cm) in the Divo zone. On the other hand, the smallest diameters at 30 cm from the ground were obtained by families F7 (13.53 cm) and F17 (13.33 cm) in the Divo zone. The cross-section showed a significant difference between hybrid families in all zones. The best cross-

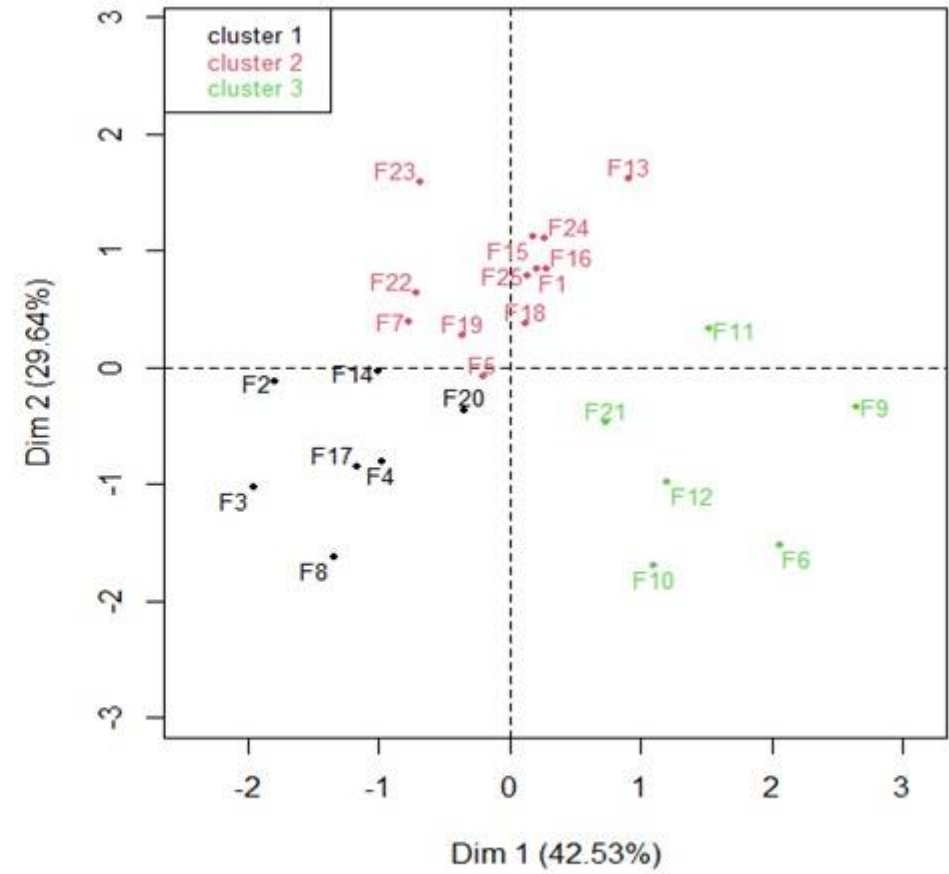
Table 4. Comparison of hybrid families according to mortality rate, growth and development parameters in the different zones.

Families	Mortality rate (%)		Diameter 30 cm above ground (cm)		Cross-section at 1.5 m above ground (cm ²)		Total leaf area (cm ²)	
	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
F1	6.18±0.03 ^a	66.33±0.04 ^{bdac}	13.52±0.48 ^{ba}	12.84±2.07 ^a	95.63±10.5 ^{bc}	62.35±13.2 ^{bc}	215.74±9.34 ^{bdac}	218.74±18.3^a
F10	5.63±0.02 ^a	28.33±0.14 ^{egf}	15.67±0.31^a	14.56±0.73 ^a	114.88±8.4 ^{bac}	114.92±13.8 ^{ba}	187.65±9.4 ^{fdchcg}	166.39±8.6 ^{ba}
F11	8.37±0.02 ^a	52.33±0.12 ^{ebdacf}	14.49±0.61 ^{ba}	12.63±0.74 ^a	117.53±11 ^{bac}	106.81±15.1 ^{ba}	224.22±11.38 ^{ba}	151.94±16.4 ^{ba}
F12	10.18±0.07 ^a	34.52±0.15 ^{edgf}	14.63±0.5 ^{ba}	11.58±1.25 ^a	124.81±11.08 ^{bac}	66.62±10.2 ^{bc}	193.67±8.85 ^{fbdecg}	173.55±10.7 ^{ba}
F13	2.89±0.01 ^a	43±0.08 ^{ebdgcf}	14.21±0.51 ^{ba}	11.48±0.98 ^a	100.18±10.21 ^{bc}	80.11±11.2 ^{bac}	245.4±12.17^a	195.98±18.5 ^{ba}
F14	5.63±0.02 ^a	33.33±0.09 ^{edgf}	13.12±0.58 ^{ba}	14.36±0.71 ^a	110.43±11.6 ^{bc}	128.57±16.8^a	182.57±10.08 ^{fdchg}	176.44±9.6 ^{ba}
F15	5.63±0.02 ^a	25.19±0.11 ^{egf}	13.45±0.45 ^{ba}	11.9±0.87 ^a	129.73±11.34 ^{bac}	76.11±9.2 ^{bac}	221.11±12.22 ^{bac}	193.75±10.3 ^{ba}
F16	5.63±0.02 ^a	29.52±0.20 ^{egf}	13.68±0.47 ^{ba}	11.86±0.88 ^a	107.83±6.82 ^{bc}	81.97±13.2 ^{bac}	217.76±25.62 ^{bdac}	164.61±8.3 ^{ba}
F17	6.18±0.03 ^a	71.67±0.14 ^{bac}	13.33±0.59 ^{ba}	14.32±1.49 ^a	120.19±10.42 ^{bac}	84.96±34.1 ^{bac}	165.24±8.53 ^{hg}	158.46±13.3 ^{ba}
F18	8.93±0.03 ^a	28.67±0.08 ^{egf}	13.26±0.5 ^{ba}	11.99±1.24 ^a	102.68±11.65 ^{bc}	74.32±16.8 ^{bac}	201.7±12.25 ^{fbdec}	180.48±17.5 ^{ba}
F19	2.89±0.0 ^a	38.33±0.09 ^{edgcf}	13.91±0.62 ^{ba}	12.29±0.98 ^a	104.87±11 ^{bc}	89.46±17.6 ^{bac}	202.53±10.15 ^{fbdec}	204.96±11.4 ^{ba}
F2	5.63±0.02 ^a	47.67±0.04 ^{ebdagcf}	12.54±0.38 ^b	11.57±1.05 ^a	94.32±8.88 ^{bc}	68.39±14.1 ^{bc}	168.73±11.2 ^{fhg}	134.35±17.2 ^b
F20	6.18±0.03 ^a	66.67±0.12 ^{bdac}	13.72±0.68 ^{ba}	9.36 ±1.39 ^a	112.3±13.84 ^{bc}	60.73±15.5 ^{bc}	186.44±11.2 ^{fdchcg}	186.86±11.1 ^{ba}
F21	2.89±0.00 ^a	16.71±0.13 ^g	15.17±0.49 ^{ba}	13.33±0.89 ^a	157.53±11.32^a	86.55±9.5 ^{bac}	207.32±11.68 ^{bddec}	200.83±12.2 ^{ba}
F22	2.89±0.00 ^a	25.19±0.11 ^{egf}	13.44±0.59 ^{ba}	12.73±1.05 ^a	125.14±13.46 ^{bac}	85.76±10.2 ^{bac}	203.36±14.48 ^{fbdec}	215.02±9.5^a
F23	6.18±0.03 ^a	20.19±0.11 ^{gf}	12.43±0.37 ^b	13.71±0.78 ^a	80.69±7.36 ^c	113.96±14.3 ^{ba}	214.17±7.72 ^{bdac}	199.97±9.1 ^{ba}
F24	9.3±0.06 ^a	16.71±0.13 ^g	12.93±0.5 ^{ba}	13.14±0.72 ^a	100.36±9.92 ^{bc}	99.31±10.4 ^{ba}	216.05±12.36 ^{bdac}	186.9±9.2 ^{ba}
F25	2.89±0.00 ^a	20.52±0.08 ^{gf}	14.03±0.54 ^{ba}	13.14±1.05 ^a	110.82±7.74 ^{bc}	108.31±15.3 ^{ba}	219.07±13.13 ^{bac}	166±8.4 ^{ba}
F3	2.89±0.00 ^a	76±0.05 ^{ba}	13.33±0.36 ^{ba}	9.92±1.76 ^a	100.29±8.75 ^{bc}	55.81±17.1 ^c	155.39±9.09 ^h	166.91±20.4 ^{ba}
F4	2.89±0.00 ^a	24.86±0.16 ^{egf}	13.99±0.45 ^{ba}	11.93±0.51 ^a	106.12±7.83 ^{bc}	78.6±8.2 ^{bac}	174.59±9.49 ^{fehcg}	188.14±9.6 ^{ba}
F5	6.18±0.03 ^a	52.33±0.12 ^{ebdacf}	13.69±0.67 ^{ba}	10.69±0.95 ^a	101.94±10.55 ^{bc}	63.84±13.1 ^{bc}	193.81±9.06 ^{fbdecg}	177.51±7.9 ^{ba}
F6	16.26±0.08^a	81±0.05^a	14.6±0.58 ^{ba}	12.9±1.55 ^a	98.6±9.7 ^{bc}	86.27±17.2 ^{bac}	187.98±12.9 ^{fbdehcg}	159.85±14.3 ^{ba}
F7	2.89±0.00 ^a	29.86±0.15 ^{egf}	13.53±0.51 ^{ba}	12.13±0.77 ^a	86.21±8.05 ^{bc}	83.63±13.1 ^{bac}	198.23±13.3 ^{fbdecg}	165.84±12.2 ^{ba}
F8	2.89±0.00 ^a	57±0.14 ^{ebdac}	14.13±0.59 ^{ba}	12.38±0.79 ^a	138.39±11.3 ^{ba}	88.15±20.3 ^{bac}	154.95±8.1 ^h	162.59±12.2 ^{ba}
F9	15.71±0.06 ^a	71.33±0.08 ^{bac}	14.54±0.71 ^{ba}	11.66±1.16 ^a	103.95±9.21 ^{bc}	68.17±16.2 ^{bc}	218.34±12.7 ^{bdac}	182.15±13.1 ^{ba}
Mean	6.15	42.29	13.80	12.48	109.96	87.55	201.566	181.18
CV (%)	9.96	48.96	19.27	28.349	46.427	31.15	29.557	24.24
P < 0.05	0.4214	0.0007	0.0029	0.1865	<.0001	0.037	<.0001	0.0003

*In each column, the means followed by the same letter are not statistically different at the 5% level.

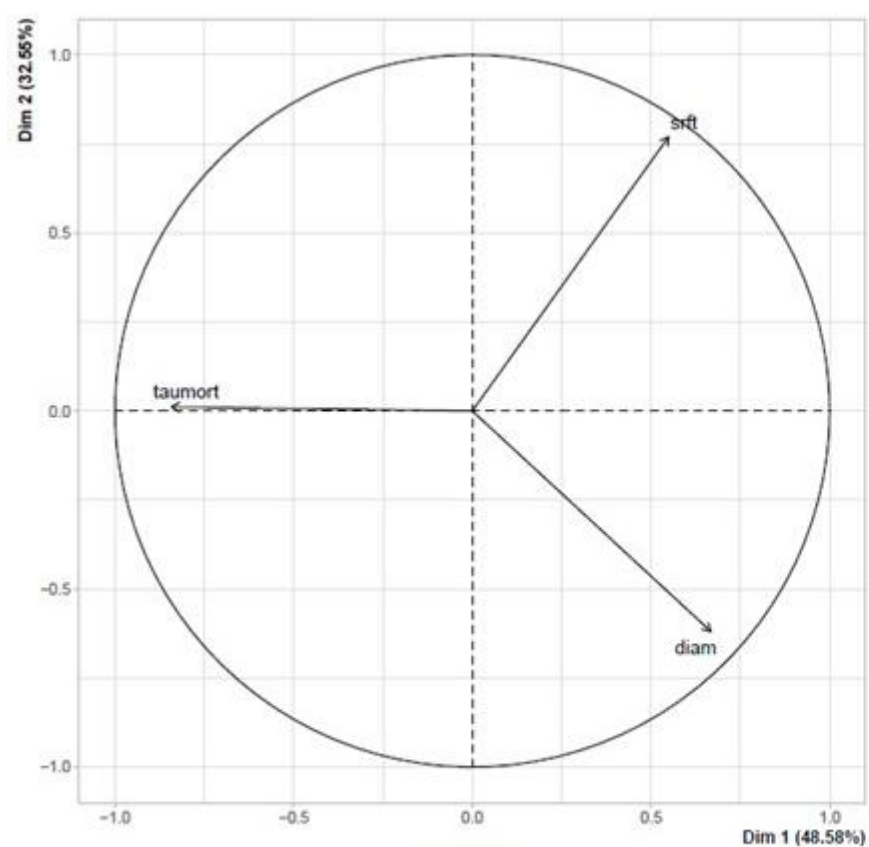


A

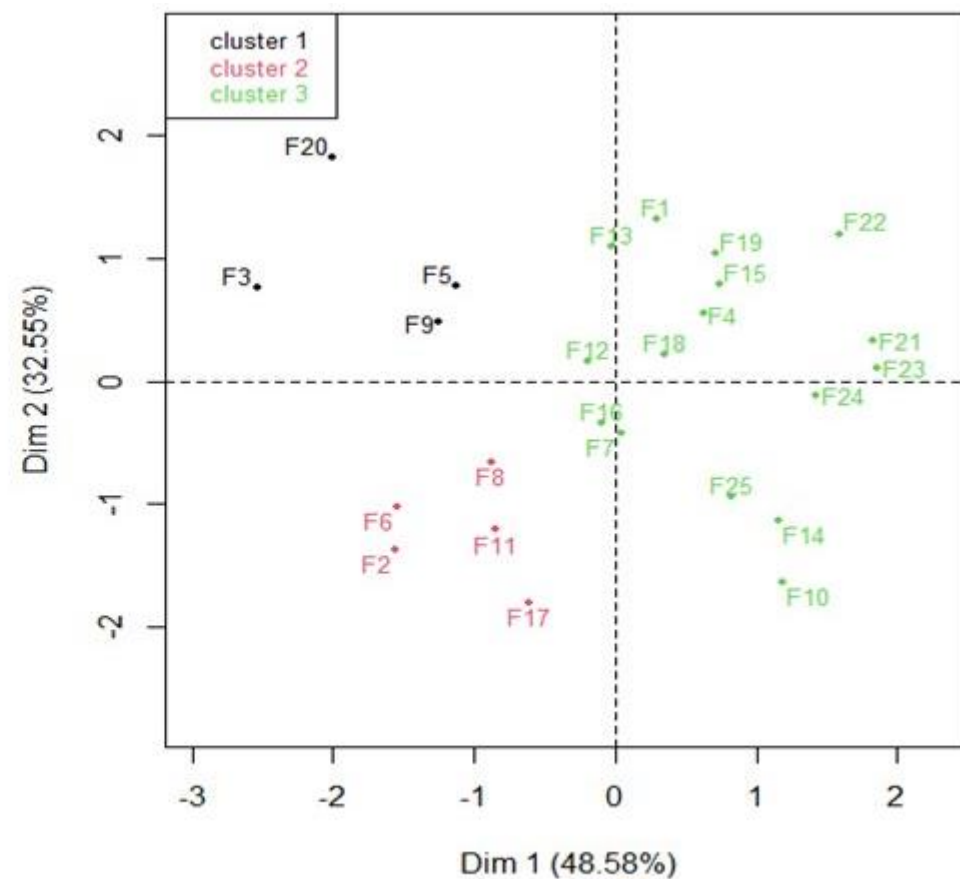


B

Figure 2. Selection of hybrid families according to vigour and mortality rate variables assessed in the field in the Divo area. **A)** Correlation circle between vigour variables and mortality rate along axes 1 and 2; **B)** Ascending hierarchical classification of individuals along axes 1 and 2.



A



B

Figure 3. Selection of hybrid families according to vigour and mortality rate variables assessed in the field in the Toumodi area. **A)** Correlation circle between vigour variables and mortality rate along axes 1 and 2; **B)** Ascending hierarchical classification of individuals along axes 1 and 2.

sections were obtained by the F21 family (157cm²) in the Divo zone, and F14 (128.57 cm²) in the Toumodi zone. On the other hand, the smallest sections were presented by the F23 families (80.69 cm²) in the Divo zone and F3 (55.81 cm²) in the Toumodi zone. Total leaf area showed a significant difference between hybrid families in all zones. The largest leaf areas were obtained by families F13 (245.4 cm²) in the Divo zone, and families F1 (218.47cm²) and F22 (215.02 cm²) in the Toumodi zone. On the other hand, the smallest total leaf area was obtained by families F3 (155.39 cm²) and F8 (154.95 cm²) in the Divo zone and F2 (134.35 cm²) in the Toumodi zone.

SELECTION OF COCOA TREES BASED ON GROWTH AND DEVELOPMENT PARAMETERS

The information provided by the two axes used in the principal component analysis of families in the Divo zone accounted for 72.17 % of the variability observed. Axis 1 accounted for 42.53 % of the total variability. The variables mortality rate and diameter at 30 cm above ground formed this axis with squared cosines ranging from 0.485 to 0.723. Axis 2 expressed 29.29 % of the total variability. The total leaf area volume variable with a cosine squared of 0.654 constructed this axis (Figure 2A). Hierarchical ascending classification (HAC) (Figure 2A) indicated three groups of cocoa trees according to growth and development parameters in the Divo zone. The first group was made up of families F2, F14, F20, F17, F4, F3 and F8. This group was characterised by low values for the variables total leaf area, mortality rate and diameter at 30 cm from the ground. The second group was made up of families F23, F22, F7, F19, F5, F18, F25, F15, F1, F16, F24 and F13. This group was characterised by high values for the total leaf area variable, low values for the mortality rate variable and average values for the diameter at 30 cm from the ground. The third group was made up of families F11, F21, F12, F9 and F6. This group was characterised by high values for the variables total leaf area, diameter at 30 cm above ground and mortality rate.

In the Toumodi zone, principal component analysis of the families expressed 81.13% of the variability observed. Axis 1 accounted for 48.58 % of the total variability. The mortality rate variables constructed this axis with squared cosines that ranged from 0.586 to 0.578. Axis 2 expressed 32.55 % of the total variability. The total leaf area volume variable with respective cosines squared 0.512 constructed this axis (Figure 3A). In the Toumodi zone, hierarchical ascending classification (HAC) (Figure 3B) also indicated three groups of cocoa trees based on growth and development parameters. The first group was made up of families F3, F20, F5 and F9. This group was characterised by high values for the mortality rate and total leaf area variables and low values for the diameter at 30 cm above ground variable. The second group was made up of the F8, F11, F17, F2 and F6 hybrid families. This

group was characterised by high values for the mortality rate variable and low values for the total leaf area and diameter at 30 cm from the ground variables. The third group was made up of families F1, F13, F19, F15, F4, F18, F12, F16, F7, F25, F14, F10, F22, F24, F21 and F23. This group was characterised by high values for the variables total leaf area and diameter at 30 cm above ground and low values for the variable mortality rate.

INFLUENCE OF ZONES ON COCOA PRODUCTION PARAMETERS

INFLUENCE OF ZONES ON POD-RELATED PARAMETERS

The zones showed significant differences between them for all the parameters evaluated for all the families ($P < .0001$). Zone*family interactions were significant for all parameters assessed ($P < .0001$). Cortical thickness varied significantly between zones. It averaged 1.51 cm in the Divo zone, which recorded the highest mean. On the other hand, the Toumodi area, with an average of 1.11 cm, recorded the lowest average cortex thickness. The largest pod volumes were obtained in the Divo zone, with 743.56 cm³. On the other hand, the smallest pod volumes were obtained in the Toumodi area with 537.67 cm³. The highest pod shape and size were obtained in the Divo zone, with averages of 2.51 and 188.65 cm² respectively. On the other hand, the smallest shape and size were obtained in the Toumodi zone, with averages of 1.91 and 138.19 cm² respectively. The number of normal beans per pod varied significantly between zones. The average was 40.43 in the Divo zone, which recorded the highest average, compared with 27.12 in the Toumodi zone. For the number of flat beans per pod, the highest average (1.44) was obtained in the Divo zone and the lowest number of flat beans per pod was recorded by the Toumodi zone (0.75) (Table 5).

INFLUENCES OF DROUGHT ON POD SIZE FOR FAMILIES IN EACH ZONE

All the parameters linked to pod dimensions (Table 6) showed significant zone*family interactions ($p < .0001$). Families were ranked by zone. Pod cross-section showed significant differences between families in the two zones ($p < .0001$). Cortex thickness also showed a significant difference between families in the two zones. Families F13 (1.77 cm) and F20 (1.51 cm) had the greatest cortex thicknesses at Divo and Toumodi respectively. On the other hand, the smallest cortex thicknesses were found in families F5 (1.36 cm) in Divo and F9 (0.71 cm) in Toumodi. Pod volume showed significant differences between families in both zones.

The largest volumes were represented by families F25 with 1045.45 cm³ at Divo and F20 with 742.65 cm³ at

Table 5. Comparison of zones according to the size of cocoa pods under drought conditions

Zones	Cortex thickness (cm)	Pod volume (cm ³)	Pod shape	Pod size	Number of normal beans	Number of still beans
Divo	1.51±0.00 ^a	743.56±2.68 ^a	2.51±0.00 ^a	188.65±0.47 ^a	40.43±0.31 ^a	1.44±0.09 ^a
Toumodi	1.11±0.01 ^b	537.67±7.15 ^b	1.91±0.00 ^b	138.19±1.28 ^b	27.12±0.68 ^b	0.75±0.07 ^b
Mean	1.47	721.08	2.45	183.14	33.77	1.1
CV(%)	20.52	28.46	10.19	19.68	38.92	57.04
P < 0.05	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
zone*famille	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0002

In each column, the means followed by the same letter are not statistically different at the 5% level.

Table 6. Comparison of families according to the size of cocoa pods under drought conditions.

Families	Pod cortex thickness (cm)		Pod shape		Pod size (cm ²)	
	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
F1	1.44±0.1 ^{jhik}	1.08±0.5 ^{edc}	2.41±0.01 ^{gh}	2.07±0.04 ^{cbd}	185.05±2.15 ^{fhgi}	134.05±8.14 ^{bdac}
F10	1.49±0.1 ^{fhig}	1.03±0.4 ^{edfc}	2.36±0.01 ^{ih}	1.67±0.04 ^g	176.43±1.60 ^{ji}	136.9±5.63 ^{bdac}
F11	1.66±0.2 ^b	1.27±0.1 ^{bdac}	2.5±0.01 ^{ef}	2.15±0.06 ^{cb}	202.73±2.42 ^{cb}	132.4±19.52 ^{bdac}
F12	1.60±0.1 ^{cbd}	1.15±0.1 ^{ebdc}	2.40±0.01 ^{gh}	1.95±0.02 ^{fbcdg}	200.38±2.08 ^{cd}	159.91±9.33 ^{bdac}
F13	1.77±0.1^a	1.08±0.07 ^{edc}	2.61 ±0.01 ^{cb}	1.81±0.05 ^{fedg}	195.86±1.99 ^{cde}	125.22±6.26 ^{bdc}
F14	1.39±0.1 ^{ijk}	0.97±0.4 ^{edf}	2.59±0.01 ^{cb}	1.92±0.03 ^{fbcdg}	183.33±2.32 ^{fhgi}	132.49±4.74 ^{bdac}
F15	1.48±0.1 ^{fhig}	1.21±0.1 ^{ebdac}	2.76±0.02^a	2.53±0.06^a	196.51±2.46 ^{cde}	171.03±11.87 ^a
F16	1.48±0.1 ^{fhig}	1.03±0.1 ^{edfc}	2.33±0.01 ^{ij}	2.01±0.10 ^{fbcd}	180.32±1.97 ^{hgi}	160.01±15.09 ^{bdac}
F17	1.49±0.2 ^{fhig}	1.3±0.7 ^{bdac}	2.78±0.01 ^a	2.05±0.05 ^{cbcd}	176.01±2.37 ^{ji}	151.24±9.37 ^{bdac}
F18	1.53±0.1 ^{fhig}	1.39±0.4 ^{bac}	2.41±0.01 ^{gh}	1.78±0.03 ^{feg}	202.05±2.52 ^{cb}	158.26±6.50 ^{bdac}
F19	1.44±0.2 ^{jik}	1.46±0.9 ^{ba}	2.5±0.02 ^{ef}	2.09±0.05 ^{cbd}	192.31±2.80 ^{fde}	169.33±13.07 ^a
F2	1.51±0.1 ^{fhig}	1.10±0.3 ^{ebdc}	2.32±0.01 ^{ij}	1.84±0.02 ^{fedg}	162.3±1.90 ^l	118.01±2.63 ^{dc}
F20	1.38±0.1 ^{lk}	1.51±0.6^a	2.64±0.01 ^b	1.93±0.03 ^{fbcdg}	188.68±2.31 ^{fge}	172.1±8.48 ^a
F21	1.59±0.1 ^{ced}	1.3±0.3 ^{bdac}	2.62±0.00 ^{cb}	1.99±0.03 ^{fbcd}	196.03±1.80 ^{cde}	154.4±5.47 ^{bdac}
F22	1.65±0.1 ^{cb}	1.28±0.3 ^{bdac}	2.58±0.01 ^{cd}	1.8f±0.02 ^{edg}	196.76±2.20 ^{cde}	156.14±4.91 ^{bdac}
F23	1.55±0.1 ^{fed}	1.15±0.2 ^{ebdc}	2.46±0.01 ^{gf}	1.88±0.02 ^{fbcdg}	187.89±2.11 ^{fhge}	134.2±2.67 ^{bdac}
F24	1.5±0.1 ^{fhig}	1.07±0.3 ^{edc}	2.54±0.01 ^{ed}	1.94±0.03 ^{fbcdg}	178.79±1.86 ^{hji}	121.44±4.33 ^{dc}
F25	1.62±0.1 ^{cb}	1.29±0.5 ^{bdac}	2.53±0.01 ^{ed}	1.87±0.04 ^{fbcdg}	237.69±2.84 ^a	159.12±8.65 ^{bdac}
F3	1.49±0.1 ^{fhig}	1.13±0.6 ^{ebdc}	2.29±0.01 ^j	1.83±0.18 ^{fedg}	179.27±2.14 ^{hi}	162.18±6.92 ^{bac}
F4	1.45±0.1 ^{jhik}	0.99±0.3 ^{edf}	2.28±0.01 ^j	1.877±0.05 ^{fbcdg}	170.34±1.87 ^{kj}	137.65±8.36 ^{bdac}
F5	1.36±0.1 ^l	0.97±0.3 ^{edf}	2.39±0.01 ^h	1.74±0.01 ^{fg}	166.34±2.13 ^{kl}	121.79±3.11 ^{dc}
F6	1.54±0.1 ^{feg}	1.29±0.5 ^{bdac}	2.528±0.01 ^{ed}	2.073±0.03 ^{cbd}	208.66±2.51 ^b	166.67±5.7 ^{ba}
F7	1.46±0.1 ^{jhig}	0.88±0.1 ^{ef}	2.46±0.01 ^{gf}	1.91±0.02 ^{fbcdg}	177.98±1.94 ^{ji}	119.86±2.36 ^{dc}
F8	1.51±0.1 ^{fhig}	1.14±0.8 ^{ebdc}	2.77±0.01^a	2.08±0.1 ^{cbd}	191.02±2.11 ^{fe}	139.33±7.36 ^{bdac}
F9	1.43±0.1 ^{jik}	0.71±0.7 ^l	2.73±0.01^a	2.21±0.06 ^b	187.7±2.09 ^{fhge}	115.9±5.25 ^d
Mean	1.51	1.12	2.51	1.91	188.65	138.19
Cv (%)	20.07	26.74	10.05	12.45	19.44	24.6
P<0.05	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001

In each column, the means followed by the same letter are not statistically different at the 5% level.

Toumodi. The smallest pod volumes were obtained by families F2 (616.28 cm³) at Divo and F9 (384.36 cm³) at Toumodi. Pod shape and size showed significant differences between families in all zones. Families F17 (2.78), F8 (2.77), F15 (2.76) and F9 (2.73) had the largest pod shapes in Divo and F15 (2.53) in Toumodi. The smallest pod shapes were found in families F3 (2.29) and

F4 (2.8) in Divo and F10 (1.7) in Toumodi. The largest pod sizes were obtained by families F25 (237.69 cm²) at Divo and F20 (172.1 cm²), F15 (171.03 cm²) and F19 (169.33 cm²). The smallest pod sizes were represented by families F2 (162.3 cm²) at Divo and F9 (115.9 cm²) at Toumodi. The number of normal beans and flat beans per pod showed significant differences between families in the two

Table 6 continued. Comparison of families according to the size of cocoa pods under drought conditions.

Families	Pod Volume (cm ³)		Number of normal beans		Number of normal beans	
	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
F1	735.27±12.2 ^{gd fce}	495.96±52.2 ^{eb dcf}	39.03±1.56 ^{fg de}	17.17±3.21 ^{ln mkj}	2.23±0.70 ^{bac}	0.7±0.38 ^{eb dc}
F10	689.76±8.8 ^{gfh}	562.02±31.6 ^{eb dacf}	38.8±1.42 ^{fg de}	28.93±3.67 ^{eg d f c}	0.67±0.19 ^d	0.13±0.09 ^{ed}
F11	828.98±14.1 ^b	471.73±10.3 ^{ed cf}	36±1.12 ^{gh}	14.67±3.43 ^{ln m}	1.7±0.48 ^{bd ac}	0.3±0.16 ^{ed c}
F12	827.87±12.1 ^b	666.54±58.9 ^{e bdac}	43.6±1.68 ^{bac}	31.4±3.08 ^{eb dac}	1.3±0.41 ^{bdc}	0.63±0.23 ^{ed c}
F13	771.55±11.3 ^{dc}	470.8±29.6 ^{d cf}	40.13±1.41 ^{fg dec}	26.08±2.66 ^{eg ifh}	1.07±0.26 ^{dc}	0.95±0.39 ^{eb dac}
F14	705.02±13.2 ^{g fhe}	502.37±25.2 ^{eb dcf}	37.68±1.27 ^{gh}	38.03±2.66 ^{ba}	1.1±0.26 ^{dc}	0.67±0.39 ^{eb dc}
F15	754.75±13.1 ^{dce}	647±65.6 ^{eb dac}	38.03±1.8 ^{5 fgeh}	20.37±1.54 ^{li khj}	2.3±0.75 ^{bac}	0.3±0.29 ^{ed c}
F16	719.13±11.3 ^{gd fhe}	646.74±75.2 ^{eb dac}	38.88±1.65 ^{fg de}	28.23±3.34 ^{eg d f h}	1.83±0.50 ^{bd ac}	0.7±0.15 ^{eb dc}
F17	638.52±12.1 ^{ij}	588.46±52.2 ^{eb dacf}	37.9±1.35 ^{fgeh}	16.77±3.66 ^{ln mk}	2.55±0.75 ^{ba}	1.03±0.31 ^{bd ac}
F18	839.21±15.1 ^b	679.41±36.3 ^{bd ac}	38.03±1.53 ^{fgeh}	31±2.82 ^{eb d f c}	1.15±0.3 ^{dc}	1.1±0.35 ^{bd ac}
F19	769.48±15.6 ^{dc}	719.25±78.2 ^{ba}	43.77±1.55 ^{bac}	24.65±5.7 ^{eg if khj}	1.83±0.54 ^{bd ac}	0±00 ^e
F2	616.28±10.5 ^j	427.44±13.7 ^{ef}	42.83±1.57 ^{bd ac}	32.88±3.11 ^{eb dac}	0.77±0.20 ^d	0.9±0.36 ^{eb dac}
F20	725.6±12.3 ^{gd f e}	742.65±56.1^a	41.98±1.11 ^{bdec}	21.83±3.49 ^{lg if khj}	1.4±0.42 ^{bdc}	0.37±0.25 ^{ed c}
F21	768.68±10.4 ^{dc}	616.66±29.9 ^{eb dacf}	42.67±1.29 ^{bd ac}	25.58±3.84 ^{eg if h j}	1.8±0.42 ^{bd ac}	0.53±0.26 ^{ed c}
F22	780.38±12.8 ^c	661.07±27.1 ^{eb dac}	38.63±1.88 ^{fg de}	39.53±1.93^a	2.8±0.89^a	0.43±0.17 ^{ed c}
F23	744.16±11.6 ^{d fce}	515.11±14.4 ^{eb dacf}	40.2±1.24 ^{fg dec}	36±2.13 ^{bd ac}	0.6±0.14 ^d	1.15±0.44 ^{bac}
F24	679.56±10.1 ^{gi h}	438±21.91 ^{ed f}	34.2±2.04 ^h	38.5±1.57 ^{ba}	1.77±0.59 ^{bd ac}	0.5±0.17 ^{ed c}
F25	1045.45±18.3^a	667.86±48.7 ^{eb dac}	46.3±1.78^a	33.03±3.00 ^{eb dac}	0.6±0.16 ^d	0.77±0.32 ^{eb dc}
F3	718.58±11.5 ^{gd fhe}	688.74±50.7 ^{bac}	39.3±1.93 ^{fg de}	22.5±3.00 ^{lg if khj}	1.13±0.52 ^{dc}	0.5±0.28 ^{ed c}
F4	666.14±10.1 ^{ih}	535.1±44.2 ^{eb dacf}	45.2±1.37 ^{ba}	39 ±2.46 ^{ba}	1.3±0.36 ^{bdc}	1.65±0.54 ^{ba}
F5	634.0±12.27 ^j	458.93±16.3 ^{ed cf}	39.3±1.03 ^{fg de}	18.18±3.47 ^{lim kj}	1.03±0.27 ^{dc}	1.8±0.65^a
F6	861.97±15.13 ^b	672.86±31.7 ^{bd ac}	42.3 ±1.19 ^{bd ac}	37 ±2.34 ^{bac}	0.83±0.17 ^d	0.93±0.36 ^{eb dac}
F7	685.71±10.3 ^{gh}	429.64±11.1 ^{ef}	43.73±1.40 ^{bac}	38.77 ±1.39 ^{ba}	1.37±0.36 ^{bdc}	0.37±0.15 ^{ed c}
F8	721.04±11.4 ^{gd fhe}	519.95±38.1 ^{eb dacf}	41.2±1.43 ^{fb dec}	9.7±2.90 ^{nm}	2.5±0.88 ^{ba}	0.53±0.3 ^{ed c}
F9	704.96±11.2 ^{g fhe}	384.36±26.1 ^f	41±1.06 ^{fb dec}	8.78±2.39 ⁿ	1±0.34 ^{dc}	1.8±0.61^a
Mean	743.56	537.68	40.42	27.12	1.45	0.756
CV (%)	28.11	34.83	20.46	47.12	46.75	48.68
P < 0.05	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0193	0.0229

In each column, the means followed by the same letter are not statistically different at the 5% level.

Table 7. Comparison of production parameters for the zones over the 4 harvest years.

Zones	Production parameters				
	Ncab	Pmcab (g)	Pmff (g)	Psf (g)	Longfs (cm)
Divo	25.29±0.45^a	432.35±0.00^a	80.057±0.00^a	1.39±0.00^a	2.43±0.00^a
Toumodi	9.46±0.43 ^b	370.81±0.00 ^b	83.35±0.00 ^a	1.27±.00 ^b	2.30±0.00 ^b
Mean	20.085	412.13	81.14	1.34	2.38
Cv (%)	48.99	11.88	5.45	14.98	8.36
p ≤ 0.05	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
zone*family	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001

Ncab=number of pods, Pmcab=average pod weight, Pmff=dry bean weight, dry bean length. In each column, the averages followed by the same letter are not statistically different at the 5% level.

zones (p<.0001). The highest number of normal beans per pod was obtained by families F25 (46.3) in Divo and F22 (39.53) in Toumodi. On the other hand, the lowest number of normal beans per pod was obtained by families F24 (34.2) in Divo and F9 (8.78) in Toumodi (Table 6). The

highest number of flat beans per pod was obtained by families F22 (2.8) in Divo and F5 and F9 (1.8) in Toumodi. The lowest number of flat beans per pod was obtained by families F6 (0.83), F2 (0.77), F10, F23, F25 (0.6) in Divo and F19 (0) in Toumodi (Table 6).

Table 7 (continued). Comparison of zone production parameters over the 4 harvest years.

Zones	Production parameters				
	Largfs (cm)	Tot	Tcp (%)	Rdtp (kg/ha)	Rdtr (kg/ha)
Divo	1.28±0.0^a	37.997±0.1^a	1.011±0.1 ^b	1906.64±31.2^a	1265.63±22.74^a
Toumodi	1.11±0.0 ^b	12.289±0.5 ^b	7.04±0.31^a	697.96±31.8 ^b	551.41± 25.75 ^b
Mean	1.21	29.547	2.99	1509.34	1030.865
Cv (%)	11.57	45.8	73.59	51.82	55.12
p ≤ 0.05	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
zone*family	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001

Largfs=dry bean width, Tot=total number of pods (healthy, rotten, gnawed and other), Tcp=rotten pod rate, Rdtp=potential yield, Rdtr=actual yield. In each column, the averages followed by the same letter are not statistically different at the 5% level.

SELECTION OF COCOA TREES BASED ON POD PARAMETERS

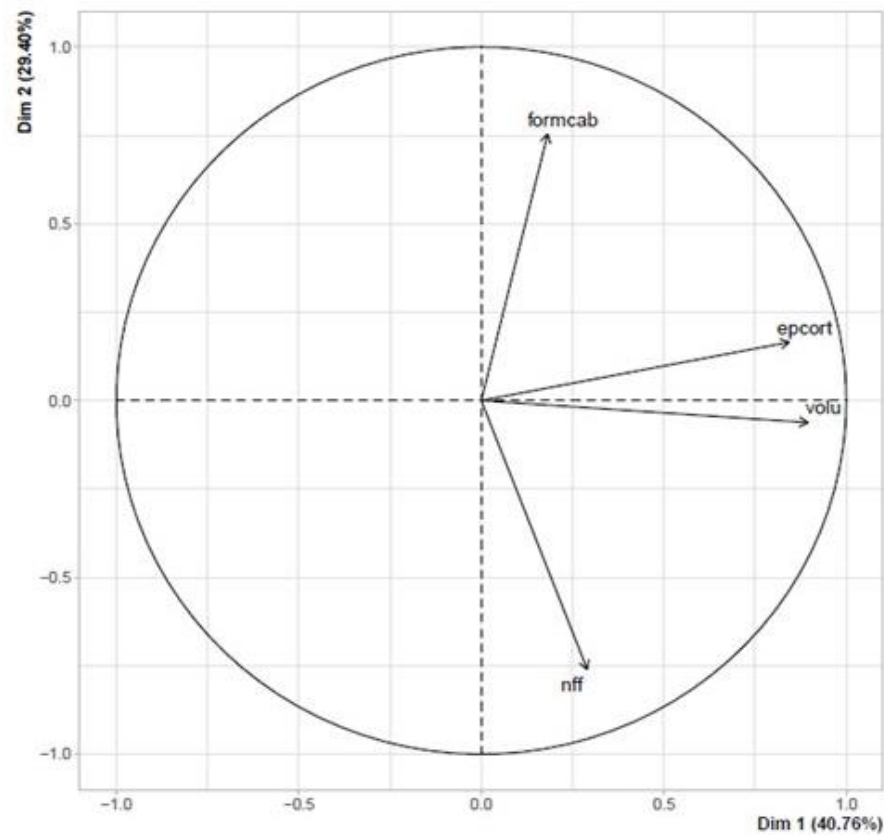
The information provided by the two axes used in the principal component analysis of families in the Divo zone accounted for 70.16 % of the variability observed. Axis 1 accounted for 40.76 % of total variability. The variables pod volume and pod cortex thickness constructed this axis with respective cosines squared of 0.654 and 0.723. Axis 2 expressed 29.40 % of the total variability. The variable pod shape and number of normal beans, with squared cosines ranging from 0.386 to 0.578, constructed this axis (Figure 4A). Hierarchical ascending classification (HAC) (Figure 4B) indicated three groups of cocoa trees according to pod parameters in the Divo zone. The first group was made up of families F5, F10, F1, F16, F3, F7, F2, F9 and F4. This group was characterised by low values for the variables pod shape, pod volume and cortex thickness, and high values for the variable number of normal beans. The second group was made up of families F17, F24, F14, F9, F20, F15 and F8. Hierarchical ascending classification (HAC) (Figure 5B) also indicated three groups of hybrid families based on pod parameters. The first group was made up of families F5, F13, F24, F14, F2, F7, F4, 23 and F10. This group was characterised by high values for the variable number of normal beans and low values for the variables cortex thickness, pod shape and pod volume. The second group was made up of families F9, F1, F8, F11, F17 and F15. This group was characterised by high values for the variables pod shape and cortex thickness and low values for the variables pod volume and number of normal beans. The third group was made up of families F16, F3, F12, F25, F18, F19, F20, F21, F22 and F6. This group was characterised by high values for the variables pod shape, pod volume, cortex thickness and number of normal beans.

INFLUENCE OF DROUGHT ON COCOA PRODUCTION PARAMETERS OVER THE HARVEST YEARS

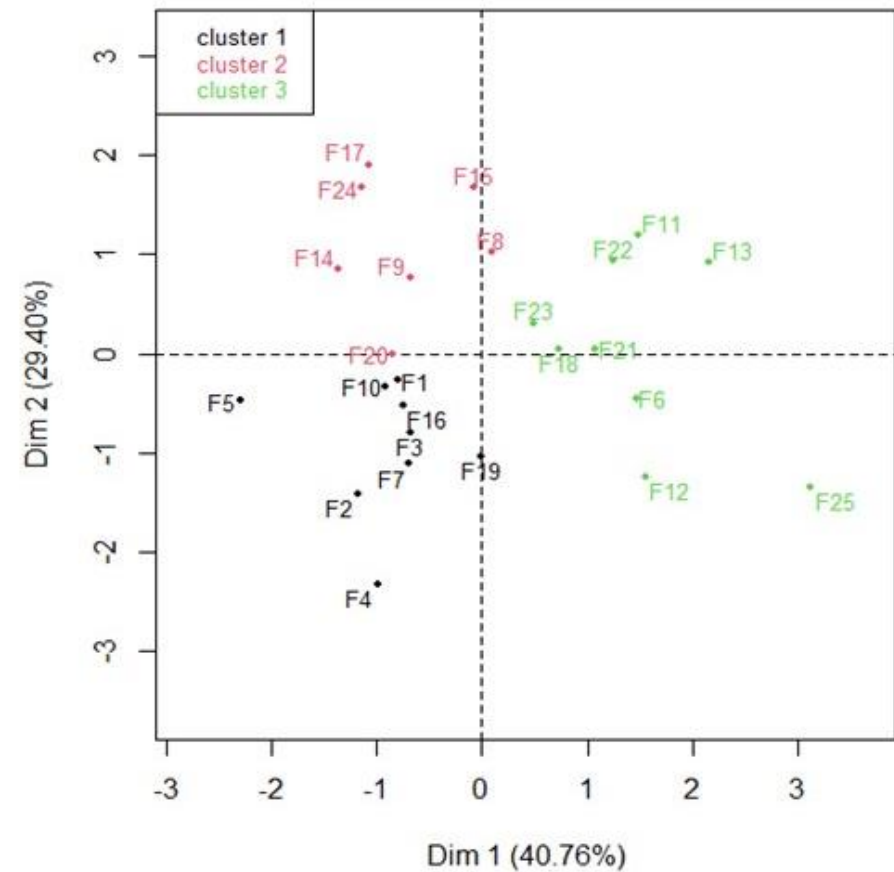
COMPARISON OF THE PRODUCTION PARAMETERS OF THE ZONES OVER THE FOUR (04) HARVEST YEARS

The zones showed significant differences ($P<.0001$) between them for all the parameters evaluated for all the families. Zone*family interactions were significant for all the parameters assessed ($P<.0001$) (Table 7). The highest number of healthy pods was obtained in the Divo zone, with an average value of 25.29. On the other hand, the lowest number of healthy pods was obtained in the Toumodi zone with a mean value of 9.46. The Divo zone had the highest average healthy pod weight (432.35 g) and the lowest average healthy pod weight (370.81 g) was obtained in the Toumodi zone. The Divo and Toumodi zones were homogeneous in terms of average fresh bean weight. The highest dry bean weight, with an average of 1.39 g, was obtained in the Divo zone. On the other hand, the lowest dry bean weight with an average of 1.27 g was obtained in the Toumodi zone. The longest dry beans (2.43 cm) were obtained in the Divo zone and the shortest dry beans (2.30 cm) in the Toumodi zone. The largest dry beans, with an average length of 1.28 cm, were obtained in the Divo zone. On the other hand, small dry beans with an average width of 1.11 cm were obtained in the Toumodi zone. The highest total number of pods, with an average of 37.99, was obtained in the Divo zone. On the other hand, the lowest total number of pods, with an average of 12.29, was obtained in the Toumodi zone. The Toumodi zone had the highest rate of rotten pods, with an average of 7.04 %, while the Divo zone had the lowest (1.01 %). Potential and actual yields were highest in the Divo zone, with averages of 1906.64 kg/ha and 1265.63 kg/ha respectively. However, potential and actual yields were lower in the Toumodi zone, with averages of 697.96 kg/ha and 551.41 kg/ha respectively.

COMPARISON OF HYBRID FAMILIES ACCORDING TO PRODUCTION PARAMETERS IN THE DIFFERENT ZONES OVER THE HARVEST YEARS

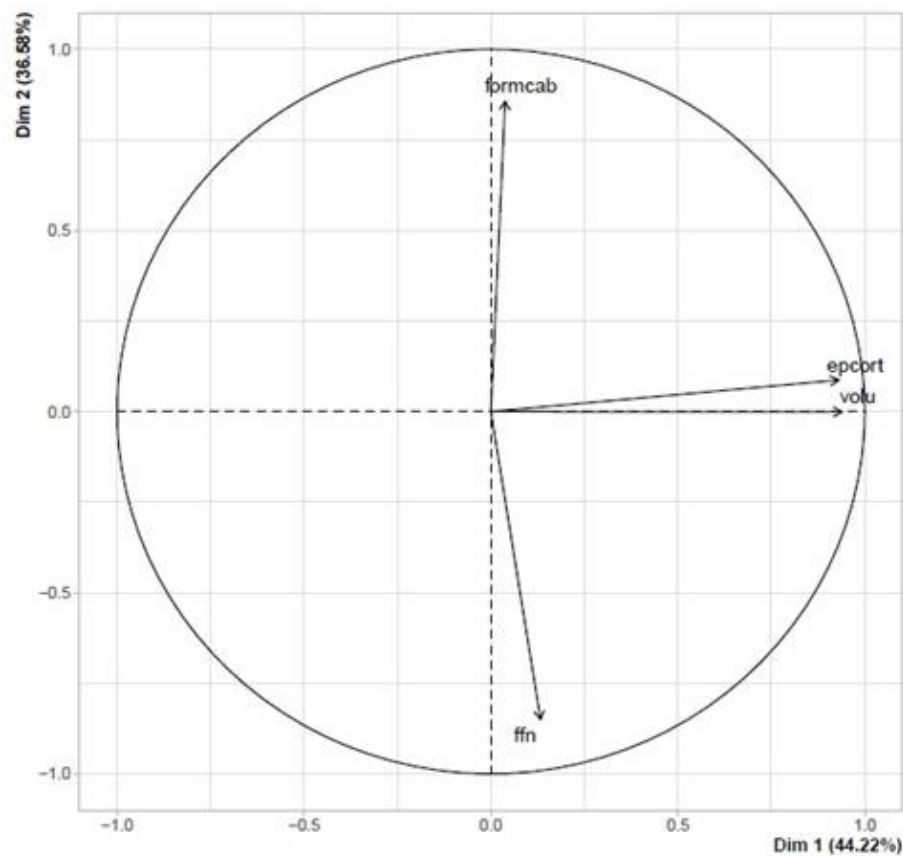


A

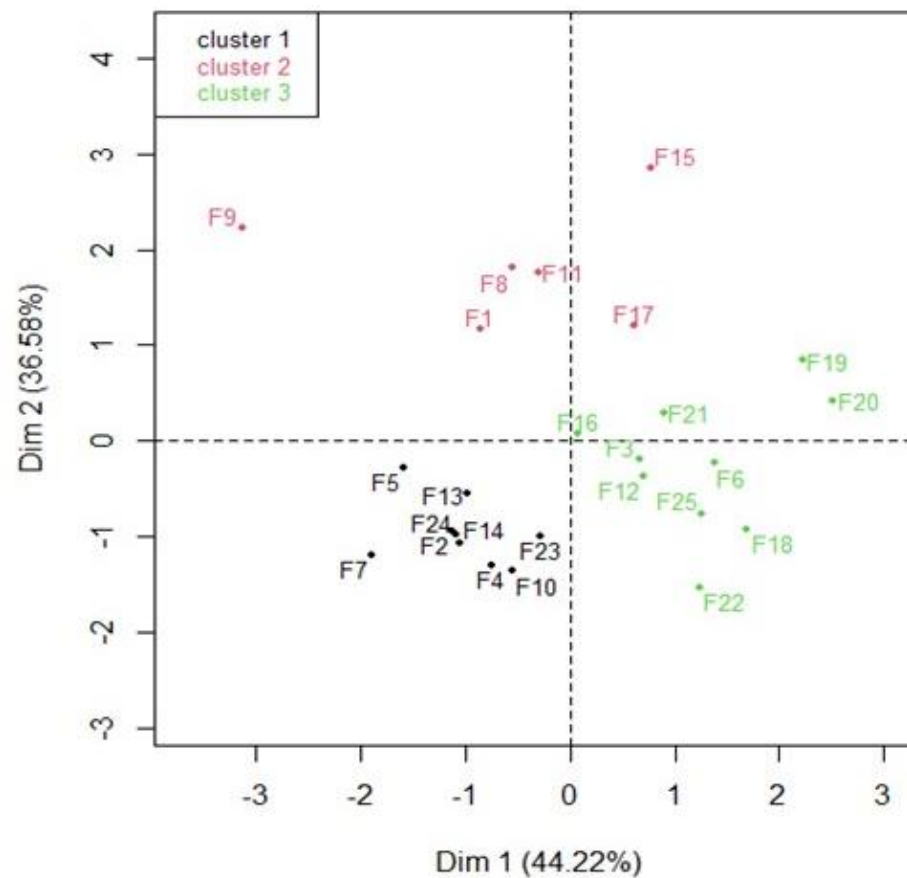


B

Figure 4. Selection of hybrid families according to pod variables assessed in the following field in the Divo area. **A)** Correlation circle between vigour variables and mortality rate along axes 1 and 2; **B)** Ascending hierarchical classification of individuals along axes 1 and 2.



A



B

Figure 5. Selection of hybrid families according to pod variables assessed in the following field in the Toumodi area. **A)** Correlation circle between vigour variables and mortality rate along axes 1 and 2; **B)** Ascending hierarchical classification of individuals along axes 1 and 2.

Table 8. Comparison of families according to production parameters during harvest years in the different zones.

	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
Familles	Tot	Tot	Ncab	Ncab	Pmcab (g)	Pmcab (g)	Tcp (%)	Tcp (%)
F1	38.267±3.24 ^{edfc}	7.77±3.11 ^{cd}	24.57±2.28 ^{efdc}	6.77±2.71 ^{cd}	390.49±0.01 ^{feg}	274.35± 0.07 ^{edf}	2.22±0.66 ^{ba}	13.75±2.26 ^{ba}
F10	52.88±3.26^a	7.619±1.40 ^{cd}	37.91± 2.55^a	6.84±1.24 ^{cd}	394.76±0.01 ^{fegd}	342.35±0.03 ^{ebdacf}	0.14±0.01 ^b	7.22±1.42 ^{ebdacf}
F11	33.418±3.13 ^{egdf}	7.65±2.248 ^{cd}	22.86±2.27 ^{efdc}	6.73±1.97 ^{cd}	425.07±0.02 ^{fcegd}	295.11±0.04 ^{ebdcf}	2.73±0.76^a	9.45±1.92 ^{ebdac}
F12	31.878±2.42 ^{egdf}	7.15±1.71 ^{cd}	21.77±1.86 ^{efdc}	5.19±1.29 ^{cd}	477.66 ± 0.01 ^{cbd}	401.39±0.05 ^{ebdac}	1.23±0.49 ^{ba}	7.85±1.60 ^{ebdacf}
F13	44.08±3.41 ^{ebdac}	7.24±1.48 ^{cd}	29.14±2.44 ^{bdc}	5.93±1.25 ^{cd}	451.5 ± 0.01 ^{fcebd}	349.1±0.04 ^{ebdacf}	0.88±0.40 ^{ba}	8.87±1.63 ^{ebdac}
F14	30.57±2.53 ^{egf}	19.73±3.42 ^{bc}	20.32±1.96 ^{efd}	15.91±2.66 ^{bc}	403.49±0.02 ^{fcegd}	491.36±0.02 ^{bac}	1.94±0.62 ^{ba}	0.61±0.46 ^f
F15	36.1 ±2.65 ^{edf}	6.55±1.38 ^{cd}	25.68±1.9 ^{efdc}	5.52±1.14 ^{cd}	462.84±0.01 ^{fcebd}	288.63±0.03 ^{edcf}	0.68±0.34 ^{ba}	10.62±1.54 ^{bdac}
F16	39.83±2.63 ^{ebdfc}	4.6±0.83 ^d	27.13±1.99 ^{edc}	3.88±0.74 ^d	406.92±0.01 ^{fcegd}	370.73±0.03 ^{ebdacf}	0.19±0.01 ^b	8.027±1.50 ^{ebdacf}
F17	43.03±2.84 ^{ebdac}	18.17±5.49 ^{bcd}	26.44±2.12 ^{efdc}	13.67±5.19 ^{bcd}	413.2± 0.01 ^{fcegd}	329.76±0.04 ^{ebdacf}	0.67±0.34 ^{ba}	6.36±2.24 ^{ebdcf}
F18	30.402±2.74 ^{egf}	13.27±3.16 ^{cd}	20.31±1.91 ^{efd}	11±2.67 ^{bcd}	484.31± 0.03 ^{cb}	299.56±0.03 ^{ebdcf}	0.99±0.43 ^{ba}	10.90±1.60 ^{bdac}
F19	28.43±2.35 ^{gf}	8.14±2.44 ^{cd}	18.17±1.54 ^{ef}	6.92±2.33 ^{cd}	456.84±0.01 ^{fcebd}	398.74±0.04 ^{ebdac}	0.93±0.40 ^{ba}	7.36±1.57 ^{ebdacf}
F2	30.37±2.34 ^{egf}	12.32±3.19 ^{cd}	18.48±1.68 ^{ef}	8.5±1.98 ^{cd}	396.57± 0.01 ^{fegd}	374.49±0.03 ^{ebdacf}	0.47±0.24 ^b	5.21±1.53 ^{edcf}
F20	39.8±2.72 ^{ebdfc}	12.46±3.51 ^{cd}	25.06±1.97 ^{efdc}	10.31±2.68 ^{bcd}	420.98±0.01 ^{fcegd}	335.86±0.05 ^{ebdacf}	0.19±0.01 ^b	8.72±2.36 ^{ebdac}
F21	51.5±3.22 ^{ba}	10.54±2.09 ^{cd}	31.75±2.11 ^{bac}	8.17±1.59 ^{cd}	467.69±0.01 ^{fcebd}	394.63±0.03 ^{ebdac}	0.42±0.23 ^b	5.69±1.22 ^{edcf}
F22	39.66±4.08 ^{ebdfc}	14.17±2.43 ^{cd}	30.07±3.06 ^{bdc}	10.98±1.89 ^{bcd}	427.62±0.01 ^{fcegd}	398.38±0.03 ^{ebdac}	2.03±0.65 ^{ba}	7.491±1.43 ^{ebdacf}
F23	32.27±2.26 ^{egdf}	31.69±3.22^a	22.45±1.74 ^{efdc}	24.265±2.27^a	445.95±0.01 ^{fcebd}	533.7±0.01^a	0.14±0.01 ^b	0.43±0.36 ^f
F24	49.16±3.85 ^{bac}	19.83±3.01 ^{bc}	29.71±2.45 ^{bdc}	13.8±2.03 ^{bcd}	382.28±0.01 ^{fg}	389.27±0.02 ^{ebdacf}	1.19±0.50 ^{ba}	4.09±1.06 ^{edf}
F25	21.3±1.78 ^g	10.51±1.78 ^{cd}	16.82±1.52 ^f	8.343±1.47 ^{cd}	584.39±0.02^a	382.34±0.03 ^{ebdacf}	0.88±0.40 ^{ba}	7.25±1.35 ^{ebdacf}
F3	40.20±2.54 ^{ebdfc}	7.2±2.95 ^{cd}	25.56±2.01 ^{efdc}	5.55±2.18 ^{cd}	395.2±0.01 ^{fegd}	260.6±0.06 ^{ef}	0.22±0.01 ^b	12.55±2.85 ^{bac}
F4	35.173±2.85 ^{edf}	5.75±1.07 ^{cd}	23.82±2.19 ^{efdc}	4.38±0.72 ^d	409.1±0.01 ^{fcegd}	336.26±0.03 ^{ebdacf}	1.165±0.47 ^{ba}	7.9±1.48 ^{ebdacf}
F5	30.54±3.08 ^{egf}	5.29±1.70 ^d	20.86±2.32 ^{efd}	3.95±1.36 ^d	347.83 ±0.01 ^g	185.05±0.04 ^f	2.7±0.73^a	14.531±2.01^a
F6	34.14±2.81 ^{edf}	8.69±2.86 ^{cd}	24.38±2.24 ^{efdc}	6.63±2.11 ^{cd}	520.23±0.02 ^b	504.53±0.10 ^{ba}	1.77±0.63 ^{ba}	6.34±2.78 ^{ebdcf}
F7	39.692±2.12 ^{ebdfc}	26.424±3.94 ^{ba}	25.84±2.19 ^{efdc}	19.10±2.88 ^{ba}	412.87±0.01 ^{fcegd}	427.68±0.02 ^{ebdac}	0.18±0.02 ^b	2.66±0.98 ^{ef}
F8	45.37±2.95 ^{bdac}	7.417±1.54 ^{cd}	27.57±2.19 ^{edc}	5.42±1.24 ^{cd}	473.28±0.01 ^{cebd}	483.2±0.03 ^{bdac}	0.21±0.01 ^b	2.28±1.15 ^{ef}
F9	52.59 ± 4.84^a	12.571±3.97 ^{cd}	36.23±3.77 ^{ba}	6.89±1.76 ^{cd}	352.53±0.01 ^g	220.6 ±0.04 ^{ef}	1.25±0.52 ^{ba}	11.713±2.38 ^{bdac}
Mean	37.997	2.78	25.28	9.45	432.355	370.819	1.011095	7.044
Cv (%)	39.59	70.98	43.17	70.17	40.349	16.14	73.4	69.97
p ≤ 0.05	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001

Tot = (healthy pods + gnawed pods + rotten pods + others), Ncab =number of healthy pods, pmcab=average weight of healthy pods, tcp= rate of rotten pods. In each column, the averages followed by the same letter are not statistically different at the 5% level.

Table 9. Comparison of families according to production parameters during harvest years in the different zones.

	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
Familles	Pmff (g)	Pmff(g)	Pmfs (g)	Pmfs	Longfs (cm)	Longfs (cm)	Largfs (cm)	Largfs (cm)
F1	75.5 3±0.01 ^{bdc}	49.51±0.01 ^{bc}	1.54±0.01 ^c	1.38±0.02 ^c	2.38±0.02 ^{hegf}	2.41±0.03 ^{cb}	1.38±0.04 ^c	0.82±0.03 ^k
F10	76.28±0.01 ^{bdc}	75.28±0.01 ^{bac}	1.28±0.01 ^j	1.28±0.01 ^{ef}	2.34±0.02 ^{hji}	2.31±0.01 ^{gefh}	1.24±0.04 ⁱ	1.13±0.02 ^{egd}
F11	69.67±0.01 ^{dc}	58.23±0.01 ^{bc}	1.5±0.01 ^d	1.17±0.01 ^k	2.54±0.03 ^b	2.16±0.01 ^{kj}	1.32±0.04 ^e	1.083±0.02 ^g
F12	83.92±0.00 ^{bdac}	96.99±0.01 ^{ba}	1.37±0.01 ^g	1.31±0.01 ^{ed}	2.54±0.02 ^b	2.33±0.01 ^{gefd}	1.28±0.03 ^f	0.88±0.01 ^j
F13	76.48±0.01 ^{bdc}	99.18±0.01 ^{ba}	1.30±0.01 ^{ji}	1.16±0.01 ^k	2.39±0.02 ^{hegdf}	2.2±0.01 ^{ij}	1.24±0.03 ^{ih}	1.12±0.01 ^{eg}
F14	77.8±0.01 ^{bdc}	98.09±0.01 ^{ba}	1.57±0.01 ^b	1.47±0.01 ^a	2.50±0.02 ^{cb}	2.26±0.01 ^{gife}	1.36±0.04 ^{dc}	1.2±0.01 ^b
F15	82.77±0.01 ^{bdac}	61.83±0.00 ^{bac}	1.4±0.01 ^f	1.42±0.01 ^b	2.37±0.03 ^{hegif}	2.34±0.01 ^{cefd}	1.2±0.03 ^{gife}	1.21±0.01 ^{cb}
F16	80.18±0.01 ^{bdac}	104.06±0.01 ^{ba}	1.35±0.01 ^{hg}	1.33±0.01 ^d	2.45±0.04 ^{cd}	2.31±0.01 ^{gefh}	1.28±0.04 ^{gf}	1.19±0.01 ^{cebd}
F17	80.14±0.00 ^{bdac}	65.12±0.01 ^{bac}	1.37±0.01 ^g	1.25±0.01 ^{gih}	2.40±0.03 ^{egdf}	2.22±0.01 ^{ij}	1.25±0.04 ^{gife}	1.17±0.01 ^{cebd}
F18	82.2±0.00 ^{bdac}	64.79±0.01 ^{bac}	1.41±0.01 ^f	1.32±0.00 ^d	2.40±0.01 ^{egdf}	2.31±0.01 ^{gefh}	1.23±0.03 ⁱ	1.12±0.01 ^{cg}
F19	78.02±0.01 ^{bdc}	88.77±0.01 ^{bac}	1.25±0.01 ^k	1.41±0.00 ^{cb}	2.30±0.02 ^j	2.37±0.01 ^{cebd}	1.16±0.04 ^k	1.01±0.02 ^{ch}
F2	75.25±0.00 ^{bdc}	81.76±0.01 ^{ba}	1.31±0.01 ^{ji}	1.21±0.00 ^{ji}	2.32±0.02 ^{ji}	2.37±0.01 ^{cebd}	1.25±0.03 ^{gih}	1.15±0.01 ^{ced}
F20	125.3±0.00^a	55.16±0.01 ^{bc}	1.3±0.01 ^{hi}	1.1±0.00 ^l	2.43±0.02 ^{ed}	2.16±0.01 ^{kj}	1.26±0.03 ^{gife}	0.96±0.01 ^{fc}
F21	75.54±0.00 ^{bdc}	87.43±0.01 ^{bac}	1.29±0.01 ^j	1.28±0.00 ^{gf}	2.49±0.02 ^{cb}	2.47±0.01^a	1.23±0.03 ⁱ	1.14±0.01 ^{fc}
F22	77.15±0.00 ^{bdc}	96.7±0.01 ^{ba}	1.24±0.01 ^k	1.27±0.00 ^{gfh}	2.49±0.02 ^{cb}	2.34±0.01 ^{cebd}	1.19±0.04 ^j	1.15±0.01 ^{fc}
F23	79.46±0.00 ^{bdc}	96.28±0.01 ^{ba}	1.35±0.01 ^{hg}	1.26±0.00 ^{gfh}	2.40±0.02 ^{egdf}	2.29±0.01 ^{gefh}	1.27±0.03 ^{gfh}	1.19±0.01 ^{fc}
F24	66.05±0.00 ^d	88.92±0.01 ^{bac}	1.25±0.01 ^k	1.2±0.00 ^j	2.37±0.02 ^{hgif}	2.26±0.01 ^{gih}	1.23±0.03 ^j	1.0 ±0.01 ^{fch}
F25	99.4±0.01 ^{ba}	84.46±0.01 ^{bac}	1.54±0.01 ^c	1.34±0.00 ^d	2.43±0.02 ^{ed}	2.42±0.01 ^b	1.32±0.04 ^e	1.16±0.01 ^{fc}
F3	78.64±0.00 ^{bdc}	82.97±0.02 ^{bac}	1.41±0.01 ^f	1.24±0.01 ^{gih}	2.50±0.02 ^{cb}	2.29±0.01 ^{gefh}	1.34±0.04 ^{de}	0.89±0.02 ^{fcj}
F4	72.67±0.01 ^{bdc}	91.42±0.01 ^{bac}	1.3±0.01 ^{hi}	1.35±0.01 ^d	2.42±0.03 ^{edf}	2.39±0.01 ^{cbd}	1.32±0.04 ^e	1.23±0.02 ^{fc}
F5	73.83±0.00 ^{bdc}	32.31±0.00 ^c	1.49±0.01 ^d	1.2±0.00 ^{ih}	2.45±0.02 ^{cd}	2.30±0.01 ^{gefh}	1.40±0.05 ^b	1.18±0.02 ^{fc}
F6	87.72±0.00 ^{bdac}	111.17±0.02 ^{ba}	1.76±0.01^a	1.5±0.01^a	2.61±0.02^a	2.49±0.01^a	1.49±0.05^a	1.33±0.02^a
F7	78.35±0.01 ^{bdc}	83.86 ±0.01 ^{bac}	1.44±0.01 ^e	1.21±0.01 ^{ji}	2.46±0.04 ^{edf}	2.11±0.03 ^k	1.36±0.04 ^{dc}	0.68±0.02 ^l
F8	81.64±0.00 ^{bdac}	123.65±0.01^a	1.33±0.01 ^{hi}	1.09±0.00 ^l	2.45±0.02 ^{cd}	2.24±0.01 ^{ih}	1.23±0.03 ^j	0.99±0.01 ^{fh}
F9	66.62±0.00 ^{dc}	062.68±0.01 ^{bac}	1.25±0.01 ^k	1.09±0.00 ^l	2.347±0.02 ^{higi}	2.17±0.01 ^{kj}	1.2±0.03 ^j	1.12±0.01 ^{geg}
Mean	80.057	83.36	1.38	1.27	2.43	1.11	1.28	1.11
Cv (%)	4.91	6.44	15.18	14.74	8.18	14.59	9.52	14.59
p ≤ 0.05	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001

Pmff=average weight of fresh beans, Pmfs=average weight of dry beans, Longfs=length of dry beans, Largfs=length of dry beans. In each column, the averages followed by the same letter are not statistically different at the 5% level.

The hybrid families showed significant differences between them for all the parameters assessed ($p < .0001$) in each zone.

TOTAL NUMBER OF PODS, NUMBER OF HEALTHY PODS, AVERAGE WEIGHT OF PODS, AVERAGE WEIGHT OF FRESH FEVES PER POD

Families F10 and F9 had the highest total number of pods in the Divo zone, with mean values of 52.88 and 52.59 respectively. Family F25 had the lowest total number of pods, with an average of 21.3. In the Toumodi zone, family F23 had the highest total number of pods with an average of 31.69 and family F16 had the lowest total number of pods with an average of 4.6 (Table 8). Family F10 produced more healthy pods with an average of 37.91, compared with 16.82 healthy pods produced by family F25 in the Divo zone. On the other hand, in the Toumodi zone, the highest number of healthy pods was obtained by family F23 with an average of 24.27 and families F4, F5 and F16 obtained the lowest numbers of healthy pods with averages of 4.38, 3.95 and 3.88 respectively (Table 8).

The average weight of healthy pods in the Divo zone was highest for family F25, with an average value of 584.39 g. On the other hand, families F9 and F5 had the lowest average pod weights, at 352.53g and 347.83g respectively. In the Toumodi zone, family F23 had the highest average pod weight with an average value of 533.7 g and family F5 had the lowest average pod weight with an average of 185.05 g (Table 8).

In terms of the rate of rotten pods, family F5 had more rotten pods (14.53 %) and families F14 and F23 had fewer rotten pods, with rates of 0.61% and 0.43% respectively in the Toumodi zone. In the Divo zone, families F11 and F5 had more rotten pods, with rates of 2.73% and 2.7% respectively. Families F2, F21, F3, F8, F20, F16, F7, F10 and F23 had fewer rotten pods, with rates of 0.47 %, 0.42 %, 0.22 %, 0.21 %, 0.19 %, 0.18 % and 0.14 % respectively (Table 8).

AVERAGE WEIGHT OF FRESH BEANS PER POD, AVERAGE WEIGHT OF DRIED BEANS, LENGTH AND WIDTH OF DRIED BEANS

In the Divo zone, family F20 obtained the highest average weight of fresh beans per pod (125.3 g) and family F24 the lowest (66.05 g). In the Toumodi zone, family F6 had the highest average weight of fresh beans per pod (111.17 g) and family F5 had the lowest average weight of fresh beans per pod (32.31 g) (Table 9).

The average weight of dry beans was highest for family F6 (1.76 g) and lowest for family F22 (1.24 g) in the Divo zone. In the Toumodi zone, family F6 had the highest average dry bean weight (1.5 g) and family F8 the lowest (1.09 g) (Table 9).

The longest dry beans were obtained by family F6 (2.61 cm) and the shortest by family F19 (2.3 cm) in the Divo zone. However, in the Toumodi zone, families F6 and F21, with mean values of 2.49 cm and 2.47 cm respectively, obtained the longest dry beans, while family F7, with a mean value of 2.11 cm, came last (Table 9). The width of dry beans in the Divo zone was highest for family F6 (1.49 cm) and lowest for family F19 (1.6 cm). In the Toumodi zone, the greatest width of dry beans was obtained by family F6 (1.33 cm) and the smallest width of dry beans was obtained by family F7 with an average of 0.68 cm (Table 9).

POTENTIAL AND ACTUAL YIELDS

The highest potential yield with an average of 2808.4 kg/ha in the Divo zone was obtained by family F21, while family F5 had the lowest potential yield with an average of 1345.9 kg/ha. However, in the Toumodi zone, family F23 obtained the highest potential yield with an average value of 1862.2 kg/ha and families F5 and F16 with average values of 261.1 kg/ha and 258.3 kg/ha respectively obtained the lowest potential yields (Table 10).

Actual yields were highest in the Divo zone, with an average value of 1,723.8 kg/ha for family F21, and lowest for family F2, with an average value of 863.4 kg/ha. On the other hand, in the Toumodi zone, the real yield was higher for family F23 with an average value of 1437.7 kg/ha and lower for family F5 with 208.1 kg/ha (Table 10).

SELECTION OF COCOA TREES BASED ON PRODUCTION PARAMETERS

The information provided by the two axes used in the principal component analysis of families in the Divo zone accounted for 83.34 % of the variability observed. Axis 1 accounted for 58.93 % of total variability. The variables dry bean weight, total number of pods and potential yield constructed this axis with cosines squared ranging from 0.493 to 0.857. Axis 2 expressed 26.23 % of the total variability. The rotten pod rate variable with a cosine squared of 0.780 constructed this axis (Figure 6A). Hierarchical ascending classification (HAC) (Figure 6B) indicated three groups of cocoa trees according to production parameters in the Divo zone. The first group was made up of families F5, F14, F1, F11 and F6. This group was characterised by high values for the variables rotten pod rate and average dry bean weight, and low values for the total number of pods and potential yield. The second group was made up of families F25, F18, F12, F15, F4, F3, F7, F16, F20, F19, F2 and F23. This group was characterised by low values for the variables rotten pod rate, total number of pods, potential yield and average dry bean weight. The third group was made up of families F22, F17, F13, F8, F10, F24, F9 and F21. This group was

Table 10. Comparison of families based on potential and actual yields during the harvest years in the different zones.

	Divo	Toumodi	Divo	Toumodi
Familles	Rdtp (kg/ha)	Rdtp (kg/ha)	Rdtr (kg/ha)	Rdtr (kg/ha)
F1	1905.5±164.62 ^{fcebd}	448.1±170.52 ^c	1219. ±114.22 ^{ebdc}	394.3±151.42 ^c
F10	2303.9±145.4 ^b	426.3±74.25 ^c	1647.6±113.36 ^{ba}	388.6±66.38 ^c
F11	1768.9±169.01 ^{fcebd}	382±100.93 ^c	1209.9±119.71 ^{ebdc}	340.6±88.95 ^c
F12	1776.2±126.63 ^{fcebd}	467±119.25 ^c	1197.7±96.08 ^{ebdc}	349.7±91.05 ^c
F13	2244.5±164.57 ^{cb}	415.8±83.02 ^c	1502.1±122.57 ^{bac}	339.4±70.71 ^c
F14	1556.8±148.86 ^{fed}	1014±141.65 ^{bc}	1037.1±111.92 ^{edc}	831±112.32 ^{bc}
F15	1827.7±130.74 ^{fcebd}	336.9±64.64 ^c	1298.2±93.27 ^{ebdac}	286.3±53.99 ^c
F16	1879.2±131.28 ^{fcebd}	258.3±40.39 ^c	1272.7±98.87 ^{ebdac}	217.8±36.24 ^c
F17	2152±156.90 ^{cbd}	1015±351.24 ^{bc}	1308.1±112.5 ^{ebdac}	799.7±341.88 ^{bc}
F18	1745.7±191.56 ^{fcebd}	834.7±205.34 ^{bc}	1191.1±150.50 ^{ebdc}	697.6±175.67 ^{bc}
F19	1500.3±124.62 ^{fed}	570.1±175.32 ^c	961.2±86.00 ^{ed}	493.3±162.33 ^c
F2	1424.9± 15.25 ^{fe}	618.7±151.27 ^c	863.4±82.07 ^e	440.8±98.16 ^c
F20	1900.7±145.34 ^{fcebd}	757.3±217.58 ^c	1164.7±99.44 ^{ebdc}	626.4±166.42 ^{bc}
F21	2808.4 ± 176.03^a	617.4±108.28 ^c	1723.8±115.16^a	493.3±87.41 ^c
F22	1995.5±182.12 ^{fcebd}	919.5±152.85 ^{bc}	1496.5±136.55 ^{bac}	717.4±121.08 ^{bc}
F23	1567.5±104.36 ^{fed}	1862.2±187.49^a	1090±80.35 ^{edc}	1437.7±131.06^a
F24	2262.4±185.50 ^{cb}	988.5±150.25 ^{bc}	1353.2±112.55 ^{ebdac}	722.2±117.69 ^{bc}
F25	1560.7±150.65 ^{fed}	691.8±120.81 ^c	1237.8±128.40 ^{ebdac}	550.9±97.90 ^{bc}
F3	1846.3±121.22 ^{fcebd}	358.4±135.28 ^c	1158.1±88.87 ^{ebdc}	278.4±98.69 ^c
F4	1766±152.20 ^{fcebd}	310.4±55.99 ^c	1206.5± 115.77 ^{ebdc}	240±38.19 ^c
F5	1345.9±155.22 ^f	261.1±86.3 ^c	927.4±113.37 ^{ed}	208.1±72.29 ^c
F6	2134.4±175.87 ^{cebd}	670.5±237.96 ^c	1498.7±132.89 ^{bac}	525.5±188.20 ^c
F7	1831.4±156.90 ^{fcebd}	1454±227.68 ^{ba}	1177.7±80.35 ^{ebdc}	1119.9±195.49 ^{ba}
F8	2372.1±153.84 ^b	395.7±83.15 ^c	1428.6±113.67 ^{bdac}	286.9±62.81 ^c
F9	2208.8±195.28 ^{cbd}	512.1±133.24 ^c	1485.6±145.42 ^{bac}	301.8±70.39 ^c
Mean	1906.64	697.958	1265.634	551.4113
Cv (%)	43.68	45.92	46.76	46.83
p ≤ 0.05	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001

Rdtp=potential yield, Rdtr=actual yield. In each column, the averages followed by the same letter are not statistically different at the 5% level.

characterised by high values for potential yield and total number of pods, and low values for rotten pod rate and dry bean weight.

In the Toumodi zone, principal component analysis of families expressed 88.8 % of the variability observed. Axis 1 accounted for 63.37 % of total variability. The variables potential yield, total number of pods and rate of rotten pods, with respective cosines squared of 0.894, 0.610 and 0.486, formed this axis. Axis 2 accounted for 25.42 % of total variability. The dry bean weight variable with a cosine squared of 0.796 constructed this axis (Figure 7A).

However, hierarchical ascending classification (HAC) (Figure 7B) indicated four groups of cocoa trees according to production parameters in the Toumodi zone. The first group was made up of families F5, F3, F11, F13 and F9. This group was characterised by high values for the rotten pod rate variable and low values for the dry bean weight, potential yield and total number of pods variables. The second group was made up of families F15, F1, F16, F12,

F10, F18, F25, F4, F19 and F6. This group was characterised by high values for the variables rotten pod rate and dry bean weight, and low values for the variables total number of pods and potential yield. The third group was made up of families F21, F22, F17, F2, F8, F20 and F20. The second group was characterised by intermediate values between the parameters assessed. The fourth group was made up of families F14, F7 and F23. This group was characterised by high values for the variables total number of pods and potential yield, and low values for the variables rotten pod rate and dry bean weight.

DISCUSSION

The study conducted on twenty-five (25) cocoa genotypes after nine (09) years of planting in two zones with different rainfall showed the depressive effect of drought on growth and development parameters such as trunk diameter, trunk

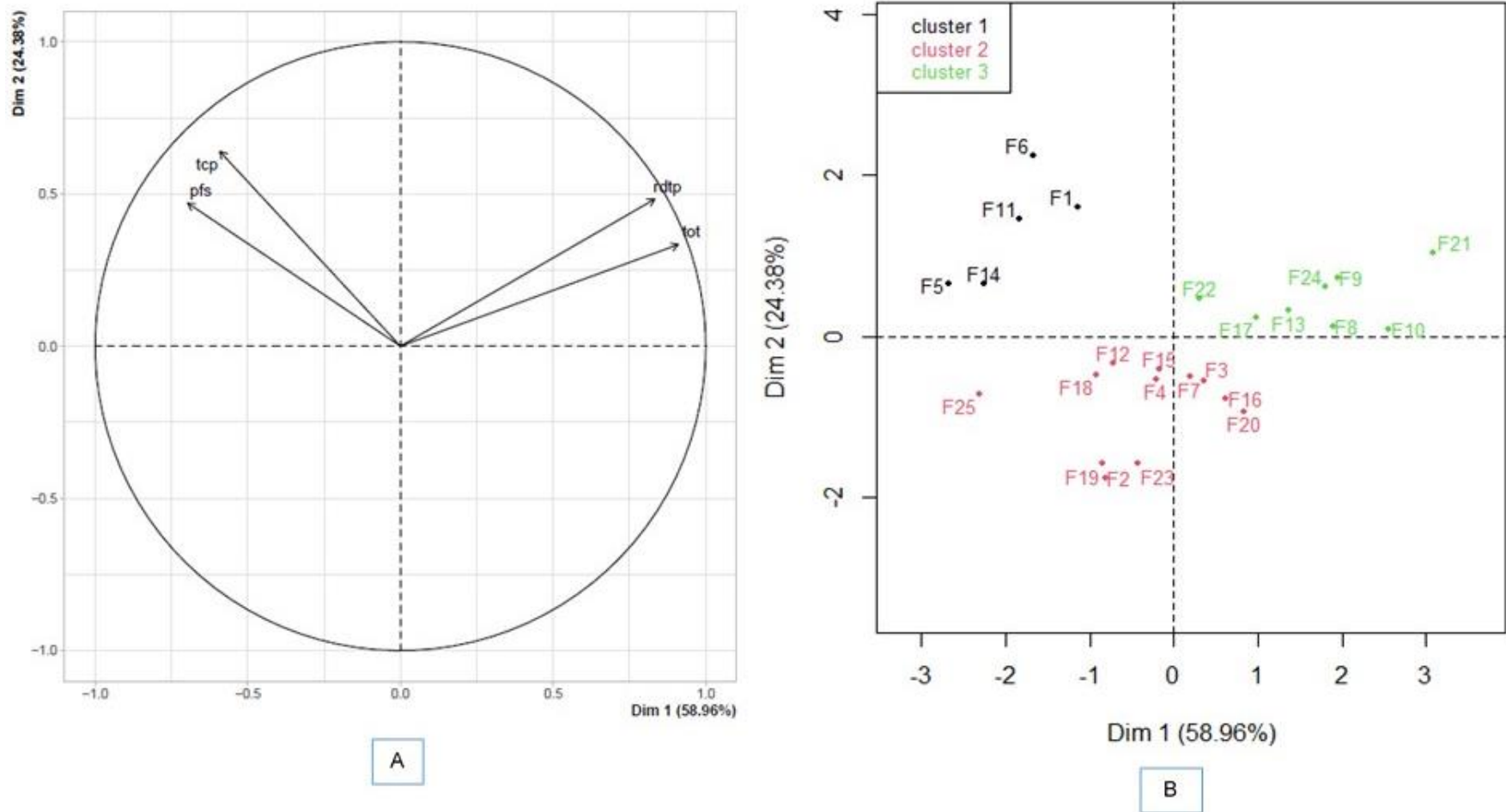


Figure 6. Selection of hybrid families according to production variables assessed in the field in the Divo area. **A)** Correlation circle between vigour variables and mortality rate along axes 1 and 2; **B)** Ascending hierarchical classification of individuals along axes 1 and 2.

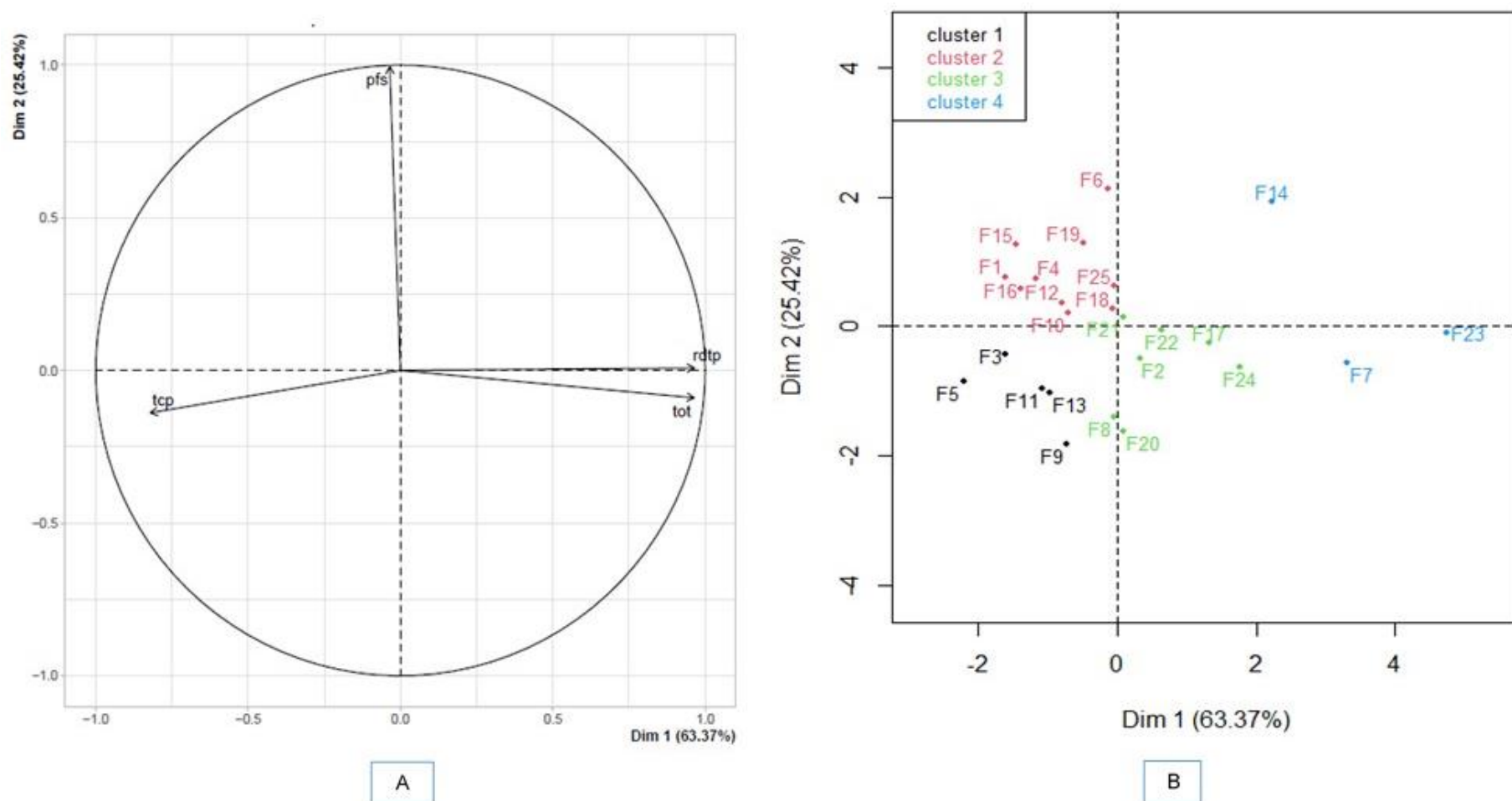


Figure 7. Selection of hybrid families according to production variables assessed in the field in the Toumodi zone. **A)** Correlation circle between vigour variables and mortality rate along axes 1 and 2; **B)** Ascending hierarchical classification of individuals along axes 1 and 2.

section and total leaf area. However, the mortality rate increased with the severity of the drought.

The effect of the drought altered the visual appearance of the cocoa trees in the Toumodi zone, where rainfall is deficient, unlike in the Divo zone. The cocoa trees showed a folding of the leaf blade around the central vein. At the same time, the colour of the leaves changed from pure green to light green, with patches of yellowing appearing from the apical end of the leaves and spreading inwards. This phenomenon marks the beginning of the water shortage. Depending on the duration of the drought, the necroses invaded the leaf blade, which became less turgid, and this was followed by a gradual desiccation of the cocoa plants from the apex down to the roots, leading to the tree's death. Hybrid families F21, F24, F23, F25, F4, F22 and F15 showed the lowest mortality rates. This results are in line with those of *Chaves et al.* (2002) and *Lebon et al.* (2006). Where the growth and development of the leaves of a plant grown under water-limited conditions are severely disrupted. Plants subjected to severe water deficit due to drought generally experience accelerated leaf senescence, and excessive water loss can lead to cell death and, in turn, tree death (*Kramer and Boyer, 1995; Bouchabke et al., 2006*).

Growth and development parameters (trunk diameter, trunk cross-section, leaf area) of cocoa genotypes decreased with the severity of the drought in the Toumodi area. The F14, F17 and F24 hybrid families were less affected in diameter growth at 30 cm from the ground compared with their controls in the Divo zone, and the F14, F23, F25 and F24 families in trunk section compared with the other hybrids in the same zone. This capacity to increase diameter and cross-section could be explained by the hybrid vigour (heterozygosity) of these families to develop under water stress. This results are in line with those of *Boyer (1971, 1973), Alvim (1978), M'bo (2015)* and *Kouamé et al. (2021)*, who showed that vegetative growth (diameter and section) discriminated between varieties subjected to drought-induced water stress. The same depressive effect of drought was observed for total leaf area in the Toumodi area. However, only the F22, F1, F19 and F21 hybrid families produced the largest leaf areas. This great variability within hybrid families for the total leaf area parameter confirmed the sensitivity of the cocoa tree to the slightest variation in soil moisture. According to *Lebon et al. (2004)*, one of the first reactions of plants to water deficit is to reduce leaf area and the number of functional leaves. This results also confirmed those of *Ferryra et al. (2004), Balasimha et al. (2008), Adra (2010), Apshara et al. (2013)* and *Kouamé et al. (2021)*, who demonstrated that vegetative development under conditions of limited water supply in the field is greatly disrupted, mainly by a significant reduction in the number of functional leaves and leaf area. This reduction in vegetative development is one of the responses of plants to dehydration, in order to conserve water resources and enable plant survival (*Lebon et al., 2004; Kouamé et al.,*

2021). The leaves of plants subjected to water deficit usually reach smaller final sizes than those of the controls (*Granier et al., 2000*), with denser venation and peripheral protection increased by a thicker cuticle and greater pilosity. The morphological parameters linked to the pods (thickness of the cortex, shape, size and volume of the pod), the number of normal beans, the number of flat beans and the production parameters (number of pods, average weight of pods, average weight of fresh beans, average weight of dry beans, length and width of dry beans or merchantable cocoa and potential yield) assessed showed the impact of drought on all these parameters measured. This results showed great variability within hybrid families for all parameters related to pods and production parameters. This high variability is a characteristic of the *Theobroma cacao* species. For the families studied, the study showed that the values for the average thickness of the cortex of the pods, the size and shape of the pods, the average volume of the pods and the average number of normal and flat beans were higher in the Divo area than in the Toumodi area. There was a significant difference between the mean obtained in the Divo zone and that obtained in the Toumodi zone ($P < 0.0001$). In the Toumodi zone, hybrid families F16, F3, F12, F25, F18, F19, F20, F21, F22 and F6 were characterised by high values for the variables pod shape, pod volume, cortex thickness and number of normal beans.

As for production parameters, the F14, F7 and F23 hybrid families were characterised by high values for the total number of pods and potential yield variables and low values for the pod rate variables. However, in the Divo zone, families F16, F3, F12, F25, F18, F19, F20, F21, F22 and F6 had high values for the variables pod shape, pod volume, cortex thickness and number of normal beans. In terms of production parameters, the F22, F17, F13, F8, F10, F24, F9 and F21 hybrid families had high values for potential yield and total number of pods, and low values for rotten pod rate and dry bean weight.

These results could be explained due to the fact that the study was conducted in two contrasting zones. The Divo area has normal rainfall, with annual rainfall of at least 1,200 mm, which is well distributed and provides the cocoa trees with the necessary amount of water to ensure good fruit development. On the other hand, the Toumodi area has a lack of rainfall, with periods of drought lasting up to three or four consecutive months, which is detrimental not only to the good establishment of young cocoa trees in the field, but also, as this results show, has an impact on the volume of pods, the weight of pods, the thickness of the cortex of pods, the number of pods, the average weight of fresh beans, and the length and width of beans. With regard to the average weight of a merchantable cocoa bean, the analysis revealed in this study showed a significant difference between the average obtained at Divo (1.39 g) and that obtained at Toumodi (1.27 g). Indeed, studying the weight of a cocoa bean from 15 hybrid

families planted in Divo (an area with normal rainfall) and Abengourou (an area with low rainfall), Tahi et al. (2019) found that the average weight of a merchantable cocoa bean from hybrid families was lower in Abengourou than in Divo, thus highlighting the negative impact of cocoa-growing areas with low rainfall on the weight of merchantable cocoa beans. All the hybrid families assessed in the Divo area produced merchantable cocoa beans weighing well above the threshold value (1.2 g) according to the International Germplasm Cocoa Database (IGCD) standards. In the Toumodi area, twenty (20) hybrid families produced merchantable cocoa beans weighing 1.2 g or more and five (05) families produced merchantable cocoa beans weighing between 0.9 g and 1.2 g according to the International Germplasm Cocoa Database (IGCD) standards. However, as the weight of merchantable cocoa beans is a highly heritable trait (Lachenaud, 2007), this trait exists within the F6 hybrid family with an average value of 1.76 g in the Divo zone and 1.50 g in the Toumodi zone. The ability of these families to reduce the number of pods on the trees and the number of beans inside the pods in the low-rainfall zone would have favoured good development of the beans inside the pods and good yields from the F23 and F7 hybrid families. Lachenaud (1991) has shown that there is intra-tree competition between the number of pods, pod weight and, by extension, the weight of beans per pod. An increase in one could, under unfavourable environmental conditions, lead to a reduction in the other. This competition would also take place within the pod itself between the number of beans and the average weight of the beans (Lachenaud 2014). According to Falalou (2000), the resistance of cocoa trees to drought in agronomic terms is their capacity to produce when transpiration can only partially meet the evaporative demand of the atmosphere due to insufficient availability of water absorption and transfer.

CONCLUSION

The aim of this study was to carry out agro-morphological, technological and production characterisations of cocoa pods (*Theobroma cacao* L.) from 25 hybrid families planted in two zones with different rainfall. The results presented gives an understanding how the cocoa-growing zone could have an impact on the agro-morphological, technological and production performances of the families. In addition, the results showed the existence of significant genetic variability for vigour, growth, development and production parameters in both the Divo and Toumodi zones.

In the Divo zone, families F23, F22, F7, F19, F5, F18, F25, F15, F1, F16, F24 and F13 were characterised by large diameters at 30 cm from the ground, large sections and large total leaf areas. Families F11, F22, F13, F23, F18, F21, F6, F12 and F25 were characterised by high values for the variables pod shape, pod volume, cortex thickness and number of normal beans. Families F22, F17,

F13, F8, F10, F24, F9, F21 were characterised by high values for potential yield, total number of pods and low values for the rate of rotten pods. In the Toumodi area, families F1, F13, F19, F15, F4, F18, F12, F16, F7, F25, F14, F10, F22, F24, F21 and F23 stood out for their diameter at 30 cm from the ground, cross-section and total leaf area; F16, F3, F12, F25, F18, F19, F20, F21, F22 and F6 were characterised by large pod shapes, large pod volumes with a large number of normal beans and very thick cortexes, and the F14, F23 and F7 families produced more pods with a low brown rot rate and the best potential yields. Among the best hybrid families evaluated, F22, F13, F18, F6, F12, F25, F15 and F21 were the best for most of the parameters studied in both zones. In addition to these families, F23, F14 and F7 performed better in the Toumodi zone. Family F6 had the highest average weight of a merchantable cocoa bean in both Divo (1.76 g) and Toumodi (1.5 g), suggesting the presence of elite trees in terms of bean size.

REFERENCES

- Adra M (2010).** Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress hydrique. Thèse de doctorat. Univ. Mentouri. Constantine: 118 p.
- Apshara SE, Rajesh MK, Balasimha D (2013).** Assessment of morphological, physiological and molecular characteristics of cocoa accessions from central and South America in relation to drought tolerance. *J. Plant Crops*. 41:389-397.
- Assiri AA, Yoro GR, Deheuvels O, Kebe BI, Keli ZJ, Adiko A, Assa A (2009).** Les caractéristiques agronomiques des vergers de cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire. *J. Anim. Plant Sci.*, 2(1): 55-56.
- Balasimha D, Anil KV, Ananda KS (2008).** Photosynthetic characteristics and yield in cocoa hybrids. *J. Plantation Crops*, 36:8-11.
- Bouchabke O, Tardieu F, Simonneau T (2006).** Leaf growth and turgor in growing cells of maize (*Zea mays* L.) respond to evaporative demand under moderate irrigation but not in water-saturated soil. *Plant Cell and Environment*, 29(6):1138-1148.
- Boyer J (1971).** Etude des principales composantes du microclimat d'une cacaoyère au Cameroun. Importance écologique des variations spatiales et saisonnières. *Café-Cacao-Thé*, 15:275-300.
- Boyer J (1973).** Etude particulière des facteurs hydriques de la croissance des cacaoyers. *Café Cacao Thé*, 17:189-204.
- Braudeau J (1969).** Le cacaoyer. GP. Maisonneuve et Larose, Ed. Paris 304 p.
- Brou YT, Akindès F, Bigot S (2005).** La variabilité climatique en Côte d'Ivoire: entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cahiers Agricultures, Agence Universitaire de la Francophonie (AUF)*. Novembre-Décembre 2005, 14:17-33.
- Chaves MM, Pereira JS, Maroco J, Rodrigues ML, Ricardo CPP, Osório ML, (2002).** How plants cope with water stress in the field: photosynthesis and growth. *Ann. Bot.*, 89:907-916.
- Dorin B (2003).** De la fève ivoirienne de cacao à la plaquette française de chocolat noir. Rapport final CIRAD-AMIS 62 pages.
- Ehounou JN, Kouamé B, Tahi MG, Kassim EK, Dékoula CS, Yao GF, Kouadio HK, N'Guessan AEB, Soro N (2019).** Impact of Local Global Warming on Rainfall and Annual Cocoa Water Requirements in the Regions of Loh-Djiboua and Gôh in West-central Côte d'Ivoire. *Int. J. Environ. Clim. Change*, 9:503-517.
- Falalou H (2000).** Réponse physiologique du niébé (*Vigna unguiculata* L. Walp) au déficit hydrique s'exerçant au cours de deux stades de développement: début floraison et début formation des gousses. Mémoire de D.E.A. Université de Ouagadougou, BP 7021; 62 p.
- Ferryra R, Sellés G, Ruiz RS, Sellés IM (2004).** Effect of water stress induced at different growth stages on grapevine cv. Chardonnay on production and wine quality. *Acta Hort.* 664:233- 236p.

- Granier C, Inzé DF, Tardieu (2000).** Spatial distribution cell division rate can be deduced from that of P34cdc2 kinase activity in maize leaves grown in contrasting conditions of temperature and water status. *Plant Physiol.* 124:1393-1402.
- ICCO (2012).** International cocoa organization. Quarterly Bulletin of cocoa statistic.
- ICCO (2019).** ICCO Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, Vol. XLV, No.3, Cocoa year 2018/19.
- ICCO (2021).** Quarterly bulletin of Cocoa statistics, Cocoa year 2020/2021.
- Kassin KE, Doffangui K, Kouamé B, Yoro RG, Assa A (2008).** Variabilité pluviométrique et perspectives pour la replantation cacaoyère dans le Centre Ouest de la Côte d'Ivoire, *J. App. Biosci.*, 12:633-641.
- Kébé BI, N'guessan KF (2003).** Rapport de la mission de prospection du swollen shoot. C.N.R.A -Divo, Côte d'Ivoire. 7 p.
- Koné YR, Kébé IB, (1998).** Etude de la structure actuelle des populations de *Phytophthora* spp., agents de la pourriture brune des cabosses du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire. Mémoire de D.A.A. Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire.
- Koua SH, Coulibaly NAMD, Alloué-Borand WAM (2018).** Caractérisation des vergers et des maladies de cacao de Côte d'Ivoire: cas des départements d'Abengourou, Divo et Soubré 35(3):5706-5714.
- Kouakou K, Kebe BI, Kouassi N, Anno AP, Ake S, Muller E (2011).** Impact de la maladie virale du swollen shoot du cacaoyer sur la production de cacao en milieu paysan à Bazre (Cote d'Ivoire). *J. App. Biosci.*, 43:2947-2957.
- Kouamé N, N'Guessan F, N'Guessan H, N'Guessan P, Tano Y (2015).** Variations saisonnières des populations de mirides du cacaoyer dans la région de l'Indénie-Djuablin en Côte d'Ivoire. *J. App. Biosci.*, 83:7595.
- Kouamé, ST, Tahi MG, Sekou A, Cilas C, Akaffou SD (2021).** Evaluation of New High-Producing Hybrids of Cocoa Trees in Marginal Crop Areas in Cote d'Ivoire. *Agric. Sci.*, 12:1508-1526. <https://doi.org/10.4236/as.2021.1212096>.
- Kramer JP, Boyer JS (1995).** *Water Relations of Plants and Soils* Academic Press, Inc. A Division of Harcourt Brace & Company 525 B Street, Suite 1900, San Diego, California 92101-4495: 482 p.
- Lachenaud P (2014)** Guide d'identification des cacaoyers (Martinique). Document technique et de recherche, CIRAD, Montpellier, Guyane français. Upr 106, 15 pages.
- Lachenaud P (1991).** Facteurs de la fructification chez le cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) Influence sur le nombre de graine par fruit. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris (France); 186 pages.
- Lachenaud P (2007).** Fruit trait variability in wild cocoa trees (*Theobroma cacao* L.) from the Camopi and Tanpok basins in French Guiana. *Acta Botanica Gallica* 154: 117-128.
- Lebon E, Anne P, Gae TL, Jeremie L (2006).** Branch Development Controls Leaf Area Dynamics in Grapevine (*Vitis vinifera*) Growing in Drying Soil. *Ann. Bot.*, 98:175-185.
- Lebon E, Pellegrino A, Tardieu F, Lecoœur J (2004).** Shoot development in grapevine is affected by the modular branching pattern of the stem and intra and inter-shoot trophic competition. *Annals of Botany.* 93:263-274.
- M'bo KAA (2015).** Adaptation des cacaoyers [*theobroma cacao* L. (malvaceae)] à la sécheresse: étude des paramètres morphologiques, physiologiques, biochimiques et des marqueurs moléculaires de la tolérance. Thèse de doctorat. Univ. Felix Houphouët-Boigny: 239p.
- Tahi GM, Guiraud BS, Kassin KE, Kouame B, Ehounou JN, Kouadio H (2019).** Une approche intégrée pour améliorer l'efficacité et la résilience des cacaoyers au changement climatique par une meilleure utilisation des ressources génétiques du cacao en Côte d'Ivoire: première phase. Rapport Technique de Fin du Projet Bioversity en Côte d'Ivoire; 43 pages.
- Tahi GM, Lachenaud P, N'Guessan KF, N'Goran NKJ, Pokou D, Kébé IB, Paulin D, Cilas C, Eskes AB (2011).** Selection of new varieties on-station and on-farm in Côte d'Ivoire. Final Report of the CFC/ICCO/Bioversity International Project on "Cocoa Productivity and Quality improvement: a Participatory Approach" (2004-2010): pp. 42-58.
- Tahi GM, Trébissou IC, Guiraud SB, Ribeyre F, Lachenaud Ph, Pokou ND, N'Guessan KF, Walet PN, Aka AR, Coulibaly K, Kébé BI, Assi EM, Koné B, Kassin KE & Cilas C (2017).** Second cycle de sélection récurrente du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire: paramètres génétiques chez les deux population's constitutives après treize années d'observation, pp 1-12. In: Proc, International Symposium on Cocoa Research (ISCR), Lima (Peru).

COMMUNICATIONS ORALES ET AFFICHEES

	COMMUNICATIONS ORALES		
N°	PERIODES	LIEUX	THEMES
1	DU 30/11/2022 AU 01/12/2022	UJLoG DALOA	Evaluation du comportement de nouveaux hybrides de cacaoyers hauts producteurs en zones de cultures marginales en Côte d'Ivoire
2	DU 10/05/2023/ AU 12/05/2023	UJLoG DALOA	Impact de la sécheresse sur des familles d'hybrides de cacaoyers (<i>Theobroma cacao L.</i>) en Côte d'Ivoire
3	DU 28/11/2023 AU 01/12/2023	PASRES UPGCK KORHOGO	Sélection de génotypes de cacaoyers (<i>Theobroma cacao L.</i>) en serre et adaptés aux zones de faible pluviométrie en Côte d'Ivoire.
4	DU 13/12/2023 AU 15/12/2023	UJLoG DALOA	Critères agro-physiologiques pour la sélection de génotypes de cacaoyers (<i>Theobroma cacao L.</i>) tolérants au stress hydrique induit en serre
5	DU 11/03/2024 AU 14/03/2024	CAMES YAMOUSSOUKRO	Synthèse des pigments chlorophylliens et accumulation des métabolites secondaires de nouveaux hybrides de cacaoyers (<i>Theobroma cacao L.</i>) à haut rendement dans adaptation à la sécheresse en Côte d'Ivoire
	COMMUNICATIONS AFFICHEES		
1	DU 09/04/2024 AU 13/04/2024	SACOT Dabou	Paramètres agro-physiologiques pertinents pour la sélection de variétés de cacaoyers (<i>Theobroma cacao L.</i>) tolérants au stress hydrique induit en serre
2	DU 15/10/2024 AU 17/10/2024	UPGCK KORHOGO	Pigments chlorophylliens et accumulation des métabolites secondaires impliqués dans la résistance de nouveaux hybrides de cacaoyers (<i>Theobroma cacao L.</i>) à la sécheresse en Côte d'Ivoire.

Résumé

La sécheresse due au changement climatique, est provoquée par la déforestation. Elle modifie les précipitations, l'humidité et la température de l'air. Cette situation menace davantage la durabilité de la cacaoculture, source de revenu de 6 millions de personnes dans certaines régions où la pluviométrie est comprise entre 900 et 1200 mm. Face à ce nouveau contexte de production, de nouvelles variétés résistantes/tolérantes doivent être développées et proposées aux producteurs. Cette thèse s'inscrit dans cette optique avec pour objectif général de sélectionner de nouvelles variétés de cacaoyers résistants/tolérants au déficit hydrique. Pour atteindre cet objectif fixé, plusieurs expérimentations ont été réalisées sur différents sites d'étude. L'approche méthodologique a été en premier lieu d'évaluer 31 familles hybrides en serre à Soubré. Par la suite, 23 familles d'hybrides ont été évaluées au champ dans les zones à pluviomètre déficitaire de Djékanou, Toumodi, Yamoussoukro à trois ans et dans la zone de Toumodi à 9 ans avec leurs témoins respectifs dans la zone de Divo. Dans une seconde étape, la détermination des pigments chlorophylliens et des métabolites secondaires impliqués dans l'adaptation des familles d'hybrides au déficit hydrique au champ à 3 ans et à 9 ans, a été réalisée. Dans une troisième étape, les paramètres génétiques impliqués dans la tolérance et/ou résistance des familles d'hybrides au déficit hydrique ont été évalués. Les résultats ont montré une augmentation de la mortalité, de la masse spécifique foliaire et une diminution de vigueur dans les régimes hydriques déficitaires (50 % et 20%), au champ en zones de pluviométries déficitaires selon les différents âges et des rendements à 9 ans. Aussi, une diminution des pigments chlorophylliens, des teneurs en phénols totaux, protéines solubles, excepté les teneurs en proline, a été enregistrée en zone de pluviométries déficitaires. L'analyse des paramètres génétiques a montré la prédominance de l'ASC sur l'AGC pour toutes les variables dans les différentes zones. Les héritabilités ont été instables et la tendance générale est à l'évolution progressive des héritabilités au sens large. Les rapports entre les variances de l'ASC et de l'AGC ont été inférieurs à 1 dans toutes les zones, ce qui justifie de la dominance dans la transmission des caractères de résistance. Tous ces mécanismes agro-physiologiques, biochimiques et génétiques ont permis de sélectionner 04 familles d'hybridés (F21, F20, F12 et F14) pour leurs performances dans les trois régimes hydriques (100 % CC, 50 % Cc et 20 % CC) en serre. Onze (11) familles d'hybrides ont été sélectionnées pour leurs performances au champ sur l'ensemble des zones d'étude à 3 ans et à 9 ans. Cinq (05) familles d'hybrides (F12, F14, F7, F6 et F15) ont été meilleures pour l'ensemble des paramètres agro-physiologiques, production et biochimiques au champ dans les parcelles de 9 ans à Toumodi. Deux stratégies de sélections ont été définies ; une portant sur les aptitudes spécifiques à la combinaison de 13 descendants qui sont IFC1 X MC67 ; IFC1 X SCA6 ; IFC1X T60/887 ; IFC1 X UPA409 ; IMC67 X SCA6 ; T60/887 X IMC67 ; POR X T60/887 ; SCA6 X IMC67 ; SCA6 X UPA409 ; POR X IFC1 ; T60/887 X POR ; T60/887 X SCA6 et UPA409 X SCA6. Ces croisements spécifiques sont susceptibles de constituer une sortie variétale une fois leurs paramètres de production étudiés. L'autre stratégie serait de les impliquer comme géniteurs dans les programmes futurs d'amélioration variétale pour la résistance/tolérance à la sécheresse.

Mots clés : Déforestation, Changement climatique, Sécheresse, Hybrides résistants, *Thobroma cacao*,

Summary

Drought caused by climate change is exacerbated by deforestation. It alters precipitation, humidity and air temperature. This situation further threatens the sustainability of cocoa farming, a source of income for 6 million people in certain regions where rainfall is between 900 and 1,200 mm. In response to this new production context, new resistant/tolerant varieties must be developed and offered to producers. This thesis is part of this approach, with the overall objective of selecting new varieties of cocoa trees that are resistant/tolerant to water deficit. To achieve this objective, several experiments were carried out at different study sites. The methodological approach was first to evaluate 31 hybrid families in a greenhouse in Soubré. Subsequently, 23 hybrid families were evaluated in the field in the rainfall-deficient areas of Djékanou, Toumodi and Yamoussoukro at three years and in the Toumodi area at nine years, with their respective controls in the Divo area. In a second stage, the chlorophyll pigments and secondary metabolites involved in the adaptation of hybrid families to water deficit in the field at three and nine years were determined. In a third stage, the genetic parameters involved in the tolerance and/or resistance of hybrid families to water deficit were evaluated. The results showed an increase in mortality and specific leaf mass and a decrease in vigour in water-deficient regimes (50% and 20%) in the field in areas with low rainfall, depending on age and yields at 9 years. In addition, a decrease in chlorophyll pigments, total phenol content, and soluble proteins, except for proline content, was recorded in areas with low rainfall. Analysis of genetic parameters showed the predominance of ASC over AGC for all variables in the different areas. Heritabilities were unstable, and the general trend was towards a gradual evolution of heritabilities in the broad sense. The ratios between ASC and AGC variances were less than 1 in all areas, which justifies the dominance in the transmission of resistance traits. All these agro-physiological, biochemical and genetic mechanisms made it possible to select four hybrid families (F21, F20, F12 et F14) for their performance in the three water regimes (100% CC, 50% Cc and 20% CC) in the greenhouse. Eleven (11) hybrid families were selected for their performance in the field across all study areas at 3 and 9 years. Five (5) hybrid families (F12, F14, F7, F6 and F15) performed best for all agro-physiological, production and biochemical parameters in the field in the 9 year plots in Toumodi. Two selection strategies were defined, one focusing on the specific aptitudes of the combination of 13 descendants, which are IFC1 X MC67; IFC1 X SCA6; IFC1X T60/887; IFC1 X UPA409; IMC67 X SCA6; T60/887 X IMC67; POR X T60/887; SCA6 X IMC67; SCA6 X UPA409; POR X IFC1; T60/887 X POR; T60/887 X SCA6 and UPA409 X SCA6. These specific crosses are likely to constitute a varietal release once their production parameters have been studied. The other strategy would be to involve them as parents in future varietal improvement programmes for drought resistance/tolerance.

Key word : Deforestation, Climate change, Drought, Resistant hybrids, *Thobroma cacao*