

UNIVERSITE DU BENIN  
\*\*\*\*\*  
FACULTE DES SCIENCES  
\*\*\*\*\*



CS - 03418

**THESE**

Présenté par

**M. Koffi-Sa BEDJA**

Pour obtenir le grade de

**Docteur d'Etat és-Sciences**

**CONTRIBUTION A LA SECURITE  
DES INSTALLATIONS ELECTRIQUES  
APPLICATION A L'AMELIORATION DES  
PRISES DE TERRE EN ZONES TROPICALES**

Soutenue le 19 Décembre 1998 devant la commission d'examen

**Président :** - Bernard CHAPPEY

Président de l'Université d'Evry

**Examineurs :** - Agbéko M. K. EDEE  
- Ludovic PROTIN  
- Kpakpo ADOTEVI-AKUE  
- Claude LISHOU  
- Pierre ROUAN  
- Kodjo Messan PEDASSOU

Professeur à l'Université du Bénin  
Professeur à l'Université du Havre  
Professeur à l'Université du Bénin  
Maître de Conférences à l'UCAD  
Maître de Conférences à l'Université de Pau  
Directeur Technique de la CEET

# *Au Dieu des Pauvres*

à

Odette, Olitsè, Ossan et Olafe

*Mes sincères remerciements à :*

*Mes honorables Professeurs,*

*Mes honorables Encadreur,*

*Tous ceux qui m'ont supporté, encouragé*

*Et soutenu pour que ce travail aboutisse.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à :*

- *Monsieur le Professeur Bernard CHAPPEY, Président de l'Université d'Evry Val d'Essonne, qui nous a toujours soutenu et aidé constamment sur tous les plans et nous fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.*
- *Monsieur le Professeur Agbeko M. EDEE, Directeur de la Recherche Scientifique à l'Université du Bénin, pour sa disponibilité et le grand honneur qu'il nous fait en acceptant d'examiner ce travail.*
- *Monsieur le Professeur Ludovic PROTIN, Directeur du Laboratoire d'Electronique de Puissance et d'Informatique Industrielle à la Faculté des Sciences de l'Université du Havre, pour avoir accepté de juger ce travail malgré ses multiples occupations.*
- ✕ *Monsieur le Professeur Georges Kpakpo ADOTEVI-AKUE, Co-Directeur de cette thèse, qui n'a ménagé aucun effort en tout temps pour que ce travail aboutisse.*
- *Monsieur Pierre ROUAN, Maître de Conférences à l'Université de PAU, pour le soutien moral et d'avoir accepté de juger ce travail.*
- *Monsieur Claude LISHOU, Maître de Conférences à l'ESP de Dakar, Directeur de cette thèse pour qui la rigueur, la tenacité et la recherche du bien pour son prochain constituent un crédo.*
- *Monsieur PEDASSOU Kodjo Messan, Directeur Technique de la Compagnie Energie Electrique du Togo (CEET) qui, malgré ses nombreuses occupations, a accepté de participer au jury.*

*Et à :*

- *Monsieur le Professeur Francisco Komlanvi SEIDDOU, Ancien Recteur de l'Université du Bénin, un très grand merci pour tout.*
- *Monsieur le Professeur Osséni TIDJANI, Vice-Recteur de l'Université du Bénin, un très grand merci pour tout.*
- *Monsieur le professeur Messanvi F. GBEASSOR, Doyen de la Faculté des Sciences à l'Université du Bénin, un très grand merci pour tout.*
- *Monsieur le professeur GAYIBOR, Directeur des Affaires Académiques et de la Scolarité à l'Université du Bénin, un très grand merci pour tout.*

*Une pensée toute particulière aux sieurs :*

- *Ayité Senah Akoda AJAVON*
- *Komlan Assogba KASSEGNE*
- *Esénam Kwamé AKOUSSAH*
- *Emmanuel Fonsi K. DAGOH*
- *Max Kossi K. AGBO*

*Un très grand merci à :*

- *Mme Sylvana N. AGBOYI*
- *M. Bruno Silété HOUNKPATI*
- *M. Akakpo AGBAGO*
- *M. Sousso KELOUWANI*

*Seuls l'échange respectueux,  
L'interdépendance mutuelle,  
La réciprocité confiante  
Peuvent créer des relations  
Fraternelles.*

*Seul, l'échange entre frères  
Permet de donner sans asservir  
Et de recevoir sans s'aliéner.*

*Nous sommes tous pauvres de quelque chose  
Dieu nous donne  
Pour combler cette pauvreté  
Des frères et des sœurs  
Qui nous sont complémentaires.*

## SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES EFFETS DU COURANT ELECTRIQUE ET LES MOYENS DE PROTECTION.....	4
1.1 - INTRODUCTION.....	5
1.2 - EFFETS PHYSIOLOGIQUES DU COURANT ELECTRIQUE.....	5
1.2.1 - Description clinique des accidents.....	5
a) - <i>Accidents immédiats</i> .....	5
b) - <i>Accidents secondaires ou tardifs</i> .....	5
1.2.2 - Facteurs physiques qui conditionnent la gravité des accidents.....	6
a) - <i>L'intensité</i> .....	6
b) - <i>Le trajet du courant</i> .....	9
c) - <i>La fréquence du courant</i> .....	9
1.3 - LA FOUDRE, SES EFFETS ET LES PROTECTIONS .....	10
1.3.1 - Electricité atmosphérique.....	10
a) - <i>Electricité atmosphérique par beau temps</i> .....	10
b) - <i>Electricité atmosphérique par temps orageux</i> .....	11
1.3.2 - Avant la foudre, la formation de l'orage.....	12
1.3.3 - La foudre et ses paramètres électriques .....	14
a) - <i>Formes des composantes impulsionnelles de la foudre</i> .....	14
b) - <i>Choc de foudre</i> .....	15
c) - <i>Distribution des amplitudes</i> .....	16
d) - <i>Distribution des raideurs de front</i> .....	17
e) - <i>Les autres grandeurs électriques caractérisant la foudre</i> .....	18
1.3.4 - Les effets de la foudre.....	18
1.3.5 - La distribution statistique des orages - Sévérités orageuses.....	20
a) - <i>Le niveau kéraunique</i> .....	20
b) - <i>La sévérité du foudroiement</i> .....	21
1.3.6 - Les protections contre la foudre.....	23
a) - <i>Les modes de couplages</i> .....	24
b) - <i>Protection</i> .....	28

1.4 – CONSTITUTION D'UNE PRISE DE TERRE.....	31
1.5- REALISATION DE LA PRISE DE TERRE .....	34
1.6 – LA MESURE DES PRISES DE TERRE ET DE LA RESISTIVITE DES SOLS.....	37
1.6.1 - Mesures des prises de terre.....	40
1.6.2 - Mesure de la résistivité des sols.....	43
a) - <i>Méthode des quatre électrodes</i> .....	44
b) <i>Méthode de WENNER</i> .....	46
1.7 - TENSIONS DE PAS ET TENSIONS DE TOUCHER (OU DE CONTACT).....	48
1.8 -INFLUENCE DU REGIME DU NEUTRE.....	50
1.8.1 - Résistance d'isolement et capacités par rapport à la terre .....	52
1.8.2 - Prise de terre et résistance de terre .....	54
1.8.3 - Régime de neutre et courant de défaut.....	54
1.8.4 - Tension de contact.....	57
a) - <i>Contact direct et mesures de protection</i> .....	58
b) - <i>Contact indirect</i> .....	59
1.8.5 - Surtensions et régime de neutre .....	62
1.9 - LES DIFFERENTS TYPES DU REGIME DU NEUTRE.....	63
1.9.1 - Examen des différents modes de raccordement du point neutre.....	63
1.9.2 - Régimes du neutre en Basse Tension.....	65
a) - <i>Neutre isolé ou impédant</i> .....	65
b) - <i>Neutre mis directement à la terre</i> .....	66
c) - <i>Mise au neutre</i> .....	67
1.9.3 - Régimes du neutre utilisés en Haute Tension.....	70
a) - <i>Schémas retenus par la norme NFC 13-100</i> .....	70
b) - <i>Schémas retenus par la norme NFC 13-200</i> .....	71
1.9.4 - Protection contre les contacts directs et indirects en Basse Tension .....	74
a) - <i>Protection contre les contacts directs en B T</i> .....	74
b) - <i>Protection contre les contacts indirects en BT</i> .....	76
1.9.5 - Protection contre les contacts directs et indirects en Haute Tension .....	80
a) - <i>Protection contre les contacts directs</i> .....	80

<i>b) - Protection contre les contacts indirects</i> .....	80
1.10 - CHOIX DU SCHEMA DE LIAISON A LA TERRE (SLT).....	82
1.11 - CONCLUSION.....	84
LISTE DES SYMBOLES.....	86

## CHAPITRE 2 : LES MODELES REDUITS DE MISE A LA TERRE.....88

2.1 - INTRODUCTION.....	89
2.2 - EQUATION FONDAMENTALE.....	89
2.3 - CAS D'UNE ELECTRODE DE LONGUEUR $\Delta L$ ENFOUIE DANS LE SOL.....	94
2.4 - CAS D'UNE ELECTRODE QUELCONQUE.....	95
2.5 - ANALYSE DIMENSIONNELLE.....	96
2.6 - MODELE REDUIT A SIMILITUDE GEOMETRIQUE.....	99
2.7 - MODELISATION DES SOLS.....	101
2.7.1. Utilisation d'un modèle analytique (mathématique) de calcul.....	101
2.7.2. Résolution du système d'équations établi avec les matrices réduites.....	109
2.8 - CONCLUSION.....	113
LISTE DES SYMBOLES.....	115

## CHAPITRE 3 : REALISATION D'UN LOGICIEL DE DIMENSIONNEMENT ET DE SIMULATION DES PRISES DE TERRE.....116

3.1 - INTRODUCTION.....	117
3.2 - OBJECTIFS DU LOGICIEL.....	117
3.3 - ASPECTS LOGICIEL ET MATERIEL.....	118
3.3.1 - Langage de programmation (le Software).....	118
3.3.2 - Matériels de programmation (le Hardware).....	120
3.4 - DEVELOPPEMENT DU LOGICIEL.....	120
3.4.1 - Description sommaire.....	120
3.4.2 - Module de calcul de prise.....	121
<i>a) - Détermination de la résistance R de la prise</i> .....	123

<i>b) - Détermination des dimensions d'une prise.....</i>	126
3.4.3 - Module d'évaluation de la résistivité du sol et de gestion de bibliothèque.....	133
3.4.4 - Module de banques de données.....	134
3.4.5 - Module d'analyse graphique.....	134
3.5 - FONCTIONNALITE DU LOGICIEL.....	139
3.5.1 - Caractéristiques générales.....	139
3.5.2 - Première utilisation ou création d'un nouveau projet.....	139
3.5.3 - Ouverture d'un projet quelconque existant.....	142
3.5.4 - Ouverture des projets de la bibliothèque uniquement.....	143
3.5.5 - Ouverture des projets de la bibliothèque en lecture seulement.....	144
3.5.6 - Fonctionnalité du module « Calcul d'une prise de terre » .....	144
<i>a) -Modification de la configuration d'un projet.....</i>	144
<i>b) - Calcul d'une prise de terre.....</i>	145
<i>c) - Limitation du calcul de la prise à un type : cas de «n-Piquets» exclusivement... </i>	148
3.5.7 - Fonctionnalité du module « Banque de Mesures ».....	150
3.5.8 - Fonctionnalité du module « Analyses graphiques ».....	151
<i>a) -Analyse de l'évolution de la résistance d'une prise ou de la résistivité du site             étudié.....</i>	152
<i>b) - Etude des risques par simulation.....</i>	154
<i>c) - Le sous module « Statistiques ».....</i>	156
3.6 - CONCLUSION.....	157
LISTE DES SYMBOLES.....	158

## CHAPITRE 4 : ETUDE DE CAS : ANALYSE GEOTECHNIQUE DES SOLS DE LOME ET SES ENVIRONS, VALIDATION ET PROTOTYPAGE..... 159

4.1 - INTRODUCTION.....	160
4.2 - IDENTIFICATION DES SOLS.....	160
4.3 - CHOIX DES SITES.....	175
4.4 - VALIDATION EXPERIMENTALE DES MESURES DE RESISTIVITE DU SOL ET DE RESISTANCE DES PRISES DE TERRE.....	176

4.4.1 - Méthodologie.....	176
a) - <i>Mesure de la résistivité</i> .....	176
b) - <i>Mesure des résistances de terre</i> .....	177
4.4.2 - Résultats.....	178
4.4.3 - Commentaires.....	181
4.5 - CONCLUSION.....	194
CONCLUSION GENERALE.....	195

## INTRODUCTION GENERALE

Le travail de cette thèse a été effectué dans trois laboratoires, celui d'Electronique de l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de l'Université du Bénin à LOME au TOGO, celui d'Energies Renouvelables, « Groupe de Traitements Informatiques », jeune Equipe de Recherche n° 6003 associée à l'AUPELF-UREF de l'Ecole Supérieure Polytechnique (Centre de Dakar - Sénégal) et au CEMIF de l'Université d'Evry Val d'Essonne en France.

Il est l'aboutissement d'une série de discussions que nous avons eues avec des Ingénieurs de la Compagnie Energie Electrique du Togo (CEET) et les responsables du département du Génie Electrique de l'Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar (SENEGAL).

Les problèmes posés par la nécessité de la mise à la terre dans les pays en voie de développement ne sont pas nouveaux.

Le Togo, comme une partie importante de l'Afrique tropicale, est soumis à une activité kéraunique très élevée. Certaines régions sont plus touchées que d'autres. Il s'en suit de nombreuses perturbations aussi bien dans le réseau de distribution d'énergie que dans celui des télécommunications.

De nombreux travaux ont été effectués dans le domaine des coups de foudre et des prises de terre dont les plus importants sont cités dans la bibliographie.

Longtemps laissées à l'empirisme, les mises à la terre ont fini par bénéficier d'une attention particulière. Ce regain d'intérêt s'explique par l'introduction massive de l'électronique et la miniaturisation poussée de ces dernières dans les télécommunications s'accompagnant d'une sensibilité plus accrue aux perturbations.

En effet, la sécurité des personnes et des biens contre les risques d'origine électrique est assurée par deux équipements indissociables : une prise de terre et un dispositif différentiel. Ils sont conçus pour assurer la protection des personnes contre le contact simultané entre d'une part, une partie métallique d'un appareil, appelée masse, mise accidentellement sous tension par

suite de la défaillance de son isolation et d'autre part, la terre ou un élément conducteur (tuyau, sol carrelé, ciment,...) non isolé de la terre ou encore une autre masse reliée à la terre ou non.

Dans le contexte de ce travail, nous nous proposons de faire une étude de cas : celle de la ville de Lomé et de ses environs (Togo) et concevoir un logiciel de dimensionnement, de simulation et de mise à la terre « GEPTERRE ».

Pour cela, nous avons effectué une campagne de mesures dans différentes zones de LOME, lesquelles sont destinées à faire mieux connaître le terrain et se sont étalées sur soixante (60) mois environ.

Cette thèse est subdivisée en quatre (4) chapitres.

Le chapitre 1 présente les généralités sur les effets du courant électrique surtout les effets physiologiques, montrant ainsi la nécessité de la réalisation de la prise de terre pour la protection des personnes et des biens.

Il donne un aperçu sur les mesures de prises de terre, expose le pourquoi, la qualité et les différentes méthodes de mesures. Il traite enfin du régime du neutre notamment les Systèmes de Liaisons à la Terre (SLT) dans les réseaux électriques.

Le chapitre 2 étudie d'une part les modèles réduits de mise à la terre notamment l'établissement des conditions de similitude à respecter dans la réalisation d'un modèle réduit d'un terrain à la couche horizontale homogène et d'autre part la modélisation des sols.

Le chapitre 3 expose le logiciel « GEPTERRE » : logiciel de dimensionnement et de simulation des prises de terre, la méthodologie et l'organigramme.

Le chapitre 4 procède à l'étude d'un cas : l'analyse géotechnique des sols de Lomé et ses environs. Cette étude est d'autant plus importante que les différents échantillons des sols en provenance des différentes zones de Lomé permettront de caractériser et de différencier les différents quartiers de Lomé.

Il expose les différentes acquisitions des données caractéristiques d'une prise de terre effectuées pendant toute la campagne de mesure, la méthodologie, les résultats et commentaires. la validation du modèle et le prototypage.

# CHAPITRE 1

## GENERALITES SUR LES EFFETS DU COURANT ELECTRIQUE ET LES MOYENS DE PROTECTION

## 1.1 - INTRODUCTION

Les conducteurs ont la propriété de permettre un passage facile du courant électrique. Cette propriété est due au fait que les électrons dits "externes", se libèrent très facilement de la couche périphérique, pour circuler de façon désordonnée, à travers le réseau d'ions fixes du cristal. Cette circulation a plusieurs effets, notamment des effets thermiques.

Comment s'exercent donc les effets du courant électrique aussi bien sur les personnes que sur les équipements des installations électriques ?

## 1.2 - EFFETS PHYSIOLOGIQUES DU COURANT ELECTRIQUE

### 1.2.1 - Description clinique des accidents

Les effets du courant sur les personnes se traduisent par une gamme d'accidents dont la gravité est variable selon l'intensité du courant.

Il convient de distinguer les accidents immédiats et les accidents tardifs.

#### a) - Accidents immédiats

Le plus grave est la perte de connaissance immédiate aboutissant à un état de mort apparente qui en l'absence de réanimation correcte, conduit à la mort réelle. Cet état de mort apparente peut s'expliquer par différents mécanismes :

- Tétanisation des muscles respiratoires ;
- "Sidération" des centres bulbaires ;
- Fibrillation ventriculaire.

#### Accidents secondaires ou tardifs

Parmi ceux-ci, on peut citer principalement trois :

- L'anurie par myoglobinurie c'est-à-dire la destruction musculaire entraînant une libération de myoglobine (urines plus acides) ;
- Les accidents locaux qui se caractérisent par les escarres des brûlures et des effets électrolytiques ;
- Infarctus du myocarde.

De nombreuses études ont révélé que les accidents électriques sont presque tous sous la dépendance de deux facteurs agissant ensemble ou séparément :

- un facteur humain lié à l'imprudence et surtout l'ignorance ;
- un facteur matériel et technique lié à la vétusté ou à la non-conformité aux règles de sécurité.

Le plus grand nombre d'accidents mortels a lieu sur les installations du réseau de distribution (ligne haute et basse tension, sous station, transformateurs). Mais les machines électriques utilisées dans l'industrie, les appareils ménagers, les lampes portatives en sont aussi les causes les plus répandues.

### 1.2.2 - Facteurs physiques qui conditionnent la gravité des accidents

La gravité des accidents ci-dessus énumérés peut provenir de l'intensité, du trajet et de la fréquence du courant.

#### a) - L'intensité

C'est le facteur essentiel. "C'est l'intensité qui tue" (Fig.1.1). Elle intervient dans les effets neuromusculaires et dans le dégagement de la chaleur par effet joule comme le montre le tableau 1.1.

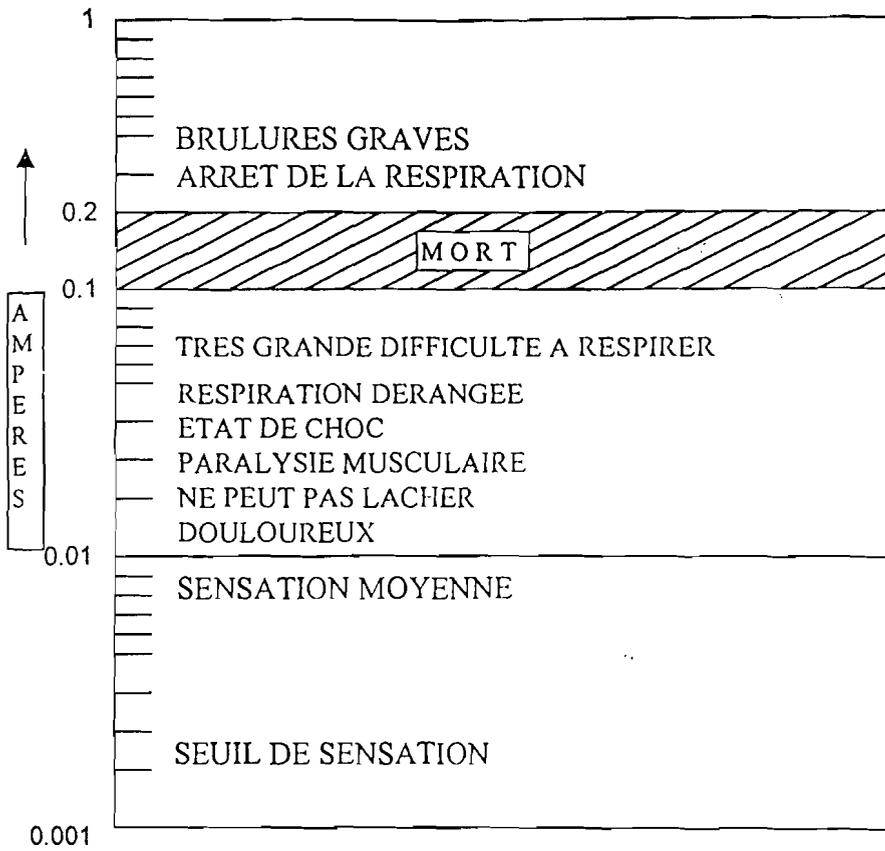


Fig. 1.1 : Effets physiologiques du courant [59] [7].

La figure 1.1 montre bien les effets néfastes du courant électrique sur l'organisme humain. Un courant de 10 mA provoque une sensation moyenne. A 100 mA, le myocarde est atteint d'une fibrillation. Entre 100 et 200 mA, il survient une mort apparente qui peut déboucher sur une mort réelle avec brûlures graves.

En vertu de la loi d'ohm, le courant électrique peut en définitive être évaluée par :

$$I = \frac{V}{\Sigma R} \tag{Eq. 1.1}$$

$V$  : - la tension (force électromotrice) de source ;

$R$  : - la somme de toutes les résistances du circuit ou entre l'organisme.

Il découle de cette formule qu'en première approximation, la gravité des accidents est proportionnelle à la tension. On distingue plusieurs niveaux de réseaux classés

selon les valeurs des tensions nominales et qui assurent plusieurs fonctions spécifiques [15], [26], (cf. tableau 1.1).

Niveau de tension	Gamme de tension	Classe de tension [kV]	Fonction du réseau
TBT (Très Basse Tension)		$\sim U \leq 0,05$ $= U \leq 0,12$	Télécommunication
BT (Basse Tension)		$0,05 \leq \sim U < 1$ $0,12 \leq = U < 1,5$	Distribution
MT (Moyenne Tension)	A	$1 \leq \sim U < 50$ $1,5 \leq = U < 75$	Transport & Distribution
HT (Haute Tension)	B	$50 \leq \sim U < 300$	Transport
THT (Très Haute Tension)	C	$300 \leq \sim U < 750$	Transport & Interconnexion
UHT (Ultra Haute Tension)	D	$\sim U \geq 750$	Interconnexion

N.B : Les gammes des tensions A, B, C, D sont couramment appelées Haute Tension.  
 $\sim U$  : Tension alternative  
 $= U$  : Tension continue

Tableau 1.1 : Niveau de tension classé selon la valeur de la tension nominale des réseaux.

L'évaluation des résistances en série avec le sujet est très importante. Dans l'immense majorité des cas, l'accident a lieu parce que le sujet fait contact entre un des pôles de la distribution et la masse ou le sol ; le circuit comprend alors le sujet, les autres résistances extérieures à la source et la source elle-même.

La courbe de PREVOST et BATELLI [46] montre que "pour les fréquences comprises entre 30 KHz et 100 KHz, le risque diminue progressivement. A un peu moins de 1 MHz, il n'y a plus de choc électrique, le courant risque de provoquer des brûlures superficielles ou internes.

Les accidents ne sont pas liés seulement au courant électrique mais aussi à la décharge atmosphérique [13], [16].

### 1.3 - LA FOUDRE, SES EFFETS ET LES PROTECTIONS

#### 1.3.1 - Electricité atmosphérique

On distingue les causes de l'électricité atmosphérique [1] [37] :

- par beau temps ;
- par temps orageux.

##### a)- Electricité atmosphérique par beau temps

Par beau temps on rencontre :

- un phénomène statique (charge) ;
- un phénomène dynamique (conduction).

Le phénomène statique par beau temps : C'est un phénomène d'influence statique, produit par la couche ionisée de Heaveside, qui intervient (on mesure un champ électrique normal  $E$ , à la surface de la terre de l'ordre de 100 à 400 V/m).

Le phénomène dynamique par beau temps : L'atmosphère est rendue conductrice par les ions positifs et négatifs, dus au rayonnement cosmique. Sous l'action du champ terrestre  $E_r$ , les ions se déplacent et donnent naissance à un courant continu  $I$  dirigé

### b) - Electricité atmosphérique par temps orageux

Comme pour dans le cas de l'électricité atmosphérique par beau temps, on distingue par temps nuageux :

- des phénomènes statiques ;
- des phénomènes dynamiques.

Pour les phénomènes statiques par temps nuageux : Les mécanismes qui sont à la base de la séparation des charges électriques dans les nuages orageux sont très complexes. Deux grandes écoles s'affrontent et se complètent [96] :

- la théorie macroscopique qui se préoccupe de la nature des précipitations et se base sur le phénomène de la polarisation (les éléments de cette théorie expliquent la création de dipôle et la dissociation locale des charges) ;
- la théorie macroscopique qui se préoccupe des courants de convection dans un nuage complet et se base sur la théorie de la diffusion.

Dans les deux cas, le nuage comporte des aérosols et des précipitations qui captent les ions de l'air [23], [80]. On distingue trois causes essentielles de la charge des nuages :

- la chute de particules d'eau dans un courant d'air ascendant ;
- le givrage ;
- le clivage par congélation.

Un nouveau modèle faisant intervenir le champ électromagnétique terrestre dans le processus de charge des nuages a été proposé [20] mais n'est pas encore suffisamment étayé.

Quant aux phénomènes dynamiques par temps d'orage, ils comportent :

- recharges par pointe [24] ;
- recharges par précipitation [24] ;
- recharges par coup de foudre.

Après ce bref aperçu sur l'électricité atmosphérique en général et sur les phénomènes de charges électriques des nuages en période orageuse en particulier, étudions le phénomène de la foudre pouvant apparaître lorsque les champs électriques internes ou externes aux nuages orageux dépassent des valeurs limites.

La foudre cause chaque année de nombreux et importants dégâts.

On dénombre annuellement la mort de plusieurs dizaines de personnes, le foudroiement d'animaux, l'allumage de milliers d'incendies et la destruction de plusieurs centaines d'antennes Yagi et compteurs électriques. De même, des phénomènes induits, créant des surtensions dans les lignes téléphoniques et les remontées de potentiels de terre après un impact peuvent entraîner de nombreux dégâts sur des matériels de communication (téléphone, répondeur, fax etc.) des matériels informatiques raccordés par modem et détériorer des équipements sensibles.

Pour ces raisons, la Société Togolaise de Télécommunication (TOGO TELECOM), la Compagnie Energie Electrique du Togo (CEET) et partiellement la Communauté Electrique du Bénin (CEB) ont mis en place quelques moyens de protection contre la foudre.

C'est dans l'esprit des sciences de l'Ingénieur que s'articule ce travail. Il nous semble donc utile de rappeler ici quelques notions sur la foudre et de définir quelques concepts utilisés par les ingénieurs dans la conception des systèmes de lutte contre ses effets.

Dans ce travail les aspects suivants de la décharge atmosphérique seront abordés : le phénomène orageux, les paramètres électriques [91] de la foudre et la distribution statistique des orages.

### 1.1 Avant la foudre, la formation de l'orage

La formation de nuages de type cumulo-nimbus est due aux effets combinés de l'humidité et d'un échauffement local du sol.

Les nuages sont d'énormes masses représentant plusieurs milliers de tonnes d'eau, ayant une épaisseur de plusieurs kilomètres et dont l'altitude de la base du nuage est comprise entre deux et trois mille mètres.

La polarisation du nuage est provoquée par les phénomènes de convection qui se produisent dans la masse nuageuse : sous l'action de vents atmosphériques ascendants, les particules légères s'élèvent, se refroidissent et se transforment en cristaux de glace, en se chargeant positivement, tandis que les particules lourdes, restées sous forme de gouttes d'eau, descendent dans la partie inférieure du nuage en se chargeant négativement.

Cette configuration correspond à 90 % des orages rencontrés mais il peut arriver que la charge électrique à la base du nuage soit positive.

L'ensemble terre-air-nuages se comporte comme un vaste condensateur dont les charges électriques s'accumulent dans les nuages, face au sol. La couche d'air comprise entre le sol et les nuages joue le rôle de diélectrique.

Par beau temps, un faible champ électrique (100 V/mètre) permanent existe, la terre étant négative et la haute atmosphère positive. L'apparition de charges négatives dans les nuages va entraîner l'inversion de polarité des charges au sol qui vont devenir positives.

Le champ électrique va croître considérablement (15 à 20 kVolts/mètre) atteignant le seuil de conduction électrique de l'air. Toute la charge électrique négative contenue dans le nuage va pouvoir s'écouler à la terre.

Les configurations 1 (a, b) et 2 (a, b) de la figure 1.3 qui représentent respectivement le coup négatif descendant et le coup positif ascendant, sont les plus fréquentes. La configuration 3 (a, b) correspond au coup de foudre positif, et se présente dans 10 à 20 % des cas, comme on le voit ci-dessous ; enfin, la configuration 4 (a et b), à traceur négatif ascendant, est beaucoup plus rare.

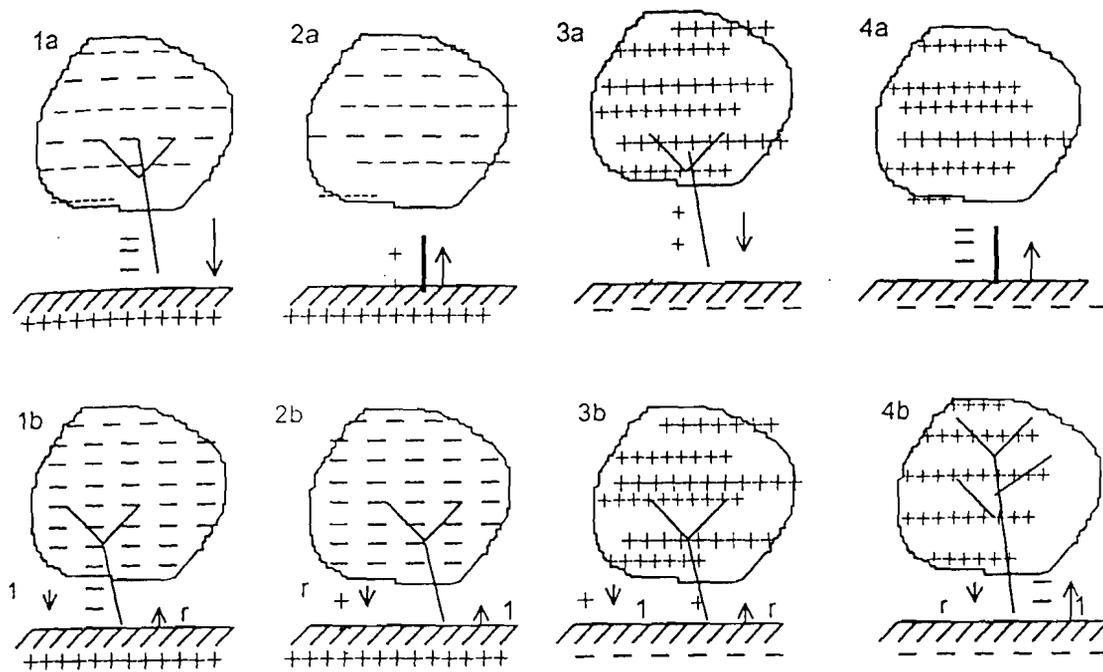


Fig. 1.3 : Différents types de coups de foudre, selon la classification de K. Berger [12].

L'activité orageuse est un phénomène électrique. Il convient d'examiner ses paramètres.

### 1.3.3 - La foudre et ses paramètres électriques [24]

#### a) - Formes des composantes impulsionnelles de la foudre

Les coups de foudre négatifs offrent une très grande variété de combinaison de courants impulsionnels et de courants «continus», chacun d'entre eux ayant une amplitude et une durée variables. La durée de front de la première décharge est de l'ordre de 5 à 15  $\mu\text{s}$  ; la durée de la queue est de l'ordre de centaine de microseconde. Pour des décharges subséquentes, la durée de front est très courte, inférieure à la microseconde, mais la queue d'onde est bien plus régulière que dans la première décharge. Les valeurs de crête des décharges subséquentes sont inférieures à celles de la première décharge partielle.

Le coup de foudre positif est constitué d'une seule décharge qui dure de 0,1 à 0,2 seconde. La durée du front de l'onde est relativement longue, elle varie entre 20 et 50  $\mu\text{s}$ , mais l'amplitude du courant peut atteindre de très fortes valeurs, supérieures à 100 kA.

b) - Choc de foudre (Fig. 1.4)

On a souvent recours à des générateurs de courant de choc [1], [2]. afin de simuler en laboratoire les effets d'un coup de foudre sur une installation électrique ou de télécommunication.

Par définition, le choc de foudre est défini principalement par :

- la valeur crête du courant ;
- le temps de montée exprimée en  $\mu\text{s}$  ;
- le temps de descente exprimée en  $\mu\text{s}$ .

Dans ce document, nous utilisons pour nos simulations, le choc normal. Par définition, le choc normal est un courant résultant de la différence de deux exponentielles :

$$i(t) = I_0 \left[ \exp\left(-\frac{t}{\tau_q}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right) \right] = I_0 (e^{-at} - e^{-bt}) \quad (\text{Eq. 1.2})$$

avec :

$\tau_f$  durée du front de l'onde ;

$\tau_q$  durée de la queue d'onde.

Les principaux paramètres du choc normal sont donnés par l'équation (Eq. 1.3). La durée de la crête,  $T_{cr}$  est égale à :

$$T_{cr} = \frac{\tau_q}{\delta - 1} \text{Ln}(\delta) \quad (\text{s}) \quad (\text{Eq. 1.3})$$

$$1: \quad \delta = \frac{\tau_q}{\tau_f}$$

La valeur de crête, atteinte par le choc, est calculée à partir de la formule (Eq. 1.4),

$$I_{cr} = I_0 \left[ \frac{1}{\delta^{(1-\delta)}} - \delta^{\frac{\delta}{(1-\delta)}} \right] \quad (A) \quad (Eq. 1.4)$$

La durée  $T_h$  jusqu'à la mi-amplitude vaut :

$$T_h = \tau_q \text{Ln} \left( \frac{2I_0}{I_{cr}} \right) \quad (s) \quad (Eq. 1.5)$$

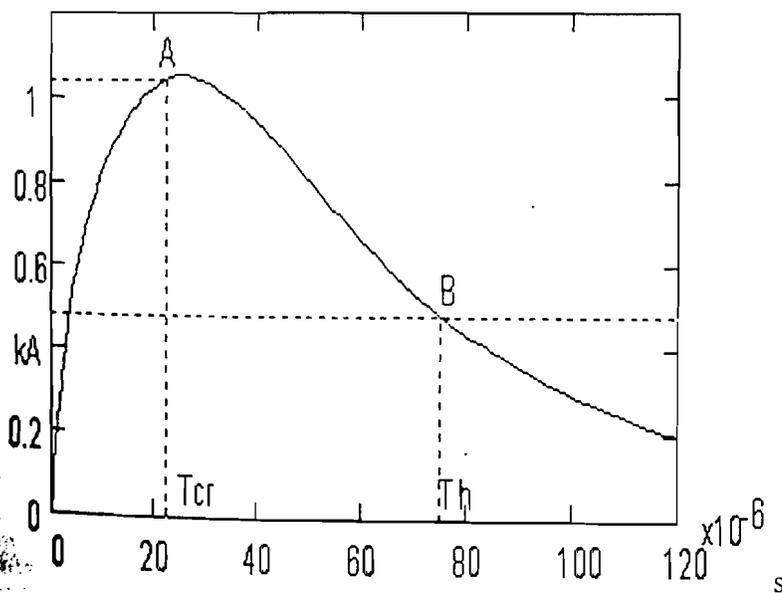


Fig. 1.4 : Définition des paramètres de l'onde de foudre conventionnel [24], [52].

Distribution des amplitudes

leur grande majorité, les mesures sur la foudre ont été effectuées en enregistrant les coups de foudre frappant les cheminées ou les tours de grande hauteur, entre 100 et

Pour exprimer la probabilité  $\varphi_1$  qu'a un coup de foudre de dépasser l'intensité  $I$ , la formule simple suivante a été proposée :

$$\log \varphi_1 = 2 - \frac{I}{60} \quad (\text{Eq. 1.6})$$

En rassemblant les données mondiales obtenues, on a pu tirer les conséquences importantes suivantes :

- l'amplitude des courants de foudre positifs peut atteindre de très fortes valeurs, supérieures à 150 kA dans 10 % des cas ;
- l'amplitude des courants de foudre négatifs est, en général, plus faible, la valeur à 10 % étant de l'ordre de 50 kA ;
- les valeurs médianes de l'intensité des coups positifs et négatifs (valeur à 50 % de la distribution globale) se situent respectivement autour de 25 kA et 18 kA.

#### d) - Distribution des raideurs de front [24]

Les courants de foudre négatifs, bien qu'ayant une amplitude en général plus faible que les courants de foudre positifs, présentent une raideur de front beaucoup plus grande. Pour 50 % des coups de foudre, la raideur de front est supérieure à 20 kA/ $\mu$ s, alors que pour les coups de foudre positifs, la moyenne est autour de 2 kA/ $\mu$ s.

Les raideurs de front les plus importantes, lors de coups de foudre négatifs, sont obtenues pour les décharges secondaires de plus faible amplitude : on a mesuré jusqu'à 100 kA/ $\mu$ s.

Quelle que soit la famille de décharge considérée (coups de foudre positifs, première impulsion d'un coup négatif, impulsions secondaires), il n'y a pas de corrélation nette entre la valeur de crête du courant et la raideur de front de l'onde. On peut simplement signaler que, plus l'amplitude du courant est grande, plus la probabilité pour avoir des pentes de front élevées est

### e) - Les autres grandeurs électriques caractérisant la foudre

Outre les grandeurs exprimées ci-dessus, il existe deux autres caractéristiques utiles pour l'ingénieur :

- la charge totale  $Q$  neutralisée au cours d'un coup de foudre est en moyenne de l'ordre de la dizaine de coulombs et peut dépasser pour une très longue et violente décharge 300 Coulombs ;
- l'intégrale  $\int i^2 dt$  est la caractéristique qui doit être prise en compte pour l'estimation des effets thermiques de la foudre, par exemple pour le calcul de la section d'un câble de paratonnerre.

#### 1.3.4 - Les effets de la foudre

L'éclair et le coup de tonnerre sont les manifestations spectaculaires de la décharge. Des effets secondaires leur succèdent. La décharge se produit en deux phases.

Durant la première phase, des traceurs quittent la base du nuage par bonds successifs en direction de la terre à la vitesse de 50 000 km/Seconde. Le champ électrique au sol augmente alors considérablement provoquant des pré-décharges ascendantes prenant leur départ depuis des aspérités telles que arbres, tiges et allant à la rencontre du traceur.

Durant la deuxième phase, le court circuit résultant permet l'écoulement du courant de la décharge principale constitué de charges superficielles qui remontent le canal ionisé créant un fort trait lumineux nommé arc en retour.

La première phase qui correspond à une phase d'amorçage est caractérisée par une tension élevée et un courant faible, tandis que la seconde phase de conduction durant laquelle l'arc en retour conduit des courants très intenses en un temps très court (1 000 à 100 000 ampères) avec un temps de montée de l'ordre de la microseconde). Ces courants en s'écoulant à la surface provoquent, selon la qualité de la prise de terre et la résistivité de la terre locale, des

élevations des potentiels de terre qui vont se propager à travers le sol et affecter tous les sites environnants dans un rayon d'une dizaine de mètres. Le rayonnement électromagnétique engendré par le courant de foudre intense et bref peut induire des tensions et courants élevés sur les lignes avoisinantes en fonction de la proximité et des caractéristiques de la liaison.

Il existe également de nombreux coups de foudre entre nuages mais, du fait de leur éloignement, les phénomènes induits dans les circuits électriques sont beaucoup plus faibles qu'une décharge directe au sol. Par contre, ils affectent la navigation et le confort des passagers des avions volant à proximité.

Les effets de la foudre résultent du passage du courant de foudre relativement élevé dans les conducteurs ou du champ électromagnétique engendré par l'écoulement de ce courant.

C'est ainsi que les courants de foudre peuvent créer :

- des effets thermiques dus à la chaleur dissipée par effet Joule dans les éléments empruntés par le courant de foudre (fusion de câbles, allumage d'incendies) ;
- des surtensions en raison du front très raide de l'onde de courant et de l'impédance élevée que présentent les conducteurs en haute fréquence (claquage d'isolants) ;
- l'apparition de tensions induites dangereuses et la circulation de courants importants dans les lignes et structures voisines dus au champ électromagnétique créé par l'écoulement à la terre du courant de foudre ;
- des effets acoustiques dus à la disparition brutale, au moment de l'extinction de l'arc, de la surpression de l'air créée par le passage du courant de foudre (tonnerre).

Il peut exister des effets indirects de la foudre. Ces effets peuvent être véhiculés :

- par les réseaux venant de l'extérieur (CEET, TOGO-TELECOM...);
- par les liaisons périphériques de toute nature.

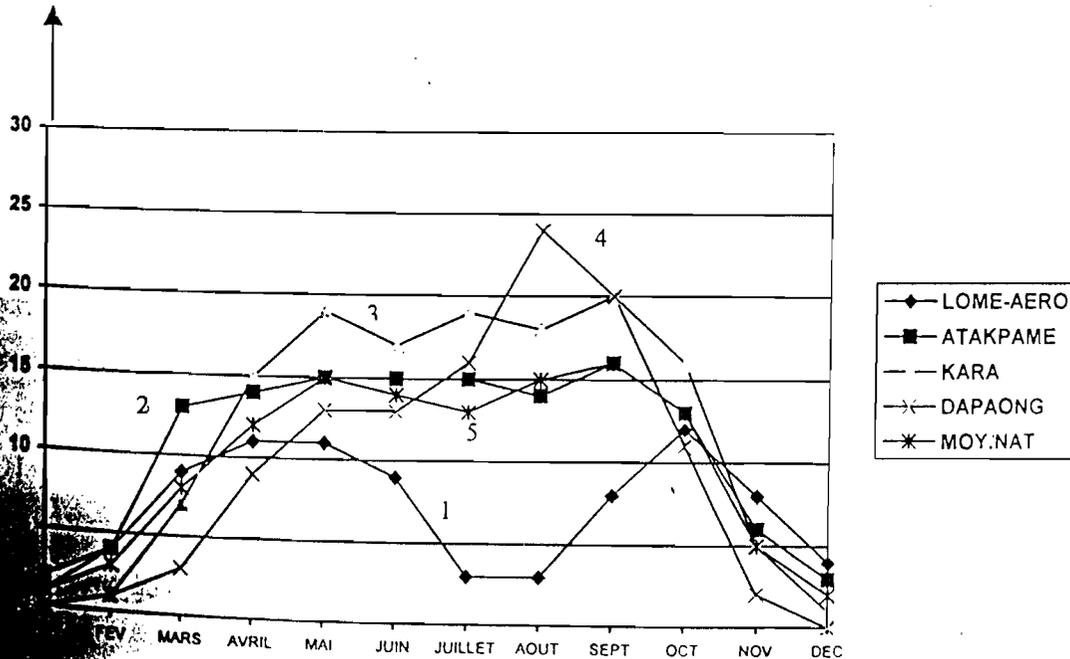
1.3.5 - La distribution statistique des orages - Sévérités orageuses

Pour protéger ou non une zone, il est important de connaître la fréquence et la densité de l'activité orageuse. Ces deux sont déterminées par le niveau kéraunique et la sévérité du foudroiement.

a) - Le niveau kéraunique

Il est d'usage de caractériser l'activité orageuse d'une région par son niveau kéraunique. Le niveau kéraunique est, par définition, «le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu». Bien que très simpliste par sa définition et équivoque par les méthodes de mesure, cette notion permet l'établissement de statistique, à partir des renseignements fournis par les services météorologiques. Enfin à titre d'exemple dans le cas du Togo, les données collectées de 1980 à 1997 ont permis de tracer la figure 1.5 que voici.

(Moyenne de jours d'orages)



Moyenne du niveau kéraunique annuel de quatre (4) régions géographiques du Togo.

La fig. 1.5 indique l'évolution de la moyenne du niveau kéraunique annuel pour quatre (4) régions (1 à 4) du Togo.

La courbe 5 illustre la moyenne pour ces quatre régions.

Sur les courbes 1 et 2, on observe deux zones bien distinctes : une première qui atteint son maximum vers le mois de Mai (première saison pluvieuse) et une seconde avec un maximum se situant aux alentours du mois d'Octobre (petite saison pluvieuse) ;

La courbe 3 montre qu'au niveau de Kara, l'activité orageuse s'étale du mois d'Avril au mois de Septembre avec un pic au mois de Septembre.

La courbe 4 illustre une activité orageuse tardive à Dapaong. Un pic est atteint au mois d'Août. A partir du mois de Mai jusqu'en Septembre, la courbe suit une évolution exponentielle.

Il n'existe pas de données sur les phases énergétiques des coups de foudre tombant au Togo, car ce sont elles qui permettent d'évaluer les effets destructeurs que contiennent potentiellement les décharges atmosphériques. On ne connaît pas non plus, la proportion entre coups de foudre ascendant et descendant, positif et négatif. De même, pour ce qui est propre à ce travail, on ne connaît pas la proportion entre coup de foudre nuage-sol et nuage-nuage.

Enfin, à titre de comparaison, on peut noter qu'au Bénin, le niveau kéraunique annuel maximum est de 123 dans la zone de Natitingou [24], aux Etats Unis d'Amérique le niveau kéraunique annuel maximum est de 90 et se situe dans la région tropicale de la Floride, alors qu'en Afrique Centrale, à Kampala par exemple, le niveau kéraunique annuel moyen est de 240 (11).

### La sévérité du foudroiement

Il est évident que la notion kéraunique est trop rudimentaire pour pouvoir fournir une utilisable de la sévérité orageuse, car elle ne donne aucune indication, ni sur la fréquence des foudroiements, ni sur l'existence de zones localisées particulièrement foudroyées. Une

détermination bien plus rigoureuse de l'activité orageuse peut être donnée par la sévérité du foudroiement, par exemple la densité de coups de foudre au sol exprimée en nombre de coups par kilomètre carré et par an. Ainsi, il était devenu indispensable de mesurer le nombre de coups de foudre qui tombent sur un terrain donné.

C'est depuis quelques années seulement, qu'il est devenu clair que les champs électrique et magnétique qui sont émis lors des différents processus des coups de foudre sont différents mais ont des formes qui les caractérisent [47]. Ensuite, sur la base de ces connaissances, différents appareils ont été développés pour mesurer des coups de foudre. On distingue cinq groupes de méthodes de mesure :

- la méthode vidéo [56] ;
- la méthode d'antenne à large bande [5], [102] ;
- la méthode de détection magnétique de direction à large bande fréquentielle utilisée par la société Lightning Location & Protection Inc. de la Compagnie DYNATEC [53] ;
- la méthode à temps d'arrivée, utilisée par la société Atmospheric Research Systems Inc. [10], [53] ;
- la méthode d'interférométrie VHF utilisée par la société française Dimensions [53].

A partir de résultats fournis principalement par les compteurs de foudre, plusieurs chercheurs ont tenté d'élaborer des formules reliant le niveau kéraunique  $N_i$  et la densité  $N_s$  de coups de foudre au sol par  $\text{km}^2$  et par an. Une formule simple qui semble donner satisfaction pour les conditions orageuses est [38] :

$$N_s = \frac{N_i}{7} \quad (\text{Eq. 1.7})$$

A titre d'exemple, en considérant le cas de Lomé aéroport on a  $N_i = 98$  en 1995 ce qui

$$N_s = \frac{98}{7} = 14/\text{km}^2$$

### 1.3.6 - Les protections contre la foudre

La foudre est un phénomène naturel qu'il est impossible de supprimer. On peut cependant en limiter ses effets et les dégâts occasionnés.

Contre une chute directe de la foudre, le paratonnerre doit être un point préférentiel pour écouler directement la charge électrique à la terre [81], [82]. Le paratonnerre peut être à tige de type Franklin ou à dispositif d'amorçage. Un générateur crée une aigrette ascendante qui attire la décharge de la foudre en cours de formation

On lui reproche, cependant, "d'attirer" systématiquement la foudre et par la même occasion de faire monter chaque fois le potentiel de terre. Une philosophie consiste à équiper le voisin du paratonnerre pour ne pas être trop perturbé soi-même, mais compte-tenu des risques de foudroiement direct cette philosophie ne paraît toujours pas correcte. Dans un premier temps, le réseau de terre doit permettre le plus directement possible l'écoulement de la charge électrique. Il sera constitué d'une prise de terre avec de nombreux brins pour mieux diffuser le courant de foudre (forme en patte d'oie). Bien évidemment, toutes les parties métalliques des charpentes doivent y être reliées. Dans un second temps, la protection portera sur la limitation des différences de potentiel des masses qui sont dangereuses. Un réseau de terre équipotentiel et maillé ne limitera pas les montées en potentiel mais évitera les surtensions (différence de potentiel) aussi bien d'origine foudre que de perturbation électromagnétique en général.

Pour les matériels électroniques, informatiques reliés par modems aux lignes de télécommunications, des protections plus sophistiquées peuvent être mises en œuvre comme c'est le cas à TOGO TELECOM [22], [104].

Les systèmes de télécommunications de TOGO TELECOM se caractérisent comme un réseau interconnectant des abonnés entre eux à travers tout le pays. Aux nœuds de ces réseaux sont situés les centraux téléphoniques contrôlant et gérant les flux d'échange. Depuis leur mise en exploitation, ces centraux ont été exposés, pendant les orages, à des perturbations dont les plus graves peuvent être rangées en deux types :

- perturbations collectées par les lignes des télécommunications elles-mêmes ;
- perturbations d'origines industrielles, notamment des réinjections à 50 Hz des lignes de puissances.

Les niveaux des surtensions peuvent aller de quelques volts à plusieurs kilovolts. Le CCITT dans ces directives les classent en deux catégories :

- les tensions de danger ;
- les tensions de trouble.

Ces surtensions peuvent être à l'origine d'accidents de personnes, de destruction de matériel, de dysfonctionnement d'équipements ou de dégradation grave de la qualité de la communication.

Afin d'éviter les accidents et de minimiser les effets de surtension, diverses règles ont été édictées. Elles tiennent compte de l'exposition au risque et sont adaptées au type de perturbateur. TOGO TELECOM, prenant en compte le caractère aléatoire de la foudre, a adopté une politique quasi systématique de protection de ses centraux, des lignes de télécommunication et des abonnés. Par contre, la protection des lignes au voisinage des ouvrages de la CEET ne manque pas de poser des problèmes liés d'une part à la faiblesse des connaissances des problèmes de compatibilité électromagnétique qui en résultent, mais aussi de la faiblesse de la collaboration de ces deux entreprises dans la recherche de solutions concertées et adaptées dans leurs modes de couplages [78].

#### a) - Les modes de couplages

Il faudra noter que les équipements de télécommunications peuvent être atteints par des perturbations provenant de la foudre, des défauts des lignes de transport ou de distribution électrique (CEET ou CEB dans le cas du TOGO), les sources industrielles ou domestiques et les ondes radioélectriques. Ces perturbations se produisent par des modes qu'on range habituellement en quatre groupes : résistif, capacitif, inductif et électrique.

Dans la pratique, ces modes de couplage peuvent se combiner. Les conséquences peuvent être :

- en régime permanent :
  - dégradation de la communication ;
  - erreur de transmission ;
  - dysfonctionnement d'équipements ;
  - bruit psophométrique (cas du couplage inductif).
- en régime de défaut :
  - danger pour les personnes ;
  - destruction de matériels.

#### ➤ Couplage résistif

C'est une conduction par le sol, à travers les prises de terre des installations de la société de distribution d'énergie électrique. Ce couplage se produit suite à un défaut dans la ligne de distribution d'énergie : foudre, court circuit ou remontée de potentiel par le sol (fig. 1.6).

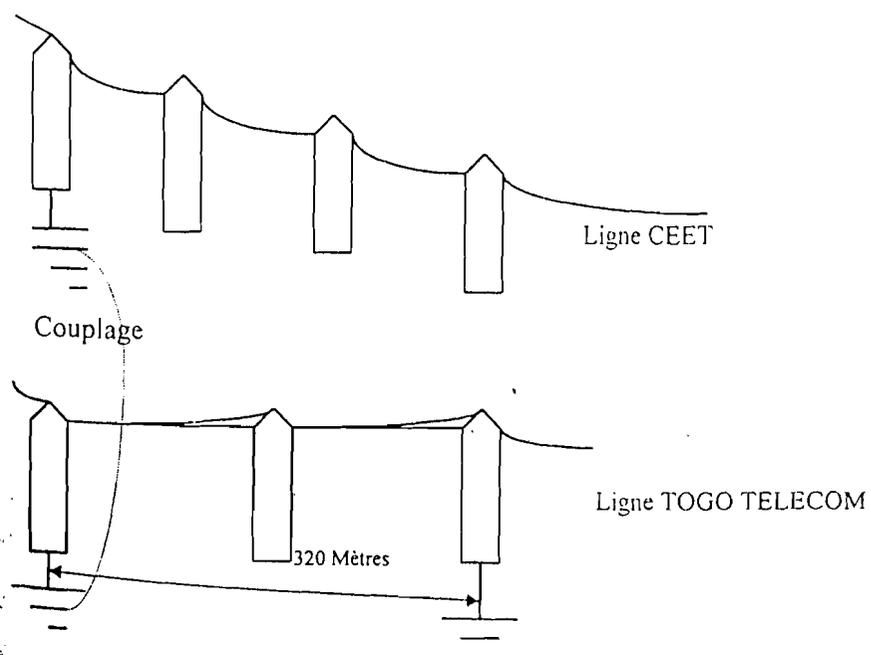


Fig. 1.6 : Couplage résistif entre prises de terre.

### > Couplage capacitif

La perturbation de couplage capacitif [22] provient souvent du parallélisme entre les lignes de TOGO TELECOM et de la CEET ou de la CEB ou de la foudre (fig. 1.7).

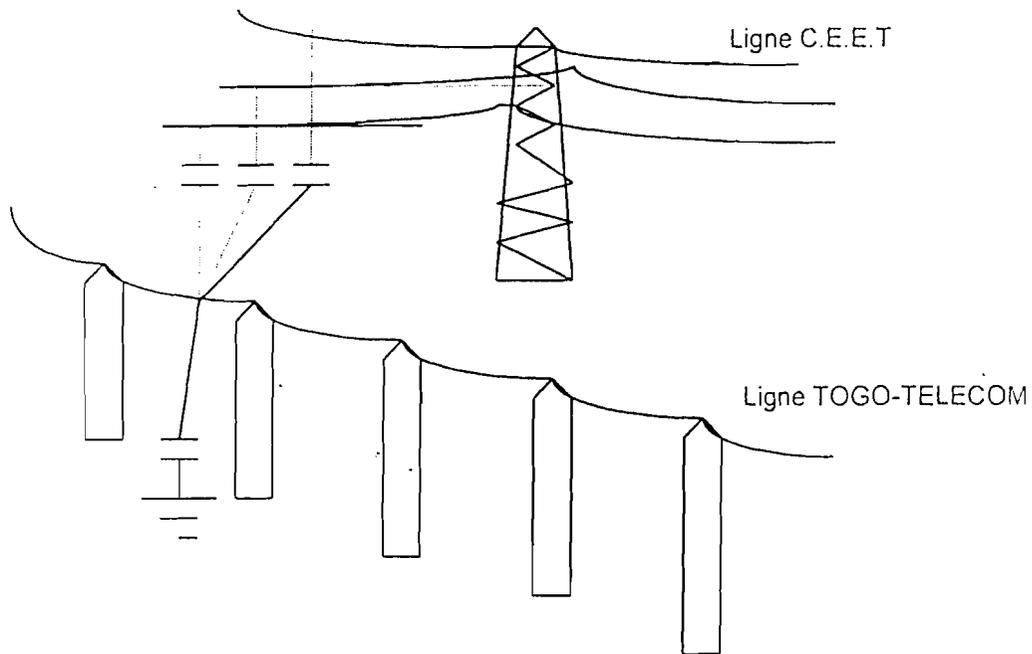


Fig. 1.7 : Couplage capacitif entre ligne TOGO-TELECOM et ligne CEET.

### > Couplage inductif

Ce mode de couplage se produit grâce à des boucles de courant avec retour par le sol. L'émetteur de la perturbation pourrait être, une ligne d'énergie aérienne ou souterraine, ou la foudre (fig. 1.8).

### > Couplage radioélectrique [19]

Ce couplage peut provenir du rayonnement direct qui serait causé par une propagation électromagnétique. L'émetteur de la perturbation est une ligne d'énergie, de télécommunication ou autre câblage qui est soumis à une propagation d'onde d'énergie plus ou moins importante.

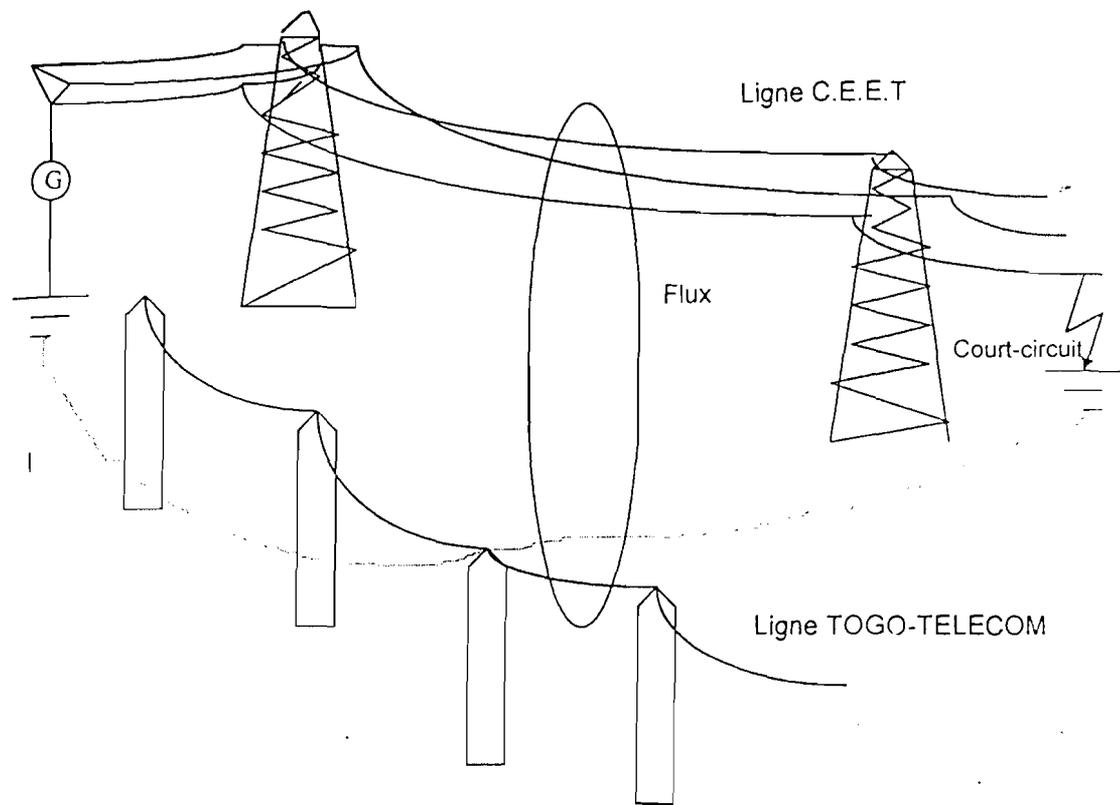


Fig. .1.8 : Couplage inductif entre ligne CEET et ligne TOGO-TELECOM.

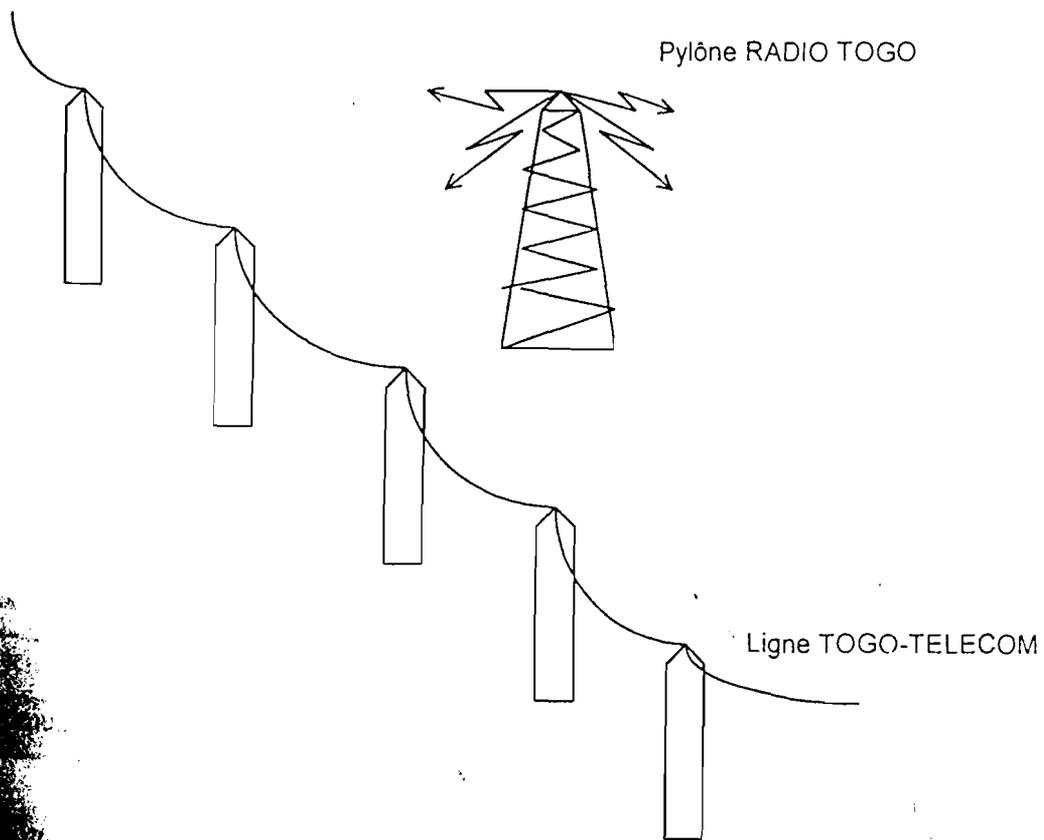


Fig. .1.9 : Couplage radioélectrique entre pylône de radiocommunication et ligne de télécommunication.

### b) - Protection

Les systèmes de protection comportent deux parties : l'écrêteur de surtension et la prise de terre.

#### > Dispositifs de parasurtension [76]

La première génération fut assurée par des blocs de carbone puis elle a été remplacée graduellement par des parasurtenseurs à gaz. La fonction de protection est positionnée entre les deux fils de la ligne ou entre ces fils et la terre ; leur action consiste donc à court-circuiter les lignes (Crowbar) de manière à envoyer l'énergie parasite dans la terre à travers la prise de terre.

Pour apprécier les formes de courant et les niveaux d'énergie mis en jeu par la foudre dans les réseaux de télécommunication, la Société Bell South en association avec d'autres opérateurs américains des télécommunications a réalisé des tests en grandeur nature. Des résultats de ces investigations (voir tableau 1.2), il est apparu que les contraintes de foudre subies par les lignes de télécommunications étaient largement inférieures à ceux qu'on croyait jusque là. Plus récemment, France Télécom en France, en collaboration avec le Centre National des Etudes de Télécommunications (CNET) fit la même démonstration. Les études ont montré que la probabilité d'avoir une onde supérieure à 100 A est au dessous de 0.001 %.

Energie absorbée ( $I^2t$ en Joule)	Résultats
Minimum	0.0002
Moyenne	0.0024
Maximum	0.55
Amplitude et forme d'onde	
Moyenne	8 A (10/100 $\mu$ S)
Maximum	27 A (10/1000 $\mu$ S)

Tableau 1.2 : Test des perturbations des lignes de télécommunication réalisées par la Société Bell South [98].

Ces études ont servi de base pour la conception de nouveaux modules de protection. Les dernières versions développées et qui sont de plus en plus disponibles sur le marché intègrent les fonctions suivantes :

- protection contre les surtensions bipolaire ou tripolaire (comme les protections conventionnelles);
- protection contre les surintensités ;
- capacité de fournir une indication sur son statut (protection activée, destruction ...).

Il est donc établi que la protection des lignes de télécommunication est pratiquement sur le point d'être maîtrisée avec un intérêt économique évident puisque les nouvelles solutions sont moins chères et plus performantes que les précédentes.

#### ➤ Les prises de terre

Chez TOGO TELECOM, les prises de terre sont installées pour la mise à la terre des cages de Faraday, des paratonnerres, des parafoudres, des boîtes RP (Raccordement de Point de coupure) et PC (Point de Coupure) des lignes, les écrans des câbles etc. L'étude, la conception et la réalisation des prises de terre des centrales et chez les abonnés sont faites de façons empiriques. Les valeurs des résistances des prises de terre sont données dans le tableau 1.3.

Les valeurs des prises de terre des autres installations telles que les paratonnerres, les parafoudres, les cages de Faraday, les centrales téléphoniques et les systèmes de transmission hertziens etc. sont fixées par des normes de l'Union Internationale des Télécommunications et Télégraphes (UIT-T) ou par les fabricants de matériels installés.

Il est temps de fonder l'étude, la conception et la réalisation des prises de terre sur des bases scientifiques et techniques. La connaissance géotechnique des sols est une des données fondamentales à prendre en compte.

Matériel raccordé à la prise de terre ou par l'intermédiaire d'un dispositif parasurtension		Utilisation de la prise de terre	Valeur maxi. en toute saison (en Ohm)
Installation dans un bâtiment de plus de 5 000 équipements		Fonctionnement et protection	1
Installation dans un bâtiment de moins de 5 000 équipements		Protection	5
Concentrateur de ligne	TELIC	Fonct. et Protection	5
	CTR 160	Protection	20
Conducteurs (boîtes RP dont RP1 en ligne)		Protection	20
Filtres d'aiguillage (PTT, SPAX, SPAY, SPAS,...)		Protection	50
Porteur des câbles		Protection	50
Poste simple d'abonné		Protection	50
Poste d'abonné avec fax, télex, taxe, etc.		Fonct., Protection	50
Cabine		Fonct., Protection	50
Sous répartiteur		Protection	10
Enveloppe des câbles à facteur réducteur		Protection	La plus faible possible
Boîte de protection d'adduction téléphonique des sites électriques		Protection	10

Tableau 1.3 : Valeurs de résistance des prises de terre à TOGO TELECOM [6].

L'analyse précédente nous a permis de comprendre les effets néfastes que le courant électrique peut avoir sur les personnes et les équipements électriques surtout lorsque ces derniers sont mal protégés ou ne sont pas du tout protégés. Un des moyens de protection utilisés par TOGO TELECOM, la CEET et la CEB est justement la prise de terre.

Pour mieux appréhender la prise de terre dans son rôle de protection nous allons étudier les relevés de ses données caractéristiques, la mesure de sa résistance et sa réalisation pratique.

## 1.4 – CONSTITUTION D'UNE PRISE DE TERRE

En électricité, la sécurité des personnes et des biens contre les risques d'origine électrique est assurée par deux équipements indissociables :

- une prise de terre ;
- un dispositif de protection (un dispositif différentiel le plus souvent).

Les deux sont conçus pour assurer la protection des personnes contre le contact simultané entre, d'une part, l'enveloppe métallique d'un appareil, appelée masse, mise accidentellement sous tension par suite de la défaillance de son isolation et, d'autre part, la terre ou un élément conducteur (tuyau, sol carrelé, ciment,...) non isolé de la terre, ou encore une autre masse reliée à la terre ou non.

Si le disjoncteur de branchement ne possède pas la fonction différentielle, un ou plusieurs dispositifs différentiels (disjoncteurs ou interrupteurs) doivent être installés en aval du disjoncteur de branchement.

Les courants nominaux différentiels de ces dispositifs, 650, 500, 300, 100, 30 mA doivent être choisis en fonction des caractéristiques de la prise de terre afin de limiter la tension de contact à la valeur définie par différentes normes, entre autres, la norme NFC 15-100 [73]. (voir tableau 1.4).

Courant nominal du dispositif différentiel	Valeur maximale de la résistance de la prise de terre
650 mA	38 ohms
500 mA	50 ohms
300 mA	83 ohms
100 mA	830 ohms

Tableau 1.4 : Résistances des prises de terre en fonction de la sensibilité du dispositif différentiel selon la norme NFC 15-100 [73] & [27].

Ce tableau donne un aperçu de la norme NFC 15-100, [73] sur les valeurs admises pour la résistance des prises de terre.

Comment est alors constituée une prise de terre ?

Une prise de terre est constituée d'une électrode en métal bon conducteur et non corrodable en bon contact avec le sol.

Cette électrode peut être :

- soit un câble enterré en cuivre nu de  $25 \text{ mm}^2$  de section ou en acier galvanisé d'au moins  $95 \text{ mm}^2$ ,
- soit un feuillard en acier d'au moins  $100 \text{ mm}^2$  de section et  $3 \text{ mm}^2$  d'épaisseur, disposé de préférence sur champ, ou un câble en acier d'au moins  $95 \text{ mm}^2$  de section, noyé dans le béton de propreté des fondations du bâtiment enrobé sur tous ses côtés d'une épaisseur d'au moins 3 cm.

Les conducteurs reliant cette prise de terre aux conducteurs de protection doivent être constitués de fers ronds lisses pour béton armé d'au moins 50 mm<sup>2</sup> de section, enrobés dans le béton de la construction. Ces conducteurs doivent être soudés aux feuillards constituant la prise de terre décrite plus haut.

Les armatures des éléments en béton armé (radiers, poteaux, voiles, poutres et planchers) doivent être reliées à la prise de terre ou aux conducteurs de protection en autant de points que possible. Ces liaisons peuvent être effectuées par ligatures.

Par contre, il faut éviter de relier au système équipotentiel ainsi constitué les armatures actives de précontrainte et leurs gaines éventuelles.

Les connexions entre éléments en acier et conducteurs en cuivre ne doivent jamais être nouées dans le béton et doivent se faire à l'aide de bornes appropriées installées en montage apparent.

- soit un ou plusieurs piquet (s) enfoncé (s) verticalement au-dessous du niveau permanent d'humidité, à une profondeur minimale de 2 m ;

Ces piquets peuvent être :

- ◆ des tubes en acier galvanisé de diamètre au moins égal à 25 mm ;
- ◆ des profilés en acier doux galvanisé d'au moins 60 mm de côté ;
- ◆ des barres en cuivre ou en acier recouvertes de cuivre, d'au moins 15 mm de diamètre ;

soit un ensemble de piliers métalliques enterrés (même s'ils sont enrobés de béton) et interconnectés, répartis sur le pourtour d'un bâtiment.

## 1.5- REALISATION DE LA PRISE DE TERRE [54], [27]

La qualité d'une prise de terre provient de sa résistance et de la résistivité du sol.

Sur le plan théorique, on peut réaliser une prise de terre au moyen d'un piquet enfoncé dans le sol. L'écoulement d'un courant de défaut se fera donc d'abord à travers les résistances de contact qui se subdivisent elles-mêmes en une multitude de résistances constituées par les intervalles existant entre chacun des constituants du terrain considéré (Fig. 1.10).

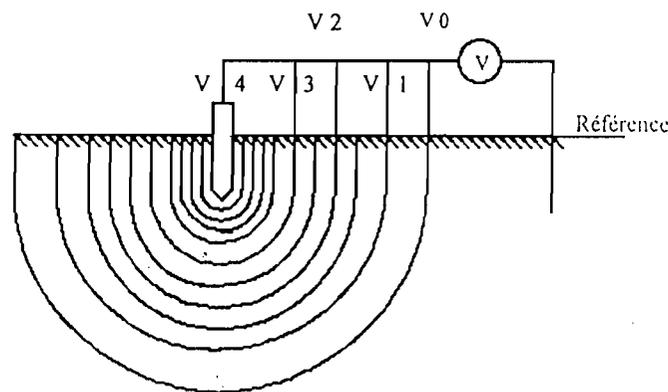


Fig. 1.10 : Ecoulement d'un courant de défaut.

A une certaine distance de la prise de terre, le nombre des résistances de contact en parallèle tend vers l'infini et constitue une résistance équivalente quasiment nulle. A partir de cette limite, quel que soit le courant de défaut, le potentiel est nul. La zone de référence qui constitue la réelle mise à la terre est atteinte. Il existe donc autour de chaque prise de terre une zone d'influence dont on ignore la forme et l'étendue.

La qualité d'une prise de terre dépendra donc de sa forme, de sa surface et de son emplacement dans le terrain (Fig. 1.11).

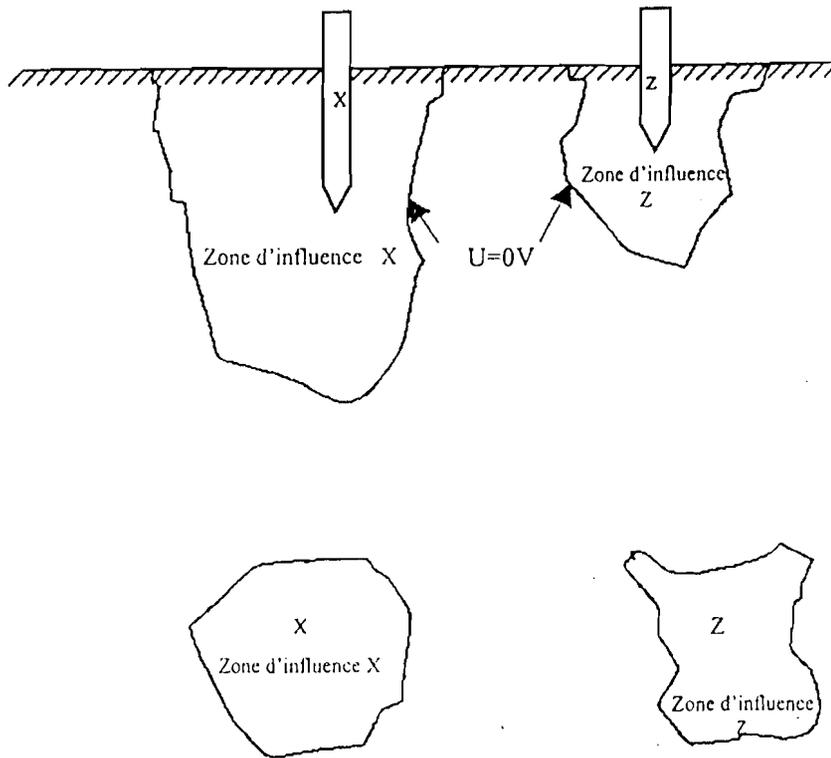


Fig. 1.11 : Zone d'influence d'une prise de terre.

On doit établir les prises de terre de préférence dans les fonds de fouille des bâtiments ou dans les caves et de toute façon en des endroits abrités de la sécheresse et du gel.

Les prises de terre doivent être tenues à distance des dépôts ou infiltrations pouvant les corroder (fumier, purin, produits chimiques, coke...)

Elles ne doivent jamais être constituées de pièces métalliques plongées dans l'eau ni établies dans des pièces d'eau ou des rivières (médiocre conductivité de l'eau, risque d'assèchement, danger pour les personnes entrant en contact avec l'eau au moment d'un défaut).

Les différents types de prises de terre sont :

Conducteurs enfouis

- Le ceinturage à fond de fouilles intéressant le périmètre du bâtiment apporte une solution efficace dans le cas de la construction d'un bâtiment ;
- Lorsque le bâtiment est construit, donc lorsque la pose à fond des fouilles n'est plus réalisable, on peut profiter des raccordements divers (eau, gaz, électricité) pour poser dans la même tranchée le câble de terre à condition de ménager un espace d'au moins 20 cm par rapport aux autres canalisations. (Fig. 1.12 et 1.13).

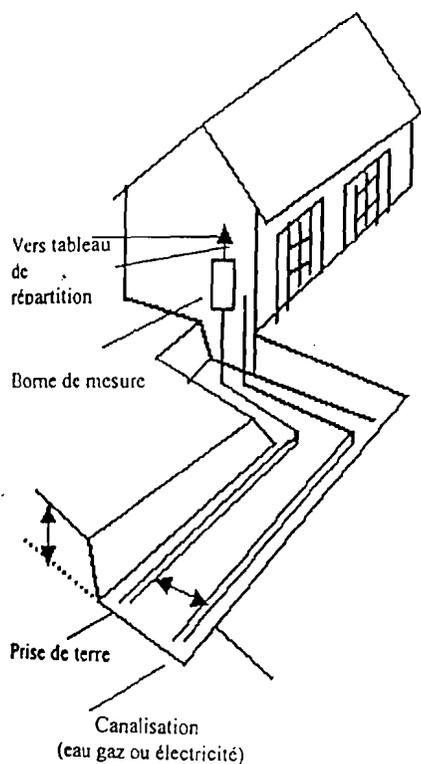


Fig. 1.12 : Conducteur en tranchée.

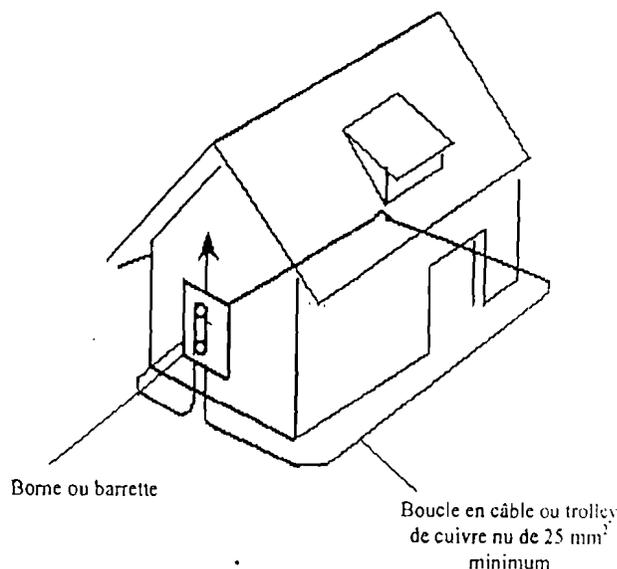


Fig. 1.13 : Boucle à fond de fouilles.

### ► Piquets

Les piquets peuvent être foncés d'un seul élément s'ils sont de faible longueur, ou par élément, ceux-ci étant emboîtés ou vissés.

Ils peuvent également être installés par forage dans les couches de sol à sables, gravillons ou cailloux puis par fonçage lorsque l'on atteint la couche conductrice. (Fig. 1.14).

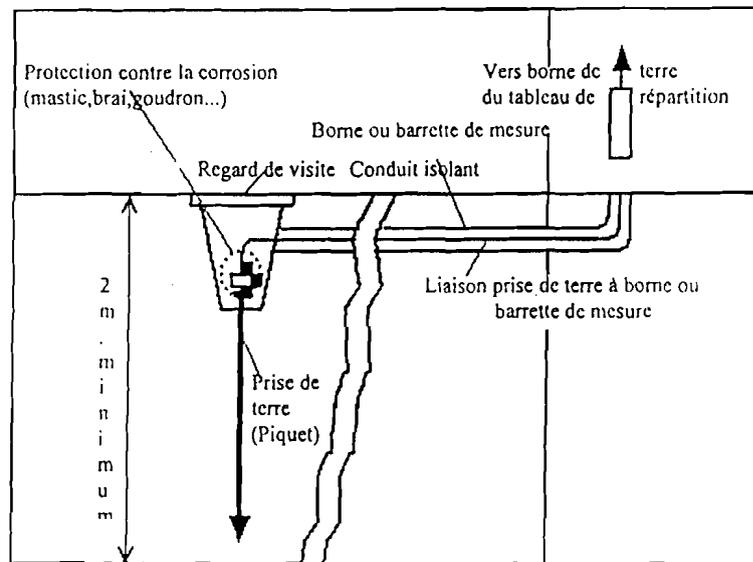


Fig. 1.14 : Piquet vertical.

### ➤ Piliers métalliques enterrés

La liaison entre piliers doit être réalisée par un câble de même section que celle exigée par la prise de terre en conducteurs enfouis. Les connexions doivent être protégées de l'oxydation.

## 1.6 – LA MESURE DES PRISES DE TERRE ET DE LA RESISTIVITE DES SOLS

La résistance de la prise de terre dépend :

- de ses dimensions ;
- de sa forme ;
- de la résistivité du terrain dans lequel elle est établie.

La résistivité du terrain quant à elle varie d'un point à un autre :

La résistivité du terrain quant à elle varie d'un point à un autre :

- suivant la profondeur ;
- le taux d'humidité ;
- la température.

Le gel, la sécheresse augmentent la résistivité des terrains et leur effet peut se faire jusqu'à plus de deux (2) m de profondeur.

La résistance R (en ohms) de la prise de terre peut être calculée d'une façon générale, de la manière suivante :

- Pour les conducteurs enfouis :  $R = 2 \rho/L$  (L est la longueur de la tranchée en mètres,  $\rho$  est la résistivité du terrain en ohm.mètres) la résistance R peut être diminuée en augmentant la longueur de la tranchée ;
- Pour les piquets verticaux :  $R = \rho/L$  (L est la longueur du piquet en mètres,  $\rho$  est la résistivité du terrain en ohms.mètres), la résistance R peut être diminuée en reliant plusieurs piquets en parallèle, de préférence alignés et distants d'au moins leur longueur pour deux (2) piquets, et davantage au-delà ;
- Pour les piliers enterrés :  $R = 0,366 (\rho/L) \log (3L/d)$  (L est la longueur enterrée du pilier, en mètres, d le diamètre du cylindre circonscrit au pilier, en mètre,  $\rho$  la résistivité du terrain en ohm.mètres).

Le paragraphe 3.4 montre en détail les formes exactes des formes de calcul de la résistance R des différentes formes de prises de terre.

La valeur de la résistance de la prise de terre dont la valeur maximale en ohms est imposée par la norme NFC 15-100 [73] dépend directement de la résistivité du terrain où est implantée cette prise. La résistivité d'un terrain est un élément très variable selon les régions et le climat comme le montre le tableau 1.5.

NATURE DU TERRAIN	RESISTIVITE (en ohm.mètre)
- Terrains marécageux .....	de quelques unités à 30
- Limon .....	20 à 100
- Humus .....	10 à 150
- Tourbe humide .....	5 à 100
- Argile plastique .....	50
- Marmes et argiles compactes .....	100 à 200
- Marmes du jurassique .....	30 à 40
- Sables argileux .....	50 à 500
- Sables siliceux .....	200 à 3 000
- Sol pierreux nu .....	1 500 à 3 000
- Sol pierreux recouvert de gazon .....	300 à 500
- Calcaires tendres .....	100 à 300
- Calcaires compacts .....	1000 à 5 000
- Calcaires fissurés .....	500 à 1 000
- Schistes .....	50 à 300
- Micaschistes .....	800
- Granits et grès en altération .....	1 500 à 10 000
- Granits et grès très altérés .....	100 à 600

Tableau 1.5 : Quelques valeurs de résistivités des sols selon Technique & Documentation.

### 1.6.1 - Mesures des prises de terre

La mesure des résistances de prise de terre doit obligatoirement s'effectuer à l'aide d'un contrôleur de terre d'une très bonne qualité. Celui-ci doit être capable de réaliser des mesures de faible ou très faible valeur sans être perturbé par la présence dans le sol de nombreux courants dits « courants telluriques ». Le contrôleur utilisé doit être muni de tous les dispositifs permettant de s'affranchir des courants parasites : générateur de courant dont la fréquence doit être choisie en dehors de celle du secteur et de ses harmoniques, condensateurs « bloquant » les composantes continues, filtres sélectifs atténuant l'influence des composantes alternatives « secteur » circulant dans les sols.

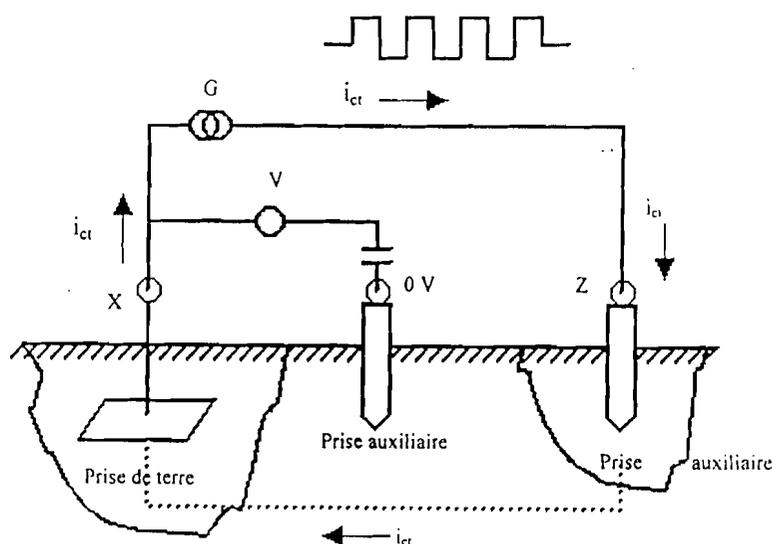


Fig. 1.15 : Mesure d'une prise de terre.

À étant la prise de terre à mesurer (Fig. 1.15) on fait circuler, à l'aide d'un générateur approprié  $G$ , un courant alternatif ( $i$ ) constant à travers la prise auxiliaire  $C$  ( $Z$ ) dite « prise d'injection courant », le retour se réalisant par la prise de terre  $A$  ( $X$ ).

On mesure la tension  $U$  entre la prise  $A$  ( $X$ ) et le point du sol où le potentiel est nul au moyen d'une autre prise auxiliaire  $P$  ( $Y$ ) dite « prise de potentiel  $0\text{ Volt}$  ».

La tension  $U$  est mesurée après un redressement, synchronisé avec le générateur  $G$ , de façon à éliminer l'influence des courants parasites alternatifs. Le quotient de la tension  $U$ , ainsi mesuré, par le courant constant injecté ( $i$ ), donne la résistance recherchée.

➤ Méthode de mesure en ligne (Méthode dite « des 62 % »)

La mesure de la résistance d'une prise de terre nécessite donc l'emploi de deux (2) électrodes auxiliaires (injection de courant et référence de potentiel 0 Volt).

La position des deux (2) électrodes auxiliaires, par rapport à la prise de terre à mesurer, est déterminante pour effectuer une bonne mesure de façon à sortir des zones d'influences des terres, comme nous venons de le voir ci-dessus.

Seuls des calculs complexes, à partir de cartes de résistivité des sols, permettraient de déterminer cette distance. Toutefois, il existe des méthodes empiriques qui permettent dans la majorité des cas, de guider l'opérateur pour positionner correctement ces électrodes afin de réduire dans une proportion acceptable l'influence sur la mesure du recouvrement partiel des zones d'influences de la prise à mesurer  $X$  et de la prise d'injection de courant  $Z$ .

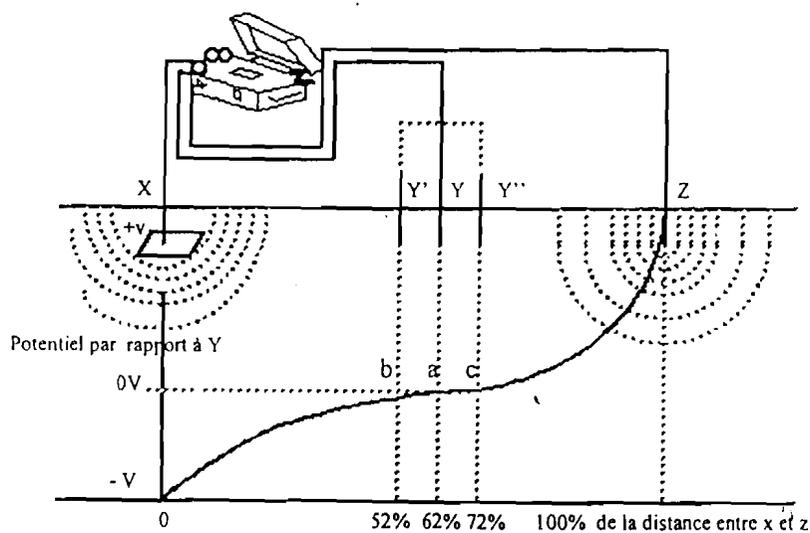


Fig. 1.16 : Méthode des 62 %.

Pour des distances très grandes entre les prises X et Z, la courbe fournissant le relevé des différences de potentiel  $V_Y - V_X$  le long de la droite XZ, aurait l'allure indiquée sur la figure 1.16 mais avec un point d'inflexion à pente nulle dans la zone correspondant à la terre de référence, zone se situant à environ 50 % de la distance XZ.

En réalité, avec les longueurs de cordon pratiquement utilisées, la courbe relevée a l'allure indiquée dans la figure 1.16 pour un terrain homogène obtient une valeur par défaut en plaçant le piquet Y à 50 % de la distance XZ. Quand la terre X est localisée telle que celle réalisée par l'enfoncement d'un piquet, on obtient une valeur plus exacte en plaçant le piquet Y à 62 % de la distance XZ (d'où le nom de la méthode).

Dans tous les cas, il convient de s'assurer en déplaçant le piquet Y en Y' et Y'' de part et d'autre de sa position initiale sur la figure XZ, que la pente de la courbe au voisinage du point de mesure est suffisamment faible eu égard à la précision recherchée. Dans le cas contraire, il faut augmenter l'espacement des prises auxiliaires et recommencer les mesures.

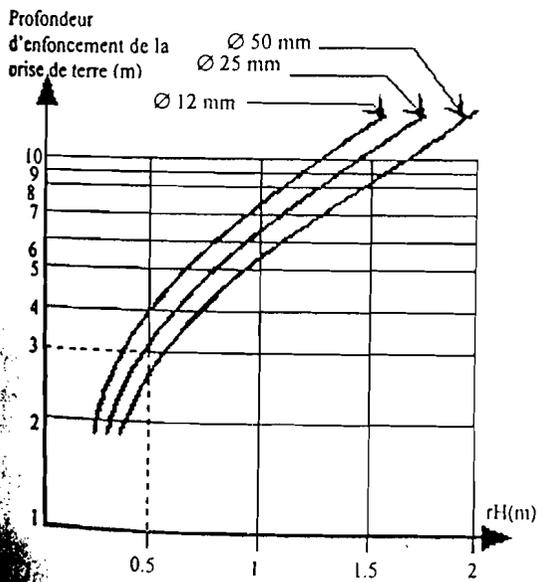


Fig. 1.17 : Rayon hémisphérique équivalent  $rH$ .

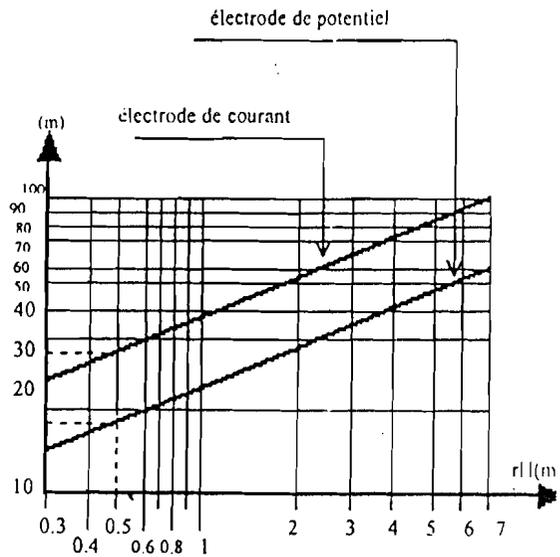


Fig. 1.18 : Rayon hémisphérique  $rH$ .

Les courbes des figures 1.17 et 1.18 permettent de guider l'utilisateur en définissant :

- Pour une prise de terre constituée par un piquet la valeur du rayon,  $r_H$  de la prise hémisphérique équivalente.
- Les distances  $XY$  et  $XZ$  à prévoir pour les prises auxiliaires en fonction du rayon de la prise hémisphérique équivalente. Par exemple : un piquet de terre de 25 mm de diamètre enfoncé à 3 m de profondeur donne un rayon de 0,50 m, ce qui correspond à des distances minimales devant séparer respectivement les électrodes de courant et de potentiel de la prise de terre de: 28 et 17,5 m.

### 1.6.2 - Mesure de la résistivité des sols

La mesure de la résistivité des sols se pratique pour l'analyse des caractéristiques des terrains afin de définir au mieux la position et la profondeur nécessaire à l'implantation des prises de terre sur de grandes installations.

Diverses méthodes sont utilisées pour déterminer la résistivité d'un terrain dont le prélèvement d'échantillons et la méthode des « deux électrodes ». Deux petites électrodes sont fixées sur un piquet isolant que l'on enfonce dans le sol. La mesure de la résistance inter-électrodes donne une indication de la résistivité du sol. Mentionnons que ces deux méthodes ne fournissent que des indications très locales et par conséquent insuffisantes, voire trompeuses, pour la conception des prises de terre.

On utilise parfois la mesure de la résistance de terre d'une électrode de forme connue (piquet, par exemple) pour déterminer la résistivité du terrain qui l'entoure. Cette méthode a l'avantage de fournir une mesure globale, mais elle ne s'applique bien que si la prise de terre à implanter est de dimensions comparables à celles de l'électrode utilisée comme référence.

Les méthodes les plus utilisées pour déterminer la résistivité du sol sont celles des « quatre électrodes » et la méthode de WENNER.

a) - Méthode des quatre électrodes

Pour connaître à l'aplomb d'un point O la résistivité du sol en fonction de la profondeur, on fait circuler à l'aide d'un générateur G un courant I entre deux prises de terre ponctuelles Z et X (Fig. 1.19).

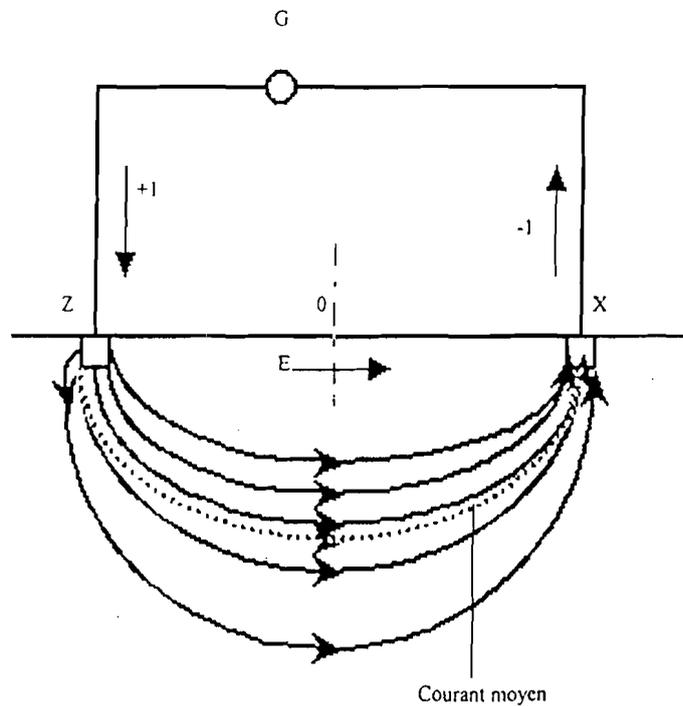


Fig. 1.19 : Mesure de la résistivité à l'aplomb du point O.

En sol homogène de résistivité  $\rho$ , la valeur du champ électrique E au point O qui est dû à la présence des charges électriques de signes contraires venant de Z et de X, a pour valeur :

$$E = \frac{\rho}{2\pi} \left[ \frac{(+I)}{ZO^2} - \frac{(-I)}{OX^2} \right] \quad (\text{Eq. 1.8})$$

Si le point O est situé au milieu de Z X tel que  $ZO = OX = d$ , l'on en déduit la formule suivante de la résistivité du sol sous le point O :

$$\rho = \pi d^2 \frac{E}{I} \quad (\text{Eq. 1.9})$$

Le sol étant rarement homogène, la formule exprime la résistivité apparente des couches cumulées du sol sous le point O jusqu'à la profondeur atteinte par le filet de courant moyen circulant entre les électrodes Z et X.

En pratique, on détermine le champ électrique E en faisant le rapport entre la différence de potentiel  $\Delta V$  qui existe entre deux électrodes de terre Y et  $X_v$  disposées symétriquement par rapport à O, et leur écartement « a » (Fig. 1.20).

$$E = \Delta V/a \quad (\text{Eq. 1.10})$$

La différence de potentiel  $\Delta V$  peut être exprimée en fonction de la distance respective des points Y et  $X_v$  par rapport aux courants +I et -I.

$$\Delta V = V_C - V_D = \frac{a \cdot I}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{ZY} - \frac{1}{YX} \right) - \left( \frac{1}{ZX_v} - \frac{1}{X_v X} \right) \right] \quad (\text{Eq. 1.11})$$

On en déduit la valeur de la résistivité apparente  $\rho$  (expression Eq. 1.12) des couches cumulées du sol sous le point O : (Fig. 1.20).

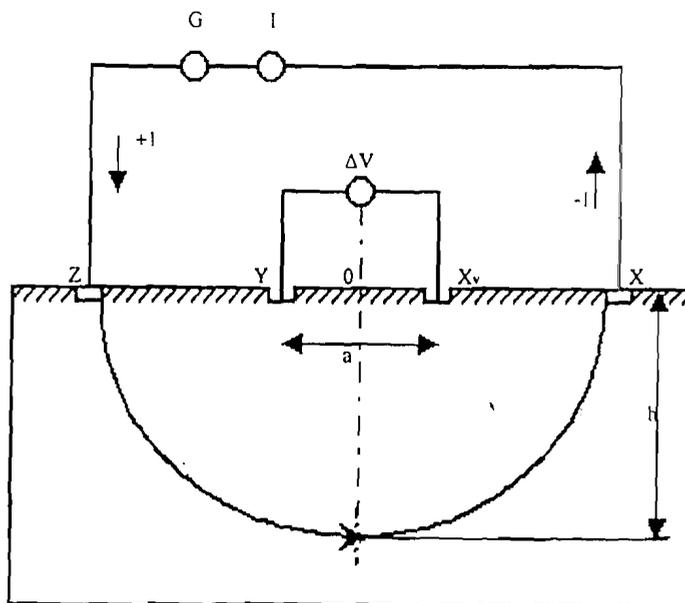


Fig. 1.20 : Principe de mesure de la résistivité apparente.

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{ZY} - \frac{1}{YX} - \frac{1}{ZX_V} + \frac{1}{X_VX}} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Eq. 1.12})$$

C'est la formule générale pour la mesure de la résistivité apparente des sols, quelle que soit la longueur des segments en négligeant l'enfoncement des piquets dans le sol. Le terme  $\Delta V/I$  est la résistance  $R$  qui est mesurée avec un ohmmètre de terre à quatre bornes dont le circuit voltmétrique est relié aux prises  $Y$  et  $X_V$  et le circuit ampèremétrique aux prises  $Z$  et  $X$ .

Dans le cas où le sol est homogène, la résistivité apparente est identique à la résistivité réelle.

Par application de cette méthode, WENNER a su apporter des modifications importantes influant sur les résultats d'où la méthode de WENNER.

b) - Méthode de WENNER [104] [27]

La méthode de mesure de la résistivité apparente des sols la plus utilisée est celle de WENNER dans laquelle les quatre électrodes sont disposées en ligne et équidistantes.

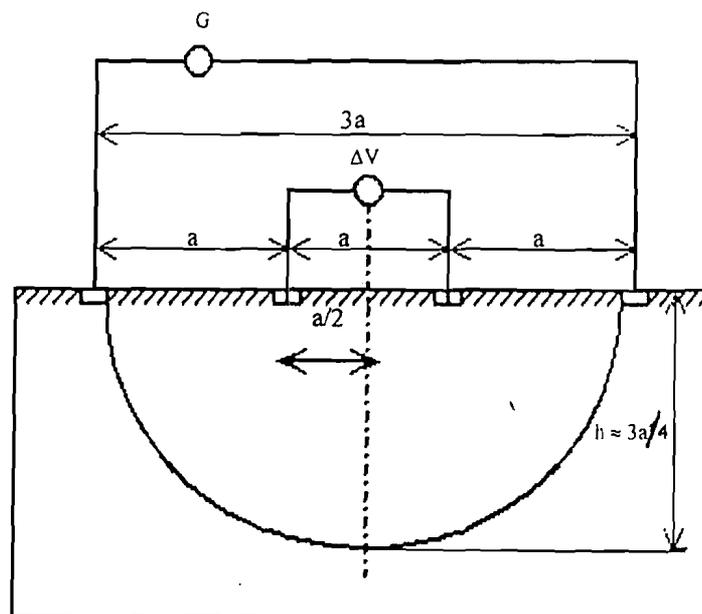


Fig. 1.21 : Méthode de WENNER.

L'appareil de mesure est un ohmmètre de terre classique. Les deux électrodes extrêmes sont celles d'injection du courant de mesure  $I$  ; les deux centrales sont les électrodes de mesure du potentiel  $\Delta V$  (Fig. 1.21).

Le point O de mesure de la résistivité se trouve au milieu d'un système symétrique entre les électrodes de potentiel. La distance « a » entre deux électrodes adjacentes est appelée « base de mesure » ; la distance entre les électrodes extrêmes est la « ligne d'émission » (elle est égale à « 3 a » avec la méthode de WENNER).

La formule générale donnant la valeur de la résistivité apparente cumulée des couches de terrain situées sous le point de mesure se trouve simplifiée avec la méthode de WENNER.

Elle devient :

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot R \quad (\text{Eq. 1.13})$$

avec :

$\rho$  : - résistivité apparente cumulée en  $\Omega \cdot m$  ;

a : - base de mesure en mètres ;

R : - valeur en ohms, lue sur l'ohmmètre de terre.

A l'aplomb des deux électrodes centrales (mesure du potentiel), la densité de courant dans le sol décroît régulièrement lorsque la profondeur augmente. Le courant pénètre d'autant plus profondément dans le sol que les électrodes d'injection du courant sont éloignées.

La résistivité apparente mesurée par la méthode de WENNER est donc une moyenne des résistivités réelles du terrain, chaque valeur étant pondérée par la densité de courant à la profondeur considérée. En pratique, on peut admettre que la résistivité apparente est essentiellement celle des couches comprises entre la surface du sol et la profondeur à laquelle la densité de courant n'a que la moitié de sa valeur en surface. En sol homogène, cette « profondeur d'investigation » h est de l'ordre de grandeur de la distance a séparant deux piquets adjacents (h est compris entre a et 0,75 a).

## 1.7 - TENSIONS DE PAS ET TENSIONS DE TOUCHER (OU DE CONTACT)

Le fait de toucher un objet relié à une prise de terre ou de se trouver à proximité de celle-ci au moment précis où elle écoule un courant de défaut, peut dans certaines conditions, constituer un risque.

Le risque d'électrocution est lié, non à la valeur de l'élévation du potentiel de terre, mais au courant traversant le corps. Les principaux paramètres à considérer sont notamment :

- l'amplitude et la durée d'application du courant ;
- le trajet suivi par le courant, donc les points d'application de la tension ;
- la valeur des impédances rencontrées.

### ➤ Tension de pas au voisinage d'une prise

La tension de pas est la différence de potentiel entre deux points à la surface du sol séparés par une distance de un pas, que l'on assimile à un mètre dans la direction du gradient de potentiel maximal (Fig. 1.22a).

### ➤ Tension de contact (ou de toucher) au voisinage d'une prise de terre

La tension de contact est la différence de potentiel entre une structure métallique mise à la terre et un point à la surface du sol à une distance horizontale maximale que l'on peut atteindre, soit approximativement un (1) mètre. La figure 1.22b définit de la façon la plus simple la tension de contact.

La prise de terre conduisant aux plus fortes tensions de pas, c'est-à-dire aux gradients les plus élevés, est le piquet de terre (Fig. 1.23). La chute de tension depuis la surface de l'électrode jusqu'à la distance  $x$  s'exprime par :

$$U - U_x = \frac{1}{2\pi} \rho_i \text{Log} \frac{x}{r} \quad (\text{Eq. 1.14})$$

où :

$r$  : est le rayon de piquet ;

$x$  : est la distance égale à 1m (cas de tension de pas).

Il est difficile de donner une tension limite admissible car les personnes ont généralement des chaussures plus ou moins électriquement isolants qui peuvent réduire considérablement le courant dans le corps. Les courants s'écoulant par les terres étant connus, il convient de vérifier que les tensions de pas ne dépassent pas les valeurs limites admises par les normes NFC 15-100 [73].

Si les conditions sont particulièrement défavorables (chaussures détrempées, gants humides...), une valeur indicative est admissible pour les calculs.

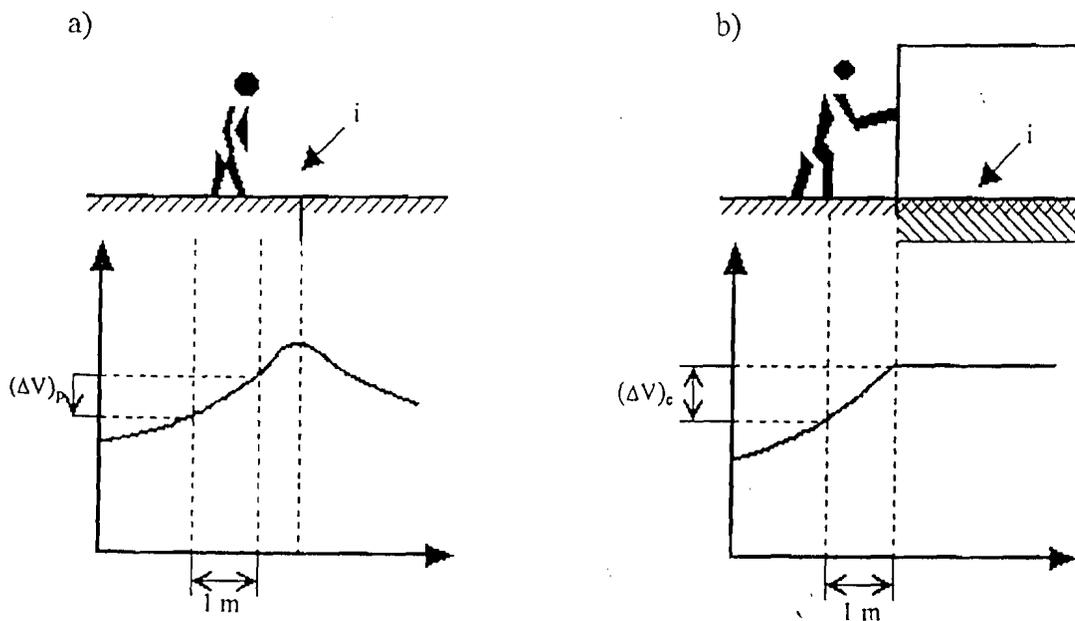


Fig. 1.22 : Tension de pas et tension de toucher :

a) Potentiel du sol  $V$  et tension de pas  $(\Delta V)_P$  près d'un conducteur enfoui écouant un courant.

b) Potentiel du sol  $V$  et tension de contact  $(\Delta V)_c$  près d'une structure métallique écouant un courant.

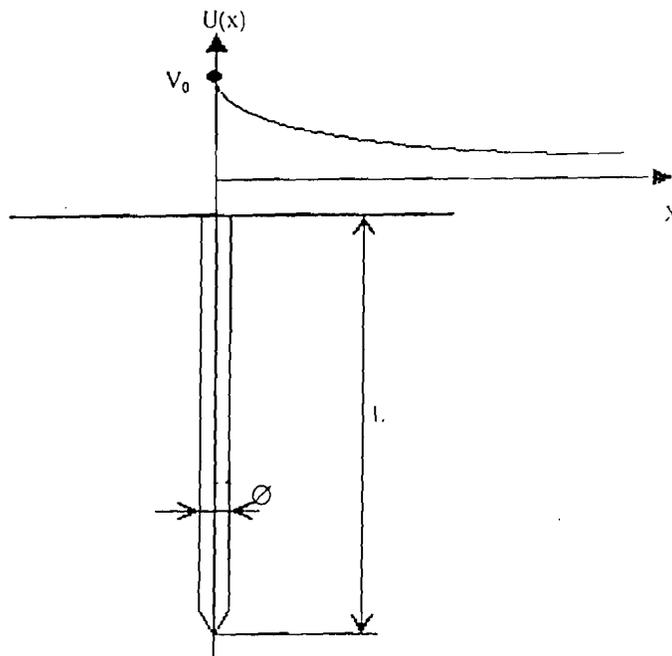


Fig.1.23 : Gradient de potentiel à partir d'un piquet de terre.

Il convient d'examiner à présent le régime du neutre pour la distribution d'énergie et les unités industrielles.

## 1.8 -INFLUENCE DU REGIME DU NEUTRE

Lors de la conception d'un réseau électrique, il faut choisir un schéma de liaison de neutre à la terre : le neutre peut être soit isolé, soit relié intentionnellement à la terre. Aujourd'hui l'évolution des besoins permet de distinguer trois (3) Schémas de Liaisons à la Terre (SLT), longtemps appelés régimes du neutre tels que définis par les normes électriques internationales, [69], [73] :

- la mise au neutre ;
- le neutre à la terre ;
- le neutre isolé ou impédant.

Ces trois (3) schémas ont une même finalité en terme de protection des personnes et des biens : la maîtrise des effets des défauts d'isolement. Ils sont considérés comme équivalents sur le plan de la sécurité des personnes contre les contacts indirects. Il n'en est pas de même nécessairement pour la sûreté de l'installation électrique Basse Tension (BT) en ce qui concerne :

- la disponibilité de l'énergie (continuité de service) ;
- la maintenance de l'installation.

Ces grandeurs chiffrables font l'objet d'exigence de plus en plus fortes dans les usines et les immeubles tertiaires. Par ailleurs, les systèmes de contrôle commande des bâtiments et de gestion de la distribution d'énergie électrique jouent un rôle de plus en plus important au niveau de la gestion et de la sûreté.

Cette évolution de besoin de sûreté n'est donc pas sans effet sur le choix du Schéma de Liaison à la Terre (SLT) [21]. Il faut rappeler que les conditions de continuité de service ont joué un rôle lors de l'émergence des SLT [54].

Dans toute installation, la continuité de service en présence d'un défaut d'isolement est liée au régime du neutre. Un neutre isolé permet la continuité de service en Basse Tension et même en Haute Tension, sous réserve de respecter le décret sur la protection des travailleurs. Un neutre direct à la terre ou faiblement impédant impose au contraire un déclenchement dès l'apparition du premier défaut d'isolement.

L'importance des dommages que subissent certains équipements tels que les moteurs et les alternateurs présentant un défaut d'isolement interne, dépend également du régime du neutre.

Dans un réseau à neutre direct à la terre, une machine affectée d'un défaut d'isolement est fortement endommagée en raison de la valeur élevée des courants de défaut.

Dans un réseau à neutre isolé ou fortement impédant, les dommages sont au contraire réduits mais il faut que les équipements aient un niveau d'isolement compatible avec le niveau de surtension pouvant se développer dans ce type de réseau [34], [35].

Pour assurer la protection des personnes et la continuité d'exploitation, les conducteurs et les pièces sous tension d'une installation électrique sont « isolés » par rapport aux masses reliées à la terre. L'isolement est réalisé par :

- l'utilisation de matériaux isolants ;
- l'éloignement qui nécessite des distances d'isolement dans les gaz (par exemple l'air) et des lignes de fuite (concernant l'appareillage, par exemple chemin de contournement d'un isolateur).

Un isolement est caractérisé par des tensions spécifiées qui, conformément aux normes, sont appliquées aux produits et aux équipements neufs :

- tension d'isolement (plus grande tension du réseau) ;
- tension de tenue au choc de foudre (onde 1,2 à 50  $\mu$ s) ;
- tension de tenue à la fréquence industrielle ( $2U+1000V/mn$ ).

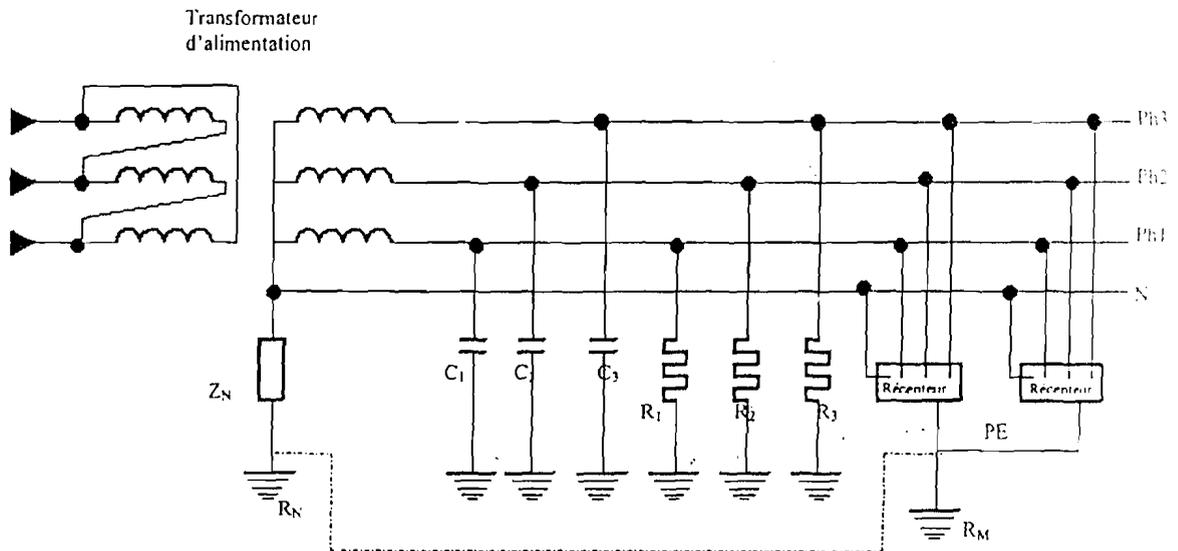
Le choix du régime du neutre, tant en Basse Tension qu'en Haute Tension, dépend à la fois de la nature de l'installation et de celle du réseau. Il est également influencé par la nature des récepteurs et la recherche de la continuité de service [34], [35], [54], [55].

### **1.8.1 - Résistance d'isolement et capacités par rapport à la terre** (Fig. 1.24)

En Basse Tension (BT), comme en Haute Tension (HT), un réseau présente toujours une résistance de fuite entre chacune de ses phases et la terre [87]. En Basse Tension, on admet qu'un réseau est correctement isolé quand la résistance de fuite des phases par rapport à

la terre ( $R_1, R_2, R_3$ ) sont au moins égales à  $1000 \Omega / V$  avec un minimum de  $250 \text{ k}\Omega / 100\text{m}$  de canalisation [73]. Sur un réseau correctement isolé on admet toujours, que :

$$R_1 = R_2 = R_3 = R \tag{Eq. 1.15}$$



PE : Conducteur de protection  
 $C_1, C_2, C_3$  : capacités des conducteurs de phase par rapport à la terre  
 $R_1, R_2, R_3$  : résistances d'isolement  
 $Z_N$  : impédance de mise à la terre du neutre

$R_N$  : résistance de la prise de terre du neutre  
 $R_M$  : résistance de la prise de terre des masses  
 Ph1 , Ph2 , Ph3 : désignations des phases  
 N : neutre

Fig.1.24 : Schéma équivalent d'un réseau.

En plus des résistances de fuite, il convient de tenir compte de la capacité que présente chaque conducteur de phase par rapport à la terre. Soient  $C_1, C_2, C_3$ , ces capacités; leur valeur est proportionnelle à la longueur des câbles en Basse Tension, elle est de l'ordre de  $0,25 \mu\text{F}$  par phase et par kilomètre. On admet toujours que :

$$C_1 = C_2 = C_3 = C \tag{Eq. 1.16}$$

En Haute tension, la valeur de ces capacités dépend du niveau de tension, ainsi que de la nature des câbles employés et de celle des isolants entrant dans leur composition.

### 1.8.2 - Prise de terre et résistance de terre [28], [77]

Lorsque le neutre d'un réseau est mis à la terre, que ce soit directement ou par l'intermédiaire d'une impédance, il est relié à une prise de terre du neutre, présentant une résistance  $R_N$  non nulle.

Dans une installation électrique Basse ou Haute Tension, les masses métalliques des récepteurs sont interconnectées. L'interconnexion peut être totale ou réalisée par groupes de récepteurs. Chaque groupe interconnecté est relié à une prise de terre de valeur  $R_M$ . Il est également possible qu'une ou plusieurs masses soient reliées individuellement à la terre. Les prises de terre des masses et du neutre peuvent ou non être interconnectées et sont parfois communes. Le conducteur d'interconnexion des masses est appelé conducteur de protection et est noté PE ou PEN.

Un réseau Basse ou Haute Tension est donc toujours caractérisé par :

- une résistance d'isolement  $R$  ;
- une capacité  $C$  entre chaque phase et la terre ;
- une prise de terre du neutre de valeur  $R_N$  ;
- une prise de terre des masses de valeur  $R_M$ .

### 1.8.3 - Régime de neutre et courant de défaut

Considérons un réseau triphasé Basse ou Haute Tension (Fig. 1.25). Le neutre peut être ou non mis à la terre. Le régime du neutre dépend de la valeur et de la nature de l'impédance



Lorsqu'une phase est mise en contact avec la terre, un courant  $I_f$  s'établit et se referme par l'impédance  $Z_N$  ainsi que par les capacités et résistances de fuite des phases saines:

$$\bar{I}_f = \bar{I}_N + \bar{I}_C + \bar{I}_R \quad (\text{Eq. 1.18})$$

avec :

- $I_f$  : courant dans le défaut ;
- $I_N$  : courant circulant dans l'impédance de mise à la terre du neutre ;
- $I_C$  : courant circulant dans les capacités du réseau ;
- $I_R$  : courant circulant dans les résistances de fuite.

Le point neutre est alors porté à un potentiel:

$$\bar{V}_N = -Z_N \cdot \bar{I}_N \quad (\text{Eq. 1.19})$$

Le courant de fuite  $I_R$ , toujours très faible, peut être négligé.

Si le neutre est mis directement à la terre, le courant  $I_N$  est très important et le courant  $I_C$  peut également être négligé;

Si le neutre est isolé, on a :

$$\bar{I}_f = \bar{I}_C \quad (\text{Eq. 1.20})$$

Si le neutre est impédant, on a :

$$\bar{I}_f = \bar{I}_N + \bar{I}_C \quad (\text{Eq. 1.21})$$

La répartition des courants de défaut dans les différents circuits se calcule assez simplement moyennant une légère approximation [32]. Celle-ci consiste à négliger l'impédance de court-circuit de la source et les impédances de liaison vis-à-vis de l'impédance

de mise à la terre du neutre et des capacités du réseau. En d'autres termes on considère que les courants de défaut sont très inférieurs aux courants de court-circuit triphasé [34], [85].

#### 1.8.4 - Tension de contact

Supposons que dans un réseau, à la suite d'un défaut d'isolement, une phase vienne accidentellement en contact avec la masse d'un récepteur (Fig. 1.26). Il s'établit alors un courant de défaut  $I_f$  entre la masse du récepteur et la terre. Toute personne entrant en contact avec cette masse est soumise à une différence de potentiel  $U_C$  appelée tension de contact :

$$U_C = R_M I_f \quad (\text{Eq. 1.22})$$

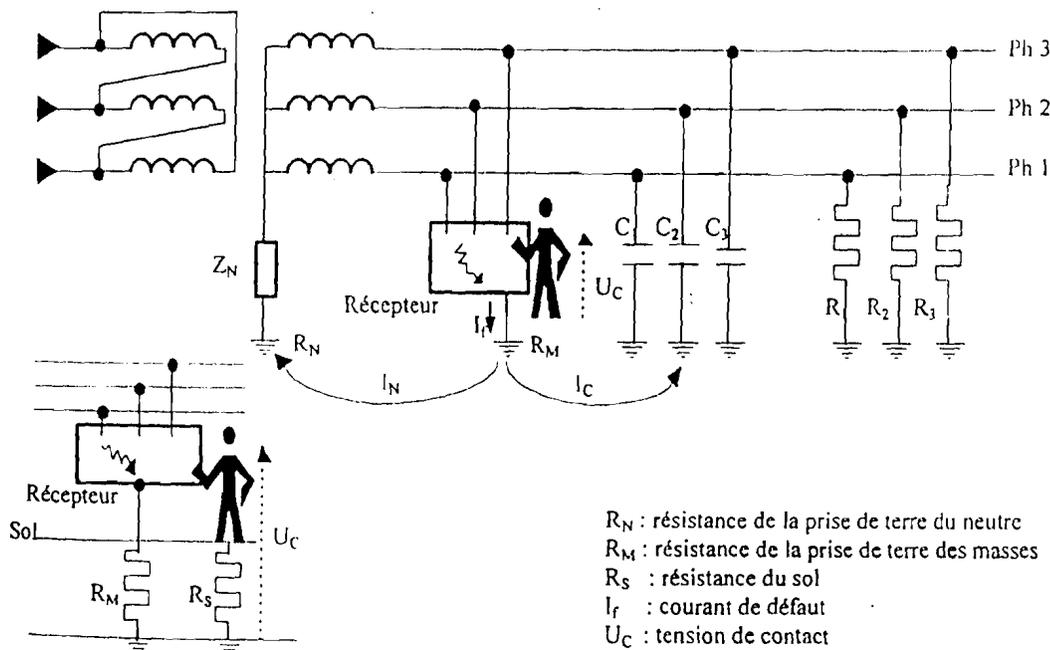


Fig. 1.26 : Représentation de la tension de contact.

Comme pour le courant de défaut, la valeur de la tension de contact est étroitement liée à la valeur de l'impédance  $Z_N$ , donc au régime du neutre. Si le neutre est isolé, les valeurs du courant de défaut  $I_f$  et de la tension de contact  $U_C$  sont très faibles. Elles sont par contre élevées si le neutre est mis directement à la terre.

Toute personne entrant en contact avec une pièce sous tension peut être soumise à une différence de potentiel : il y a donc pour elle un risque d'électrisation (on entend par électrisation le fait de recevoir un choc électrique n'entraînant pas la mort). On distingue deux sortes de contacts : le contact direct et le contact indirect (fig. 1.27) ; [34], [54].

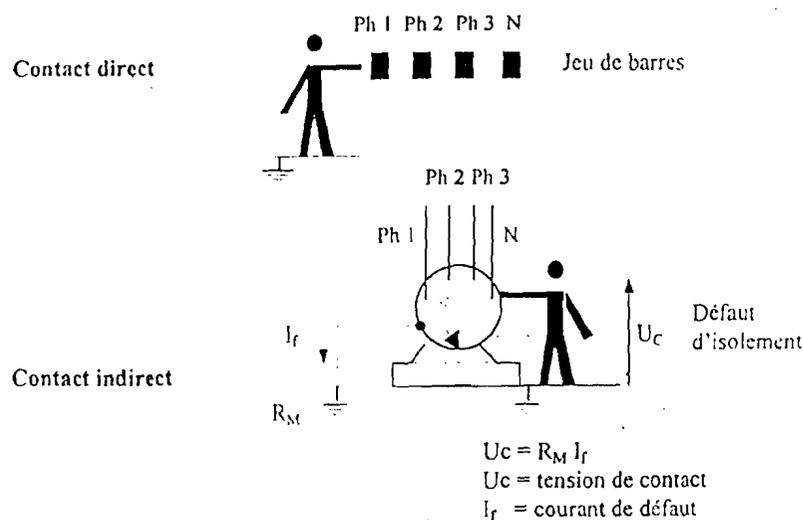


Fig. 1.27 : Contact direct et contact indirect

#### a) - Contact direct et mesures de protection

C'est le contact accidentel d'une personne avec une partie active d'un matériel sous tension. Le contact peut avoir lieu avec une phase ou avec le neutre.

Dans le cas où le risque est très important la solution triviale consiste à utiliser l'électricité sous une tension non dangereuse, c'est à dire l'emploi de la très basse tension de sécurité.

Les mesures de protection consistent à mettre ces parties actives hors de portée. Une mesure complémentaire contre contacts directs consiste à utiliser des Dispositifs Différentiels Résiduels (DDR) instantanés à Haute Sensibilité ( $\leq 30 \text{ mA}$ ) appelés DDR-HS, (cette mesure est nécessaire dans tous les cas d'alimentation de circuits où la mise en œuvre du SLT en aval n'est pas maîtrisée), [55], [73]

### *b) - Contact indirect*

C'est le contact d'une personne avec une masse d'un récepteur mise accidentellement sous tension à la suite d'un défaut d'isolement.

Contrairement à une idée très répandue, le risque d'électrisation n'est pas lié uniquement à la valeur de la tension pouvant être appliquée au corps humain, mais aussi à celle du courant susceptible de le traverser et à la durée du contact. Le courant et la tension sont liés par la loi d'Ohm  $I=U/R$  où  $R$  est l'impédance du corps humain.

Cette impédance varie en fonction de la tension de contact, de l'état d'humidité et de la surface de la peau, la nature du trajet du courant.

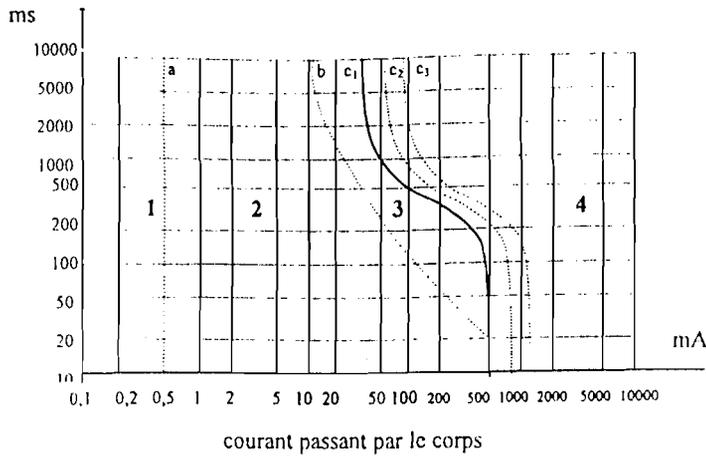
La publication [70] indique les valeurs d'impédance électrique du corps humain résultant d'études statistiques.

Cette même publication indique également les effets du courant électrique sur le corps humain en fonction du passage du courant. Ces effets sont représentés sur la figure 1.28 pour le courant alternatif entre 15 et 100 Hz.

C'est sur ces données qu'ont été établies les courbes fixant les temps maximaux de coupure des dispositifs de protection en fonction de la tension de contact présumée [73].

Ces courbes permettent de définir, suivant les conditions d'humidité, des tensions limites conventionnelles  $U_L$  qui peuvent être maintenues sans danger pour les personnes : autrement dit, une tension de contact inférieure à  $U_L$  ne nécessite pas de coupure mais, par contre, toute tension de contact supérieure à  $U_L$  nécessite l'élimination du défaut dans un temps au plus égal à celui fixé par la courbe correspondante (Temps fonction de la Tension de contact (voir tableau 1.6.). Les tensions limites conventionnelles ont été fixées à 50 V en locaux secs, 25 V en locaux humides et même 12 V dans certains locaux tels que les piscines et les salles d'eau.

durée de passage du courant



- zone 1 : perception
- zone 2 : forte gêne
- zone 3 : contractions musculaires
- zone 4 : risque de fibrillation ventriculaire (arrêt cardiaque )
- c<sub>1</sub> : probabilité 5 %
- c<sub>3</sub> : probabilité > 50 %

Fig. 1.28: Zones temps/courant des effets du courant alternatif (15 Hz à 100 Hz) sur les personnes selon [34] et [70].

			Temps de coupure
Conditions normales	Conditions particulières		maximal du dispositif de protection
< 50 V	< 25 V	< 12 V	-
50 V	25 V	12 V	5 s
75	40	20	1 s
90	50	27	500 ms
110	65	37	200 ms
150	95	55	100 ms
220	145	82	50 ms
280	195	110	30 ms
350	250	135	20 ms 10 ms
500	370	210	

Tableau 1.6. : Temps de coupure en fonction de la tension de contact présumée.

Vis à vis du risque d'apparition de tension dangereuse  $U_L$ , les normes [69], [73] ont focalisé trois Schémas de Liaison à la Terre (SLT) et défini les règles d'installation et de protection correspondantes.

Les mesures de protection contre les contacts indirects reposent sur trois principes fondamentaux :

- mise à la terre des masses des récepteurs et équipements électriques pour éviter qu'un défaut d'isolement ne conduise à l'équivalent d'un contact direct;
- l'équipotentialité des masses simultanément accessibles . (L'interconnexion de ces masses contribue efficacement à la réduction de la tension de contact. Elle se fait par le conducteur de protection (PE) qui relie les masses des matériels électriques pour l'ensemble d'un bâtiment, éventuellement complétée de liaisons équipotentielle (avec les canalisations d'eau ou de gaz), (Fig. 1.29) ;
- la gestion du risque électrique (prévention).

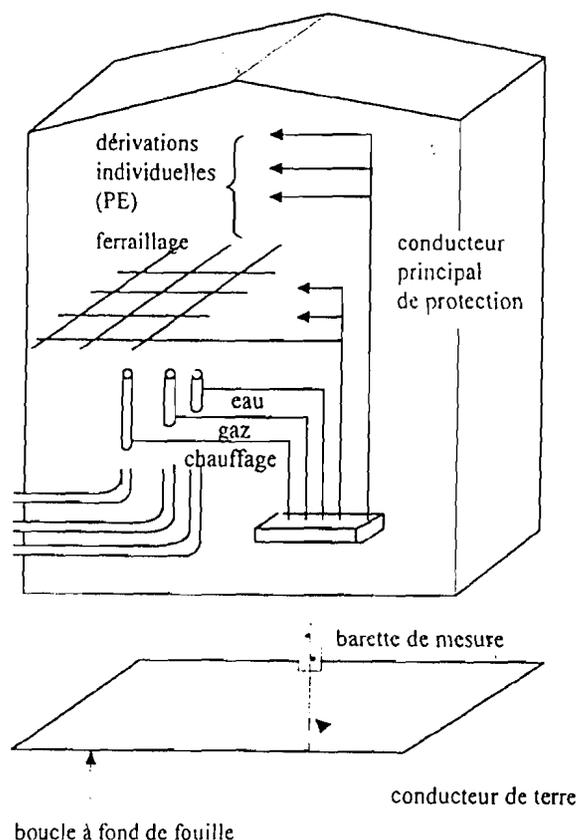


Fig. 1.29 : Equipotentialité dans un immeuble

### 1.8.5 - Surtensions et régime de neutre [34], [101]

En l'absence de défaut, tout réseau est le siège d'un régime permanent. L'apparition d'un défaut (un défaut à terre par exemple) entraîne une modification de la structure du réseau qui évolue alors vers un autre régime permanent différent du régime initial. Il en est de même lors de l'élimination d'un défaut. Ces changements de régime sont accompagnés de régimes transitoires durant lesquels il peut se développer des surtensions importantes dont les amplitudes sont caractérisées par les différents éléments constituant le réseau, en particulier par les capacités et le régime du neutre.

Un neutre isolé ou mis à la terre par réactance favorise l'apparition de surtensions élevées, alors qu'un neutre mis directement à la terre ou résistif limite fortement l'amplitude des surtensions.

On classe habituellement les surtensions selon leur origine, interne ou externe, et selon leur durée, temporaire ou transitoire.

Les surtensions d'origine externe peuvent être dues :

- à la foudre directement ou indirectement par transmission capacitive au travers du transformateur d'alimentation ;
- au contact accidentel avec un réseau à tension supérieure, amorçage entre HT et BT dans un transformateur par exemple.

Les surtensions d'origine interne apparaissent avec chaque changement d'état brusque d'un réseau, par exemple lors de l'enclenchement ou du déclenchement d'une charge, ou encore lors de l'élimination d'un défaut.

Les surtensions temporaires sont causées par des variations brusques, par des phénomènes de résonance et ferro-résonance [3], [14], et par des défauts à la terre. Leur durée dépend des caractéristiques de fonctionnement du réseau et du fonctionnement des dispositifs de protection.

Les surtensions transitoires proviennent en général :

- de l'enclenchement ou du déclenchement d'une ligne ;
- de l'apparition ou de l'extinction de défauts ;
- de la coupure de courants capacitifs ou inductifs ;
- de la perte de charge ;
- de coups de foudre.

La plupart des surtensions se traduisent par une élévation de la tension moyenne du réseau par rapport à la terre. On peut donc concevoir que la mise à la terre d'un point neutre du réseau influe sur l'amplitude des surtensions qui peuvent apparaître. On constate de façon assez générale que les surtensions entre phase et terre sont d'autant plus sévères que l'impédance qui relie le neutre du réseau à la terre est plus élevée.

## 1.9 - LES DIFFERENTS TYPES DU REGIME DU NEUTRE

### 1.9.1 - Examen des différents modes de raccordement du point neutre

On distingue d'une façon générale cinq (5) modes de raccordement du point neutre :

- le neutre directement mis à la terre ;
- le neutre isolé, ou fortement impédant ;
- le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une résistance ;
- le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une réactance ;
- le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une bobine de Petersen.

Les différents modes de raccordement du point neutre à la terre sont indiqués dans le tableau 1.7.

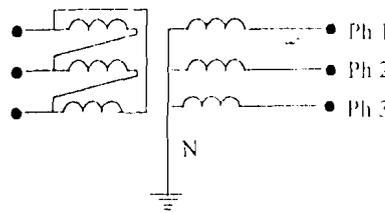
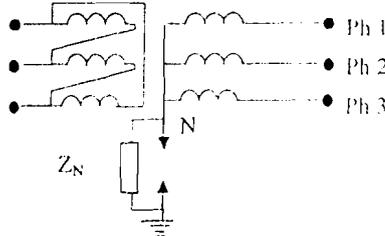
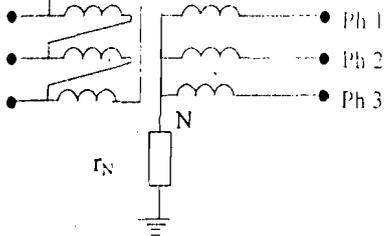
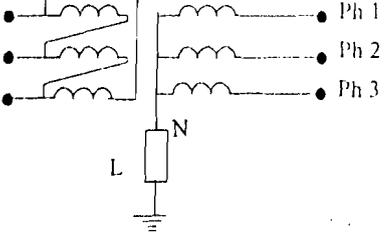
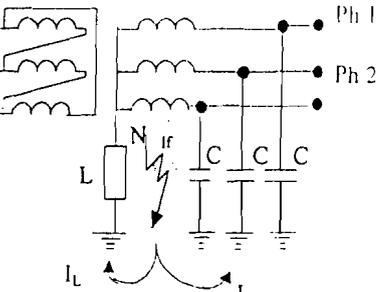
<p><b>Neutre mis directement à la terre</b>                      Une liaison électrique est réalisée intentionnellement entre le point neutre et la terre</p>	
<p><b>Neutre isolé</b>                      Il n'existe aucune liaison électrique entre le point neutre et la terre, à l'exception des appareils de mesure ou de protection.</p> <p><b>Neutre fortement impédant</b>                      Une impédance de valeur élevée est intercalée entre le point neutre et la terre</p>	
<p><b>Neutre mis à la terre par résistance</b>                      Une résistance est intercalée volontairement entre le point neutre et la terre.</p>	
<p><b>Neutre mis à la terre par réactance</b>                      Une réactance est intercalée volontairement entre le point neutre et la terre.</p>	
<p><b>Neutre mis à la terre par bobine d'extinction de Petersen (non utilisé en France)</b>                      Une réactance L accordée sur les capacités du réseau est volontairement intercalée entre le point neutre et la terre de sorte qu'en présence d'un défaut à la terre, le courant dans le défaut est nul.</p>	 <p> <math>I_f = I_L + I_C \approx 0</math>,  <math>I_f</math> : courant de défaut,  <math>I_L</math> : courant dans la réactance de mise à la terre du neutre,  <math>I_C</math> : courant dans les capacités phase-terre.                 </p>

Tableau 1.7 : Modes de raccordement du point neutre

## 1.9.2 - Régimes du neutre en Basse Tension

En Basse Tension, les régimes du neutre sont régis par les normes [69], [73]. Trois schémas sont pris en considération. Chaque schéma est défini par deux lettres.

La première lettre définit la situation du point neutre par rapport à la terre :

T : liaison directe du point neutre à la terre ;

I : point neutre, soit isolé de la terre, soit relié à la terre par une impédance.

La deuxième lettre définit la situation des masses de l'installation électrique par rapport à la terre :

T : les masses sont reliées directement à la terre, indépendamment de la mise à la terre éventuelle du point neutre ;

N : les masses sont reliées directement au conducteur neutre.

### a) - Neutre isolé ou impédant (schéma IT, Fig. 1.30)

Le neutre est isolé ou relié à la terre par une impédance (première lettre I). La valeur de cette impédance est généralement élevée (une impédance de  $1700 \Omega$  est fréquemment employée)

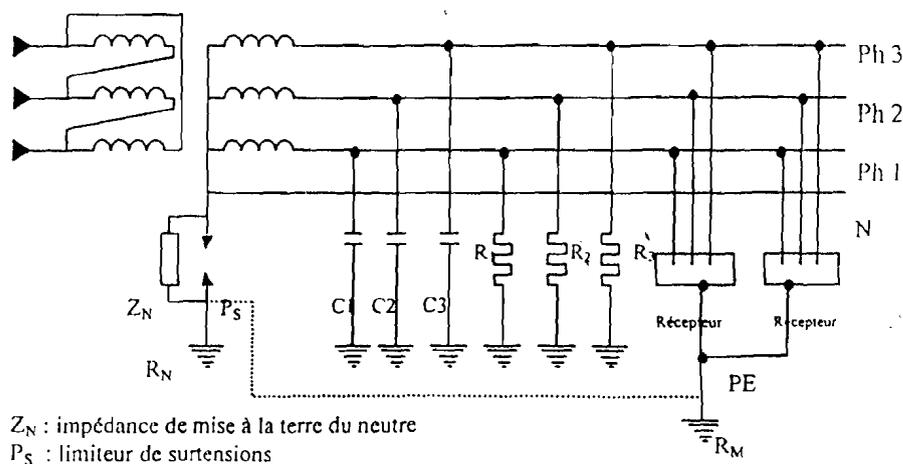


Fig. 1.30 : neutre isolé ou impédant (schéma IT) en Basse Tension.

Les masses des récepteurs sont interconnectées soit totalement soit par groupe de récepteurs. Chaque groupe interconnecté est relié à une prise de terre (deuxième lettre T). Il est possible qu'une ou plusieurs masses soient reliées séparément à la terre.

Dans la mesure du possible, il est recommandé d'interconnecter toutes les masses d'une même installation et de les relier à la même prise de terre. Il est toutefois admis que des masses très éloignées les unes des autres ou situées dans des bâtiments différents, ne le soient pas. Chaque groupe de masses reliées à la même terre et chaque masse reliée individuellement à la terre doivent être protégée par un dispositif différentiel à courant résiduel.

Les prises de terre des masses et du neutre peuvent être ou non interconnectées ou confondues.

Il est déconseillé de distribuer le neutre.

Il faut obligatoirement installer un limiteur de tension entre le point neutre du transformateur HT/BT et la terre. Si le neutre n'est pas accessible, le limiteur de surtension est installé entre une phase et la terre. Il assure l'écoulement à la terre des surtensions d'origine externe transmise par le transformateur et protège le réseau Basse Tension (BT) contre les élévations de tension résultant d'un amorçage entre les enroulements Haute Tension (HT) et Basse Tension (BT) du transformateur

***b) - Neutre mis directement à la terre (schéma TT, Fig. 1.31)***

Le point neutre est relié directement à la terre (première lettre T). Les masses des récepteurs sont reliées à la terre (deuxième lettre T), soit toutes ensemble ou par groupes, soit individuellement. Toutes les masses protégées par le même dispositif de protection doivent être reliées à la même prise de terre.

La prise de terre du neutre et celle des masses peuvent ou non être interconnectées ou confondues. Le neutre peut être distribué ou non.

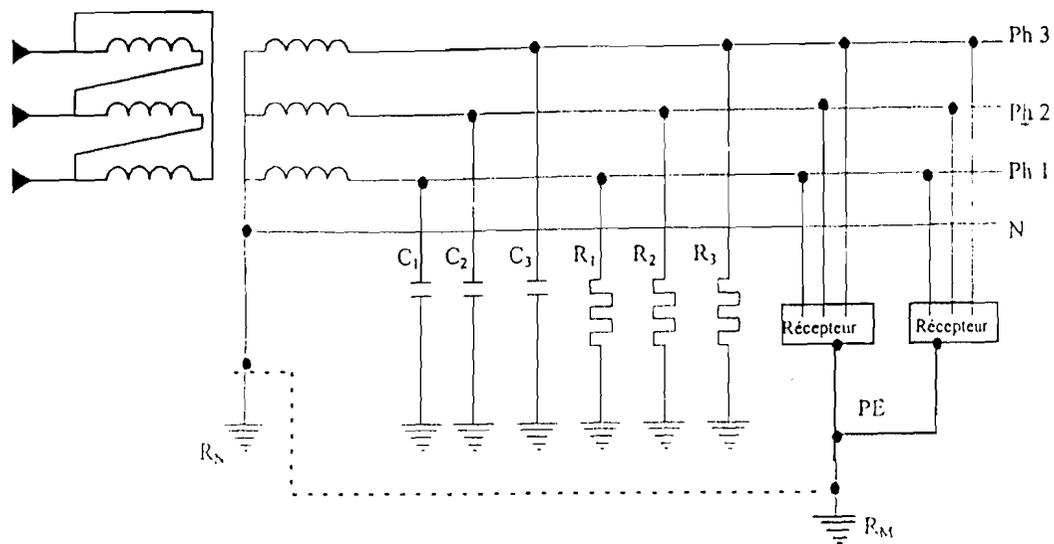


Fig. 1.31 : Neutre mis directement à la terre (schéma TT) en Basse Tension

c) - Mise au neutre (schéma TN)

Le point neutre est relié directement à la terre (première lettre T).

Les masses des récepteurs sont reliées au conducteur neutre (deuxième lettre N).

On distingue deux schémas possibles suivant que le conducteur neutre et le conducteur de protection (PE) sont confondus ou non.

➤ Premier cas

Les conducteurs de neutre et de protection sont confondus en un seul conducteur appelé PEN. Le schéma est identifié par une troisième lettre C et est noté TNC (fig. 1.32).

Pour ce cas de figure :

- Il faut répartir uniformément des prises de terre tout le long du conducteur PEN afin d'éviter les montées en potentiel des masses ;
- Ce schéma est interdit pour les sections inférieures à 10 mm<sup>2</sup> cuivre et 16 mm<sup>2</sup> aluminium, ainsi que pour les canalisations mobiles. Il est également interdit en aval d'un schéma TNS (norme C 15-100 [73]).

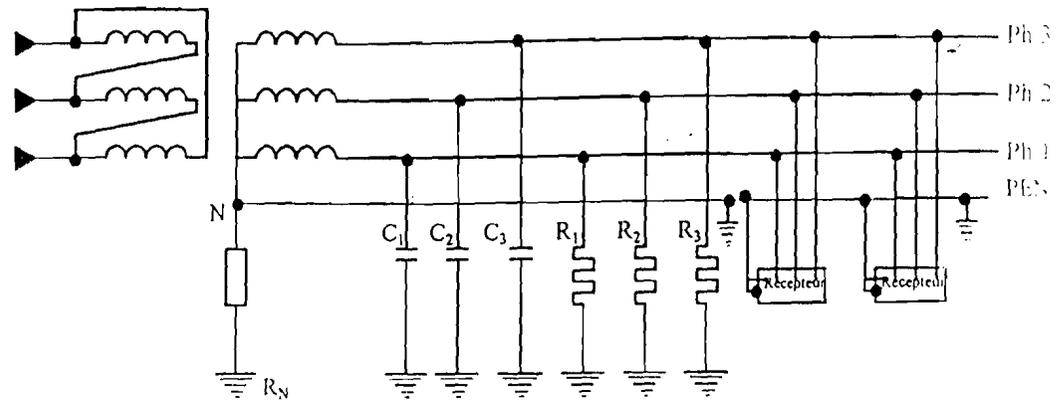


Fig.1.32 : Mise à neutre (schéma TNC) en Basse Tension.

### ➤ Deuxième cas

Le conducteur du neutre et le conducteur de protection sont séparés. Le schéma est alors identifié par la troisième lettre S et est noté TNS (Fig. 1.33).

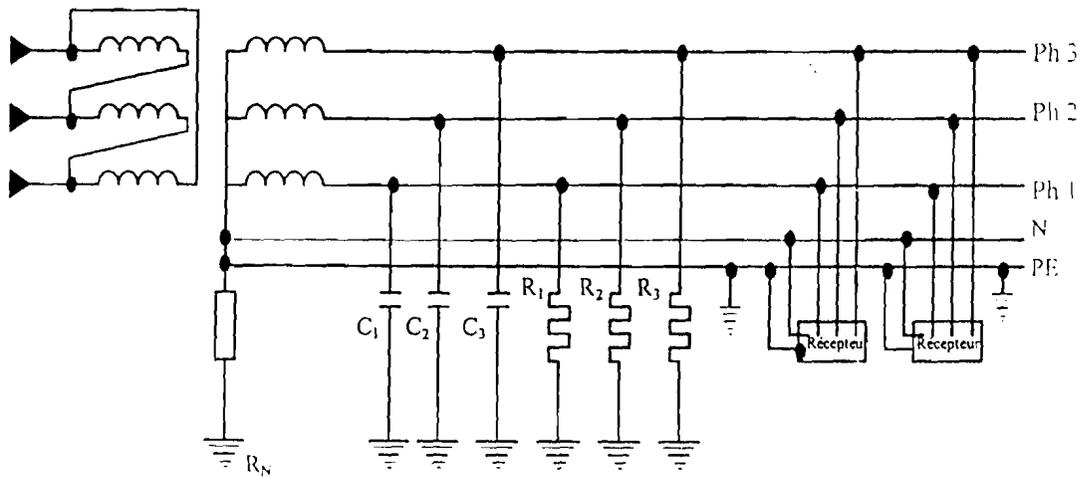


Fig. 1.33 : Mise à neutre (schéma TNS) en Basse Tension.

Pour ce cas de figure :

- Des prises de terre doivent être réparties uniformément le long du conducteur de protection PE pour éviter les montées en potentiel des masses ;
- Ce schéma est obligatoire pour les sections inférieures à 10 mm<sup>2</sup> cuivre et 16 mm<sup>2</sup> aluminium, ainsi que pour les canalisations mobiles. Il est interdit en amont d'un schéma TNC.

➤ Remarques :

- Les deux schémas TNC et TNS peuvent être utilisés dans une même installation. Mais le schéma TNC (4 fils) ne doit jamais être en aval du schéma TNS (5 fils), (Fig. 1.34) ;
- La mise au neutre nécessite la création d'un système équipotentiel pour éviter la montée en potentiel des masses et des éléments conducteurs. Il est par conséquent nécessaire de relier le conducteur PE ou PEN à de nombreuses prises de terre réparties dans l'installation ;
- En schéma TNC, la fonction conducteur de protection l'emporte sur les fonctions neutre. En particulier, un conducteur PEN doit toujours être raccordé à la borne de terre d'un récepteur et un pont doit être réalisé entre cette borne et la borne neutre.

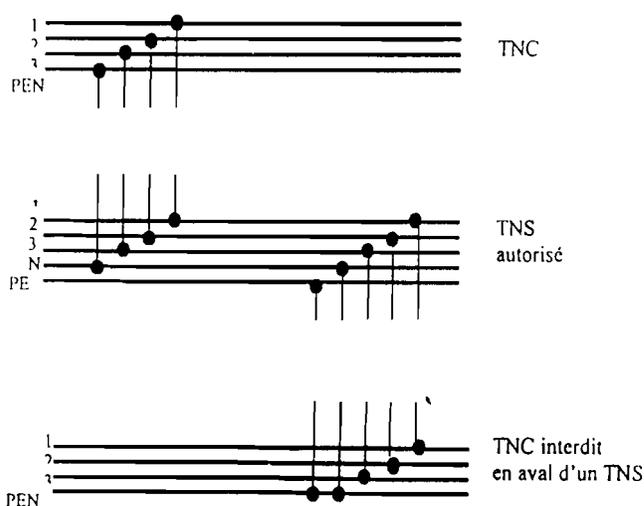


Fig.1.34 : Combinaison des schémas TNC et TNS.

### 1.9.3 - Régimes du neutre utilisés en Haute Tension

En Haute Tension, les régimes du neutre sont régis par deux normes :

- La norme C 13-100 [71], qui définit les régimes du neutre et les schémas des liaisons à la terre, pour les postes HT/BT établis à l'intérieur d'un bâtiment et ne comportant qu'un seul transformateur HT/BT alimenté par le réseau du Distributeur dont la tension est comprise entre 1 et 33 kV.

- La norme NFC 13-200 [72], relative aux installations Haute Tension dont la tension est comprise entre 1000 V et 63 kV; ces installations peuvent être alimentées :

- soit par le réseau du Distributeur ;
- soit par une ou plusieurs sources autonomes d'énergie ;
- soit à la fois par le réseau du Distributeur et une ou plusieurs sources autonomes d'énergie.

#### a) - Schémas retenus par la norme NFC 13-100 [71]

Dans la définition des régimes du neutre et des liaisons à la terre, la norme NFC 13-100 [71] ne s'applique qu'aux postes de livraison ne comportant qu'un seul transformateur HT/BT installé dans un poste. Les schémas des liaisons à la terre retenus par la norme NFC 13-100 [71] sont désignés par trois (3) lettres, les deux premières lettres étant celles définies dans la norme NFC 15-100 [73].

#### > Première lettre

La première lettre définit la position du neutre de l'installation BT par rapport à la terre:

I : le neutre est isolé ou relié à la terre par l'intermédiaire d'une impédance ;

T : le neutre est mis directement à la terre.

### ➤ Deuxième lettre

La deuxième lettre définit la position des masses à l'installation BT par rapport à la terre :

T : les masses sont reliées à la terre ;

N : les masses sont reliées au conducteur neutre.

### ➤ Troisième lettre

La troisième lettre désigne la situation des masses du poste :

R : les masses du poste, le point neutre et les masses de l'installation BT sont reliés à une prise de terre commune ;

N : les masses du poste et le point neutre sont reliés à une prise de terre commune; les masses de l'installation sont reliées à une prise de terre séparée ;

S : les masses du poste, le point neutre et les masses de l'installation sont reliés à des prises de terre séparées.

La norme NFC 13-100 [71] autorise six (6) schémas construits à partir des trois schémas TN, TT et IT définis par la norme NFC 15-100 [73], auxquels sont ajoutées les liaisons à la terre des masses du poste (Tableau 1.8).

#### b) - Schémas retenus par la norme NFC 13-200 [72]

La norme NFC 13-200 [72] définit les régimes du neutre et les schémas des liaisons à la terre des installations HT en général. Elle utilise comme la norme NFC 13-100, trois (3) lettres pour définir les schémas retenus.

<p><b>Schéma TNR</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le neutre du transformateur HT/BT est mis directement à la terre,</li> <li>- les masses de l'installation BT sont reliées conducteur neutre,</li> <li>- les masses du poste sont reliées à la prise de terre du neutre.</li> </ul>	
<p><b>Schéma ITR</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le neutre du transformateur HT/BT est isolé ou relié à la terre par une impédance,</li> <li>- les masses de l'installation BT sont interconnectées et reliées à la prise de terre du neutre,</li> <li>- les masses du poste sont reliées à la prise de terre du neutre.</li> </ul>	
<p><b>Schéma TTN</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le point neutre du transformateur HT/BT est mis directement à la terre,</li> <li>- les masses de l'installation BT sont interconnectées et reliées à une prise de terre séparée de celle du neutre,</li> <li>- les masses du poste sont reliées à la prise de terre du neutre.</li> </ul>	
<p><b>Schéma ITN</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le point neutre du transformateur HT/BT est isolé ou relié à la terre par une impédance,</li> <li>- les masses de l'installation BT sont interconnectées et reliées à une prise de terre séparée de celle du neutre,</li> <li>- les masses du poste sont reliées à la prise de terre du neutre.</li> </ul>	
<p><b>Schéma TTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le point neutre du transformateur HT/BT est mis directement à la terre,</li> <li>- les masses de l'installation BT sont interconnectées et reliées à une prise de terre séparée de celle du neutre,</li> <li>- les masses du poste sont reliées à une prise de terre séparée de celle du neutre et de celle des masses de l'installation.</li> </ul>	
<p><b>Schéma ITS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le point neutre du transformateur HT/BT est isolé ou relié à la terre par une impédance,</li> <li>- les prises de terre respectives du poste, du neutre et des masses interconnectées de l'installation sont séparées.</li> </ul>	

Tableau 1.8 : Schémas retenus par la norme C 13-100 [71] (neutre HT).

➤ Première lettre :

Elle définit la position du neutre de l'installation par rapport à la terre :

I : le neutre est isolé de la terre, ou relié à celle-ci par une impédance de valeur élevée;

T : le neutre est relié à la terre, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une impédance de faible valeur.

➤ Deuxième lettre

Elle définit les liaisons éventuelles entre les masses de l'installation et la prise de terre du neutre :

T : les masses de l'installation sont interconnectées et reliées à une prise de terre séparée de celle du neutre ;

N : les masses de l'installation sont interconnectées et reliées à la prise de terre du neutre.

➤ Troisième lettre

Elle définit les liaisons éventuelles des masses du poste de livraison avec la prise de terre du neutre et celle des masses de l'installation :

N : les masses du poste sont reliées à la prise de terre du neutre ;

R : les masses du poste et les masses de l'installation sont reliées à la même prise de terre ;

S : les masses du poste sont reliées à une prise de terre séparée de la prise de terre du neutre et de celle des masses de l'installation.

Il faut remarquer que la signification donnée à la troisième lettre par la norme NFC 13-200 [72] est différente de celle que retient la norme NFC 13-100 [71].

Pour cette dernière, la lettre R indique que le neutre, les masses du poste et les masses de l'installation sont reliés à la même prise de terre; pour la norme NFC 13-200 [72], cette même lettre impose seulement que les masses du poste et les masses de l'installation soient reliées à une prise de terre commune.

Pour la norme NFC 13-100 [71], la lettre S impose que les prises de terre du point neutre, des masses du poste et masses de l'installation soient séparées, et qu'il n'existe entre elles aucune liaison; pour la norme C 13-200, la lettre S implique que seules les masses de poste doivent être reliées à une prise de terre séparée, le point neutre et les masses de l'installation pouvant avoir une prise de terre commune (Tableau 1.8)

La norme NFC 13-200 [72] retient dix (10) schémas, parmi lesquels on retrouve ceux de la norme NFC 13-100 [71] à l'exception du schéma TNR. Le tableau 1.9 présente ces schémas, indique leur analogie avec ceux de la norme NFC 13-100 [71], et précise dans quels types d'installation on peut les rencontrer.

#### 1.9.4 - Protection contre les contacts directs et indirects en Basse Tension [34], [62], [73]

##### a) - Protection contre les contacts directs en B T

On peut classer les moyens de protection contre les contacts directs en BT en trois catégories :

##### 1 - Première catégorie

Dispositions rendant non dangereux le contact direct par l'utilisation de la Très Basse Tension de Sécurité (TBTS) limitée à 50 V

##### 2 - Deuxième catégorie

Utilisation des moyens préventifs destinés à mettre hors de portée les parties actives sous tension.

Schéma dont le point neutre est relié à la terre directement ou par une impédance de faible valeur			Schéma dont le point neutre est isolé ou fortement impédant			Applications
Désignation et représentation du schéma C 13-200	Prévu par C 13-100	Désignation C 13-100	Désignation et représentation du schéma C 13-200	Prévu par C 13-100	Désignation C 13-100	
<p>Schéma TTN</p>	non, mais s'apparente au TNR	(TNR)	<p>Schéma ITN</p>	oui	ITR	Les masses du poste, le point neutre et les masses de l'installation sont reliés à la même prise de terre. Ce cas se rencontre lorsque le transformateur est installé dans le poste et que l'installation est proche du poste (cas des installations compactes).
<p>Schéma TTN</p>	oui	TTN	<p>Schéma ITN</p>	oui	ITN	Les masses du poste et le point neutre sont reliés à la même prise de terre, les masses de l'installation sont reliées à une prise de terre séparée. Ce cas se rencontre lorsque le transformateur est installé dans le poste et que l'installation est éloignée du poste (cas des installations très étendues comportant éventuellement une ligne aérienne).
<p>Schéma TTR</p>	non	—	<p>Schéma ITR</p>	non	—	Les masses du poste et les masses de l'installation sont reliées à la même prise de terre, le neutre est relié à une prise de terre séparée. Ce cas est peu courant dans la pratique; la norme C 13-200 conseille d'éviter ce schéma
<p>Schéma TTS</p>	oui	TTS	<p>Schéma ITS</p>	oui	ITS	Les prises de terre des masses du poste, du neutre et des masses de l'installation sont séparées. Ce cas n'est pas courant dans la pratique.
<p>Schéma TNS</p>	non	—	<p>Schéma INS</p>	non	—	Le neutre et les masses de l'installation sont reliés à la même prise de terre; les masses du poste sont reliées à une prise de terre séparée. Ce cas se rencontre lorsque le poste est éloigné de l'installation et que le transformateur est situé dans l'installation (cas des installations très étendues comportant éventuellement des lignes aériennes et dans lesquelles le transformateur est proche de l'installation).

Tableau 1.9 : Analogie entre schémas de la norme C 13-100 et de la norme C 13-200.

Ces moyens sont toujours utilisés dans les installations électriques; on distingue :

- la protection par isolation des parties actives ;
- la protection au moyen de barrières ou d'enveloppe : pour être considérés comme assurant la protection contre les contacts directs, tous les équipements doivent posséder au moins le degré de protection **IP 2 xx**.

### 3 - Troisième catégorie

Ce sont les mesures complémentaires entraînant la coupure de l'alimentation. Elle consiste à utiliser des disjoncteurs différentiels haute sensibilité ( $\leq 30$  mA ).

#### b) - Protection contre les contacts indirects en BT

On distingue deux types de protections :

- la protection sans coupure de l'alimentation ;
- la protection par coupure automatique d'alimentation

#### 1 - Protection sans coupure de l'alimentation

Pour ce cas, six solutions sont envisagées :

- Emploi de Très Basse Tension de Sécurité (TBTS). Cette mesure consiste à alimenter des circuits sous Très Basse Tension (au maximum 50 V ) fournie par une source de sécurité (par exemple transformateur de sécurité) ;
- Séparation de sécurité des circuits. Cette mesure consiste à alimenter un circuit au moyen d'un transformateur de séparation ou d'un transformateur présentant entre enroulement primaire et secondaire, une séparation de sécurité équivalente ;
- Emploi de matériel de classe **II**. Ces matériels sont plus généralement connus sous l'appellation « double isolation » ou « double isolement » ;

- Liaisons équipotentielle locales non reliées à la terre. Par cette mesure, on réalise l'équipotentialité entre les masses et tous les éléments conducteurs simultanément accessibles. On empêche ainsi l'apparition d'une tension de contact dangereuse ;
- Isolation supplémentaire à l'installation. Cette mesure consiste à réaliser, lors de l'installation, une isolation des parties actives procurant une sécurité équivalente à celle des matériels de **classe II** ;
- Eloignement ou interposition d'obstacles. Par cette mesure, on rend négligeable la probabilité de toucher simultanément une masse présentant un défaut d'isolement et un élément conducteur relié à la terre.

## 2 - Protection par coupure automatique de l'alimentation

Les mesures de protection précédentes ne pouvant être, dans la pratique, que locales, toute installation électrique est en général conçue en mettant en œuvre les mesures de protection par coupure automatique de l'alimentation.

Ces mesures reposent sur deux principes fondamentaux :

- mise à la terre de toutes les masses des matériels électriques de l'installation et de tous les éléments conducteurs accessibles ;
- mise hors tension automatique de la partie d'installation où se produit un défaut d'isolement, de manière à ne pas soumettre une personne à une tension de contact  $U_c$  pendant une durée supérieure à celle fixée par les courbes de sécurité.

Le choix des dispositifs de protection à mettre en œuvre dépend du régime du neutre.

### ➤ Cas d'une installation à neutre isolé (schéma IT)

Pour être conforme à la norme NFC 15-100 [73], une installation à neutre isolé (I T) doit obligatoirement satisfaire aux conditions suivantes :

- les masses doivent être interconnectées et reliées à la terre conformément aux dispositions exposées au paragraphe 1.9.2a ;

- l'isolement doit être surveillé en permanence par un dispositif approprié; le premier défaut d'isolement doit être signalé ; afin d'éviter le déclenchement dans l'éventualité de l'apparition d'un deuxième défaut, le premier défaut doit être recherché et éliminé par le personnel d'exploitation ;
- le déclenchement doit se produire au deuxième défaut; il est admis qu'il soit réalisé par les dispositifs de protection contre les défauts entre phase (disjoncteurs, fusibles, etc...), mais les conditions de déclenchement de ces protections doivent être vérifiées [61], [62].

➤ Cas d'une installation à neutre mis directement à la terre (schéma TT)

Dans une installation à neutre mis directement à la terre, les masses sont reliées à la terre selon les dispositions indiquées au paragraphe 1.9.2b .Le déclenchement est obligatoirement au premier défaut d'isolement ; il n'est pas admis que ce déclenchement soit obtenu par les dispositifs de protection contre les défauts entre phase, même si les prises de terre du neutre sont interconnectées. Dans tous les cas, l'installation de Dispositifs Différentiels Résiduels (DDR) agissant sur les organes de coupure est obligatoire.

La tension de contact se développant au niveau d'un récepteur présentant un défaut d'isolement a pour expression :

$$U_C = R_M \cdot I_f \quad (\text{Eq. 1.22})$$

avec :

$R_M$  : résistance de la prise de terre à laquelle est raccordé le récepteur,

$I_f$  : courant de défaut s'écoulant par la prise de terre.

Le récepteur doit être mis hors tension dès que la tension de contact dépasse la tension de sécurité  $U_L$  ( $U_L = 50 \text{ V}$ ,  $25 \text{ V}$  ou  $12 \text{ V}$ ).

$$I_{\Delta n} \leq U_L / R_M \quad (\text{Eq. 1.23})$$

Lorsque les prises de terre du neutre et des masses sont interconnectées ou confondues, le courant de défaut est très important. Cependant, comme une disposition n'est exigée dans ce régime de neutre pour minimiser, calculer et mesurer les impédances des boucles de défaut, l'installation reste du type neutre à la terre et les dispositifs différentiels sont à mettre en œuvre de la même façon. Les réglages de ces dispositifs différentiels doivent vérifier dans tous les cas la relation (Eq. 1.23). S'il y a plusieurs prises de terre des masses, le réglage du DDR placé en tête de l'installation est fixé en fonction de la prise de terre des masses la plus élevée.

Toutes les masses protégées par le même dispositif différentiel doivent être reliées à la même prise de terre, afin que la relation (Eq. 1.23) soit vérifiée pour chacune d'elles.

#### ➤ Cas d'une installation à mise au neutre (schéma TN)

Dans une installation à mise au neutre, toutes les masses sont reliées au neutre mis lui-même à la terre.

Le déclenchement est obligatoire au premier défaut; il est obtenu par le fonctionnement des protections contre les défauts entre phases (disjoncteurs, fusibles, etc.).

Il est par conséquent impératif de prendre toutes les dispositions pour faciliter l'établissement d'un courant de défaut élevé. Il est obligatoire de vérifier, à l'étude par des calculs et au contrôle par des mesures, que les conditions de déclenchements des dispositifs de protection sont obtenues.

### 1.9.5 - Protection contre les contacts directs et indirects en Haute Tension [34], [62], [71], [72]

#### a) - Protection contre les contacts directs

##### 1 - Protection par mise hors de portée

Elle est définie par les normes NFC 13-100 [71] et NFC 13-200 [72]. La règle fondamentale précise qu'aucun conducteur ni aucune pièce sous tension, en l'absence de tout défaut d'isolement ne doit se trouver à portée de personnes.

Cette règle s'applique également au conducteur neutre et à tout conducteur de terre reliant à une prise de terre le conducteur neutre ou le point neutre de la source d'alimentation.

La condition ci-dessus peut être satisfaite soit par le seul éloignement des pièces conductrices ou des conducteurs, soit par l'interposition d'obstacles ou par isolation

#### b) - Protection contre les contacts indirects

##### 1 - Dans les postes HT/BT

En pratique, la protection contre les contacts indirects est assurée à l'intérieur du poste en réalisant une liaison équipotentielle entre toutes les masses du poste et tous les éléments conducteurs y compris le sol.

Cette liaison doit être telle que la résistance  $R$  entre deux éléments quelconques simultanément accessible respecte la condition :

$$R \leq \frac{50}{I_m} \quad (\text{Eq. 1.24})$$

$I_m$  étant l'intensité maximale du courant du premier défaut monophasé à terre du réseau Haute Tension alimentant le poste. ( $I_m = 300$  A pour les réseaux aériens ou mixtes ; et  $I_m = 1000$  A pour les réseaux souterrains).

D'autre part, un défaut d'isolement entre une partie active à Haute Tension et la masse, ne doit pas entraîner d'élévation de potentiel qui puisse provoquer un amorçage sur le circuit Basse Tension, l'amorçage pouvant propager un potentiel dangereux dans l'installation Basse Tension. Cette règle impose aux résistances des différentes prises de terre des valeurs maximales qui dépendent des schémas des liaisons à la terre (schémas TNR, ITR, TTN, ITN, TTS et ITS).

### ➤ Protection contre les surtensions résultant d'un coup de foudre sur le réseau HT

Les postes HT alimentés par un réseau aérien ou aéro-souterrain sont protégés contre les coups de foudre par des éclateurs ou des parafoudres reliés à la prise de terre des masses du poste ; lors du fonctionnement de ces appareils, les courants de fuite s'écoulant par la prise de terre des masses du poste provoquent la montée en potentiel de toutes les masses.

Suivant le régime du neutre et l'interconnexion ou non des masses de l'installation BT, il y a risque de claquage des matériels BT. Les phénomènes mis en jeu sont les mêmes que ceux qui se développent lorsqu'il se produit un amorçage sur la partie HT du poste ; comme pour ceux-ci on est amené à limiter les valeurs des résistances des prises de terre [71] de manière à réduire les risques d'amorçage.

## 2 - Dans les installations HT

L'apparition d'une tension de contact en HT peut résulter :

- soit d'un défaut d'isolement dans un matériel de l'installation considérée ;
- soit d'un défaut d'isolement survenant sur le réseau d'alimentation au niveau du poste de livraison.

La valeur de prise par une tension de contact est, comme en Basse Tension étroitement liée au régime du neutre du réseau (TTN, TTR, TTS, TNN, TNS, ITN, ITR, ITS, INN, INS) dans lequel elle se développe, ainsi qu'à la présence ou non d'interconnexions entre les masses de l'installation et la prise de terre du neutre.

➤ **Protection contre les surtensions d'origine atmosphérique ou contre les coups de foudre.**

Contrairement à la norme NFC 13-100 [71] la norme NFC 13-200 [72] n'impose pas aux résistances de prise de terre des valeurs permettant de limiter les élévations de potentiel résultant des surtensions d'origine atmosphérique.

### 1.10 - CHOIX DU SCHEMA DE LIAISON A LA TERRE (SLT).

Le choix du SLT devrait être influencé par les utilisateurs de l'énergie électrique et par les exploitants du réseau (le service électrique). L'expérience montre que le choix est surtout fait par le bureau d'étude, concepteur de l'installation.

Pour l'utilisateur et l'exploitant réclamant la sûreté totale, l'énergie électrique doit être toujours disponible et ne présenter aucun risque. Les composantes de la sûreté de l'installation: la sécurité, la disponibilité et la maintenabilité doivent donc être optimisées.

De plus, l'électricité ne doit pas perturber les nombreux équipements courant faible.

En terme de sécurité, le TT est le meilleur.

En terme de disponibilité, c'est l'IT qui est le mieux adapté.

En terme de maintenabilité, la localisation du défaut est rapide en TN (action du Dispositif de Protection Contre les Courts-Circuits (DPCC)) mais le temps de réparation est souvent élevé. A l'inverse, en IT, la localisation du premier défaut peut être plus difficile mais la réparation est plus rapide et moins onéreuse. Le TT est un bon compromis.

**En terme de fiabilité**, les matériels de protection mis en œuvre sont fiables, mais la fiabilité de l'installation et des récepteurs peut être affectée :

- en TNC par le fait que le PEN, non protégé, peut être détérioré par les courants harmoniques ;
- en TNC et TNS, par le manque de rigueur lors d'extensions, par la mise en œuvre de source de remplacement à la puissance de court-circuit faible ;
- en IT, en cas de défaut double, les risques inhérents au TN exprimés ci-dessus existent aussi, par contre si la recherche et l'élimination du premier défaut sont rapides, la fiabilité de l'installation est très bonne ;
- en TT par le claquage en retour des récepteurs dus à un défaut dans le transformateur HT/BT, mais la probabilité d'apparition de ce défaut est faible et des parades existent. par exemple, mise en œuvre d'un parafoudre entre les conducteurs actifs et la prise de terre des récepteurs.

**En terme de perturbation**, le TT est à préférer au TNS dont les forts courants de défaut peuvent être perturbateurs.

**En terme de coûts** :

- le TNS est le moins coûteux à l'installation ; par exemple si le neutre n'est ni protégé, ni coupé, la maintenance curative peut être onéreuse ;
- l'IT est un peu plus coûteux à l'installation, (matériel de contrôle de l'isolement et de recherche de défaut). La recherche de la meilleure disponibilité de l'énergie électrique nécessite la disponibilité d'un électricien, dont l'action va minimiser la maintenance curative ;
- le TT, si les Dispositifs Différentiels Résiduels (DDR) sélectifs sont installés en nombre suffisant, est un peu plus coûteux à l'installation que l'IT, mais la localisation du défaut est simple et la maintenance curative moins coûteuse qu'en TN.

En terme de coût complet sur 10 à 20 ans, les trois (3) SLT sont équivalents. Le meilleur choix avec un seul SLT n'existe pas, il convient donc dans beaucoup de cas de mettre en œuvre plusieurs SLT dans une même installation.

## 1.11 - CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de passer en revue les effets néfastes du courant électrique aussi bien sur les personnes que sur les équipements électriques, les différents moyens de protection notamment les prises de terre et les principaux systèmes de liaisons à la terre (SLT) qui jouent un rôle capital dans les réseaux électriques.

Les trois principaux Systèmes de Liaisons à la Terre (SLT) sont très bien définis, ainsi que leur mise en œuvre, par les normes d'installation (normes CEI 364 [69] et NFC 15-100 [73] ...). Leur emploi respectif varie en fonction des pays à savoir :

- la majorité des schémas TN : dans les pays anglo-saxons ;
- le schéma TT : souvent utilisé dans les autres pays ;
- le schéma IT : utilisé lorsque la sécurité des personnes et des biens ainsi que la continuité de service sont importantes.

Ils sont tous les trois réputés assurer la protection des personnes.

Deux évolutions importantes ont une influence non négligeable sur le choix d'un SLT :

- la recherche de la meilleure continuité de service ;
- la prolifération des appareils électroniques courant fort (perturbateurs) et courant faible (perturbés) lesquels s'érigent de plus en plus en systèmes communicants.

Ainsi, la tendance générale au niveau de SLT est, tant en HT qu'en BT, de limiter les courants de défaut d'isolement.

Vu la prolifération des systèmes numériques communicants (informatique, vidéo, automatique, Gestion Technique des Bâtiments - GTB etc.), il est essentiel que les SLT procurent une référence de potentiel non perturbée par les forts courants de défaut et les harmoniques.

Ainsi, l'évolution devrait favoriser les SLT qui génèrent des courants de défaut ne dépassant pas quelques dizaines d'ampère.

Le Système de Liaison à la Terre - SLT, (le schéma TT) devrait donc être de plus en plus employé.

Le chapitre suivant sera consacré à l'établissement des conditions de similitudes à respecter dans les modèles réduits de mise à la terre.

## LISTE DES SYMBOLES

R	: Résistance
$\rho$	: Résistivité
L	: Longueur
d	: Diamètre
$i_{ct}$	: Courant alternatif constant
U, V	: Tension
G	: Générateur
E	: Champ électrique
I	: Intensité du courant
a	: Ecartement
$\Delta V, \Delta U$	: Différence de potentiel
h	: Profondeur
r	: Rayon
x	: Distance égale à 1 m
TBT	: Très basse tension
BT	: Basse tension
MT	: Moyenne tension
HT	: Haute tension
THT	: Très haute tension
UHT	: Ultra haute tension
$\sim U$	: Tension alternative
$=U$	: Tension continue
Hz	: Hertz
V/m	: Volt par mètre
$\tau_q$	: Durée de la queue d'onde
$\tau_f$	: Durée du front d'onde
$T_{cr}$	: Durée jusqu'à la crête
$T_h$	: Durée jusqu'à la mi-amplitude

- A : Ampère  
∫ : Somme  
CCIT : Comité Consultatif International de Télécom.  
SLT : Schémas des liaisons à la terre  
CEI : Comité Electrotechnique International  
NFC : Norme Française  
RN : Valeur du neutre  
 $\Omega$  : Ohm  
 $\Omega/m$  : Ohm par mètre  
C : Capacité  
 $\mu F$  : Micro farad  
 $Z_N$  : Impédance du neutre  
 $I_f$  : Courant de défaut  
 $I_N$  : Courant dans l'impédance de mise à la terre du neutre  
 $I_C$  : Courant dans les capacités du réseau  
 $I_R$  : Courant dans les résistances de fuite  
 $R_M$  : Valeur de masse  
 $U_C$  : Tension de contact  
DDR-HS : Dispositifs Différentiels Résiduels à Haute Sensibilité  
 $U_L$  : Tension limite  
TBTS : Très basse tension de sécurité  
 $T_{U_n}$  : Seuil de fonctionnement du DDR.

## CHAPITRE 2

# LES MODELES REDUITS DE MISE A LA TERRE

## 2.1 - INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'établir les conditions de similitude à respecter dans la réalisation d'un modèle réduit d'un terrain à  $n$  couches horizontales et homogènes. La méthode employée fait appel à la fonction de BESSEL de première espèce. Nous établirons la forme mathématique générale du potentiel autour d'une électrode quelconque et nous soumettrons la relation obtenue à l'analyse dimensionnelle.

## 2.2 - EQUATION FONDAMENTALE

Considérons trois conducteurs homogènes et isotropes (Fig. 2.1) dont les résistivités sont respectivement  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  [86].

Une électrode ponctuelle placée en  $O$  débite un courant d'intensité  $I$ . Le problème présente une symétrie cylindrique ; dans ce cas nous rechercherons le potentiel en un point  $M$  de coordonnées  $(r, z)$ .

Il s'agit de trouver les trois fonctions  $V_1, V_2, V_3$  de  $z$  et de  $r$ , satisfaisant à l'équation de LAPLACE (Eq. 2.1) :

$$\frac{\partial^2 V_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_i}{\partial z^2} = 0 \quad ; \quad i = 1, 2, 3. \quad (\text{Eq. 2.1})$$

et qui vérifient les différentes conditions aux limites du problème (des trois zones de séparation, au point  $O$  et à l'infini).

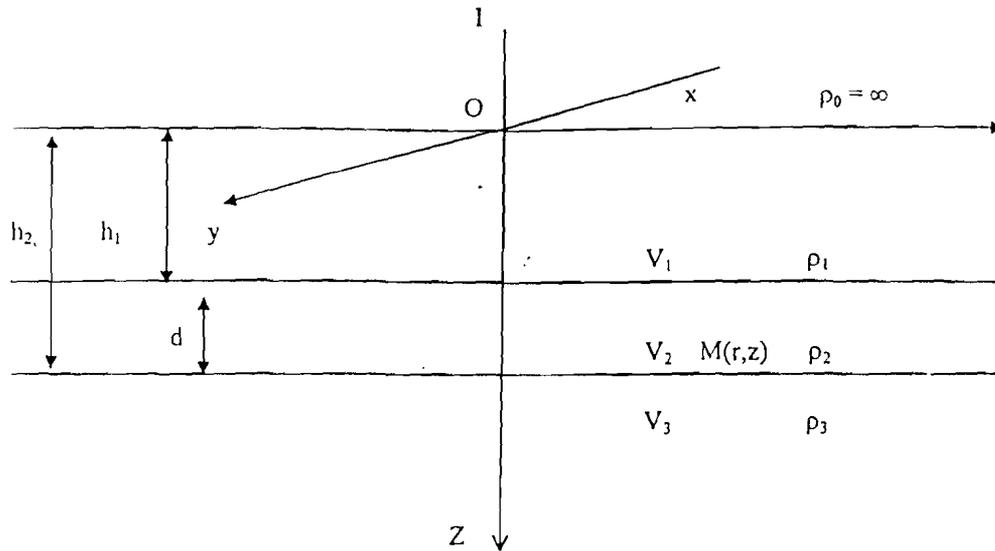


Fig. 2.1 : Electrode ponctuelle présentant une symétrie cylindrique.

STEFANESCO et SCHLUMBERGER ont montré que les fonctions  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$  s'écrivent :

$$V_1 = \frac{I}{2\pi} \rho_1 \int_0^{\infty} \left[ e^{-\lambda z} + \theta_1(\lambda) e^{-\lambda z} + \Psi_1(\lambda) e^{\lambda z} \right] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{Eq. 2.2})$$

$$V_2 = \frac{I}{2\pi} \rho_1 \int_0^{\infty} \left[ e^{-\lambda z} + \theta_2(\lambda) e^{-\lambda z} + \Psi_2(\lambda) e^{\lambda z} \right] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{Eq. 2.3})$$

$$V_3 = \frac{I}{2\pi} \rho_1 \int_0^{\infty} \left[ e^{-\lambda z} + \theta_3(\lambda) e^{-\lambda z} + \Psi_3(\lambda) e^{\lambda z} \right] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{Eq. 2.4})$$

où :

$J_0(\lambda r)$  : représente la fonction de BESSEL de première espèce et d'ordre zéro (0).

Les conditions aux frontières fournissent les valeurs des fonctions  $\theta_i$  et  $\psi_i$ .

Dans le cas de  $V_1$  l'on trouve :

$$\theta_1(\lambda) = \Psi_1(\lambda) = \frac{K_1 e^{-2\lambda h_1} + K_2 e^{-2\lambda h_2}}{1 - K_1 e^{-2\lambda h_1} - K_2 e^{-2\lambda h_2} + K_1 K_2 e^{-2\lambda d}} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

avec :

$$K_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + 1} \quad \text{et} \quad K_2 = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2}$$

$V_1$  s'écrira alors :

$$V_1 = \frac{1}{2\pi} \rho_1 \left[ \int_0^\infty e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty \theta_1(\lambda) \left[ e^{-\lambda z} + e^{\lambda z} \right] J_0(\lambda r) d\lambda \right] \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Développons la quantité  $\theta_1(\lambda)$ , (Eq. 2.5) suivant les puissances croissantes de  $K_2$ , nous aurons :

$$\begin{aligned} \theta_1(\lambda) = & \frac{K_1 e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_1 e^{-2\lambda h_1}} + K_2 (1 - K_1^2) \frac{e^{-2\lambda h_2}}{(1 - K_1 e^{-2\lambda h_1})^2} + \\ & + K_2^2 (1 - K_1^2) (e^{-2\lambda h_2} - K_1 e^{-2\lambda d}) \frac{e^{-2\lambda h_2}}{(1 - K_1 e^{-2\lambda h_1})^3} + \dots \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Le premier terme de la relation (Eq. 2.7) se développe à nouveau comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{K_1 e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_1 e^{-2\lambda h_1}} &= K_1 e^{-2\lambda h_1} + K_1^2 e^{-4\lambda h_1} + K_1^3 e^{-6\lambda h_1} + \dots \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} K_1^n e^{-2n\lambda h_1} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Le second terme de l'équation (Eq. 2.7) s'écrira de même :

$$K_2(1 - K_1^2) \frac{e^{-2\lambda h_1}}{(1 - K_1 e^{-2\lambda h_1})^2} = K_2(1 - K_1^2) e^{-2\lambda h_1} \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) K_1^n e^{-2n\lambda h_1} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Nous nous contenterons de désigner le développement des termes restants par  $K_2^i \phi_i(\lambda)$   
 $= f_i(K_1, K_2, h_1, h_2, \lambda)$ .

En résumé nous aurons :

$$\begin{aligned} \theta_1(\lambda) &= \sum_{i=0}^{\infty} K_2^i \phi_i(\lambda) = \\ &= \phi_0 + K_2 \phi_1 + \sum_{i=2}^{\infty} K_2^i \phi_i(\lambda) = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} K_1^n e^{-2n\lambda h_1} + K_2(1 - K_1)^2 e^{-2\lambda h_1} \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) K_1^n e^{-2n\lambda h_1} \\ &+ \sum_{i=2}^{\infty} K_2^i \phi_i(\lambda) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

par suite :

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} \theta_1(\lambda) [e^{-\lambda z} + e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda &= \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \int_0^{\infty} K_1^n e^{-\lambda(2nh_1+z)} J_0(\lambda r) d\lambda + \int_0^{\infty} K_1^n e^{-\lambda(2nh_1-z)} J_0(\lambda r) d\lambda \right] = \\ &= K_2(1 - K_1^2) \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \int_0^{\infty} (n+1) K_1^n e^{-\lambda[2nh_1+2h_1+z]} J_0(\lambda r) d\lambda + \right. \\ &+ \left. \int_0^{\infty} (n+1) K_1^n e^{-\lambda[2nh_1+2h_1-z]} J_0(\lambda r) d\lambda \right] + \end{aligned}$$

$$+ \sum_{i=2}^{\infty} K_2^i \int_0^{\infty} \phi_i(\lambda) \left[ e^{-\lambda z} + e^{\lambda z} \right] J_0(\lambda r) d\lambda$$

Sachant que :  $\int_0^{\infty} e^{-ax} J_0(bx) dx = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}}$

nous verrons finalement que la relation (Eq. 2.1) aura pour solution :

$$V_1 = \frac{I}{2\pi} \rho_1 \left[ \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{K_1^n}{\sqrt{r^2 + (2nh_1 + z)^2}} + \frac{K_1^n}{\sqrt{r^2 + (2nh_1 - z)^2}} \right] + \right. \\ \left. + K_2(1 - K_1)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{(n+1)K_1^n}{\sqrt{r^2 + (2nh_1 + 2h_2 + z)^2}} + \frac{(n+1)K_1^n}{\sqrt{r^2 + (2nh_1 + 2h_2 - z)^2}} \right] + \right. \\ \left. + \sum_{i=2}^{\infty} K_2^i \int_0^{\infty} \phi_i(\lambda) \left[ e^{-\lambda z} + e^{\lambda z} \right] J_0(\lambda r) d\lambda \right] \quad \text{(Eq. 2.11)}$$

si l'on fait  $z = 0$  et  $K_2 = 0$  dans l'expression (Eq. 2.11) nous aurons :

$$V_1 = \frac{I}{2\pi} \rho_1 \left[ \frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_1^n}{\sqrt{r^2 + (2nh_1)^2}} \right] \quad \text{(Eq. 2.12)}$$

Cette expression (Eq. 2.12) rejoint celle donnée par G. F. TAGG [95] dans le cas du potentiel de surface dans un terrain à deux (2) couches horizontales.

Nous venons de montrer que l'expression du potentiel dans la première couche s'exprime comme une somme infinie de fonctions en  $r, z, h_1, h_2, K_1, K_2, \rho_1$ . Le cas de  $n$  couches donnerait

une somme infinie de fonctions en  $r, z, h_1, h_2, \dots, h_{n-1}, K_1, K_2, \dots, K_{n-1}, \rho_1$  et le potentiel  $V_1$  s'exprimera :

$$V_1 = \frac{I}{2\pi} \rho_1 (\eta_0 + \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_i + \dots) \quad (\text{Eq. 2.13})$$

$\eta_0$  est une fonction de  $r$  et  $z$ . Les  $\eta_i$  ( $i \neq 0$ ) sont des fonctions de  $r, z, h_1, \dots, h_{n-1}$ , et de  $K_1, \dots, K_{n-1}$  qui sont des quantités sans dimensions. ( $\eta_i = 0$  en terrain homogène  $\forall i \neq 0$ ).

### 2.3 - CAS D'UNE ELECTRODE DE LONGUEUR $\Delta L$ ENFOUIE DANS LE SOL

Le cas d'une électrode enfouie à une profondeur  $b$  a été traité analytiquement dans le cas d'un terrain à deux (2) couches horizontales par M. MUSKAT et TAGG [95]. L'enfouissement de l'électrode ne modifie pas les équations fondamentales mais uniquement les conditions aux limites. La fonction  $V_1$  (si la prise de terre est enfouie dans la 1ère couche) devra alors présenter un pôle simple en  $r = 0$  et  $z = b$  au lieu de  $(0, 0)$ . Un raisonnement tout à fait analogue à celui décrit précédemment nous amènerait à écrire  $V_1$  à nouveau sous la forme de la relation (Eq. 2.13), avec toutefois :

$$\eta_0 = \eta_0(r, z, b)$$

$$\eta_i (i \neq 0) = \eta_i(r, z, b, h_2, \dots, h_{n-1}, K_2, \dots, K_{n-1}).$$

Si maintenant nous considérons la prise comme ayant une longueur  $\Delta L$  suffisamment petite pour s'assurer que la densité linéaire de courant dans cet élément est constante et vaut  $J$  alors l'intensité  $I$  du courant s'écrira :

$$I = J \cdot \Delta L \quad (\text{Eq. 2.14})$$

Enfin si par rapport à l'origine de nos coordonnées, on déplace l'électrode horizontalement de  $a$  et on la sorte hors du plan par une rotation  $\alpha$ . (Fig. 2.2). Le potentiel en

en un point M de coordonnées initiales (r, z) sera par suite de ces transformations, identique au potentiel d'un point M de coordonnées (r', z) dans le système initial avant modification avec :

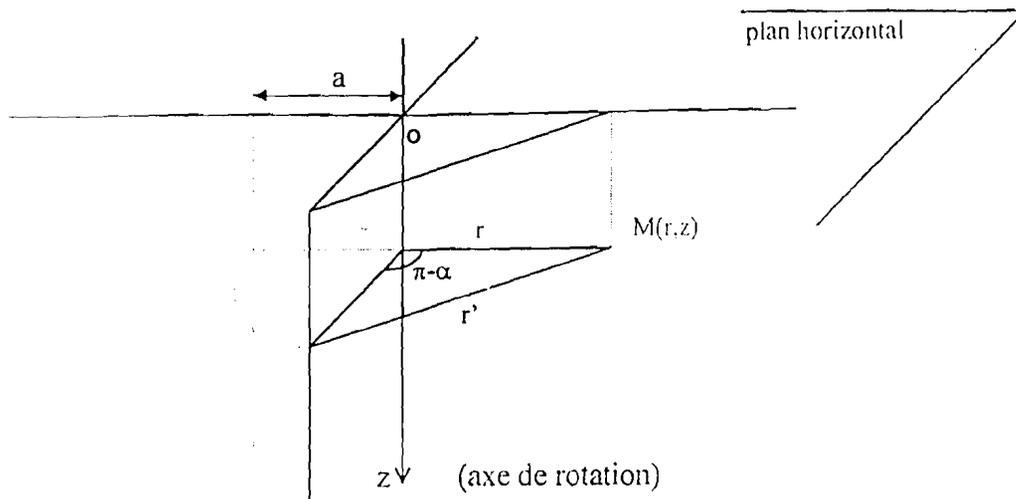


Fig. 2.2 : Electrode de longueur  $\Delta L$  enfouie dans le sol.

$$r' = a^2 + r^2 - 2 ar \cos \alpha \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Dans ce cas le potentiel  $V_1$  s'écrira :

$$V_1 = \frac{J\Delta L}{2} \rho_1 \cdot (\eta_0 + \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_i + \dots)$$

avec :

$$\eta_0 = \eta_0(r, z, a, b, \alpha);$$

$$\eta_i = \eta_i(r, z, a, b, \alpha, h_1, h_2, \dots, h_{n-1}, K_1, \dots, K_{n-1}).$$

## 2.4 - CAS D'UNE ELECTRODE QUELCONQUE

Une électrode de forme quelconque enfouie dans la première couche peut être considérée comme étant formée d'un nombre fini  $m$  de petits éléments de longueurs  $\Delta L_k$  parcourus par des courants de densités constantes  $J_k$ . En prenant le plan de la feuille comme référence et 0 comme origine des coordonnées cylindriques (Fig. 2.3), chaque élément sera caractérisé par  $\alpha_k$ ,  $a_k$ ,  $b_k$ , et  $L_k$ .

En un point  $M(r,z)$  quelconque le potentiel dû à l'électrode est la somme des potentiels dus à chaque élément pris séparément. Par suite :

$$V_1 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_k \Delta L_k}{2\pi} \rho_1 (\eta_{ok} + \eta_{1k} + \dots \eta_{ik} + \dots) \quad (\text{Eq. 2.16})$$

avec :

$$\eta_{ok} = \eta_o(r, z, a_k, b_k, \alpha_k);$$

$$\eta_{ik} = \eta_i(r, z, a_k, b_k, \alpha_k, h_1, \dots, h_{n-1}, K_1, \dots, K_{n-1}).$$

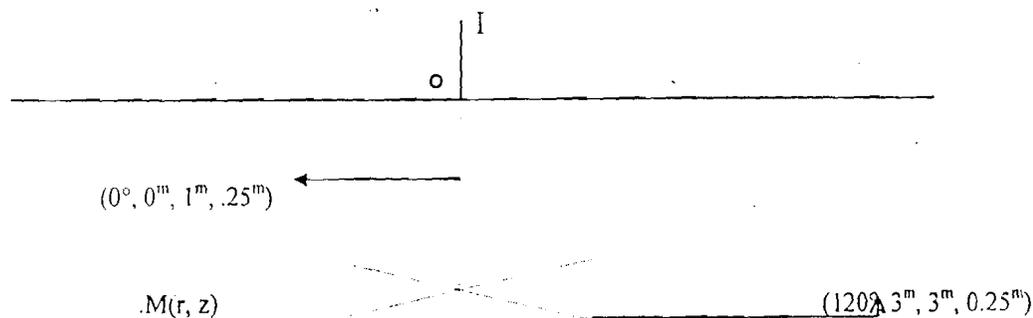


Fig. 2.3 : Electrode quelconque enfouie dans la première couche.

La figure 2.3 représente une électrode quelconque de mise à la terre qui a été décomposée en un certain nombre de petits éléments. Le dernier élément de la branche est caractérisé dans notre cas, par une rotation de  $120^\circ$ , une translation de  $3^m$ , un enfoncement de  $3^m$ , une longueur de  $0.25^m$ .

## 2.5 - ANALYSE DIMENSIONNELLE

Dans ce paragraphe nous ferons appel à la théorie de l'analyse dimensionnelle et nous nous inspirerons tout particulièrement des méthodes proposées par R. SAINT GUILHEM et V.A. VENIKOW [99]. Comme l'ont fait remarquer ces auteurs, l'analyse dimensionnelle peut conduire à des résultats incomplets et même parfois erronés, si certaines précautions ne sont pas

prises. En particulier, il faut partir d'un système complet d'équations physiques. Par système complet d'équations, on sous-entend un système d'équations faisant intervenir tous les paramètres physiques dont les variations modifient le comportement du processus physique considéré. C'est la raison pour laquelle nous avons préféré établir théoriquement la forme mathématique des équations du phénomène étudié, plutôt que de nous baser sur des considérations intuitives. Nous soulignons d'autre part que nous avons négligé tous les facteurs physiques qui, d'après l'expérience, n'interviennent pratiquement pas (du moins dans le domaine qui nous intéresse) tels que : la température, l'effet capacitif et la tension de claquage du sol.

### ➤ RAPPEL DU THEORIQUE DE VASHY BUCHINGHAM

Etant donné la forme générale d'une équation physique complète d'un phénomène A, faisant intervenir les paramètres

$$E_1, \dots, E_p,$$

tel que :

$$F(E_1, E_2, E_3, \dots E_p) = 0 \quad (\text{Eq. 2.17})$$

Dans un système cohérent d'unités, la relation (Eq. 2.17) peut s'écrire sous la forme :

$$\Theta (\pi_1, \pi_2, \dots \pi_{p-q}) = 0 \quad (\text{Eq. 2.18})$$

où :

- les  $\pi_i$  sont les produits sans dimensions indépendants qui peuvent être constitués au moyen des  $p$  grandeurs  $E_i$  concernées ;
- $q$  est égal au rang de la matrice dimensionnelle formée avec le  $p$  grandeurs. Sauf réduction du rang de la matrice, ce nombre  $q$  est égal au nombre des unités fondamentales du système d'unités choisi.

Choisissons comme système d'unités le système international :

M K S A. Le phénomène étudié fait intervenir les unités fondamentales suivantes :

- Longueur : L
- Masse : M
- Temps : T
- Courant : C

L'équation (Eq.2.16) peut s'écrire comme suit :

$$F (V_1, r, z, \rho_1, \dots J_k, \dots \Delta L_k, \dots a_k, \dots b_k, \dots \alpha_k, \dots h_i, \dots K_i \dots) = 0 \tag{Eq. 2.19}$$

avec :

$$K = 1 \dots m;$$

$$i = 1 \dots n-1.$$

$$\text{Donc : } p = 4 + 5m + 2(n-1) = 5m + 2n + 2$$

Formons le tableau des dimensions (voir tableau 2.1) :

	$V_1$	$r$	$z$	$\rho_1$	$\dots J_k \dots$	$\dots \Delta L_k \dots$	$\dots a_k \dots$	$\dots b_k \dots$	$\dots \alpha_k \dots$	$\dots h_i \dots$	$\dots K_i \dots$
L	2	1	1	3	-1	1	1	1	0	1	0
M	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
T	-3	0	0	-3	0	0	0	0	0	0	0
C	-1	0	0	-2	1	0	0	0	0	0	0

Tableau 2.1 : Tableau des dimensions.

Il est facile de voir à partir du tableau 2.1 que le rang maximal d'une matrice est  $q = 3$ . Nous aurons ainsi :  $p - q = 5m + 2(n-1) + 1$  produits sans dimensions indépendants. Il est très facile de les construire :

$$\alpha_k : \quad (\text{nombre : } m)$$

$$\frac{\Delta L_k}{r} ; \frac{a_k}{r} ; \frac{b_k}{r} : \quad (\text{nombre : } 3m)$$

$$\frac{\Delta L_k J_k \rho l}{r V_1} : \quad (\text{nombre : } m)$$

$$k_i : \quad (\text{nombre : } n-1)$$

$$\frac{h_i}{r} : \quad (\text{nombre : } n-1)$$

$$\frac{z}{r} : \quad (\text{nombre : } 1)$$

Nous pouvons écrire alors la forme finale de l'équation (Eq. 2.16) sous la forme :

$$\phi \left( \frac{\Delta L_k J_k \rho l}{r V_1} \dots \frac{\Delta L_k}{r} \dots \frac{a_k}{r} \dots \frac{b_k}{r} \dots \frac{h_i}{r} \dots \frac{z}{r} \dots \alpha_k \dots K_i \dots \right) = 0 \quad (\text{Eq. 2.20})$$

Cette équation (Eq. 2.20) doit rester invariante quel que soit le système d'unités choisi ou quelle que soit la structure physique initiale du système considéré.

## 2.6 - MODELE REDUIT A SIMILITUDE GEOMETRIQUE

Soit  $\mu_L$  l'échelle de réduction des longueurs entre les dimensions du phénomène réel et celles du modèle :

$$\mu_L = \frac{L_{\text{réel}}}{L_{\text{modèle}}} \quad (\text{Eq. 2.21})$$

De même :

$$\mu_M = \frac{M_{\text{réel}}}{M_{\text{modèle}}} \quad (\text{Eq. 2.22})$$

$$\mu_T = \frac{T_{\text{réel}}}{T_{\text{modèle}}} \quad (\text{Eq. 2.23})$$

$$\mu_I = \frac{I_{\text{réel}}}{I_{\text{modèle}}} \quad (\text{Eq. 2.24})$$

La condition à respecter pour que la similitude soit valable est la constance des produits sans dimensions :

\* La constance des  $\frac{a_k}{r}, \frac{b_k}{r}, \frac{\Delta L_k}{r}, \frac{z}{r}$  est assurée si toutes les dimensions sont réduites dans le même rapport, (Similitude géométrique) ; dans ce cas les  $\alpha_k$  conservent la même valeur aussi :

\* La constance de  $\frac{\Delta L_k J_k \rho_1}{r V_1}$  entraîne la condition suivante :

$$\frac{\mu_L \mu_I (\mu_L)^{-1} (\mu_L)^3 \mu_M (\mu_T)^{-3} (\mu_I)^{-2}}{\mu_L (\mu_L)^2 \mu_M (\mu_T)^{-3} (\mu_I)^{-1}} = 1 \quad (\text{Eq. 2.25})$$

qui est toujours vérifiée.

la dernière condition porte sur la constance des  $K_i$  qui, rappelons-le, s'écrivent :

$$K_i = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} = \frac{\frac{\rho_{i+1}}{\rho_1} - \frac{\rho_i}{\rho_1}}{\frac{\rho_{i+1}}{\rho_1} + \frac{\rho_i}{\rho_1}} \quad (\text{Eq. 2.26})$$

Si dans notre modèle nous avons respecté le rapport des résistivités des différentes couches à la première couche (où à l'une quelconque fixée à l'avance) la constance de  $K_i$  est assurée et nous déduisons alors que pour que la similitude soit sans distorsion il faudrait :

- Réaliser une similitude géométrique des longueurs ;
- Conserver le rapport des résistivités des différentes couches par rapport à l'une quelconque de ces couches fixée a priori.

**REMARQUE** : Afin de ne pas trop alourdir les relations, nous n'avons pas fait intervenir le diamètre du conducteur élémentaire. Cette omission suppose que ce diamètre est suffisamment petit pour ne pas modifier la densité linéaire du courant. Or, pour les fréquences industrielles il n'est pas erroné de dire que le courant dans une section de l'électrode se répartit uniformément. Par suite si un conducteur élémentaire a un diamètre  $\emptyset$  non négligeable, alors l'équation (Eq. 2.16) reste valable à condition toutefois de faire intervenir dans les  $\eta_i$  le paramètre supplémentaire  $\emptyset_k$  (diamètre du conducteur élémentaire  $k$ ). Il est facile de vérifier alors que l'équation (Eq. 2.20) s'écrira :

$$\phi \left( \frac{\Delta L_k J_k \rho_1}{r V_1} \dots \frac{\emptyset_k}{r} \dots \frac{\Delta L_k}{r} \dots \frac{a_k}{r} \dots \frac{b_k}{r} \dots \frac{h_i}{r} \dots \alpha_k \dots K_i \dots \frac{z}{r} \dots \right) = 0 \quad (\text{Eq. 2.27})$$

Les quantités sans dimensions  $\frac{\emptyset_k}{r}$  n'introduisent aucune condition de similitude supplémentaire.

## 2.7 - Modélisation des sols

### 2.7.1. Utilisation d'un modèle analytique (mathématique) de calcul

Elle consiste en la recherche d'une équation mathématique du recueil de mesures d'un site, avec des méthodes d'analyses numériques. Il s'agit donc pour nous, à partir des données d'acquisition (de mesures sur un site), de trouver une expression analytique qui approche au mieux l'évolution des paramètres que nous aurons à utiliser dans les calculs [9], [42], [43].

L'étude préliminaire des nuages de points fait ressortir une linéarité des valeurs. On pourra donc considérer que le modèle est linéaire et utiliser la méthode des moindres carrés pour les calculs.

D'une manière générale, Lomé et ses environs connaissent quatre (4) saisons : deux (2) pluvieuses et deux (2) sèches enchevêtrées. A ces saisons correspondraient des extrêmes du modèle (de la courbe analytique) ayant une forme polynomiale.

Supposons que notre modèle soit polynomial. Nous pouvons donc le représenter pour le point de mesure  $(R_i, H_i)$  par l'équation :

$$R_i^* = C_1 + C_2 H_i + C_3 H_i^2 + C_4 H_i^3 + \dots + C_m H_i^{m-1} \quad (\text{Eq. 2.28})$$

où :

$R_i^*$  :- valeur de la résistivité calculée (valeur du modèle) au point de mesure (i) ;

$C_j$  :- coefficients du polynôme à déterminer.

Le travail consiste donc à déterminer les  $C_j$  inconnus.

Notons par  $R_i$  la valeur réelle de la résistivité pour le point de mesure (i). L'erreur commise en utilisant le modèle de l'équation (Eq. 2.28) pour le point de mesure (i) est :

$$e_i = R_i - R_i^* \quad (\text{Eq. 2.29})$$

En remplaçant  $R_i^*$  par son expression (Eq. 2.28), nous obtenons :

$$e_i = R_i - (C_1 + C_2 H_i + C_3 H_i^2 + C_4 H_i^3 + \dots + C_m H_i^{m-1})$$

$$e_i = R_i - \sum_{j=1}^m C_j H_i^{j-1} \quad (\text{Eq. 2.30})$$

où :

$i$  : varie de 1 à  $n$  ( $n$  est le nombre de mesures) ;

$j$  : varie de 1 à  $m$  ( $m$  est le nombre de coefficients du polynôme et  $(m-1)$  est le degré du polynôme).

Le meilleur modèle est celui qui rendra minimale la quantité  $z = \sum_{i=1}^n e_i^2 w_i$  où  $w_i$  est la

pondération affectée au point  $(R_i, H_i)$ . Dans notre cas, toutes les mesures sont considérées avec les mêmes poids (pondération). Ceci revient à écrire :

$$z = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (\text{Eq. 2.31})$$

$z$  est minimale si et seulement si

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial z}{\partial C_k} = 0 \\ \frac{\partial \left( \sum_{i=1}^n e_i^2 \right)}{\partial C_k} = 0 \end{array} \right\} \quad k=1, \dots, m \quad (\text{Eq. 2.32})$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial (e_i^2)}{\partial C_k} = 0 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n 2e_i \left( \frac{\partial e_i}{\partial C_k} \right) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n e_i \left( \frac{\partial e_i}{\partial C_k} \right) = 0 \quad (\text{Eq. 2.33})$$

$$\frac{\partial e_i}{\partial C_k} = \frac{\partial (R_i - R_i^*)}{\partial C_k} \Leftrightarrow \frac{\partial e_i}{\partial C_k} = \frac{\partial R_i}{\partial C_k} - \frac{\partial R_i^*}{\partial C_k} \quad (\text{Eq. 2.34})$$

$R_i$  étant la valeur réelle de la résistivité (valeur mesurée) :

$$\frac{\partial R_i}{\partial C_k} = 0$$

$$\frac{\partial R_i^*}{\partial C_k} = \frac{\partial (C_1 + C_2 H_i + C_3 H_i^2 + C_4 H_i^3 + \dots + C_m H_i^{m-1})}{\partial C_k}$$

$$\frac{\partial R_i^*}{\partial C_k} = \frac{\sum_{k=1}^m \partial (C_k H_i^{k-1})}{\partial C_k} \Leftrightarrow \frac{\partial R_i^*}{\partial C_k} = H_i^{k-1}$$

En remplaçant  $\frac{\partial R_i^*}{\partial C_k}$  et  $\frac{\partial R_i}{\partial C_k}$  par leurs expressions dans l'équation (Eq. 2.34), nous

obtenons :

$$\frac{\partial e_i}{\partial C_k} = H_i^{k-1}$$

L'équation (Eq. 2.33) devient :

$$\sum_{i=1}^n \left( R_i - \sum_{j=1}^m (C_j H_i^{j-1}) \right) H_i^{k-1} = 0 \quad (\text{Eq. 2.35})$$

L'équation (Eq. 2.35) réduit s'écrit :

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^n ( R_i H_i^{k-1} - \sum_{j=1}^m C_j H_i^{j+k-2} ) = 0 \\
& \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n ( R_i H_i^{k-1} ) - \sum_{i=1}^n ( \sum_{j=1}^m C_j H_i^{j+k-2} ) = 0 \\
& \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n ( \sum_{j=1}^m C_j H_i^{j+k-2} ) = \sum_{i=1}^n ( R_i H_i^{k-1} ) \\
& \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n ( ( \sum_{j=1}^m H_i^{j+k-2} ) C_j ) = \sum_{i=1}^n ( R_i H_i^{k-1} ) \\
& \Leftrightarrow \sum_{j=1}^m ( ( \sum_{i=1}^n H_i^{j+k-2} ) C_j ) = \sum_{i=1}^n ( R_i H_i^{k-1} )
\end{aligned}$$

en définitif nous obtenons :

$$\sum_{j=1}^m ( ( \sum_{i=1}^n H_i^{j+k-2} ) C_j ) = \sum_{i=1}^n ( R_i H_i^{k-1} ) \quad (\text{Eq. 2.35})$$

$$a_{kj} = \sum_{i=1}^n H_i^{j+k-2}$$

Posons :

$$b_k = \sum_{i=1}^n R_i H_i^{k-1}$$

Le système d'équations (Eq. 2.36) devient :

$$\sum_{j=1}^m a_{kj} c_j = b_k, \quad k=1, \dots, m \quad (\text{Eq. 2.37})$$

Le système d'équations (Eq. 2.37) peut se présenter sous forme matricielle exprimée par l'expression (Eq. 2.38) :

$$[A] * [C] = [B] \quad (\text{Eq. 2.38})$$

où :

[C], est le vecteur des coefficients du polynôme de régression de degré  $(m-1)$ .

Il revient maintenant de définir, dans l'équation (Eq. 2.38), les matrices [A] et [B].

## 2. Construction des matrices de réduction

### □ Formation des matrices [A] et [B]

Les organigrammes relatifs à la constitution des matrices [A] et [B] sont illustrés respectivement aux figures 2.4 et 2.5.

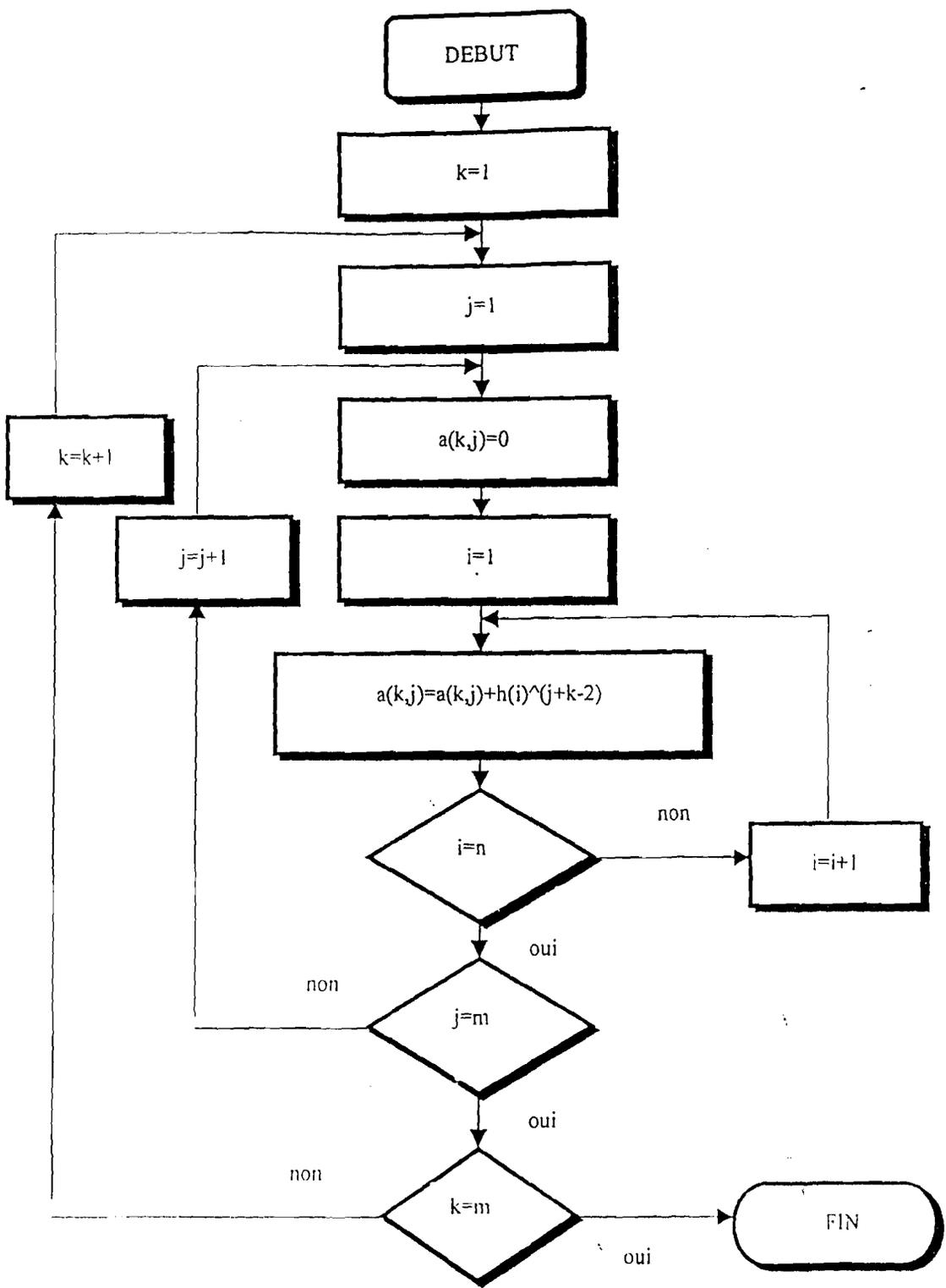


Fig. 2.4 : Constitution de la matrice [A].

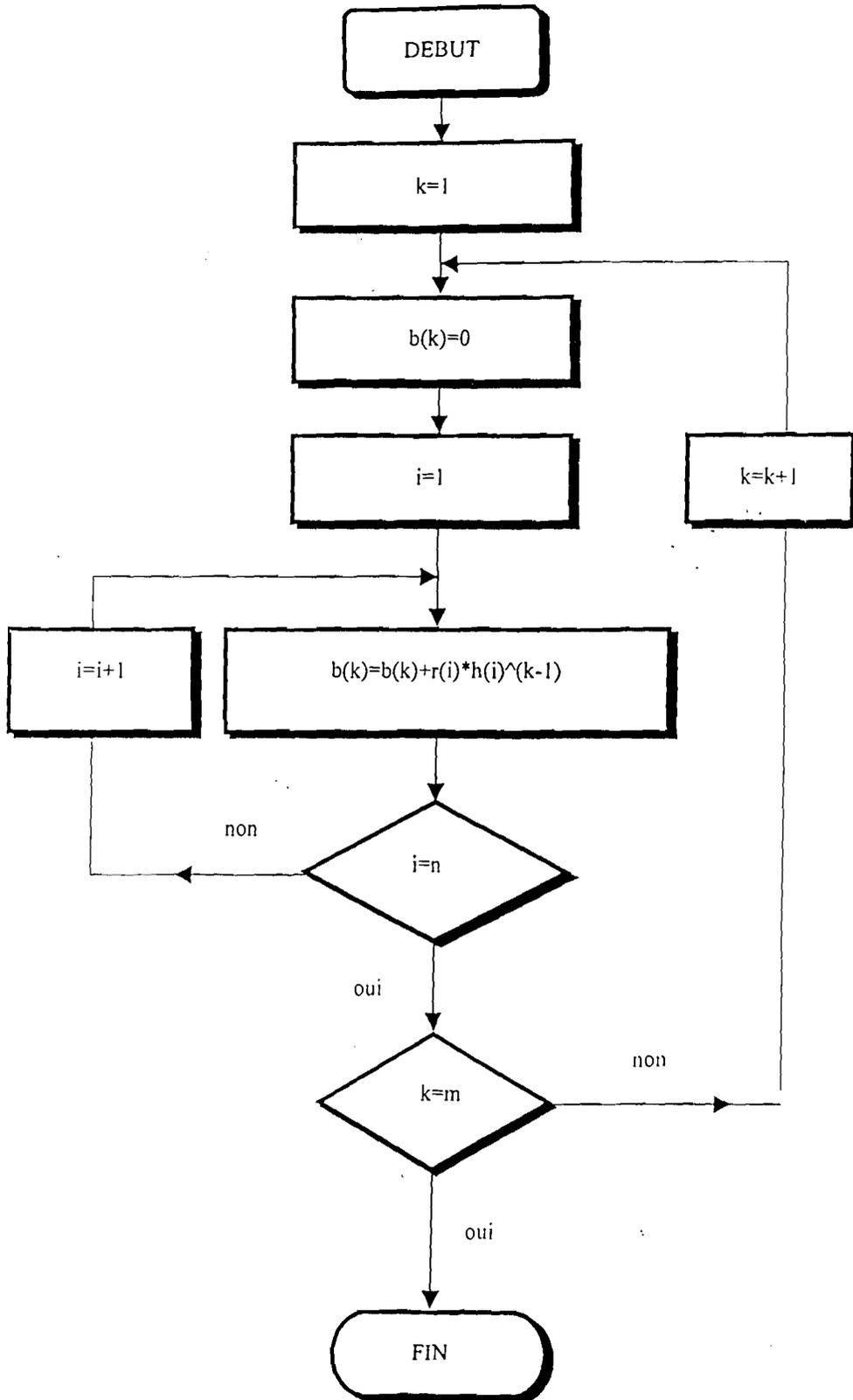


Fig. 2.5 : Constitution de la matrice  $[B]$ .

### 2.7.2. Résolution du système d'équations établi avec les matrices réduites

La matrice  $[A]$  est définie strictement positive ; tous les  $a_{ij}$  sont supérieurs à 0. Nous utilisons la méthode de GAUSS pour la résolution du système d'équation :

$$[A]*[C]=[B] \quad (\text{Eq. 2.39})$$

où :

$[A]$  : a pour dimension (m x m)

$[C]$  : a pour dimension (m x 1)

$[B]$  : a pour dimension (m x 1)

m : est le nombre de coefficients du polynôme de régression.

Pour exploiter la méthode de GAUSS, nous constituons la matrice augmentée de  $[A]$  où les éléments de la colonne (m+1) sont constitués par les éléments du vecteur  $[B]$ . L'algorithme de GAUSS simplifié est montré dans le tableau 2.2.

L'organigramme de résolution du système d'équation par la méthode de GAUSS est illustré par la figure 2.6.

<p>POUR k allant de 1 à (m-1)</p> <p>    POUR i allant de (k+1) à m</p> <p>        POUR j allant de k à (m+1)</p> <p>            <math>a_{ij}=a_{ij}-(a_{ik}/a_{kk})a_{kj}</math></p> <p>        FIN POUR j</p> <p>    FIN POUR i</p> <p>FIN POUR k</p> <p>Les indices i, j, k indiquent respectivement les lignes, les colonnes et l'étape en cours de traitement.</p>
---

Tableau 2.2 : Algorithme de résolution par la méthode de GAUSS selon [42].

La matrice [A] à la fin du traitement par la méthode de GAUSS est triangulaire supérieure. La détermination des inconnues  $C_j$  se fait par le calcul à rebours suivant l'équation (Eq. 2.40).

$$C_i = \frac{1}{a_{ii}} \left[ a_{i(m+1)} - \sum_{j=i+1}^m a_{ij} * C_j \right] \quad i=(m-1), \dots, 1 \quad (\text{Eq. 2.40})$$

avec :  $C_m = \frac{1}{a_{mm}} * a_{m(m+1)}$

L'organigramme d'évaluation des  $C_j$  est représenté à la figure 2.7.

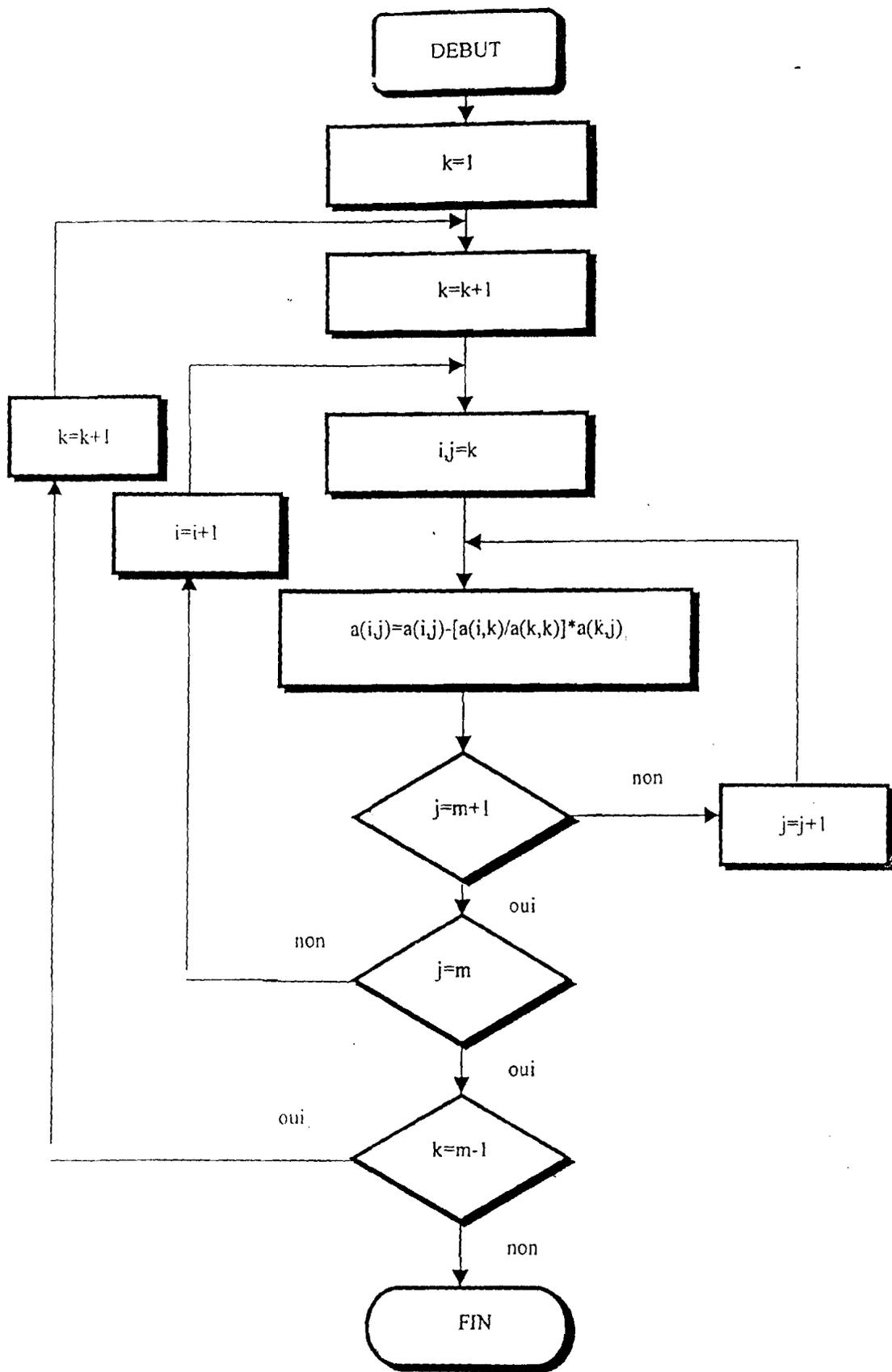


Fig. 2.6 : Organigramme de résolution par la méthode de GAUSS.

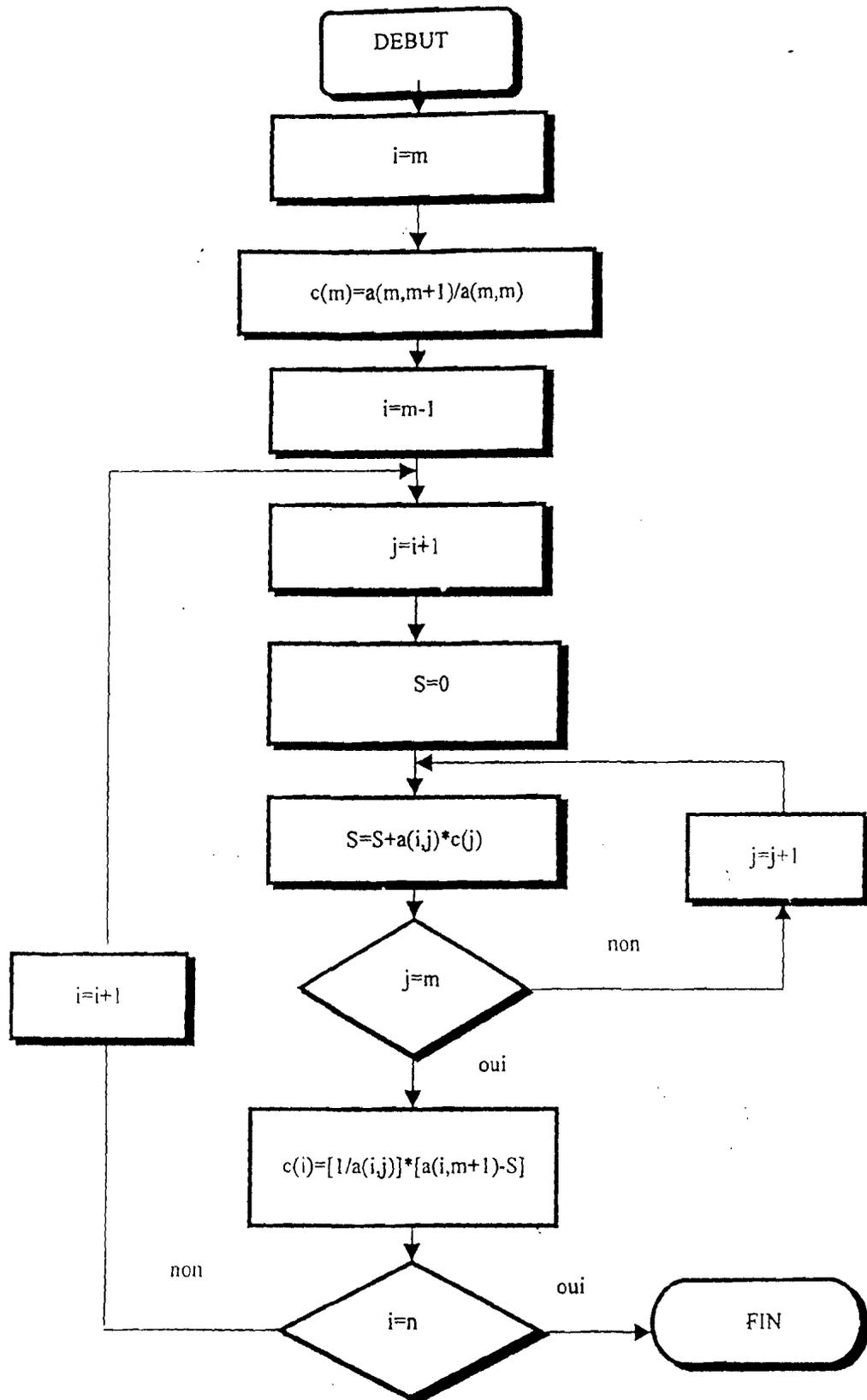


Fig.2.7 : Organigramme d'évaluation des coefficients du polynôme de régression.

## 2.8 - CONCLUSION

- L'emploi des modèles réduits dans le cas d'un terrain homogène à  $n$  couches est valable à condition de respecter les dimensions relatives des longueurs ainsi que celles des résistivités.

- L'équation (Eq. 2.27) montre clairement que si la densité de courant n'est pas uniforme le long d'une électrode,  $V_1$  ne peut s'exprimer directement en fonction du courant total injecté. Nous rejoignons ainsi les conclusions de T. N. GIAO [40], [41] qui a établi analytiquement la valeur du potentiel autour d'une prise de terre dans un sol homogène et à deux couches horizontales en tenant compte de la non-uniformité du courant dans l'électrode.

- Si la prise de terre présente une symétrie cylindrique parfaite ou si nous supposons que la densité linéaire de courant est constante dans tous les éléments, nous pouvons déterminer la valeur du facteur de réduction. En effet, nous pouvons toujours nous arranger pour prendre des  $\Delta L_k$  égaux et par suite d'une simple transformation mathématique l'équation (Eq. 2.27) s'écrira :

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{r} \phi_1 \left( \dots, \frac{\Delta_k}{r}, \dots, \frac{\Delta_L}{r}, \dots, \frac{a_k}{r}, \dots, \frac{z}{r} \right)$$

Donc :

$$\frac{V_{\text{réel}}}{V_{\text{modèle}}} = \frac{I_{\text{réel}}}{I_{\text{modèle}}} \cdot \frac{\mu_p}{\mu_L}$$

$$V_1 \text{ réel} = I \text{ réel} \cdot \frac{\mu_p}{\mu_L} \cdot \frac{V_{\text{modèle}}}{I_{\text{modèle}}} \quad (\text{Eq. 2.41})$$

où :

$\mu_p$  et  $\mu_L$  désignent respectivement les échelles de réduction des résistivités et des longueurs.

Nous déduisons alors que les résistances mesurées sur le modèle sont reliées à celle du cas réel par la relation :

$$R \text{ réel} = \frac{\mu_p}{\mu_L} \cdot R \text{ modèle} \quad (\text{Eq. 2.42})$$

- Le cas d'un terrain présentant des couches en forme quelconque, du fait même de la diversité des configurations qu'on retrouve dans la nature, entraînera des calculs inextricables sinon impossibles. Toutefois en se basant sur les conclusions précédentes, nous admettons que les conditions de similitude trouvées plus haut sont applicables aussi dans ce cas.

- Théoriquement le modèle réduit devrait s'étendre à l'infini tant en profondeur qu'en surface (étant donnée que le cas réel est supposé s'étendre à l'infini). Cependant lorsque l'étude porte sur une région d'une étendue finie, nous pouvons fixer au modèle des limites de sorte que l'influence de ces frontières soit négligeable sur le comportement physique du modèle

---

## LISTE DES SYMBOLES

- $\rho$  : Résistivité
- $r, z$  : Coordonnées cylindriques
- $V$  : Potentiel
- $I$  : Intensité du courant
- $\mu_r$  : Echelles de réduction des résistivités.
- $J$  : densité linéaire du courant
- $J_0(\lambda r)$  : Fonction de Bessel de première espèce d'ordre zéro
- $\theta_i$  et  $\varphi_i$  : Fonctions fournies par les conditions aux frontières
- $\pi_i$  : Produits sans dimension
- $L$  : Longueur
- $M$  : Masse
- $\mu_L$  : Echelle de réduction des longueurs
- $\mu_M$  : Echelle de réduction des masses
- $\mu_T$  : Echelle de réduction du temps
- $\mu_I$  : Echelle de réduction du courant
- $\emptyset$  : diamètre
- $R_i$  : Valeur réelle de la résistance
- $R_i^*$  : Valeur de la résistivité calculée

## CHAPITRE 3

# REALISATION D'UN LOGICIEL DE DIMENSIONNEMENT ET DE SIMULATION DES PRISES DE TERRE

### 3.1 - INTRODUCTION

Le logiciel GEPTERRE, acronyme de Gestion des Prises de Terre, fonctionne sous environnement Microsoft WINDOWS 95 et supérieur. Ce programme est développé pour assister les Ingénieurs et Techniciens électriciens dans la conception de bons projets d'implantation de prises de terre.

La sécurité des personnes et des biens dépendant de l'efficacité du système de mise à la terre d'une installation électrique, le bon calcul de ce dispositif s'impose et toute œuvre réalisée par tâtons doit être exclue. Or, principalement à Lomé, capitale du Togo, les prises de terre sont implantées par estimation hasardeuse. Ce n'est qu'après qu'elles sont mesurées puis comparées aux prescriptions du cahier de charges.

L'inexistence d'un outil de calcul favorise ce fait, car les calculs de meilleures prises sont longs et fastidieux. Le logiciel « GEPTERRE » est à sa première édition pour la zone de Lomé et ses environs.

### 3.2 - OBJECTIFS DU LOGICIEL

Les problèmes posés par la nécessité de la mise à la terre (des masses de récepteurs, des points neutres ...) dans les pays en voie de développement ne sont pas nouveaux.

Les conditions climatiques très difficiles, la disposition de peu de moyens financiers, l'environnement technique (personnel technique et matériel) très défavorable ne favorisent pas la résolution de ces problèmes.

Cependant, le bilan est très lourd et ne cesse de s'alourdir au niveau de la sécurité électrique des personnes et des biens. Les dégâts causés par les défauts d'isolement dans les circuits électriques et par les décharges atmosphériques doivent trouver des solutions efficaces et fiables.

Dans ce contexte, un outil assez précis permettant de faire des analyses statistiques des données telluriques (du sol), d'optimiser les dimensions des prises de terre, d'uniformiser les

démarches menant à une conception optimale des systèmes de prise de terre, trouve sa signification.

Une analyse statistique des données relatives au sol (résistivité, humidité...), sur une longue période à travers toutes les saisons dans la zone concernée permettrait de mieux maîtriser les caractéristiques de fonctionnement d'une prise de terre selon la saison.

Un dimensionnement judicieux prenant en compte les conditions climatiques et telluriques de la zone d'implantation favoriserait une réduction du coût et un meilleur fonctionnement des éléments de l'installation.

Une uniformisation (unification) des démarches relatives à la conception optimale et judicieuse des systèmes de prise de terre amènerait tous les techniciens en la matière (les réalisateurs ou les concepteurs-projeteurs des prises de terre) à faire des réalisations selon les critères universellement connus. Un logiciel conçu et fonctionnant selon les normes et réglementations électriques en vigueur arriverait à point nommé.

Le logiciel GEPТЕРRE, que nous proposons est un outil de dimensionnement dynamique et d'analyse des systèmes des prises de terre. L'application de ce logiciel permet à partir des données telluriques et électriques dont dispose l'utilisateur de réaliser une conception optimale et judicieuse (dont les critères d'évaluation sont universellement connus) des prises de terre.

### 3.3 - ASPECTS LOGICIEL ET MATERIEL

#### 3.3.1 - Langage de programmation (le Software)

Le logiciel GEPТЕРRE qui est à sa première version a été développé avec le langage de programmation VISUAL BASIC, dans l'environnement WINDOWS. La Programmation en VISUAL BASIC repose sur le principe d'une programmation modulaire. Ces modules sont des codes appropriés à une application donnée. Un code d'application est divisé en blocs plus petits appelés procédures d'événement qui s'exécute lorsqu'un événement se produit (utilisateur clique sur un bouton par exemple).

La première étape de la création d'une application à l'aide de VISUAL BASIC consiste à créer l'interface : les feuilles, les contrôles et autres objets que l'utilisateur peut voir et utiliser. Par suite, vous définissez les propriétés et écrivez le code VISUAL BASIC pour faire vivre l'interface. Une telle interface avec l'utilisateur est dotée de boîtes de dialogue qui assurent une manipulation intuitive et conviviale du logiciel [57], [63] [66]. Une barre d'état renseigne sur les actions à effectuer et permet à un non initié à tirer pleinement profit de l'outil.

Pour créer ou ouvrir une application avec VISUAL BASIC, vous manipulez des projets. Un projet se compose des éléments suivants :

- un fichier pour chaque feuille ;
- un fichier pour chaque module de code ;
- un fichier pour chaque contrôle personnalisé ;
- un fichier de projet qui mémorise tous les composants.

Pour atteindre les objectifs précités, l'analyse organique du logiciel « GEPTERRE » a conduit à la démarche suivante :

1. créer ou ouvrir un ou des projets ;
2. saisir et traiter des données issues des recueils de mesures, les modéliser et effectuer des analyses statistiques relatives aux modèles analytiques adoptés pour la reconnaissance des sols.
3. Demander le calcul de prises de terre ; soit en exploitant les modèles programmés ou soit par introduction de nouvelles données ;
4. Procéder à des analyses graphiques relatives aux résultats de calcul et évaluer les paramètres de sécurité.

Le langage de programmation VISUAL BASIC, s'est avéré le mieux adapté à nos conditions matérielles et logicielles actuelles et peut bien répondre aux exigences imposées par les objectifs de réalisation du logiciel GEPTERRE.

### 3.3.2 - Matériels de programmation (le Hardware)

Les calculs de régression (calculs par itérations) avec des matrices de grandes dimensions ont besoin de beaucoup d'espace mémoire et surtout d'une grande rapidité et précision. Pour cela il faudra des équipements puissants performants pour éviter la lenteur et l'imprécision. Sera donc requis un environnement minimum d'un micro ordinateur type Pentium.

## 3.4 - DEVELOPPEMENT DU LOGICIEL [9] [29] [57]

### 3.4.1 - Description sommaire

Le logiciel est structuré en trois (3) modules principaux et trois (3) sous modules accessibles au moyen de la barre de menu :

- Le module de « **Calcul des Prises** » acquiert de l'utilisateur les valeurs de tension de sécurité, du courant de défaut et de la résistivité puis calcule les dimensions appropriées de la prise de terre pour les trois (3) formes usuelles rencontrées à Lomé : le Piquet, le Câble ou la Ceinture et la Boucle. Elle permet à l'utilisateur de sauvegarder les paramètres et résultats de ses calculs dans un fichier de son choix sous forme d'un projet. Ce module comporte deux sous modules :

- le sous module de « **Configuration du projet** » qui sert à définir les paramètres à base desquels sera étudiée l'évolution fonctionnelle de la prise ;
  - le sous module « **Schéma d'implantation** » visionne la réalisation de chaque forme de prise avec la cotation des dimensions.
- Le module des « **Banques de mesure** » sert à la gestion du recueil de valeur de résistivité du sol du site à associer au projet pour caractériser la résistivité du lieu. Il permet la mise à jour de la base et procède au calcul de sa modélisation pour en dégager une équation mathématique représentant le mieux les nuages de points que constitue cette base de données ;
- Le module des « **Analyses Graphiques** » sert à tracer les courbes de variations de la résistivité ou de la résistance des prises calculées en fonction des saisons (Date) et autres paramètres importants déjà définis par l'utilisateur à la configuration du projet au sous module « **Configuration** ». Il comporte un sous module « **Statistique** » servant à l'évaluation statistique du modèle de régression utilisé.

L'organigramme fonctionnel du logiciel est représenté à la figure 3.1.

#### 3.4.2 - Module de calcul de prise

L'installation d'une prise de terre requiert un certain nombre de paramètres :

- la résistance maximale admise lorsque la prise sera installée ;
- les contraintes d'encombrement pour poser cette prise ; généralement pour les installations faisant l'objet de protection, la résistance admise pour la prise de terre est fixée par le cahier de charges. Pour répondre à cette exigence, il faut déterminer la forme de la prise ainsi que ses dimensions.

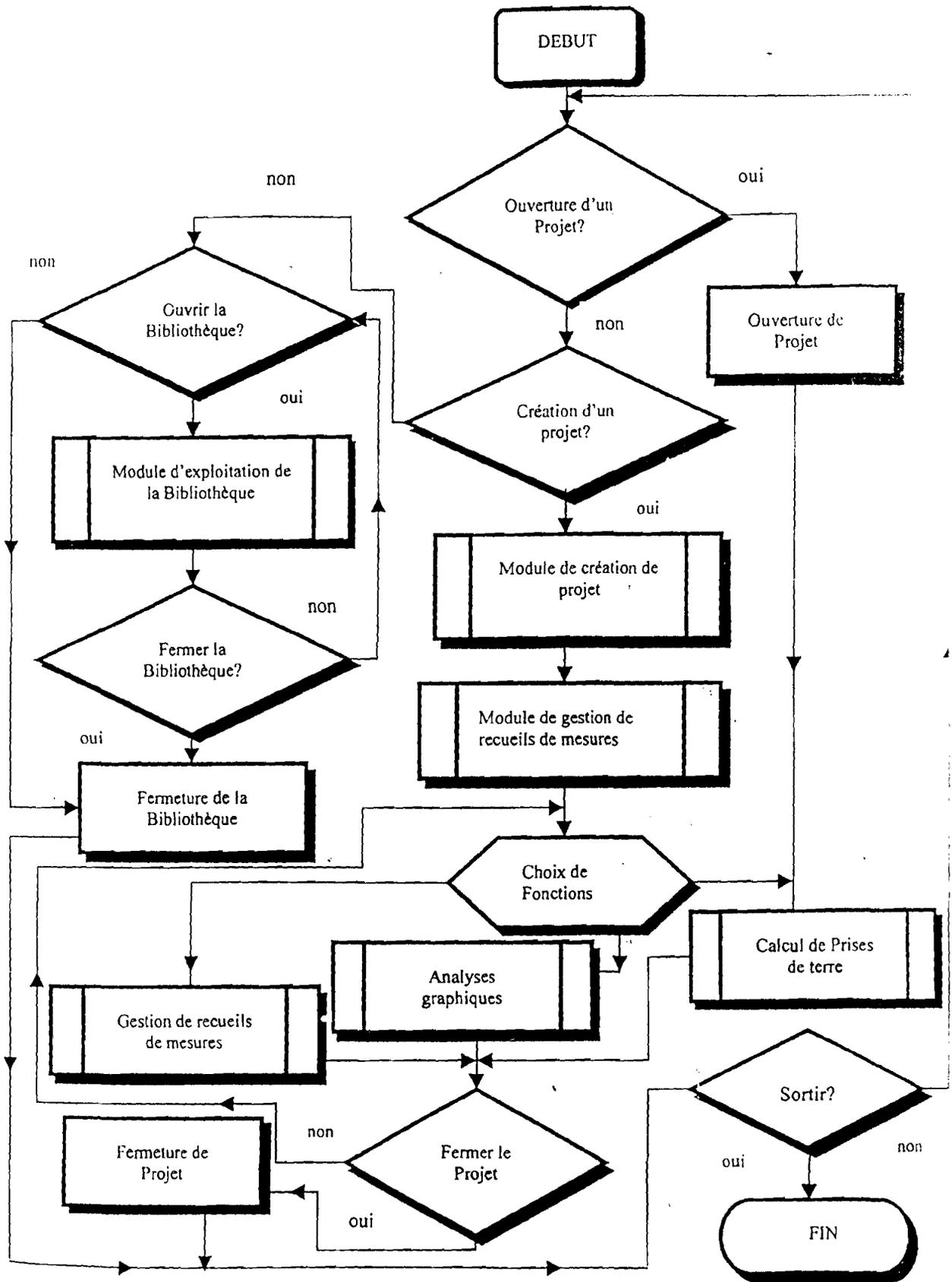


Fig. 3.1: Organigramme général de fonctionnement du logiciel.

Une enquête sur le marché national a permis de distinguer trois (3) types de prises pour les mises à la terre :

- les piquets ;
- les boucles ;
- les prises en forme de ceinture.

Le logiciel procède donc à une recherche de dimensions pour les trois (3) types de prise. Le résultat de la recherche est présenté à l'utilisateur sous forme d'un tableau. Ce dernier procède par la suite à un choix de prise suivant ses contraintes financières et surtout d'encombrement. Au cours de la recherche, les dimensions introduisant une valeur de résistance inférieure ou égale à la résistance admise pour l'installation sont retenues. La résistance admise  $R_a$  est soit donnée directement, soit déterminée à partir de la tension de sécurité  $V_s$  et le courant de défaut  $I_d$  suivant la loi d'Ohm :

$$R_a = \frac{V_s}{I_d} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Une prise de terre sera considérée comme bonne si sa résistance  $R$  est inférieure ou égale à la résistance admise  $R_a$ , soit  $R \leq R_a$ , quelles que soient les saisons de l'année.

#### a) - Détermination de la résistance $R$ de la prise

Suivant le type de prise de terre, la valeur de  $R$  est donnée par les équations (Eq. 3.2) à (Eq. 3.5) :

➤ Pour un piquet (Fig. 3.2) :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \text{Log} \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

où:

- $\rho$  - résistivité du sol ;
- $R$  - résistance de la prise ;
- $r$  - rayon du piquet ;
- $L$  - longueur du piquet.

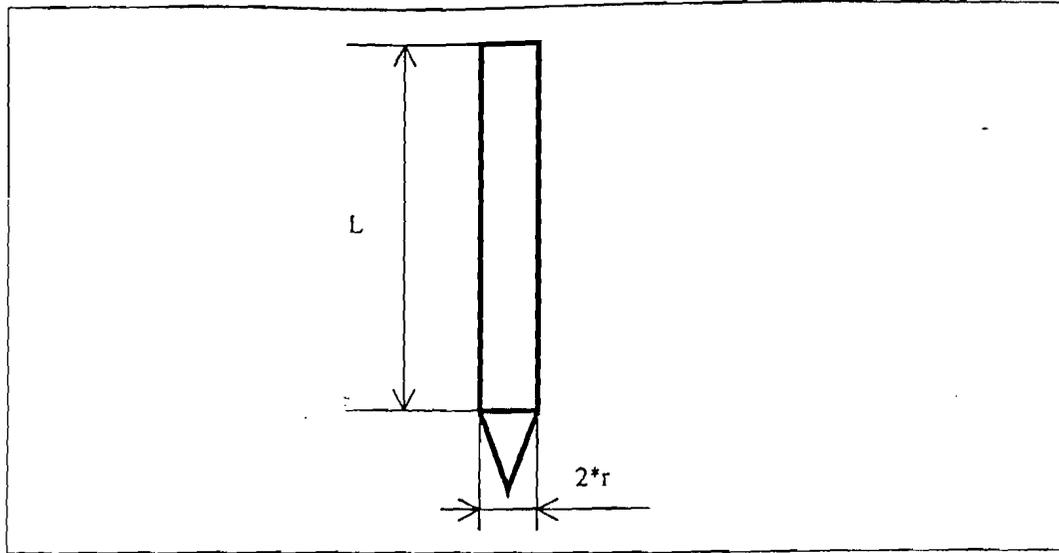


Fig. 3.2 : Prise en forme de piquet.

➤ Pour n piquets en parallèle (Fig. 3.3) :

$$R \approx \frac{1}{n} \left[ \frac{\rho}{2\pi L} \text{Log} \frac{4L}{r} - 1 + \frac{\rho}{\pi d} \sum_{i=2}^n \frac{1}{i} \right] \quad (\text{Eq. 3.3})$$

où : d - écartement entre deux (2) piquets consécutifs.

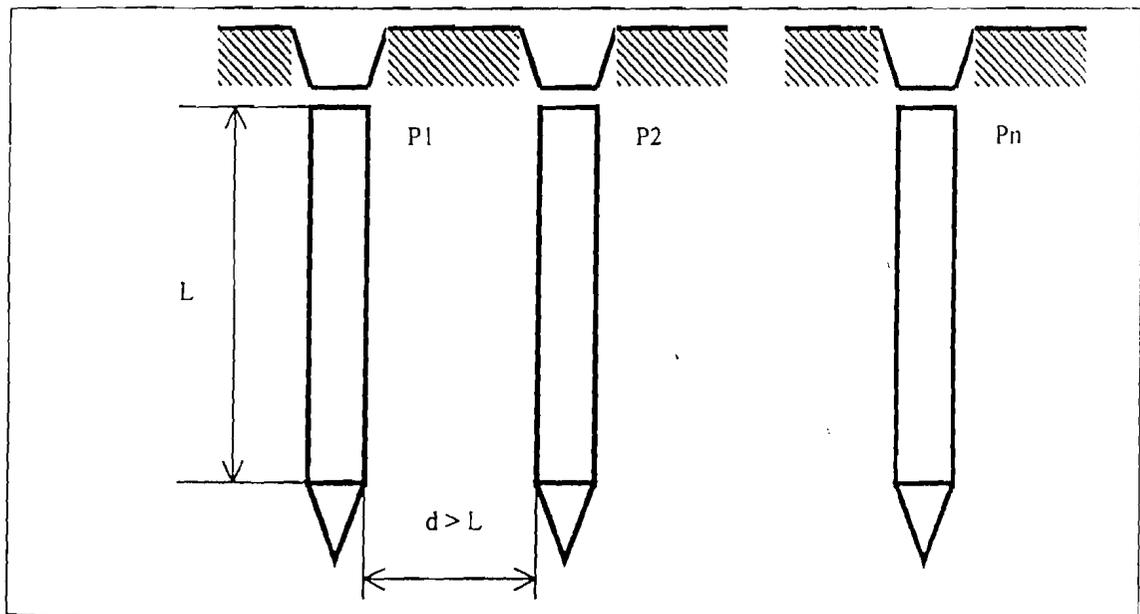


Fig. 3.3 : Prise en forme de n piquets en parallèles.

➤ Pour une prise en forme de ceinture (Fig. 3.4) :

Cette forme de prise se présente sous formes de conducteurs nus enterrés (unique ou double) mais en circuit ouvert. La résistance R se calcule par :

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left( \text{Log} \frac{2L}{\sqrt{2re}} - 1 \right) \quad (\text{Eq. 3.4})$$

où :

- L - longueur du conducteur ;
- e - profondeur d'enfouissement ;
- r - rayon du conducteur formant la ceinture

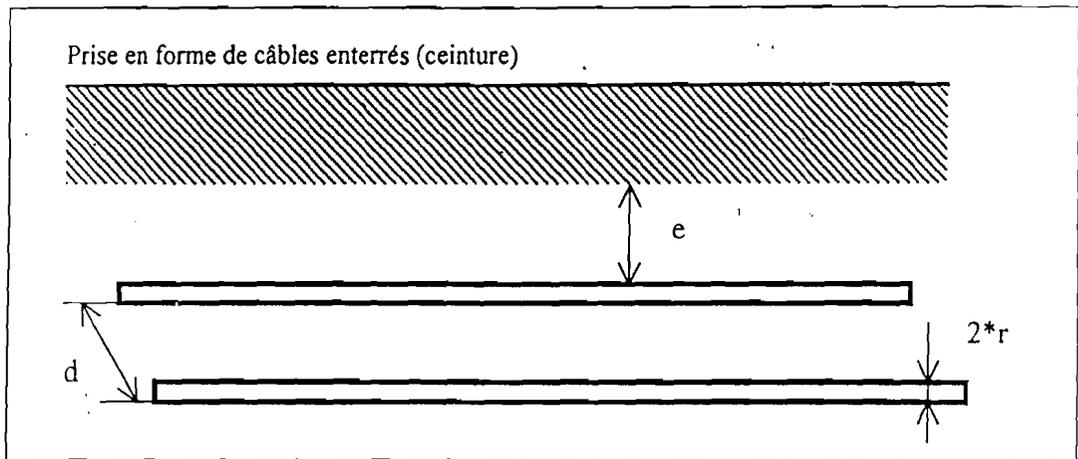


Fig. 3.4 : Prise en forme de ceinture.

➤ Pour une prise en forme de boucle enterrée (Fig. 3.5) :

$$R = \frac{\rho}{e\pi^2 D} \text{Log} \left( \frac{8D^2}{cr} \right) \quad (\text{Eq. 3.5})$$

où :

- e - profondeur d'enfouissement ;
- r - rayon du conducteur formant la boucle ;
- D - diamètre (équivalent) de la boucle.

Cette forme diffère du ceinturage par sa forme nécessairement en anneau (circuit fermé).

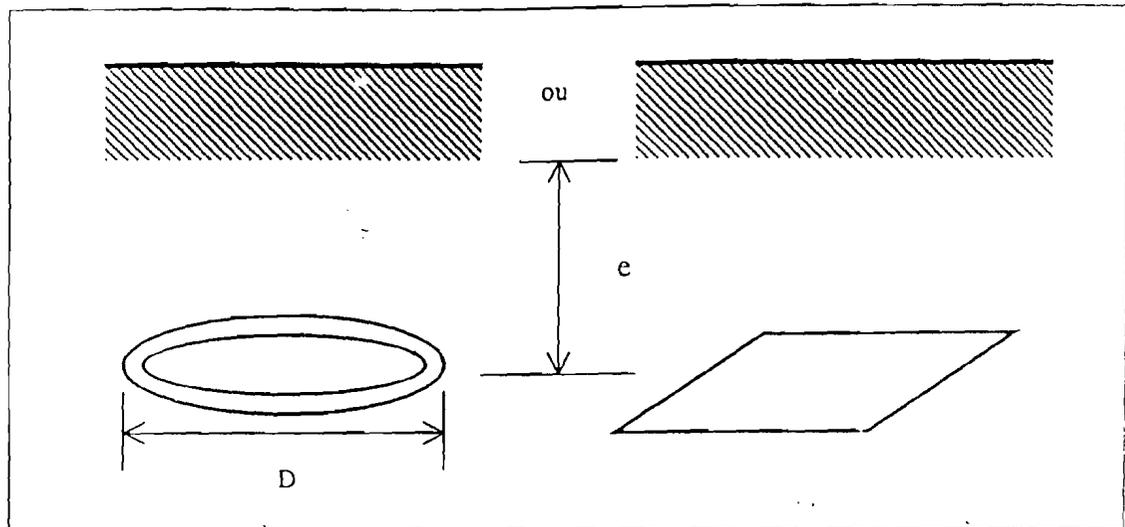


Fig. 3.5 : Prise en forme de boucle enterrée.

#### b) - Détermination des dimensions d'une prise

Examinons à présent, la façon dont se fait la recherche des dimensions optimales de la prise. L'optimisation vise ici à trouver les dimensions les plus réduites possibles permettant d'obtenir une résistance  $R$  inférieure ou égale à  $R_a$  (résistance admise).

#### Prise en forme de piquet

Considérons l'expression (Eq.3.2).

La résistivité du sol  $\rho$  sera supposée connue. La longueur  $L$  et le rayon  $r$  sont les deux (2) paramètres à déterminer en restant dans la gamme commercialisée c'est à dire :

- les diamètres variant de 16 mm à 25 mm ;
- les longueurs variant de 1 m à 2.5 m.

Le module de calcul fait varier le rayon  $r$  de 16 mm à 25 mm par itération de un (1) mm en recherchant pour chaque rayon, laquelle longueur  $L$  variant de un (1) m à 2,5 m par itération de 0,2 m vérifierait la condition  $R \leq R_a$  (Tableau 3.1).

En fin de calcul, la bonne valeur de  $R$  est retenue ainsi que les valeurs de  $r$  et  $L$  correspondantes ou alors considérer que le problème n'est pas résoluble par un piquet.

La figure 3.6 présente l'organigramme de calcul des prises de terre en forme de piquet.

	$r$ (mm)	$L$ (m)
minimum	16,0	1,0
Pas de variation	1,0	0,2
maximum	25,0	2,5

Tableau 3.1 : Tableau de variations des paramètres  $r$  et  $L$  pendant le calcul d'une prise en piquet.

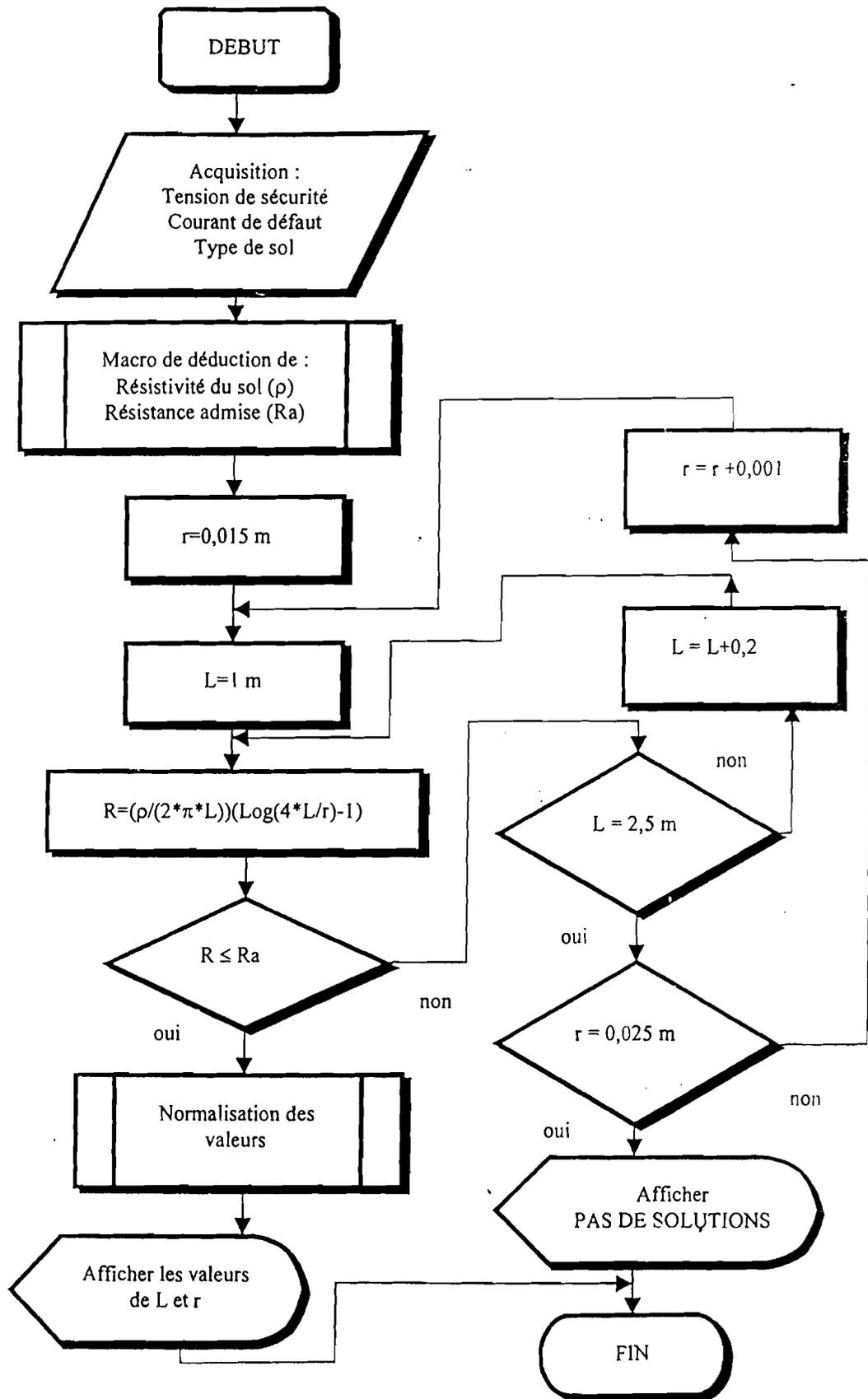


Fig. 3.6 : Organigramme de dimensionnement de prises de terre en forme de piquet.

### Prise en forme de ceinture

Les calculs seront effectués avec l'équation (Eq. 3.4). Le principe de recherche est le même que celui exposé pour la prise en piquet. Les paramètres à déterminer sont :

- le rayon du conducteur  $r$  ;
- la longueur  $L$ .

Les variations des paramètres lors des calculs de prises de terre en forme de ceinture sont représentées dans le tableau 3.2.

L'organigramme de calcul de prise de terre en forme de ceinturage est représenté à la figure 3.7.

	$r(\text{mm})$	$L(\text{m})$
Minimum	1,3 $\equiv$ 16 mm <sup>2</sup> de section	1,0
Pas de variation	2,0	0,2
Maximum	4,2 $\equiv$ 220 mm <sup>2</sup> de section	$L_{\text{max}}$

Tableau 3.2 : Tableau de variations des paramètres  $r$  et  $L$  pendant le calcul de prises de terre en forme de ceinturage ( $L_{\text{max}}$  est la longueur limite maximale donnée par l'utilisateur en fonction de l'encombrement (espace) dont il dispose pour l'implantation de la prise).

### Prise en forme de boucle

Les calculs seront effectués avec l'expression (Eq. 3.5).

Le principe de recherche est le même que celui exposé pour la prise en piquet. Les paramètres à déterminer sont :

- le rayon du conducteur  $r$  ;
- le diamètre de la boucle  $D$ .

Les variations des paramètres pendant les calculs de prises de terre en forme de boucles sont illustrés dans le tableau 3.3 et l'organigramme de calcul de dimensionnement de prise de terre de la même forme est illustré par la figure 3.8.

	$r(\text{mm})$	$D(\text{m})$
minimum	$1,28 \cong 40 \text{ mm}^2$	1,0
Pas de variation	2,0	0,5
maximum	$4,72 \cong 240 \text{ mm}^2$	25,0

Tableau 3.3 : Tableau de variations des paramètres  $r$  et  $D$  pendant le calcul de prises en forme de boucle.

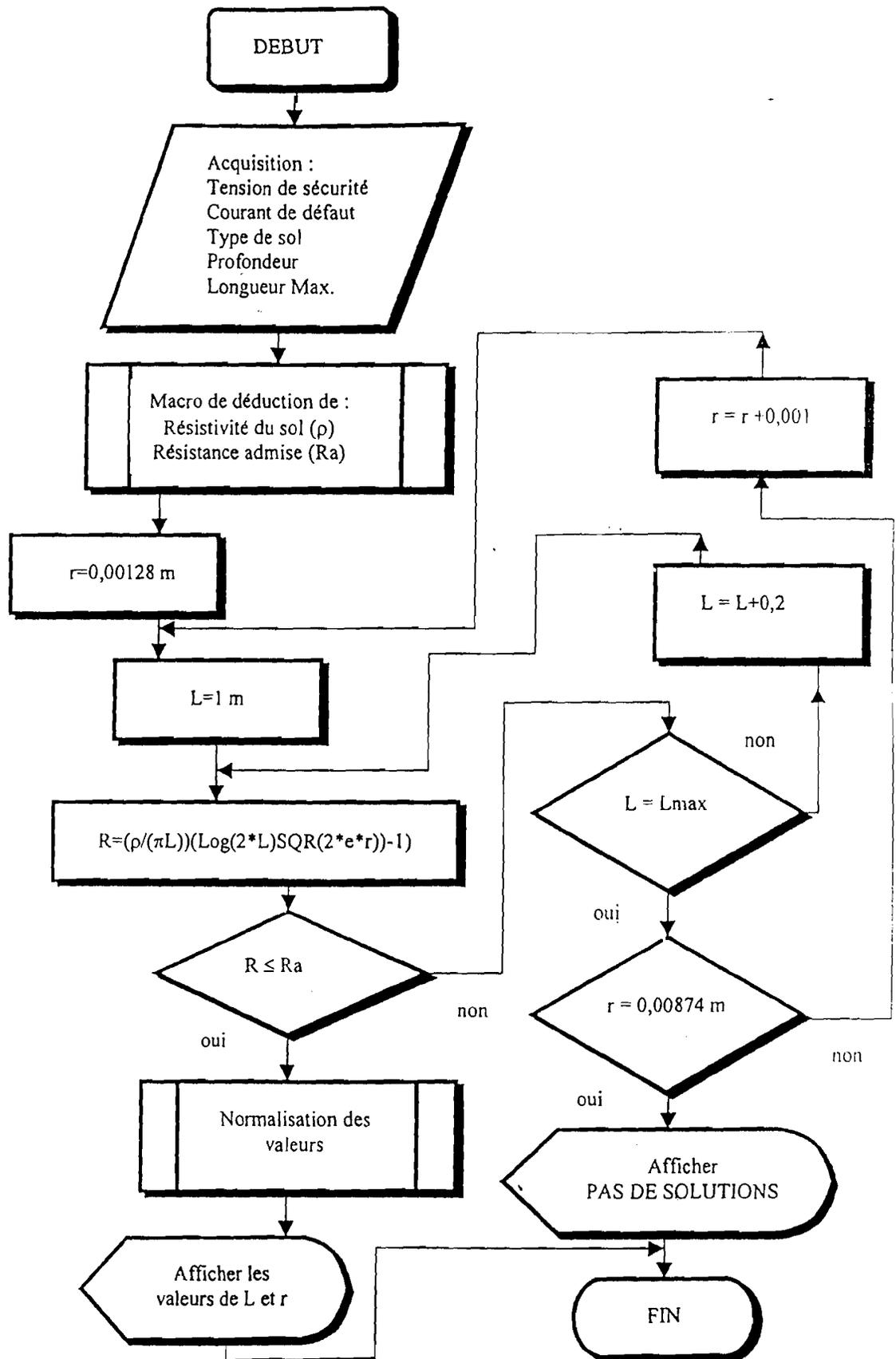


Fig. 3.7 : Organigramme de dimensionnement de prises de terre en forme de ceinture.

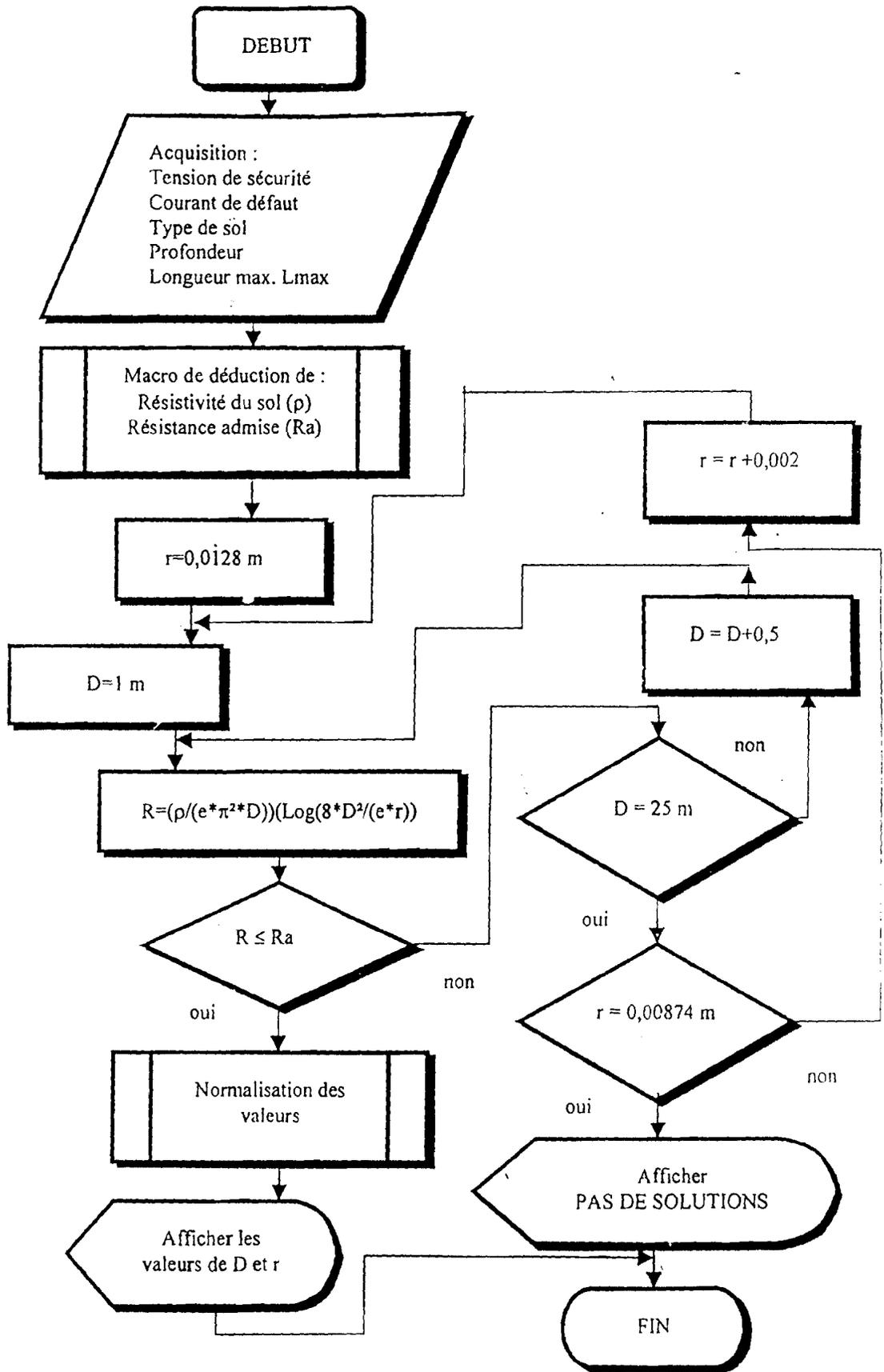


Fig. 3.8 : Organigramme de dimensionnement de prises de terre en forme de boucle.

### 3.4.3 - Module d'évaluation de la résistivité du sol et de gestion de bibliothèque

L'un des paramètres importants dans l'évaluation de la résistance d'une prise est la résistivité du sol  $\rho$ . Elle dépend de plusieurs facteurs dont :

- la nature du sol ;
- le taux d'humidité dans le sol ;
- la température du milieu ;
- le climat de la zone.

Les travaux préliminaires à la conception du logiciel « GEP'TERRE », nous ont permis de retenir la nature du sol et le taux d'humidité comme paramètres essentiellement responsables de la variation de la résistivité d'un sol. Ils peuvent être combinés à un troisième, l'hygrométrie de l'air qui, en quelque sorte, peut refléter l'humidité du sol.

La variable fondamentale au fonctionnement du logiciel est donc la résistivité du sol du site à étudier. Pour que la prise calculée ait en tout temps (toute saison) sa valeur de bon fonctionnement, il faudrait fournir au logiciel, la valeur maximale de la résistivité du site ; ce qui est bien difficile à priori à tout utilisateur du logiciel.

Pour contourner ce problème deux possibilités sont offertes pour l'entrée de la résistivité ( $\rho$ ) : une valeur directe ou un recueil de valeurs couvrant toutes les saisons. Pour le cas du recueil, il est traité par des méthodes d'analyses numériques pour en dégager un modèle mathématique de représentation valable seulement pour le paramètre associé à  $\rho$  (humidité du sol, de l'air, pluviométrie ou tout autre).

La constitution du recueil est une seconde difficulté pour l'utilisateur. Pour cela, le logiciel propose une bibliothèque de caractéristiques de différents types de sol. Cette bibliothèque contient initialement des données limitées à la ville de Lomé, capitale du Togo, et ses environs (zone échantillon pour l'étude du sol). Elle peut être mise à jour au gré de l'utilisateur permettant ainsi l'extension du domaine (zone) d'exploitation du logiciel.

On trouve initialement dans la bibliothèque les types de sols suivants :

- le sable silteux ;
- le sable (mal gradué) ;
- l'argile peu plastique ;
- le sable argileux ;
- et plus de six (6) sites singuliers respectant une répartition géographique modèle à Lomé.

Pour chaque type de sol donné, nous avons défini un site, puis relevé la valeur de la résistivité du sol ( $\rho$ ) simultanément avec le taux d'humidité du lieu. Le service de la météo fournit après les valeurs d'hygrométrie nécessaires. Nous chercherons par la suite à évaluer la valeur de la résistivité  $\rho$  dans les conditions les plus défavorables ( $\rho_{\max}$ ).

Pour le calcul du modèle, relation entre  $\rho$  et le paramètre associé (taux d'humidité ou autre), les valeurs de résistivité seront enregistrées dans le vecteur R tandis que celle du paramètre seront consignées dans le vecteur H.

#### 3.4.4 - Module de banques de données

Ce module assure la création et la gestion des bases de données relatives aux projets de prises de terre. Il est conçu à l'image des Systèmes de Gestion des Bases de Données (SGBD). Il dispose des fonctions essentielles de traitements des données telles que : l'Ajout ; la Suppression ; la Modification ; le tri ; l'Impression et la Sauvegarde de données.

Les organigrammes de fonctionnement et du macro d'affichage de ce module sont respectivement illustrés par les figures 3.9 et 3.10.

#### 3.4.5 - Module d'analyse graphique

Ce module présente diverses courbes d'évaluation. Il s'agit d'une part des courbes du modèle analytique de variation des résistivités du sol, au cours de l'année, en fonction des paramètres de base définis (date, saison, humidité de l'air et l'humidité du sol) ; et d'autre part

des courbes d'estimation de l'importance des risques d'électrisation aux environs immédiats des prises de terre installées.

Ce module contient aussi un sous module d'études statistiques relatives aux erreurs commises lors de la modélisation (modèle analytique) des valeurs discrètes (résistivités, humidité de l'air et du sol, date) issues des recueils de mesures.

L'organigramme de fonctionnement du module d'analyses graphiques est représenté à la figure 3.11.

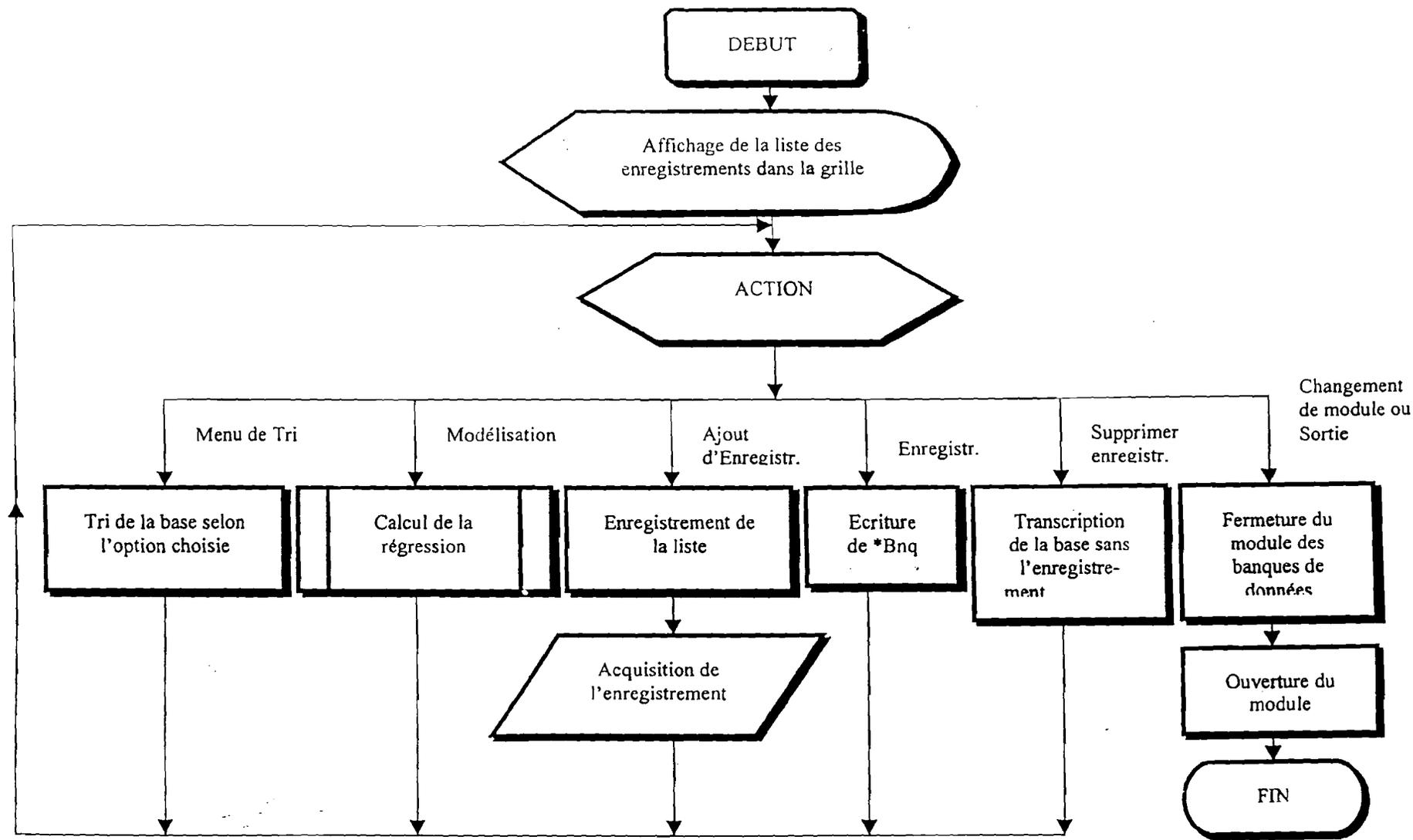


Fig. 3.9 : Organigramme du module des banques de données.

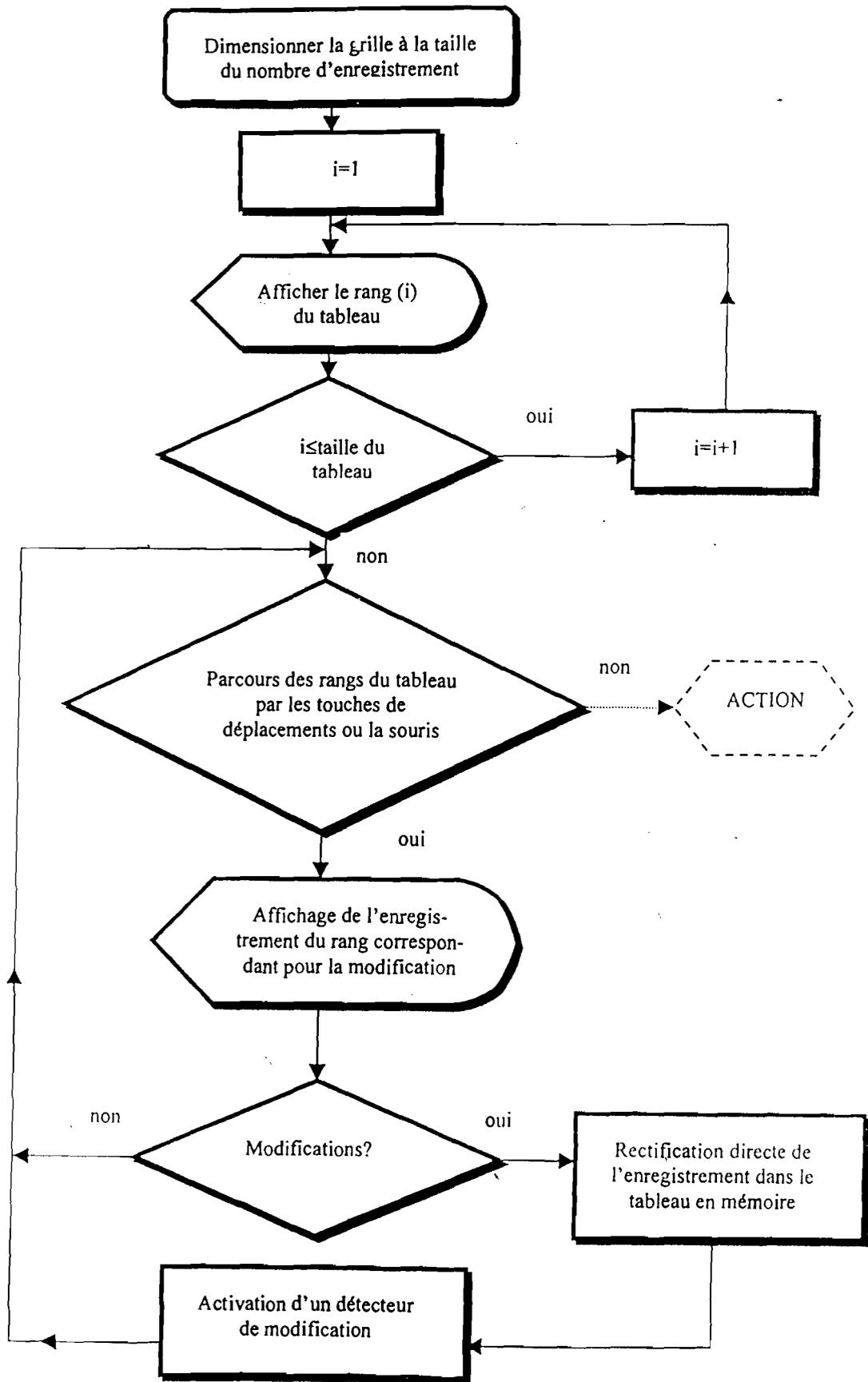


Fig. 3.10 : Détail de Macro d'affichage du module de banque de mesure.

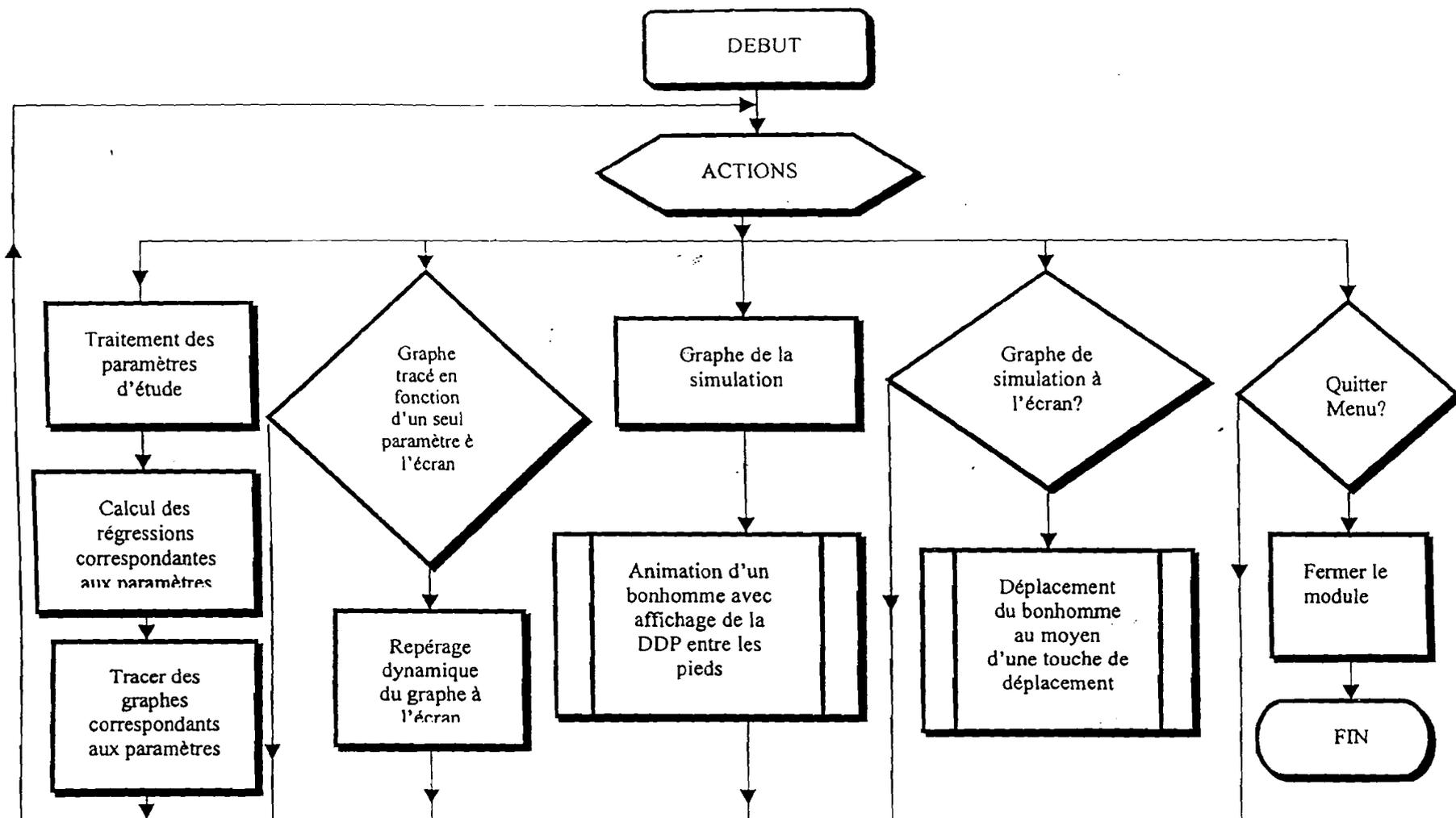


Fig. 3.11 : Organigramme de fonctionnement du module d'analyses graphiques.

### 3.5 - FONCTIONNALITE DU LOGICIEL

#### 3.5.1 - Caractéristiques générales

Le logiciel proposé a les caractéristiques suivantes :

- L'utilisation de GEPTERRE est analogue aux usages conventionnels sous les versions standards de Microsoft Windows : la souris, les touches « ALT », « TAB », « SPACE », « TOUCHES DE DEPLACEMENT », etc. ;
- L'entrée des données est interactive au moyen des contrôles d'acquisition (contrôles textes). Toute donnée d'entrée ne correspondant pas au type attendu est aussitôt refusée quand le contrôle perd le focus (à l'activation d'un autre contrôle) ;
- Au lancement du programme, le répertoire d'installation du logiciel devient celle en cours ;
- Le logiciel dispose de quatre (4) modes d'accès aux projets ; un projet étant l'ensemble des éléments définis par un utilisateur pour ses propres calculs. Ces quatre (4) modes sont :
  - la création d'un nouveau projet ;
  - l'ouverture d'un projet quelconque existant ;
  - l'ouverture d'un projet de la bibliothèque commune ;
  - l'ouverture d'un projet de la bibliothèque commune mais en lecture seulement.

#### 3.5.2 - Première utilisation ou création d'un nouveau projet

Au lancement du programme, l'écran initial apparaît (voir figure 3.12).

Au moyen de la barre principale de menu, la sélection de « **Projet/Nouveau** » (Fig. 3.13) fait apparaître le sous module de configuration des projets (Fig. 3.14).

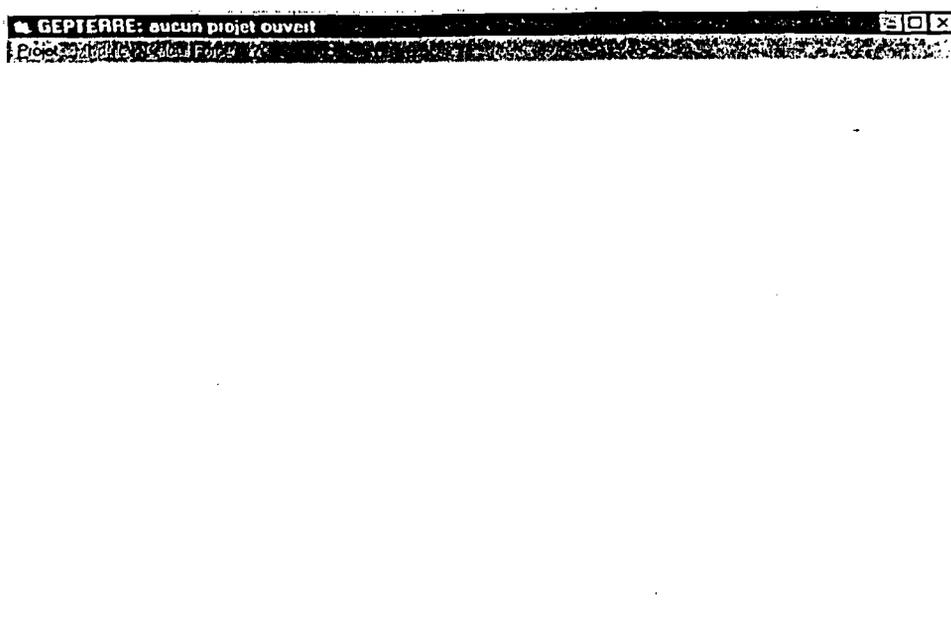


Fig. 3.12 : Ecran initial au démarrage du logiciel.

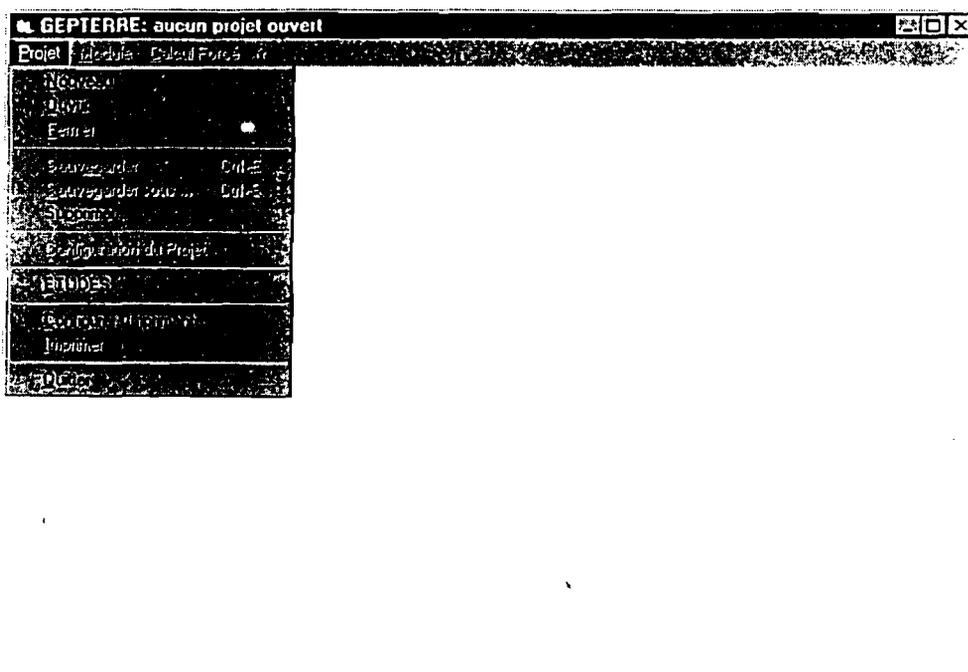


Fig. 3.13 : Menu « Projet » et les options accessibles.

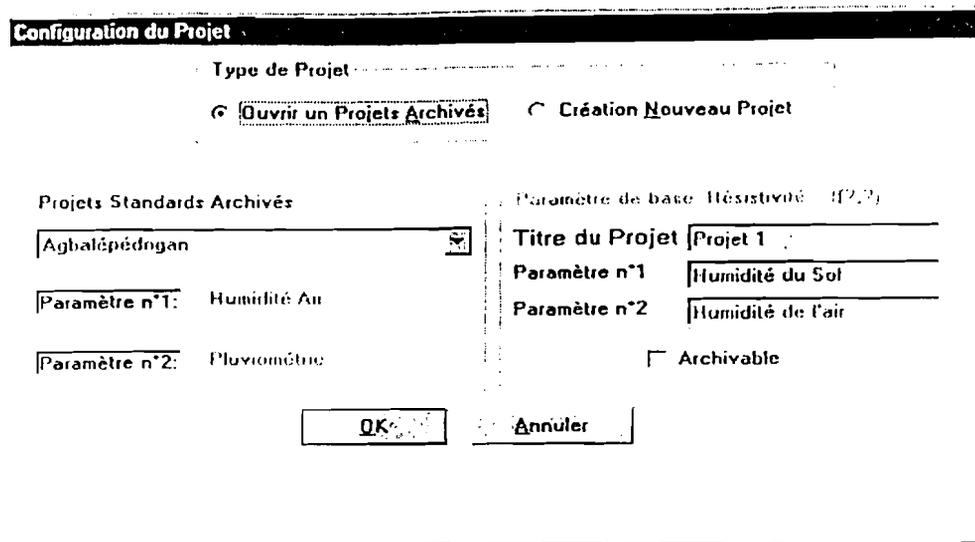


Fig.3.14 : Sous module de configuration des projets ou d'ouverture d'un projet archivé dans la bibliothèque.

La sélection de l'option « **Projet/Nouveau** » active le cadre de définition d'un nouveau projet où le titre et les paramètres (deux (2) au maximum) devront être précisés. Selon le cas, la coche dans la case d'option « **Archivable** » permettra au programme de partager ce projet avec d'autres utilisateurs par sa mise dans la bibliothèque. La configuration terminée, l'appui sur le bouton « **OK** » active directement le module « **Banque de mesure** » (Fig. 3.15).

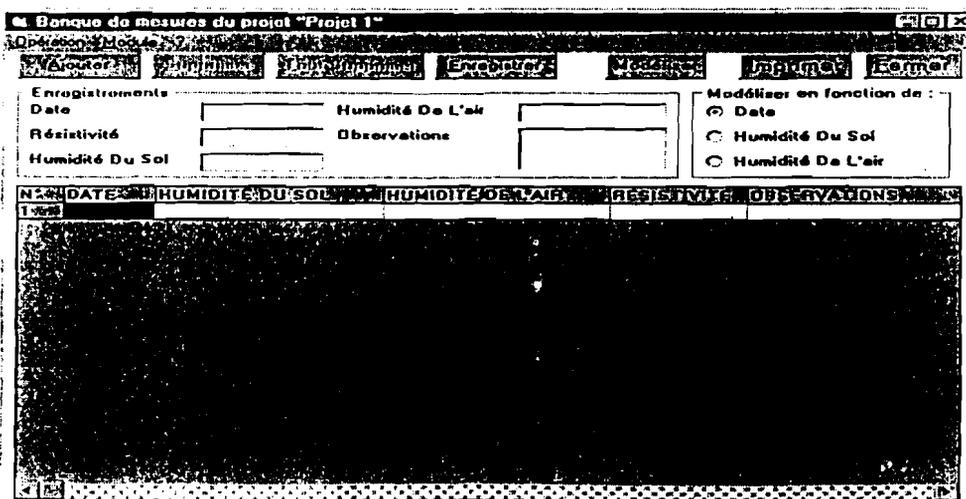


Fig. 3.15 : Menu « Banque de mesures » du projet.

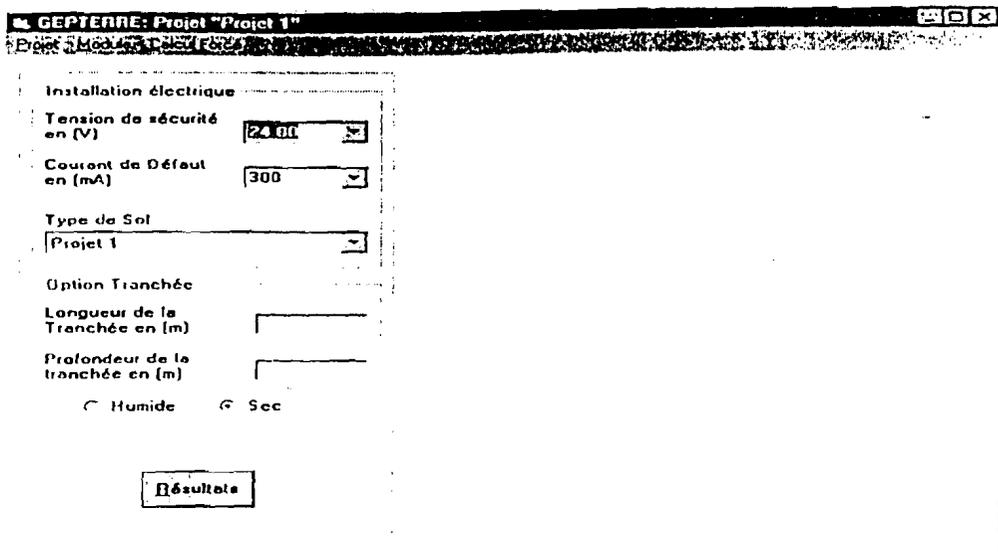


Fig. 3.16 : Ecran du module de calcul de prises de terre.

Une fois l'entrée du recueil de mesures faite, il faut les enregistrer en cliquant sur le bouton « **Enregistrer** ». On choisit ensuite un paramètre à base duquel se fera les études, puis on peut procéder à la modélisation en cliquant sur le bouton « **Modéliser** ». On peut sortir du module au moyen du bouton « **Fermer** » ou de l'option « **Opérations/Quitter** » du menu. La fermeture du module de la banque de mesures provoque automatiquement l'activation du module de calcul de prises c'est à dire que l'option « **Calcul de Prise** » du menu est activé (voir figure 3.16).

L'interface est rendue ainsi disponible à l'acquisition des autres paramètres nécessaires au calcul, sachant que la résistivité est directement déduite du recueil de mesures qui vient d'être saisie.

### 3.5.3 - Ouverture d'un projet quelconque existant

Au moyen de l'option du menu principal « **Projet/Ouvrir** », une boîte de dialogue est affichée (Fig. 3.17) avec la liste des fichiers de projets existants.

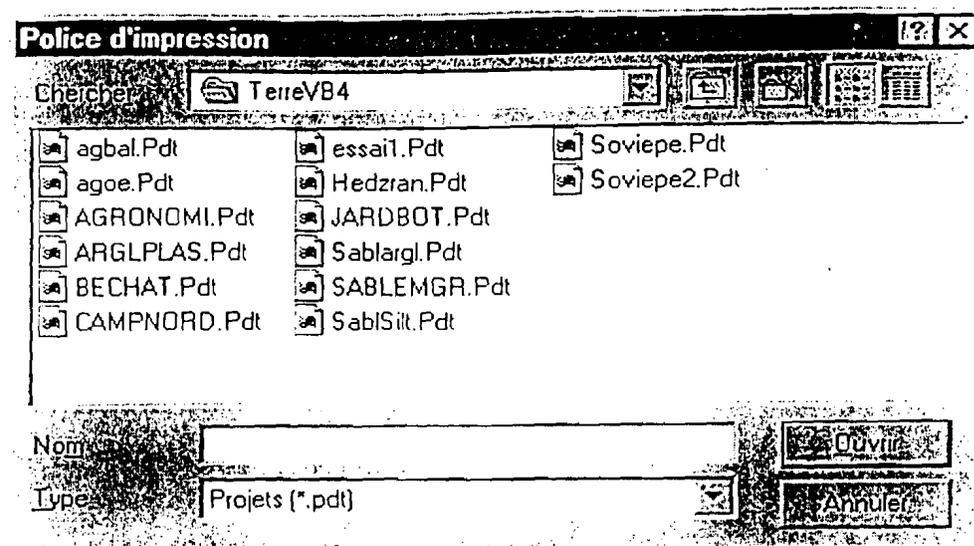


Fig. 3.17 : Boîte de dialogue affichant la liste des fichiers des projets existants.

Le choix du fichier fait que, le module de calcul, l'option « Calcul de Prise », est activé avec l'affichage ou la mise en mémoire des données de calculs précédemment enregistrées (voir figure 3.16). On a à cet effet :

- en affichage : la tension de sécurité, le courant de défaut, les encombrements disponibles du site ;
- en mémoire : la configuration du projet, l'équation modèle de la banque de mesures de résistivité, les vecteurs résistivité et paramètre d'étude, et les valeurs statistiques sur ce modèle.

### 3.5.4 - Ouverture des projets de la bibliothèque uniquement

Cette action est faisable grâce au sous module « Configuration de Projet » en sélectionnant l'option « Ouvrir un projet Archivé » (option par défaut). Dans ce cas, le sous module est activé au moyen de l'option « Projet/Nouveau » de la barre du menu (Fig. 7.18). La validation du sous module entraîne l'ouverture du projet archivé qui est sélectionné. Il faut noter qu'à la sélection d'un projet dans la liste des fichiers de projet, ses paramètres de base sont aussitôt affichés.

### 3.5.5 - Ouverture des projets de la bibliothèque en lecture seulement

Au moyen de l'option « **Projet/Etude** » du menu (Fig. 3.18), le module de calcul de prise est chargé avec tous les projets archivés (dans la bibliothèque) se trouvant dans la liste déroulante « **Type de sol** » (Fig. 3.19).



Fig. 3.18 : Ecran de l'option « **Projet/ETUDE** ».

### 3.5.6 - Fonctionnalité du module « Calcul d'une prise » de terre

#### a) - Modification de la configuration d'un projet

Une fois un projet affiché, il est possible de modifier sa configuration au moyen du menu « **Projet/Configuration du projet** »; cette action appelle le sous module « **Configuration de projet** » qui n'offre en ce temps que la possibilité de modifier les paramètres du projet en cours (Fig. 3.19).

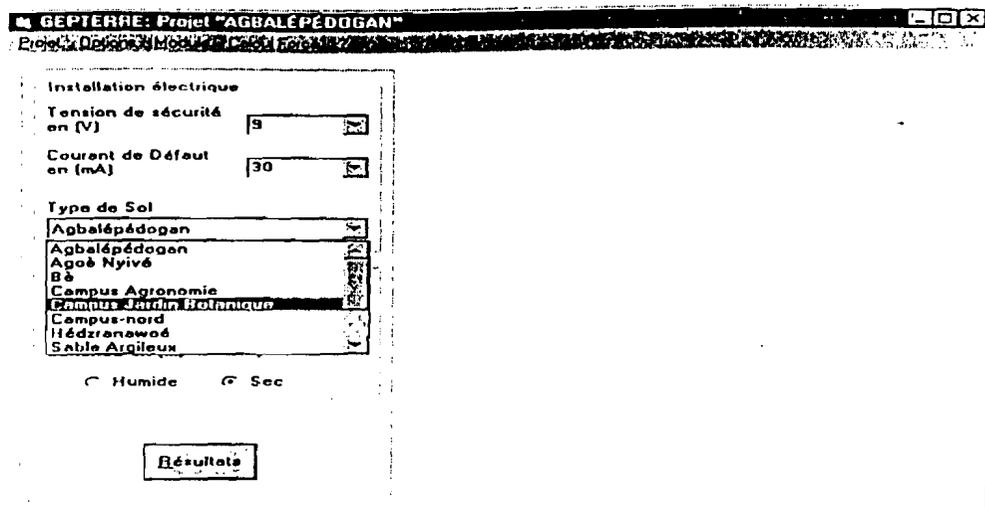


Fig. 3.19 : Boîte de liste déroulante des projets archivés.

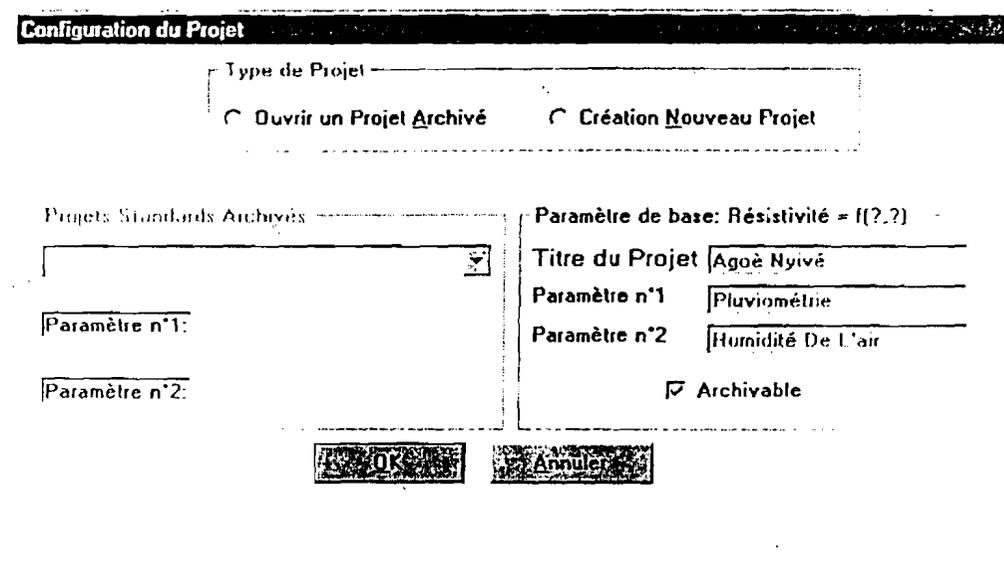


Fig. 3.20 : Ecran de gestion du sous module de configuration de projet.

b) - Calcul d'une prise de terre

Après l'entrée des données de calcul, l'appui du bouton « Résultat » entraîne la recherche de la meilleure prise pour les trois (3) formes : piquet, câble ou ceinture et boucle.

**GEPIERRE: Projet "SILTS ARGILES PEU PLASTIQUES"**

Installation électrique

Tension de sécurité en (V)

Courant de Défaut en (mA)

Type de Sol

Option Tranchée

Longueur de la Tranchée en (m)

Profondeur de la tranchée en (m)

Humide  Sec

**TABLEAU DES RESULTATS**

	Longueur mini (m)	Section mini (mm²)	Profondeur mini (m)
PIQUET	1.4	706.86	1.07
CEINTURAGE	1	6	1
BOUCLE	3.14	6	1

**Conseils**

- La Ceinture sera réalisée avec 2 conducteurs parallèles. Noter que l'écartement des 2 conducteurs est D = 20 cm.
- La Boucle est un Anneau de diamètre 1 m et dont la circonférence est affichée dans le tableau sous la rubrique Longueur.

Paramètre d'étude : "Date (Saisons)"

**Résultats**

Fig. 3.21 : Ecran des résultats de calcul de prises de terre.

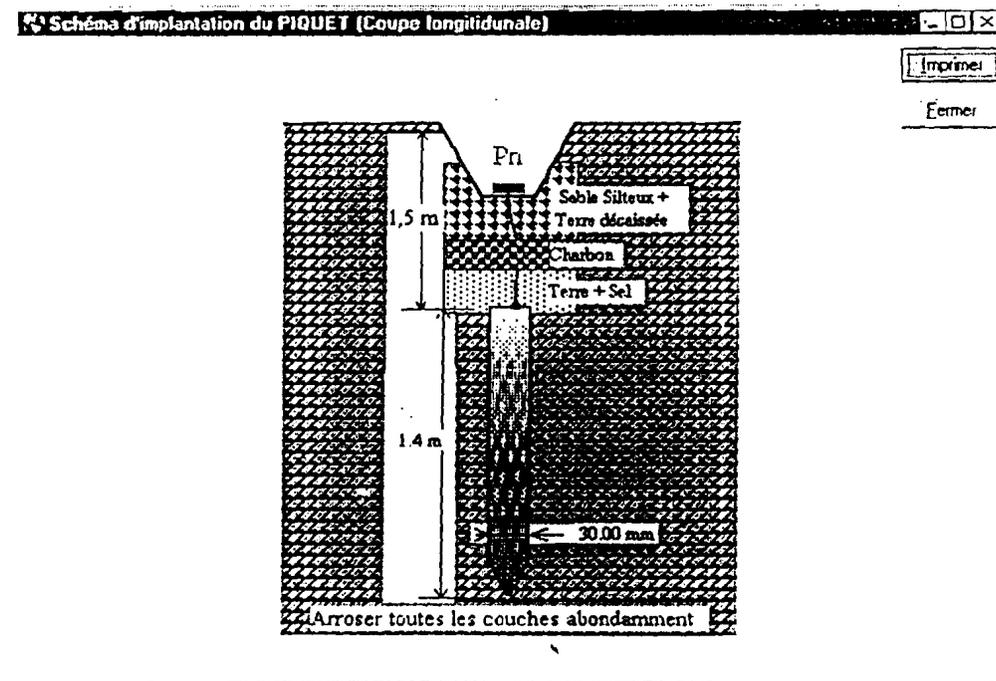


Fig. 3.22 : Affichage de schéma d'implantation d'une prise en forme de piquet.

Les dimensions sont affichées dans une grille et des recommandations sont affichées en dessous (Fig. 3.21).

Une fois présent l'écran des résultats, on peut avoir accès aux schémas d'implantation de prises de terre. Pour avoir accès à ces schémas détaillés des prises calculées (piquet, ceinturation ou boucle), il faut cliquer deux (2) fois dans la case correspondante à la prise calculée choisie (PIQUET, CEINTURAGE, BOUCLE) dans le tableau des résultats de la figure 3.21.

A cet effet, deux (2) cliques dans la case :

- « PIQUET » : affiche (imprime) le schéma d'implantation du piquet calculé (voir figure 3.22) ;
- « CEINTURAGE » : affiche (imprime) le schéma d'implantation du ceinturation calculé (voir figure 3.23) ;
- « BOUCLE » : affiche (imprime) le schéma d'implantation de la boucle calculée (voir figure 3.24) ;

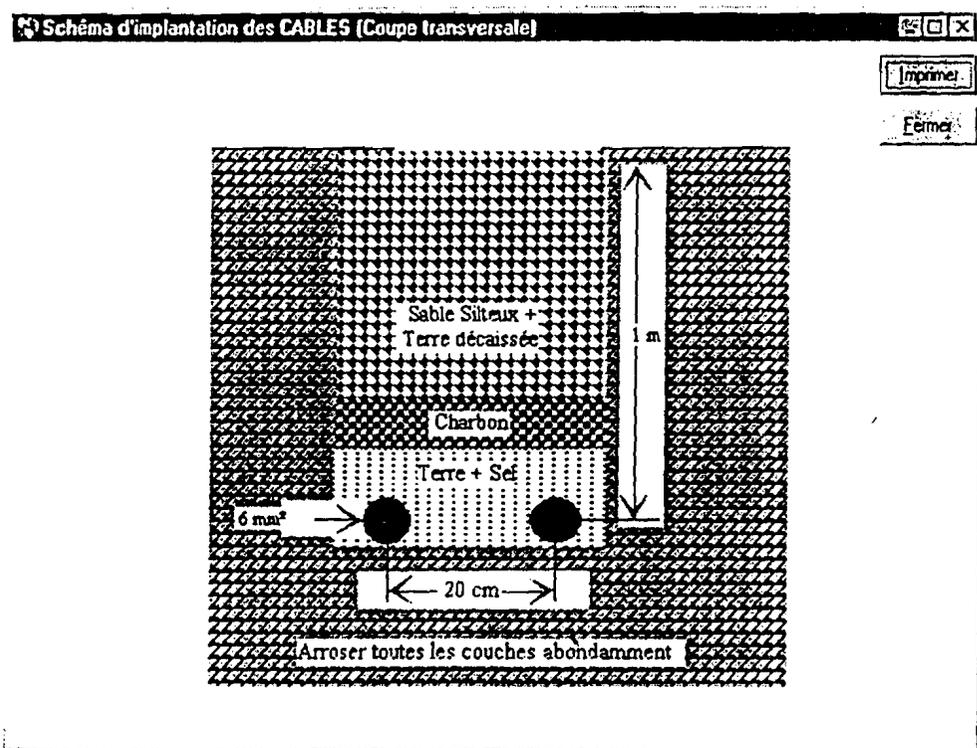


Fig. 3.23 : Affichage de schéma d'implantation d'une prise en forme de ceinturation.

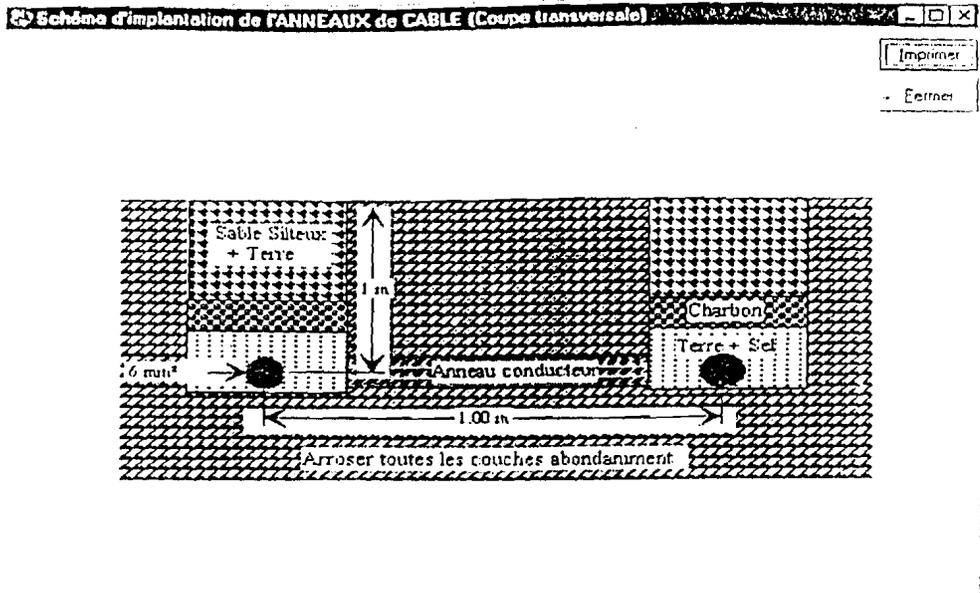


Fig. 3.24 : Affichage de schéma d'implantation d'une prise en forme de boucle.

**BEPTERRE: Projet "SILTS ARGILES PEU PLASTIQUES"**

Projet Module **Calcul Forcé 2**

Installation:  Piquets  
 Ceinture  
 Boucle

Tension de an (V): [ ]

Courant de Défaut en (mA): [300]

Type de Sol: [Silt Argiles Peu Plastiques]

Option Tranchée

Longueur de la Tranchée en (m): [70]

Profondeur de la tranchée en (m): [1]

Humide  Sec

**TABLEAU DES RESULTATS**

	Longueur (m)	Section mini (mm <sup>2</sup> )	Profondeur mini (m)
PIQUETS	0	0	0
CEINTURAGE	17	6	1
BOUCLE	26.7	6	1

**Conseils**

- La CEINTURE sera réalisée avec 2 CONDUCTEURS PARALLELES. Noter que l'ECARTEMENT DES 2 CONDUCTEURS est 0-20 cm.
- La BOUCLE est un ANNEAU de DIAMETRE 8.5m et dont la CIRCONFERENCE est affichée dans le tableau sous la rubrique LONGUEUR.

**Résultats**

Fig. 3.25 : Ecran de calcul d'autres formes de prises, excepté la forme en piquet.

c) - Limitation du calcul de la prise à un type : cas de «n-Piquets» exclusivement

On pourrait ne calculer la prise que pour une forme unique seulement. Cela peut être le cas, quand l'utilisateur n'a qu'une forme figée à réaliser. En exemple, chercher la mise en parallèle des piquets bien que d'autres formes puissent satisfaire à la condition, (Fig. 3.25).

Les résultats obtenus sont affichés comme à la figure 3.26. Le schéma d'implantation de piquets en parallèle est illustré par la figure 3.27.

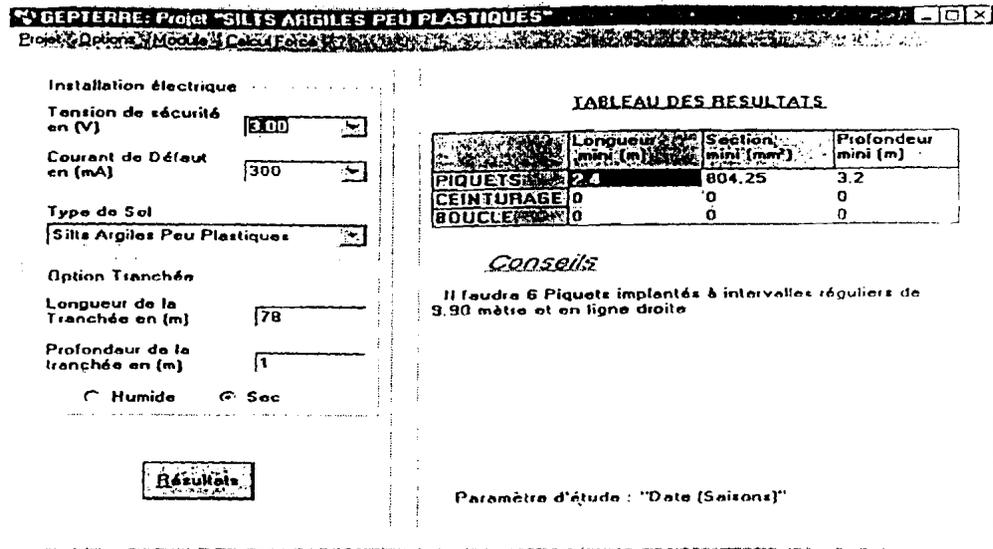


Fig. 3.26 : Ecran de calcul de n-piquets en parallèle imposés.

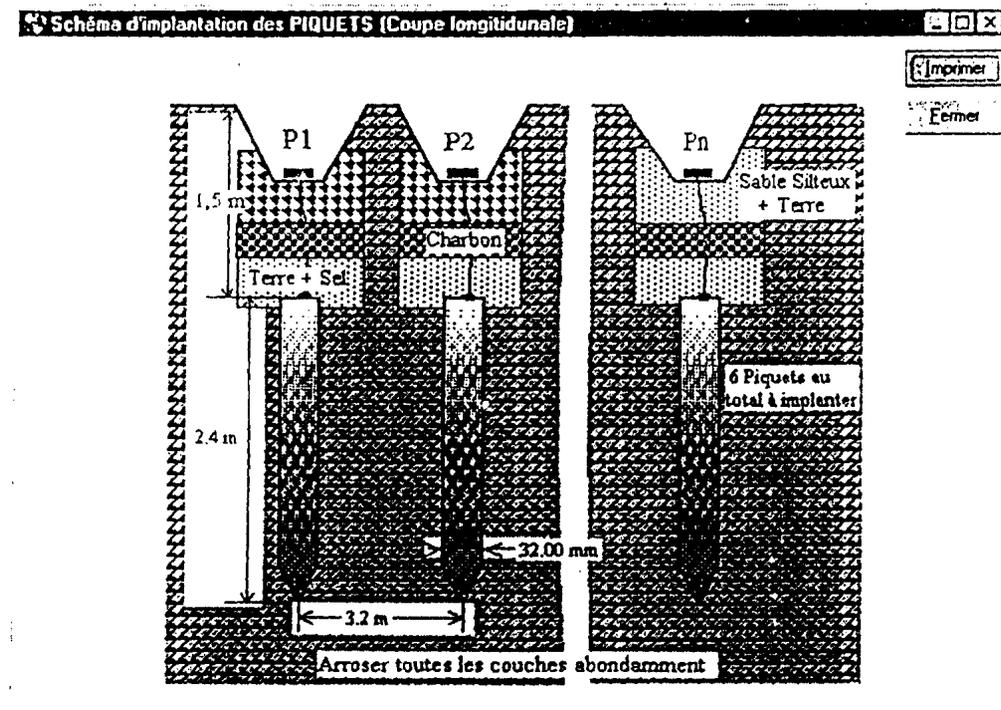


Fig. 3.27 : Affichage de schéma d'implantation d'une prise de n-piquets parallèle.

### 3.5.7 - Fonctionnalité du module « Banque de Mesures »

Ce module traite tous les problèmes de gestion de la base de données associée au projet : actualisation, modification, annulation, tri, impression, etc..

Il devient actif après avoir cliqué sur l'option « Module/Banque de mesures » menu disponible sur les deux (2) autres modules ou automatiquement à la création d'un nouveau projet. Le programme ouvre la base de données, charge les enregistrements en mémoire, les affiche dans une grille et définit le premier (1<sup>er</sup>) enregistrement comme en cours à la figure 3.28.

N°	DATE	HUMIDITÉ DU SOL	HUMIDITÉ DE L'AIR	RÉSISTIVITÉ	OBSERVATIONS
17	14/05/96	0	62	95.5044	
27	29/05/96	0	67	90.478	Pluie le 13/05/96: so:
32	11/06/96	0	68	85.954	Fine pluie le 27/05/9
41	25/06/96	0	0	71.68	
52	03/07/96	0	73	66.35	
61	23/07/96	0	76	21.614	
71	06/08/96	0	75	106.06	
81	23/08/96	0	81	112.595	
91	06/09/96	0	69	97.515	
101	17/09/96	0	81	130.69	
111	01/10/96	0	73	133.204	
121	14/10/96	0	71	136.219	
131	28/10/96	11.04	66	113.6	
141	13/11/96	11.33	61	103.547	
151	09/12/96	12.75	63	95.504	
161	20/01/97	13.78	71	87.965	
171	04/02/97	13.56	50	88.467	

Fig. 3.28 : Ecran d'affichage de la banque de mesure avec les opérations disponibles.

Avec le choix de l'option « Opération » de la barre de menu, les opérations suivantes sont faisables :

- l'annulation d'une opération de mise à jour ;
- le tri de la base de données suivant le champ voulu ;
- la configuration de l'imprimante et l'impression. Noter la boîte de configuration de l'imprimante est automatiquement suivie de celle de la configuration des polices d'impression. Cette option est aussi disponible dans le module « Calcul de Prise » ;

- la sortie ou fermeture du module. Elle est contrôlée par des fonctions de signalement modifications non enregistrées et/ou non modélisées (voir la figure 3.29).

Une principale fonction de ce module est l'affichage dans les contrôles d'acquisition cadre « Enregistrement » de l'enregistrement en cours dans la grille. Cela permet modifications, qui sont portées au fur et à mesure sur la grille et en mémoire.

Il faut noter que toutes les modifications sont faites en mémoire ; elles ne le seront dans le fichier qu'après l'exécution de la commande « Enregistrer ».

N°	DATE	HUMIDITE DU SOL	HUMIDITE DE L'AIR	RESISTIVITE	OBSERVATIONS
1	14/05/96	0	62	95.5044	
2	29/05/96	0	67	90.478	Pluie le 13/05/96: so
3	11/06/96	0	68	85.954	Fine pluie le 27/05/9
4	25/06/96	0	0	71.88	
5	09/07/96	0	73	66.35	
6	23/07/96	0	76	21.614	
7	06/08/96	0	75	106.06	
8	23/08/96	0	81	112.595	
9	06/09/96	0	69	97.515	
10	17/09/96	0	81	130.69	
11	01/10/96	0	73	133.204	
12	14/10/96	0	71	136.219	
13	28/10/96	11.04	66	113.6	
14	13/11/96	11.33	61	103.547	
15	09/12/96	12.75	63	95.504	
16	20/01/97	13.78	71	87.965	
17	04/02/97	13.56	50	88.467	

Fig. 3.29 : Ecran d'affichage de l'option « Opération » du module de banque de mesures.

### 3.5.8 - Fonctionnalité du module « Analyses graphiques »

Ce module est bien important et intéressant pour les courbes d'évaluations diverses qui permet de tracer. Ces courbes servent d'une part, à présumer les variations des résultats de calculs effectués principalement au cours de l'année ou en fonction des paramètres de base définis pour le projet et d'autre part à estimer l'importance des risques d'électrification aux environs immédiats de l'œuvre (prise) une fois implantée.

a) - Analyse de l'évolution de la résistance d'une prise ou de la résistivité du site étudié

Une prise de terre vient d'être calculée dans le module « Calcul de Prise ». On voudrait bien présumer l'évolution de la résistance de cette prise en fonction des variations des paramètres de base définis au projet : saisons (date), pluviométrie, hygrométrie, humidité du sol, etc..

Avec l'option « Courbe/Résistance de Prise/Type de prise » de la barre du menu, le programme lit la combinaison des paramètres faite dans le cadre de configuration, les prend en compte un à un, recalcule le modèle de régression de la résistivité du sol pour le paramètre considéré et trace la courbe de la résistance effective de la prise (Fig. 3.30).

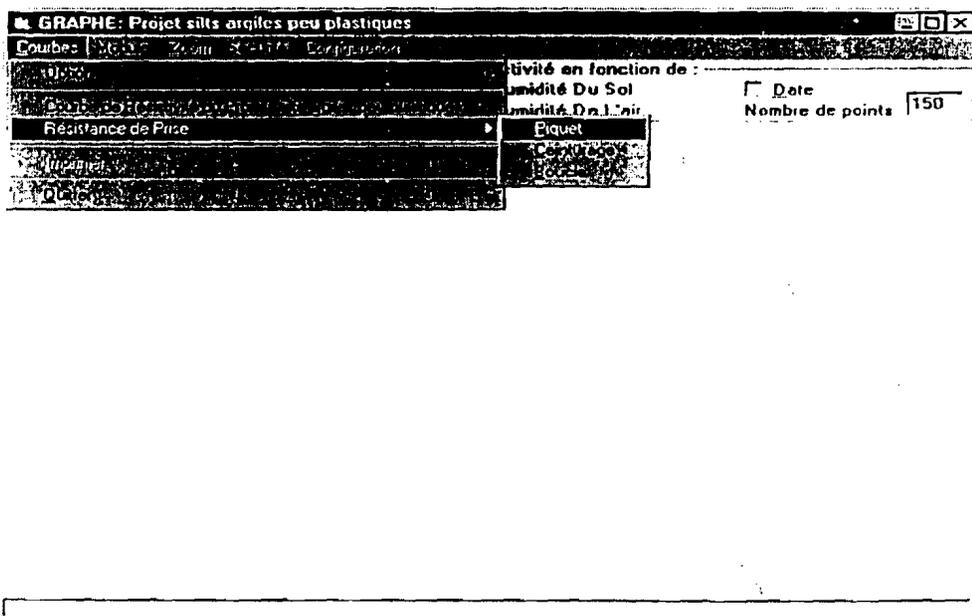


Fig. 3.30 : Options d'opérations disponibles dans le module graphique.

La figure 3.31 montre un exemple de courbe de variation de la résistance d'une prise en piquet en fonction des paramètres du projet.

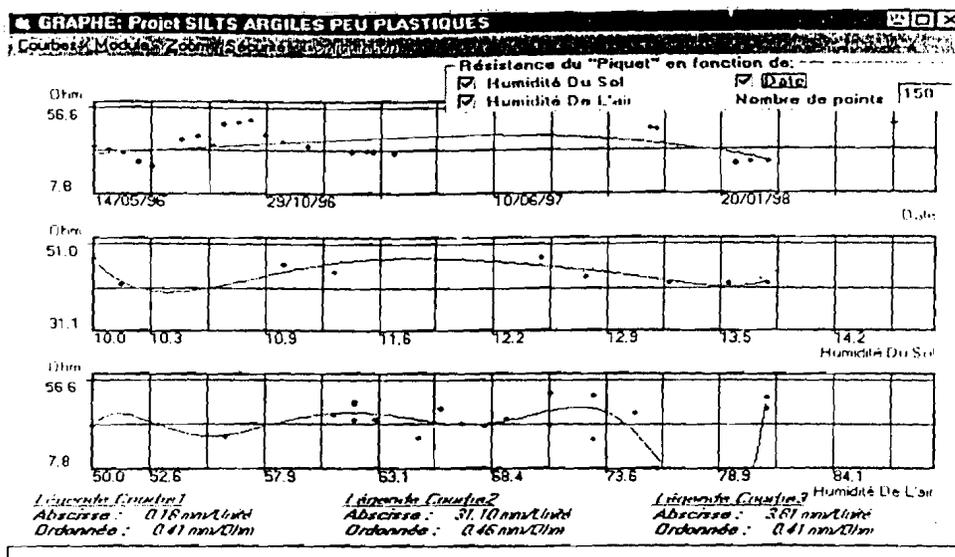


Fig. 3.31 : Exemple de courbes de variation (courbes 'modèle') de la résistance d'une prise respectivement en fonction de la date (saison), de l'humidité de l'air et du sol.

Un écran semblable serait obtenu si on avait plutôt sélectionné le menu « Courbe. Résistivité du projet X » sauf qu'en ordonnées, il aurait les valeurs de résistivité en « Ohm.m ». Le module dispose d'une fonction qui permet de repérer d'une manière dynamique (repère mobile) la courbe tracée dans le cas de la configuration à un seul paramètre. Les coordonnées sont affichées directement en bas de la feuille (Fig. 3.32).

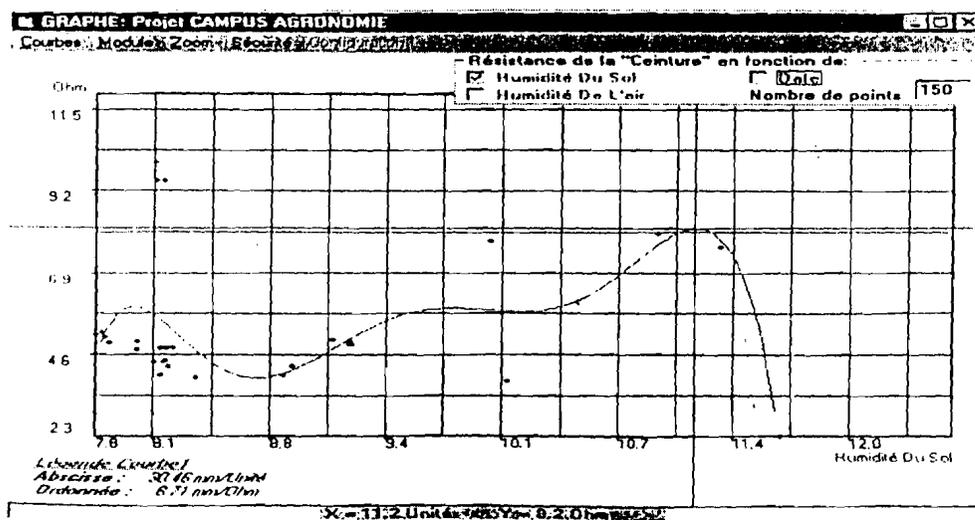


Fig. 3.32 : Repère dynamique de la courbe tracée.

b) - Etude des risques par simulation

Le module dispose d'une fonction qui permet de simuler la marche d'un individu dans les environs immédiats de la prise. Cette fonction est évoquée par l'option « Sécurité de prise » de la barre du menu, (Fig. 3.33). Les figures 3.34, 3.35 et 3.36 illustrent des exemples de simulation aux alentours d'un piquet, d'un ceinturage et d'une boucle.

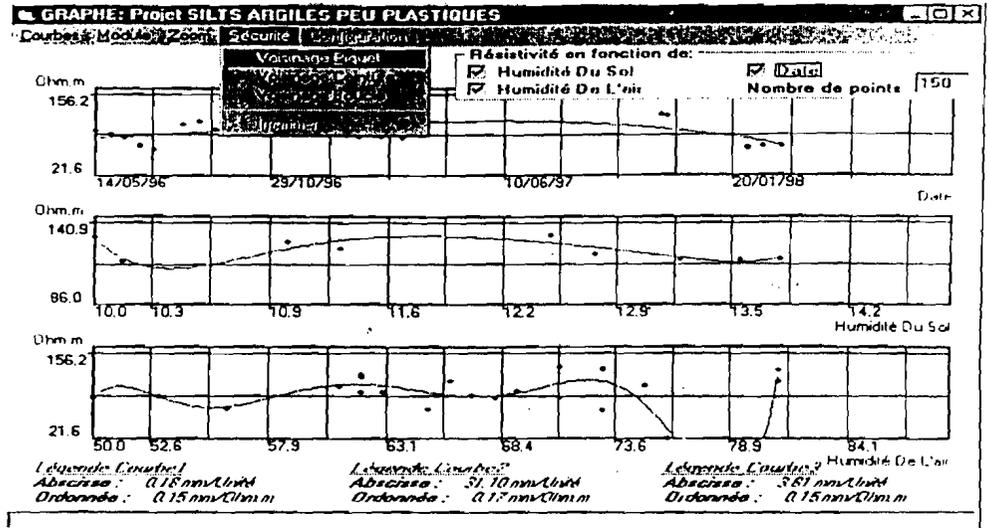


Fig. 3.33 : Les sous options de l'option 'Sécurité' du menu principal du module graphique.

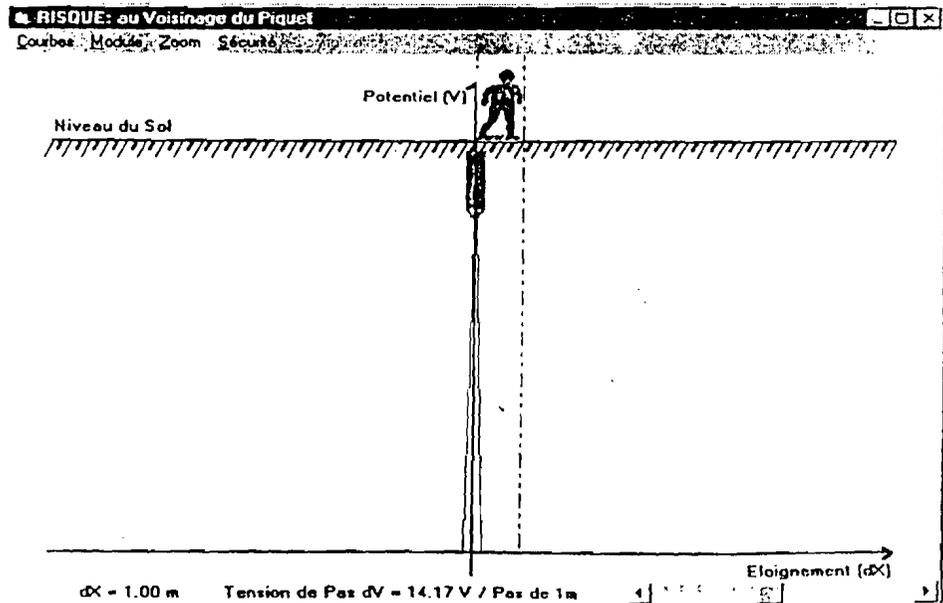


Fig. 3.34 : Gradient de potentiel aux alentours d'une prise en forme de piquet.

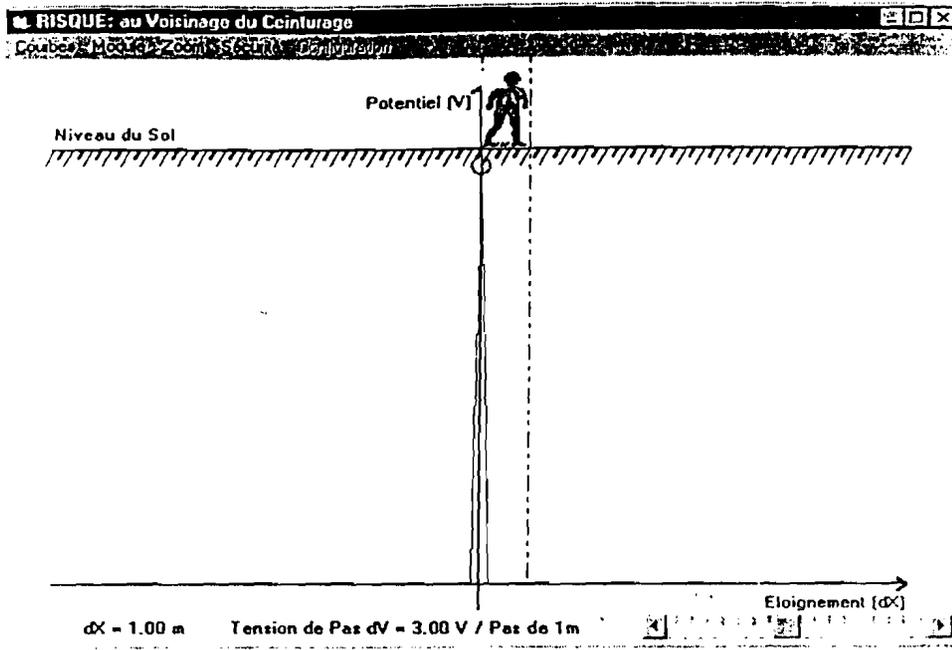


Fig. 3.35 : Gradient de potentiel aux alentours d'une prise en forme de ceinturage.

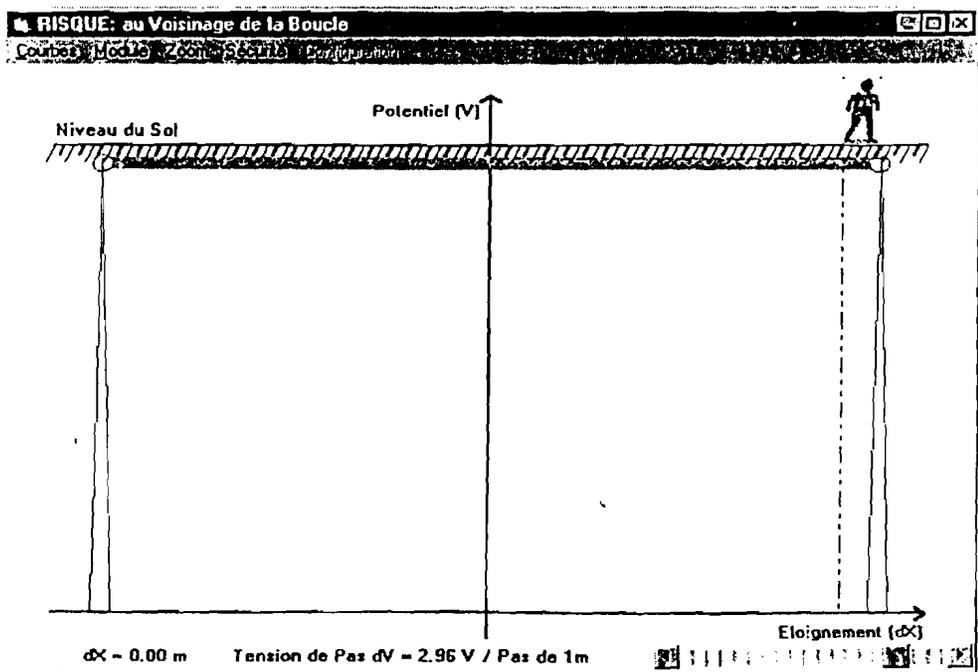


Fig. 3.36 : Gradient de potentiel aux alentours d'une prise en forme de boucle.

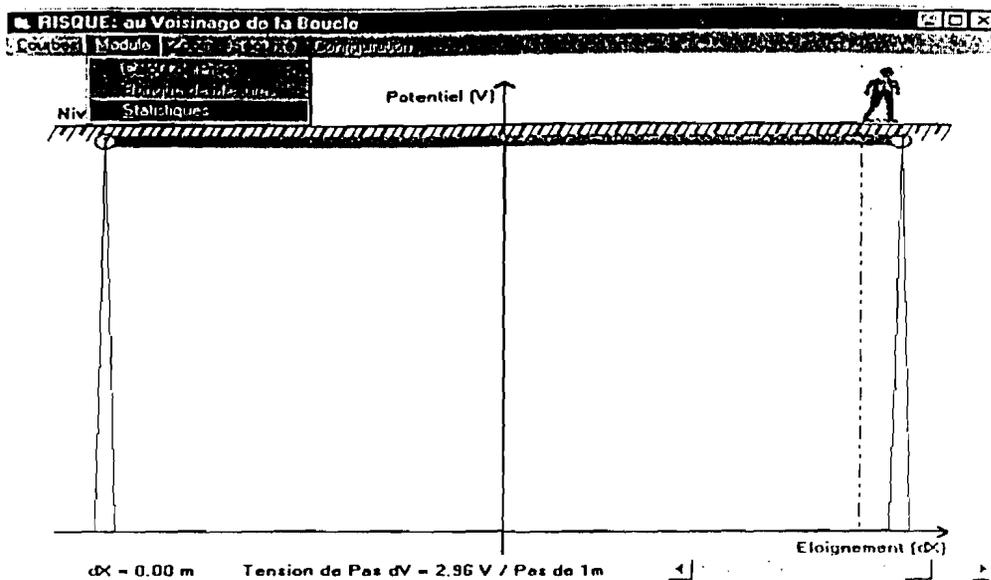


Fig. 3.37 : Sous option 'Statistique du sous module 'Risque'.

c) - Le sous module « Statistiques »

Accessible par l'option « Module/Statistique » de la barre du menu (Fig. 3.37). Ce sous module n'a pour fonction que d'afficher des valeurs d'évaluation statistique sur modèle de régression en cours (voir la figure 3.38).

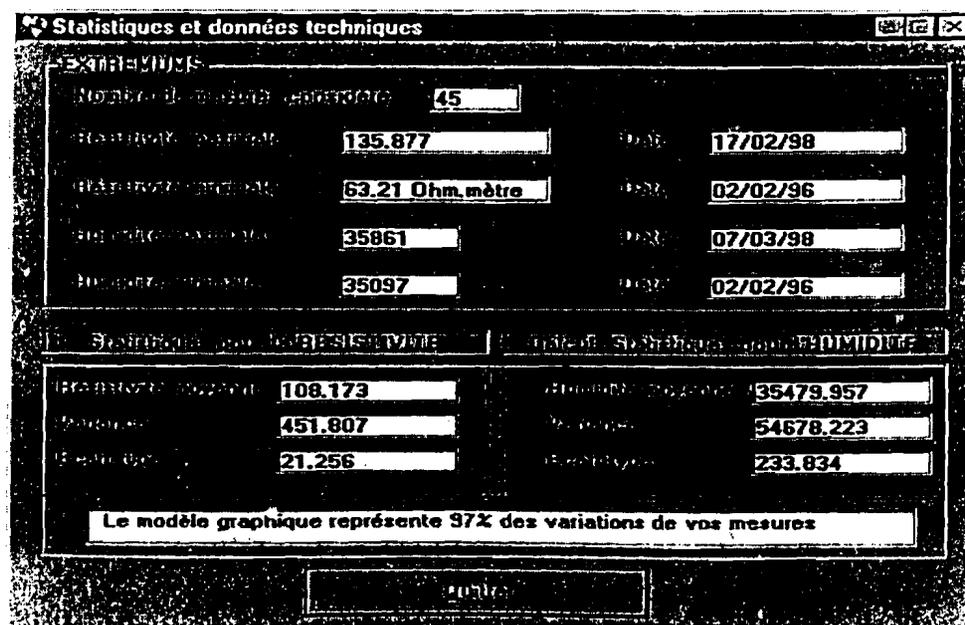


Fig. 3.38 : Evaluation statistique du modèle de régression.

### 3.6 - CONCLUSION

Nous avons montré dans ce chapitre l'aspect informatique relatif au processus de calcul des prises de terre. Le logiciel réalisé est à sa première version, et peut être à l'avenir intégré aux systèmes intelligents (Réseaux neurones, Systèmes Experts etc.) de Conception en Electricité.

Nous pensons que ce logiciel peut être un instrument adéquat pour des systèmes d'étude en matière de conception des systèmes de prises de terre.

Ce logiciel amènera les techniciens du domaine (les concepteurs-projeteurs et réalisateurs des systèmes de prise de terre) à adopter les mêmes critères universels d'évaluation de réalisation et d'expertise des prises de terre. Enfin il permet d'archiver des modèles de sol et d'étendre ces modèles dans d'autres zones géographiques selon les besoins.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude d'un cas, la validation et le prototypage.

## Liste des symboles

- $R_a$  : Résistance admise  
 $V_s$  : tension de sécurité  
 $I_d$  : Courant de défaut  
 $R$  : Résistance de la prise de terre  
 $\rho$  : Résistivité du sol  
 $r$  : Rayon du piquet  
 $L$  : Longueur du piquet  
 $e$  : Profondeur d'enfouissement  
 $D$  : Diamètre de la boucle

## CHAPITRE 4

# ETUDE DE CAS : ANALYSE GEOTECHNIQUE DES SOLS DE LOME ET SES ENVIRONS VALIDATION ET PROTOTYPAGE

## 4.1 - INTRODUCTION

Le sol est un matériau discontinu à l'échelle microscopique mais le nombre de ses constituants est tel que le concept de continuité peut le plus souvent être conservé. A la structure granulaire du sol est associée une porosité qui correspond au volume libre entre les grains et qui détermine la teneur en eau maximale que ledit sol peut avoir. L'état d'un sol dont dépend la conductivité est fonction de sa teneur en eau.

Ce chapitre sera consacré à l'identification des sols de Lomé et ses environs.

## 4.2 - IDENTIFICATION DES SOLS

Le problème de l'identification des sols consiste à caractériser les matériaux d'une façon suffisamment nette pour qu'on puisse comparer des matériaux différents sur lesquels des constructions analogues ont été placées ou encore pour comparer les états différents d'un même matériau. En dehors de l'identification immédiate (couleur, odeur, état), il existe une série d'essais de laboratoire qui permet d'y parvenir avec précision [49].

### ➤ Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique d'un sol se fait par tamisage pour les grains supérieurs à 80  $\mu$  et par sédimentation dans un liquide, en utilisant la loi de Stokes et en supposant les particules sphériques, pour les grains les plus fins.

### ➤ Teneur en eau naturelle - Matières organiques

La teneur en eau naturelle  $w$  % est le rapport de l'eau comprise dans le sol (définie conventionnellement par la perte en poids après un passage de 24 heures dans une étuve à 106°) au poids des éléments solides du sol. Dans certains cas, la perte de poids à l'étuve peut provenir

de la déshydratation de certains cristaux, notamment le gypse ou de la destruction de matière organiques. Si ces éventualités peuvent se produire on vérifie par analyse chimique s'il existe des cristaux hydratés instables et on se débarrasse indépendamment des matières organiques, par exemple en les détruisant par de l'eau oxygénée et en mesurant la perte en poids correspondante.

La teneur en eau des sols est très variable. A titre d'exemple pour les argiles on trouve normalement des teneurs en eau de 30 à 60 %. Des argiles très raides, fortement consolidées peuvent avoir  $w = 10\%$  et des argiles molles très colloïdales  $w = 200\%$ . Pour les sables les valeurs extrêmes sont généralement plus serrées, de 15 % à 35 % ; par contre, ils sont parfois non saturés.

### ➤ Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau conventionnelles qui fixent un état du sol. On les mesure sur la fraction des terres passant au tamis de 0,5 mm. Par définition, la limite de liquidité ( $w_L\%$ ) est la teneur en eau au-dessus de laquelle le sol se comporte comme un semi-liquide et s'écoule sous son propre poids. La limite de plasticité ( $w_P\%$ ) est la teneur en eau au-dessous de laquelle le sol perd sa plasticité et devient friable.

### ➤ Classification des sols de Lomé et ses environs

Dans le contexte de nos travaux, nous avons étudié les sols de Lomé et ses environs comme le confirme le tableau 4.1.

En effet, ce tableau regroupe les différentes zones étudiées, la teneur en eau et la nature des différents sols.

L'intérêt que confère cette étude réside dans le fait qu'elle nous permet d'opérer le choix des sites pour la suite de nos travaux.

Ainsi donc, on observe deux types de sols sur le campus universitaire : sable argileux et silts argiles peu plastique.

N°	Lieu de prélèvement	Teneur en Eau %		Nature du Sol
		0.5 m	1.5 m	
1	- Campus Agronomie	6,74	9,64	Sables argileux
2	- Campus Nord	5,85	8,36	Silts argiles peu plastiques
3	- Campus DAAS	7,09	7,45	Silts argiles peu plastiques
4	- Campus Secrétariat de Direction	4,68	6,90	Silts argiles peu plastiques
5	- Campus Cité B	6,79	7,00	Silts argiles peu plastiques
6	- Campus Jardin Botanique	5,33	6,92	Sables argileux
7	- Agbalepedogan	6,64	8,77	Sables argileux
8	- Agoenyive	9,79	10,20	Sables argileux
9	- Hedzranawoe	6,52	8,43	Sables argileux
10	- Ahanoukope	9,79	15,20	Sables mal gradués
11	- Bè	2,14	12,56	Sables mal gradués
12	- Soviépe	6,94	9,99	Sable Silteux

Tableau 4.1 : Types de sols et teneur en eau des douze (12) sites de Lomé et ses environs

Agoenyive et Agbalepedogan, quartiers situés au Nord de Lomé ont la même structure : sable argileux ;

Ahanoukope et Bè, quartiers situés au centre et au sud de Lomé ont la même structure : sable mal gradué ;

Enfin Soviépe, quartier sud ouest de Lomé est constitué de sable silteux.

Les couches granulo-sédimentométriques des sols étudiés constituent le fondement de classifications de sols des douze (12) sites de la ville de Lomé et ses environs. Les figures 4.1 et 4.12 illustrent respectivement leur allure selon la classification du tableau 4.1.

PRELEVE LE: 12 -02-97 PAR: ENSI/LGC  
 ESSAI DU: 14-02-97 PAR: ENSI/LGC  
 MODE DU TRAVAIL: TAMISAGE HUMIDE

COURBE GRANULO-SEDIMENTOMETRIQUE  
 (SOL)

LIEU DE PRELEVEMENT: Campus Agronomie  
 STAT:  
 PROFONDEUR DE PRELEVEMENT: 0.50 m  
 MODE DE PRELEVEMENT: ECH. REMANIE

PROJET LGC  
 E.M.S.I. (UNIVERSITE DU BENIN)  
 LOME - TOGO

CHANTIER:

A:  
 NUMERO:

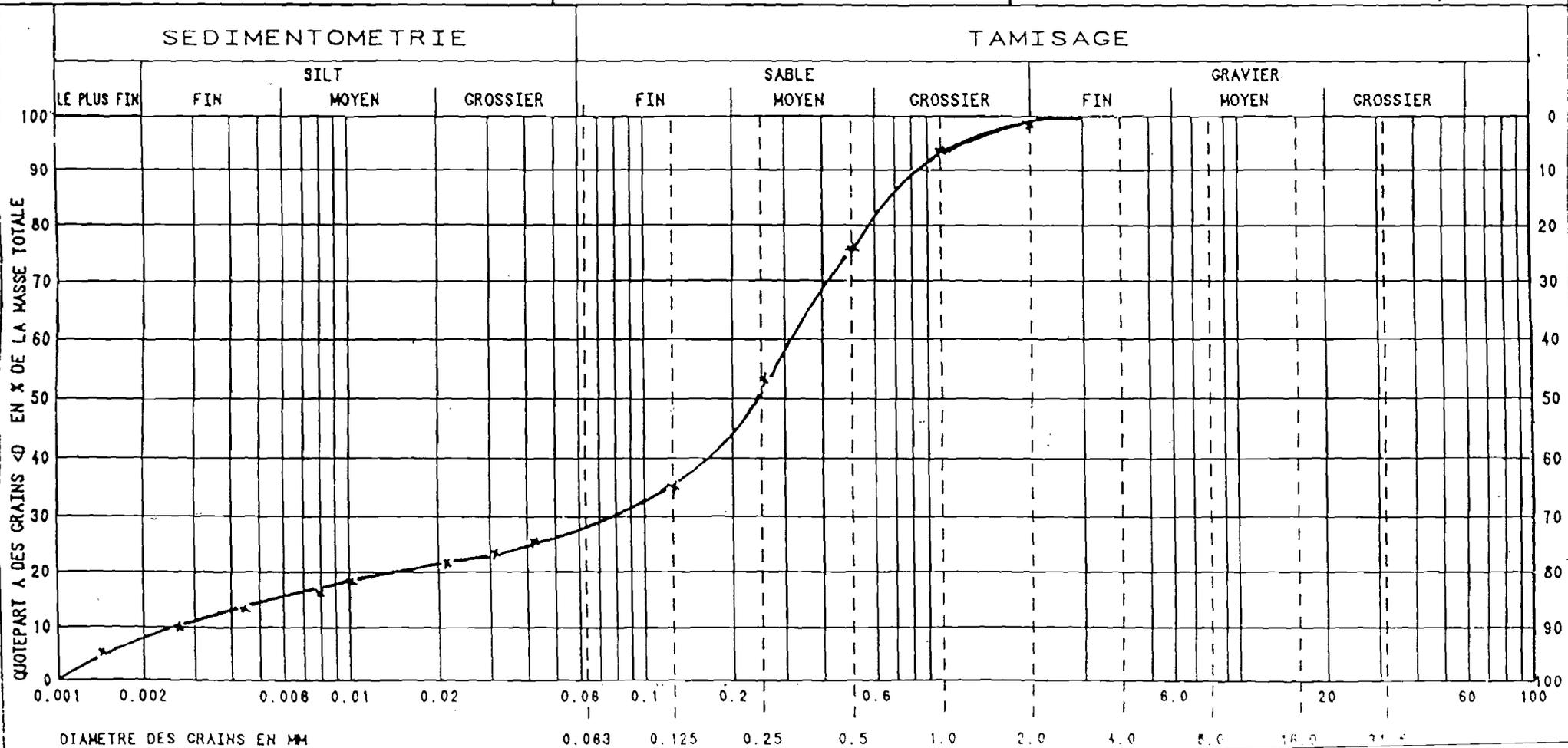
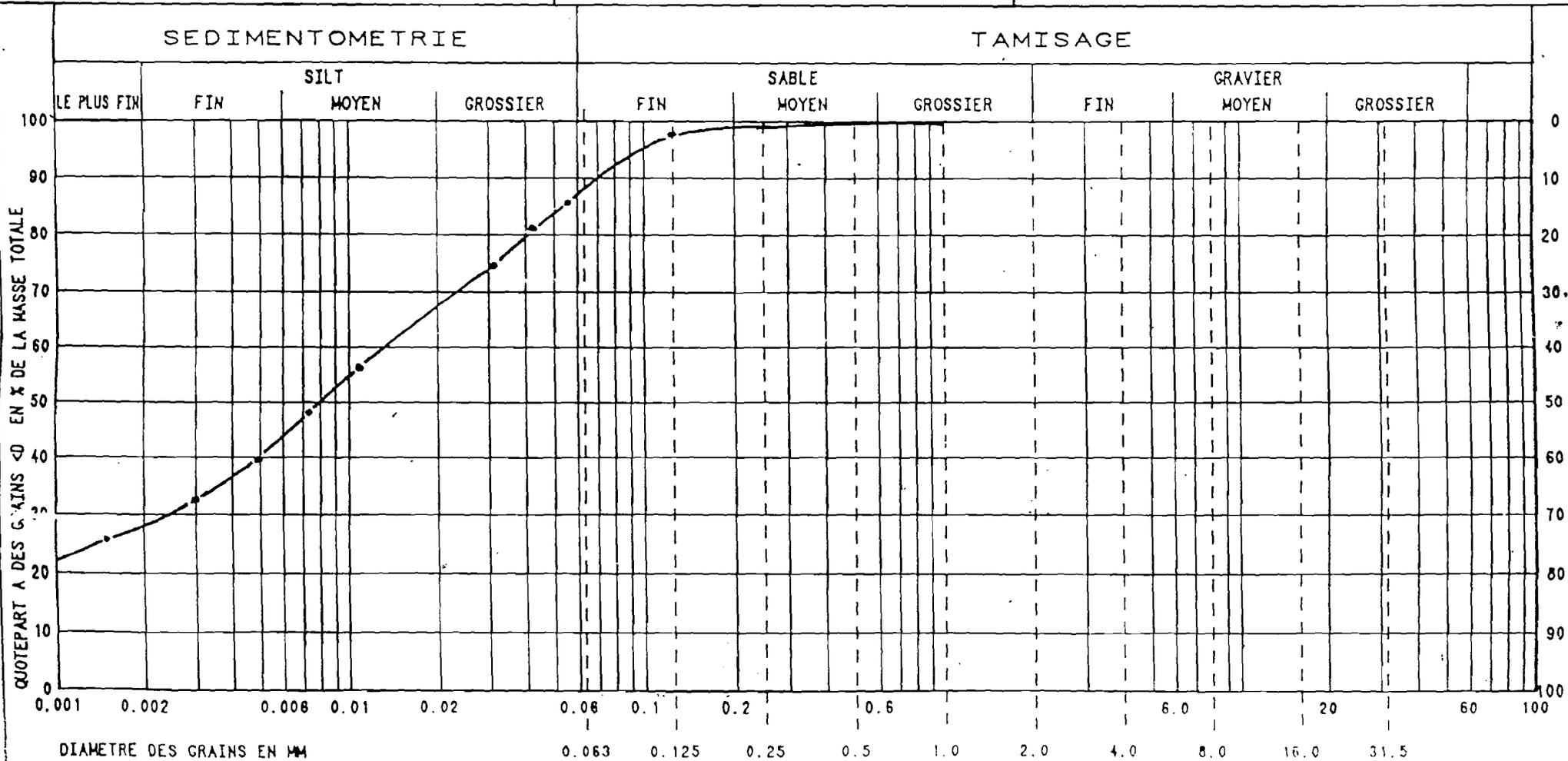


FIG. 4.1

PRELEVE LE: 14-02-97 PAR: ENSI/LGC  
 ESSAI DU: 14-02-97 PAR: ENSI/LGC  
 MODE DU TRAVAIL: TAMISAGE HUMIDE

COURBE GRANULO-SEDIMENTOMETRIQUE  
 (SOL)

LIEU DE PRELEVEMENT: Campus Nord  
 STAT:  
 PROFONDEUR DE PRELEVEMENT: 0.50 m  
 MODE DE PRELEVEMENT: ECH. REMANIE



COURBE NO: 2  
 CLASS. DU SOL: Silts Argileux peu plastiques  
 QUOTEPART < 0.063 mm: 0.09

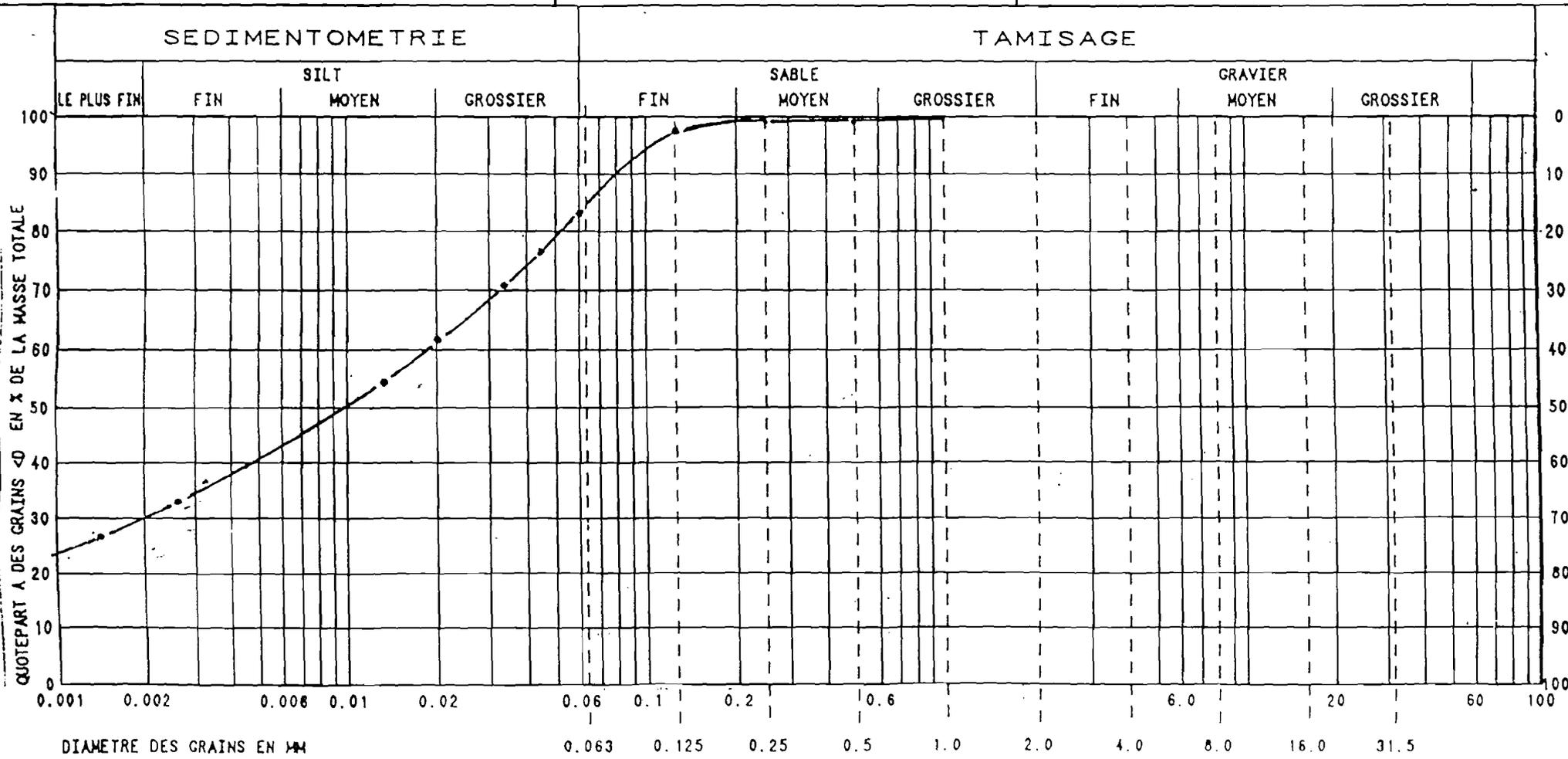
REMARQUES CONC LA FORME DES GRAINS

C.M.S.I. (UNIVERSITE DU BENIN)  
 LOME - TOGO  
 A:  
 NUMERO:

PRELEVÉ LE: 15-02-97 PAR: ENSI/LGC  
 ESSAI DU: 20-02-97 PAR: ENSI/LGC  
 MODE DU TRAVAIL: TAMISAGE HUMIDE

COURBE GRANULO-SEDIMENTOMETRIQUE  
 (SOL)

LIEU DE PRELEVEMENT: CAMPUS DAAS  
 STAT:  
 PROFONDEUR DE PRELEVEMENT: 0,50 m  
 MODE DE PRELEVEMENT: ECH. REMANIE



COURBE NO: 3  
 REMARQUES CONC LA FORME DES GRAINS

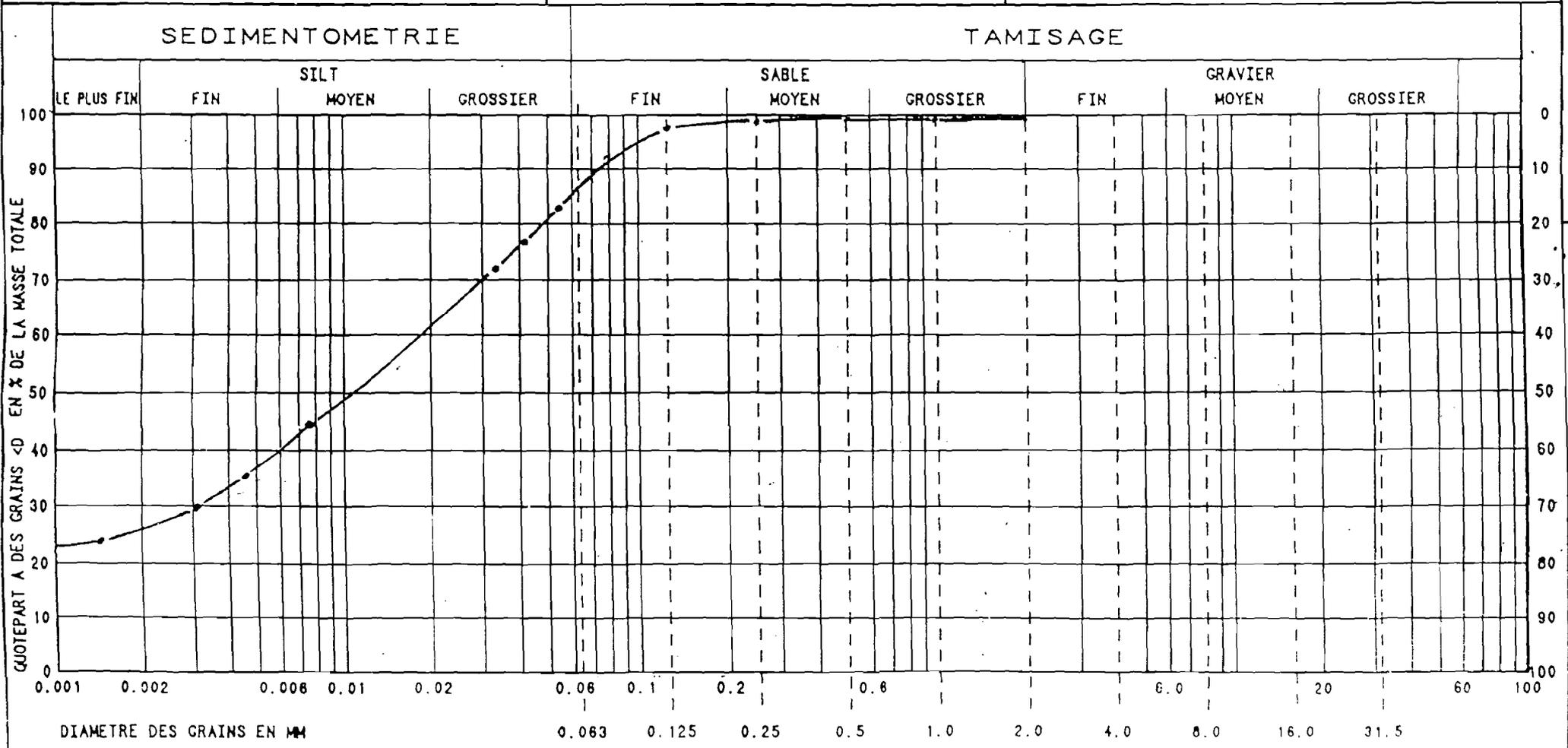
E.N.S.I. (UNIVERSITE DU BENIN)  
 LOME - TOGO  
 CHIMIE  
 FIG. 4.3  
 A:  
 NUMERO:

PRELEVE LE: 16-02-97 PAR: ENSI/LGC  
 ESSAI DU: 20-02-97 PAR: ENSI/LGC  
 MODE DU TRAVAIL: TAMISAGE HUMIDE

COURBE GRANULO-SEDIMENTOMETRIQUE  
 (SOL)

LIEU DE PRELEVEMENT: CAMPUS SECRETARIAT DE  
 STAT: DIRECTION  
 PROFONDEUR DE PRELEVEMENT: 0,50m  
 MODE DE PRELEVEMENT: ECH. REMANIE

E.N.S.I. (UNIVERSITE DU BENIN)  
 LOME - TOGO



COURBE NO:

4

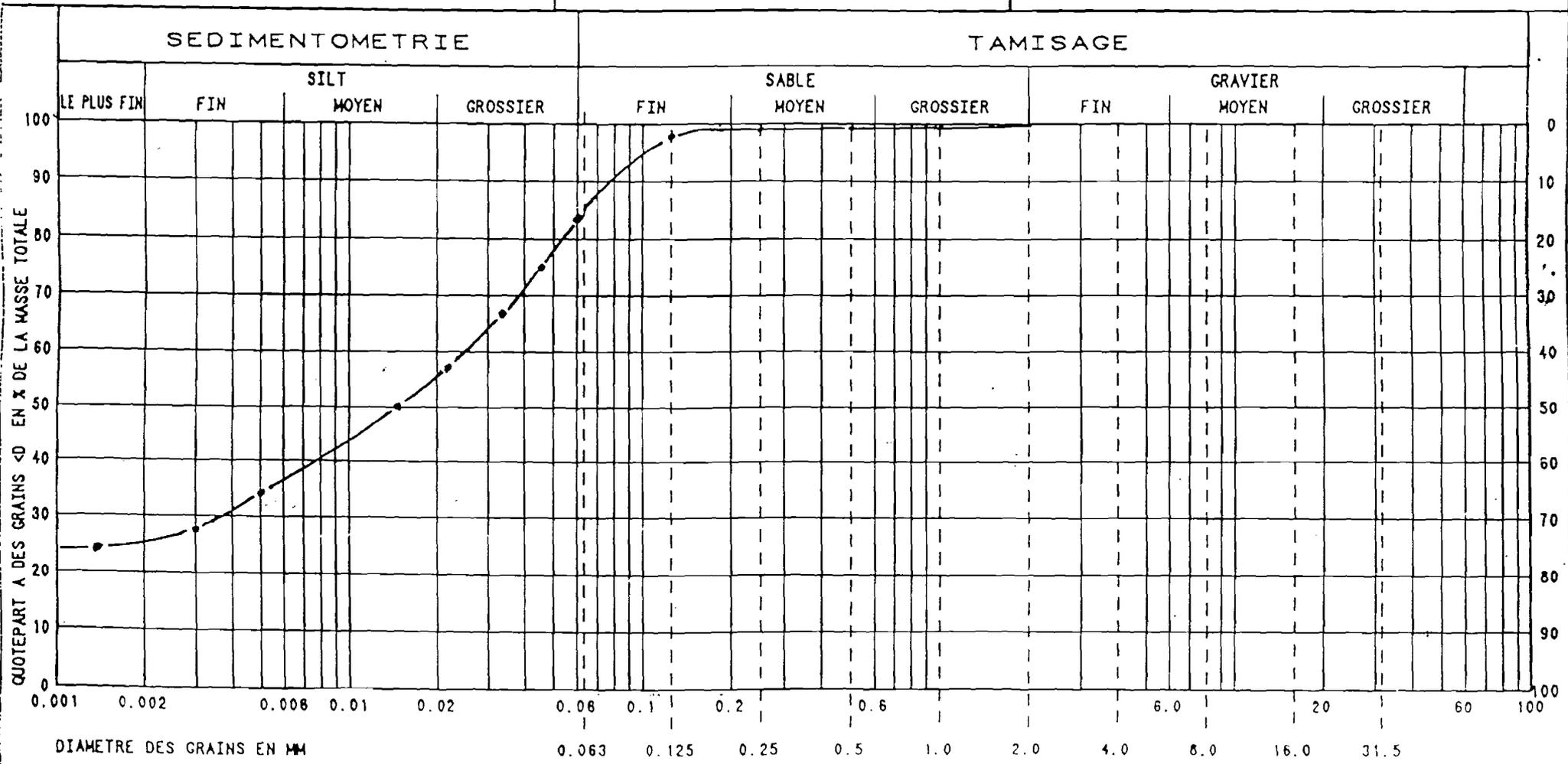
REMARQUES CONCERNANT LA FORME DES GRAINS

NUMERO: A:

PRELEVÉ LE: 17-02-97 PAR: ENSI/LGC  
 ESSAI DU: 20-02-97 PAR: ENSI/LGC  
 MODE DU TRAVAIL: TAMISAGE HUMIDE

COURBE GRANULO-SEDIMENTOMETRIQUE  
 (SOL)

LIEU DE PRELEVEMENT: CAMPUS CITE B  
 STAT:  
 PROFONDEUR DE PRELEVEMENT: 0,50 m  
 MODE DE PRELEVEMENT: ECH. REMANIE



COURBE NO: 5

LOME - TOGO

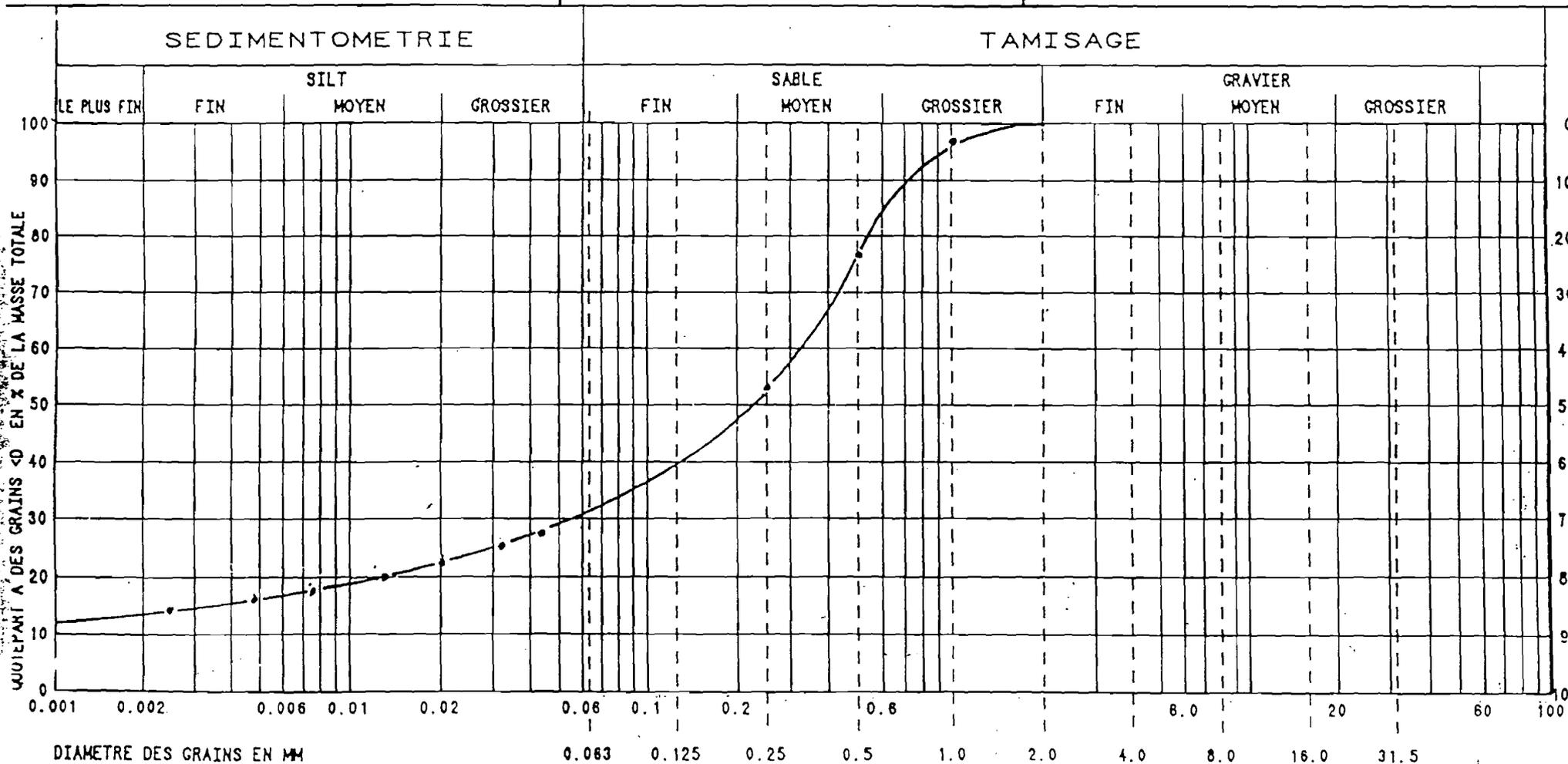
A:  
NUMERO:

PRELEVÉ LE: 17-02-97 PAR: ENSI/LGC  
 ESSAI DU: 20-02-97 PAR: ENSI/LGC  
 MODE DU TRAVAIL: TAMISAGE HUMIDE

COURBE GRANULO-SEDIMENTOMETRIQUE  
 (SOL)

LIEU DE PRELEVEMENT: CAMPUS JARDIN BOTANIQUE  
 STAT:  
 PROFONDEUR DE PRELEVEMENT: 0,50 m  
 MODE DE PRELEVEMENT: ECH. REMANIE

E.N.S.I. (UNIVERSITE DU BENIN)  
 LOME - TOGO



COURBE NO:	6	REMARQUES CONC LA FORME DES GRAINS
CLASS. DU SOL:	SC Sable Argileux	
QUOTEPART<0.083 mm:	31,00 %	
l = D80/D10		

A:  
 NUMERO:

Fig. 4.6

PRELEVÉ LE: 18-02-97 PAR: ENSI/LCC  
 ESSAI DU: 20-02-97 PAR: ENSI/LCC  
 MODE DU TRAVAIL: TAMISAGE HUMIDE

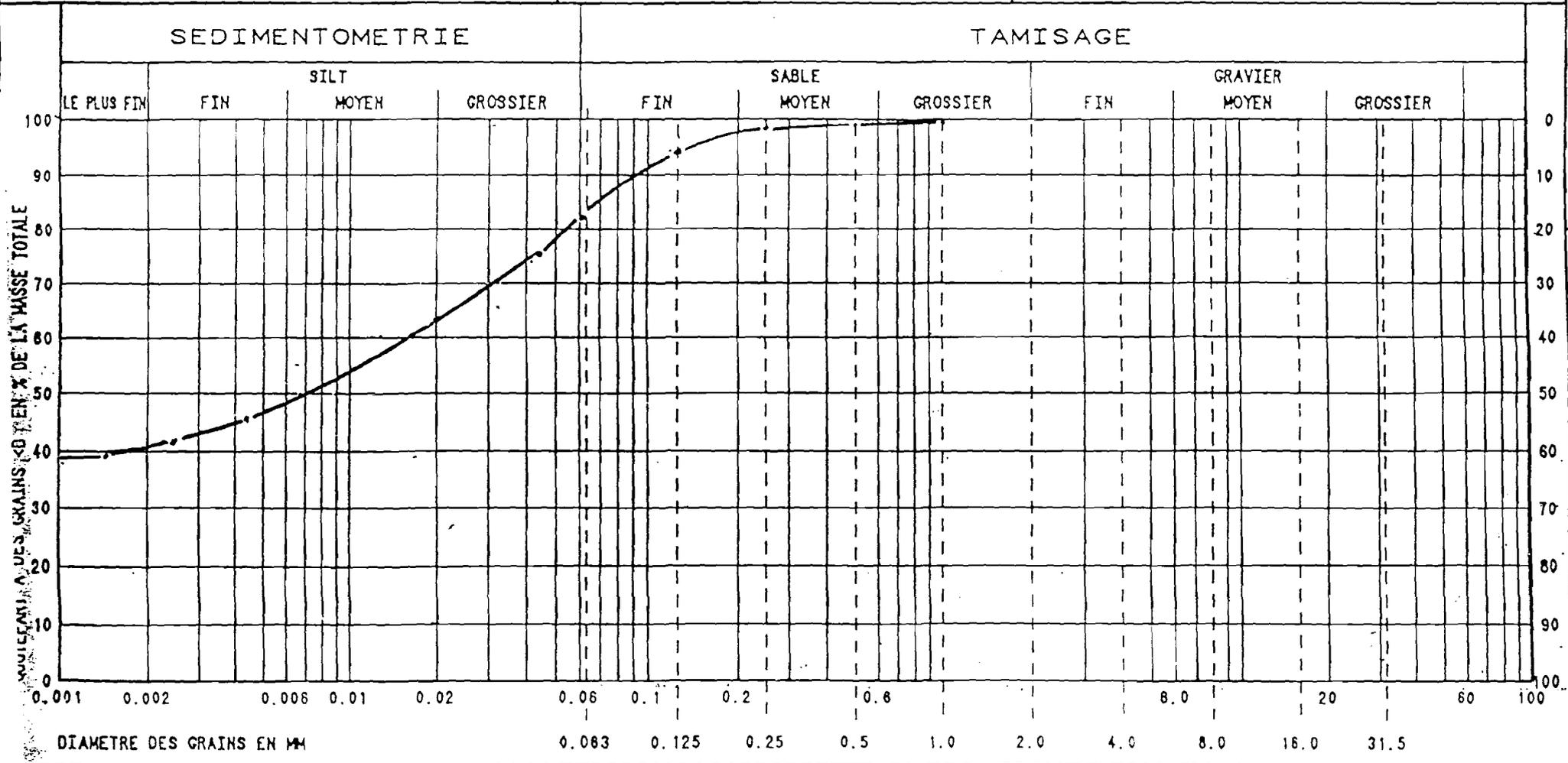
COURBE GRANULO-SEDIMENTOMETRIQUE  
 (SOL)

LIEU DE PRELEVEMENT: AGBALEPEDO  
 STAT:  
 PROFONDEUR DE PRELEVEMENT: 0,50 m  
 MODE DE PRELEVEMENT: ECH. REMANIE

PROJET LGC  
 E.N.S.I. (UNIVERSITE DU BENIN)  
 LOME - TOGO

QUANTIER:

Fig. 4.7  
 A:  
 NUMERO:



COURBE NO:	7
CLASS. DU SOL:	CL Silts-Arghles peu plastique
POTEPART < 0.083 mm:	82 %
D80/D10	

REMARQUES CONC LA FORME DES GRAINS

PRELEVEMENT: 20-02-97 PAR: ENSI/LGC  
 ESSAI DU: 20-02-97 PAR: ENSI/LGC  
 MODE DU TRAVAIL: TAMISAGE HUMIDE

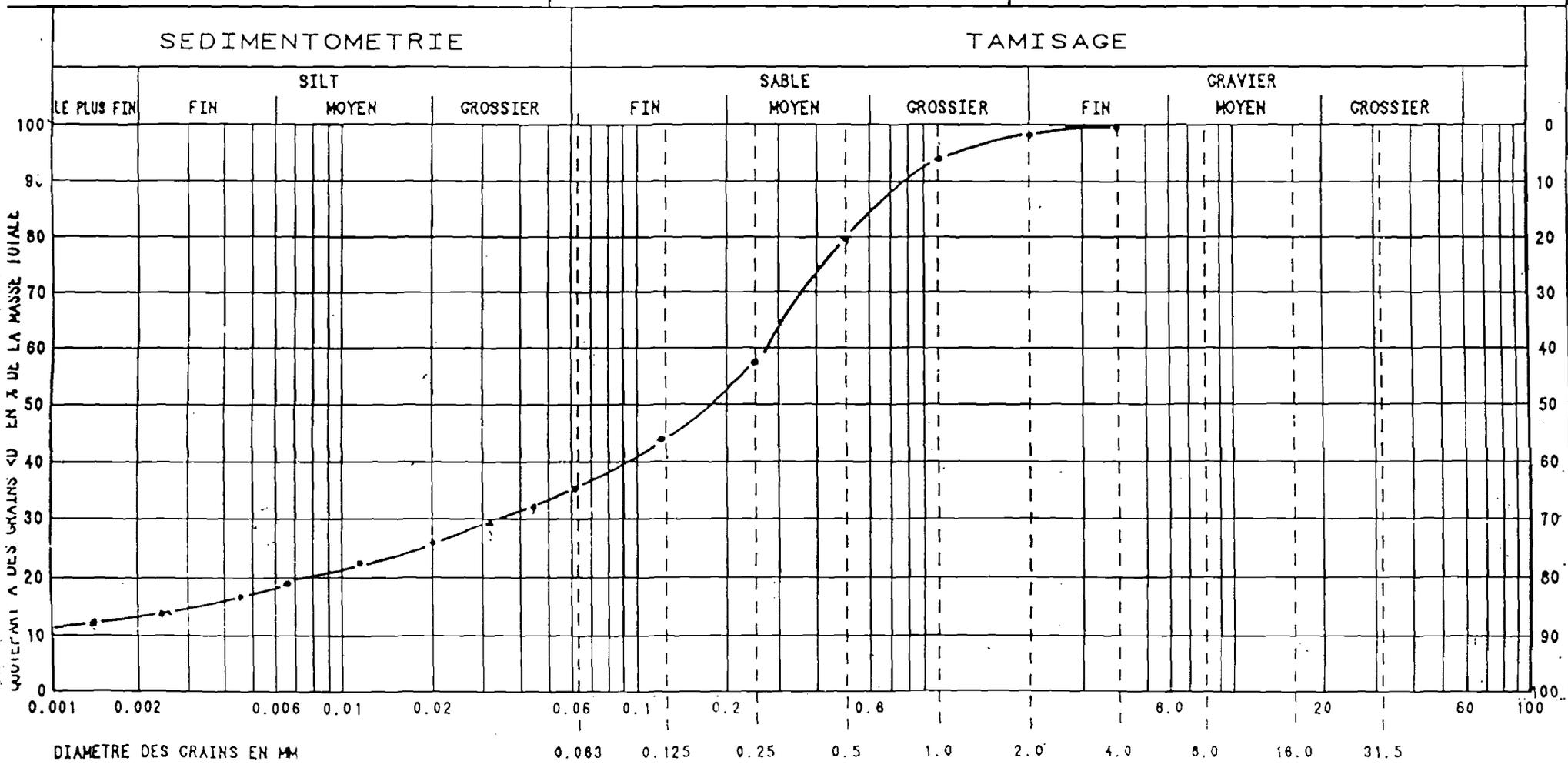
COURBE GRANULO-SEDIMENTOMETRIQUE  
 (SOL)

LIEU DE PRELEVEMENT: AGOUENYIVE  
 STAT:  
 PROFONDEUR DE PRELEVEMENT: 0.50 m  
 MODE DE PRELEVEMENT: ECH. REMANIE

PROJET LGC  
 E.N.S.I. (UNIVERSITE DU BENIN)  
 LOME - TOGO

CHANTIER:

Fig. 4.8  
 A:  
 NUMERO:



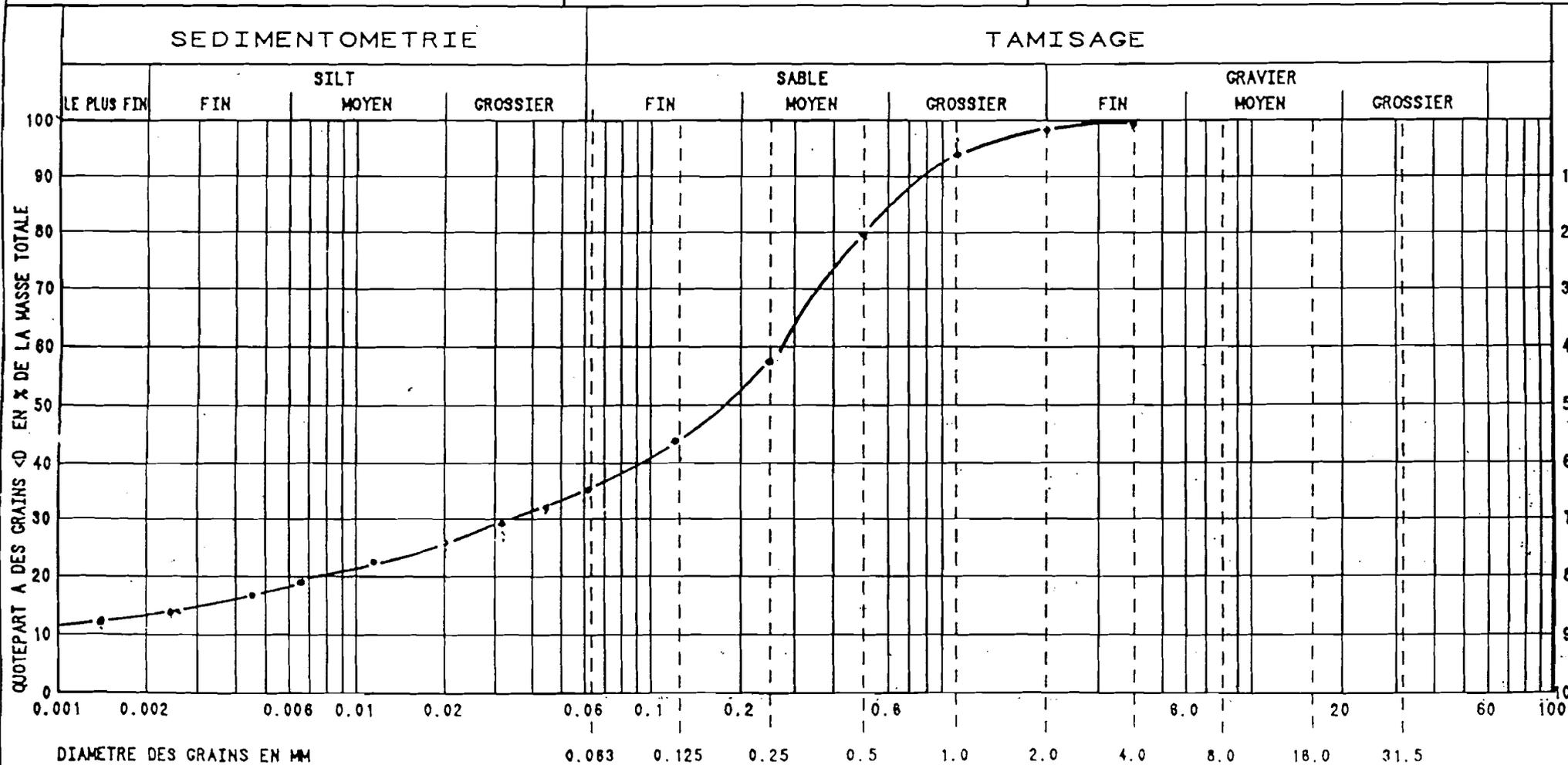
COURBE NO: 8

REMARQUES CONC. LA FORME DES GRAINS

PRELEVÉ LE: 24 - 02 - 97 PAR: ENSI/LGC  
 ESSAI DU: 26 - 02 - 97 PAR: ENSI/LGC  
 MODE DU TRAVAIL: TAMISAGE HUMIDE

COURBE GRANULO-SEDIMENTOMETRIQUE  
 (SOL)

LIEU DE PRELEVEMENT: HEDZRANAWOE  
 STAT:  
 PROFONDEUR DE PRELEVEMENT: 0,50 m  
 MODE DE PRELEVEMENT: ECH. REMANIE



COURBE NO: 9

REMARQUES CONC LA FORME DES GRAINS

E.N.S.I. (UNIVERSITE DU BENIN)  
LOME - TOGO

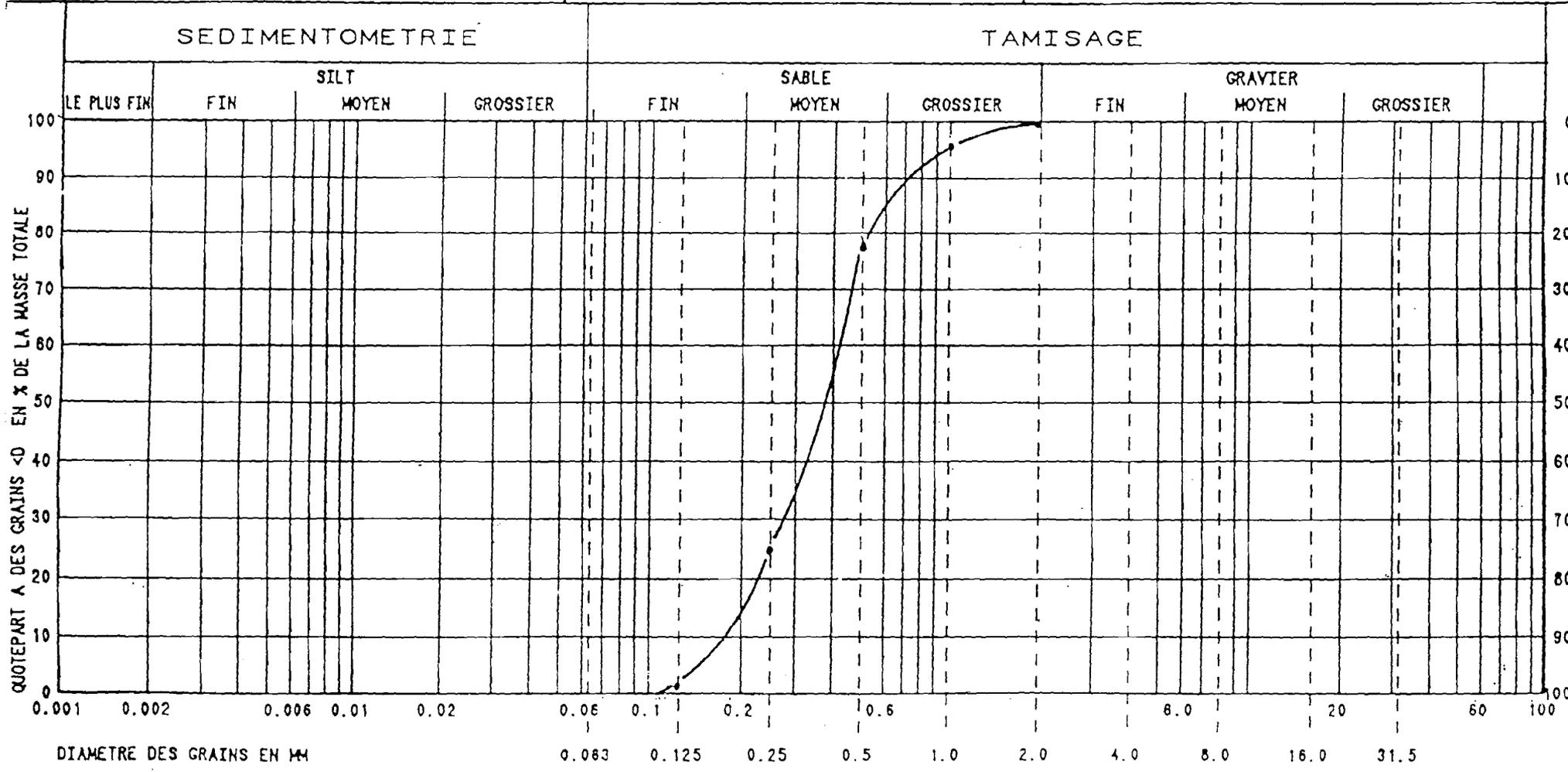
A:  
NUMERO:

DATE: 28-02-97 PAR: ENSI/LCC  
 ESSAI DU: 19-03-97 PAR: ENSI/LCC  
 MODE DU TRAVAIL: TAMISAGE HUMIDE

COURBE GRANULO-SEDIMENTOMETRIQUE  
 (SOL)

LIEU DE PRELEVEMENT: AHANOUKOPE  
 STAT:  
 PROFONDEUR DE PRELEVEMENT: 0,50 m  
 MODE DE PRELEVEMENT: ECH. REMANIE

E.N.S.I. (UNIVERSITE DU BENIN)  
 LOME - TOGO



CHIMIE:  
 A:  
 NUMERO:  
 Fig. 4.10

COURBE NO:	10	REMARQUES CONC LA FORME DES GRAINS
CLASS. DU SOL:	Sable mat gradue	
QUOTIENT <math><math>\phi</math></math> <math><math>0.063</math></math> MM:	0,00 %	
= D80/D10		

DATE: 03-03-97 PAR: ENSI/LGC  
 DATE DU: 19-03-97 PAR: ENSI/LGC  
 MODE DU TRAVAIL: TAMISAGE HUMIDE

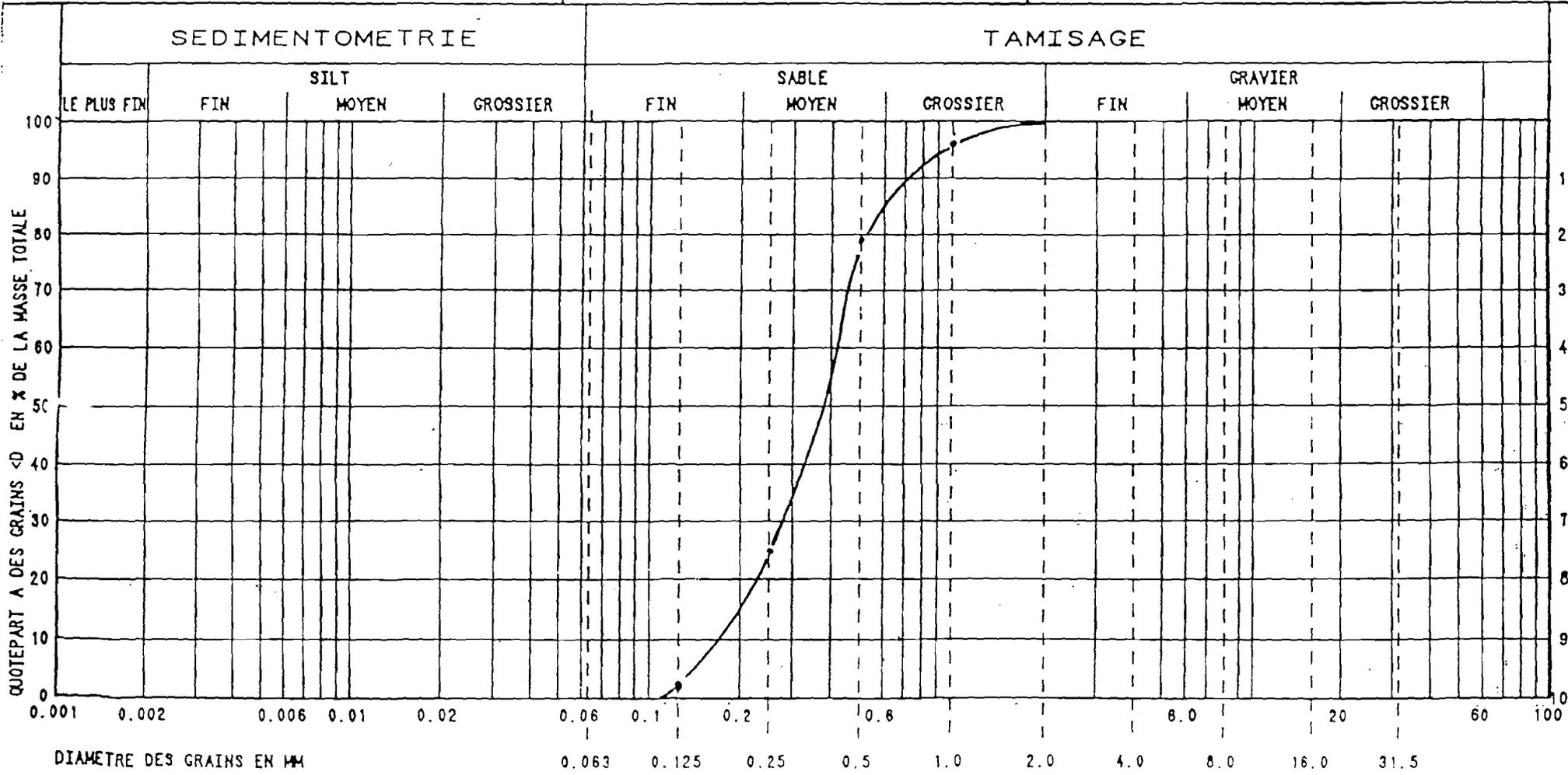
COURBE GRANULO-SEDIMENTOMETRIQUE  
 (SOL)

LIEU DE PRELEVEMENT: BE  
 STAT:  
 PROFONDEUR DE PRELEVEMENT: 1.20m  
 MODE DE PRELEVEMENT: ECH. REKAMIE

PROJET LGC  
 E.N.S.I. (UNIVERSITE DU BENIN)  
 LOME - TOGO

CHANTIER:

A:  
 NUMERO:  
 Fig. 4.11



COURBE NO: 11  
 CLASS. DU SOL: Sable mal gradué  
 QUOTEPART < 0.083 mm: 0%

REMARQUES CONC LA FORME DES GRAINS

PRELEVE LE: 03 - 03 - 97 PAR: ENSI/LGC  
 ESSAI DU: 19 - 03 - 97 PAR: ENSI/LGC  
 MODE DU TRAVAIL: TAMISAGE HUMIDE

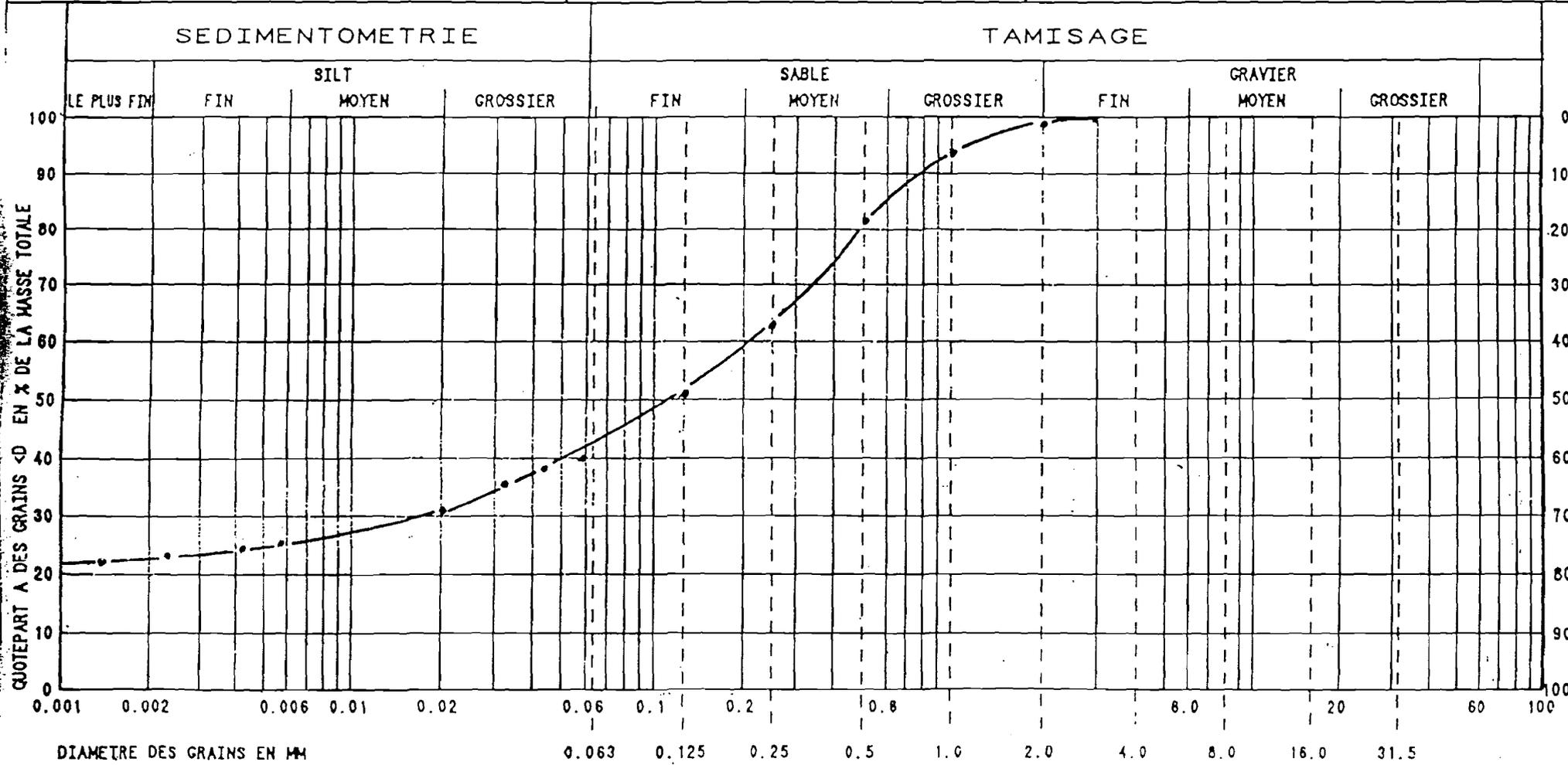
COURBE GRANULO-SEDIMENTOMETRIQUE  
 (SOL)

LIEU DE PRELEVEMENT: SOVIEPE  
 STAT:  
 PROFONDEUR DE PRELEVEMENT: 1,20 m  
 MODE DE PRELEVEMENT: ECH. REMANIE

PROJET LGC  
 E.N.S.I. (UNIVERSITE DU BENIN)  
 LOME - TOGO

CHANTIER:

Fig. 4.12  
 A:  
 NUMERO:



COURBE NO: 12  
 CLASS. DU SOL: SM Sables Silteux  
 REMARQUES CONC LA FORME DES GRAINS

### 4.3 - CHOIX DES SITES

Grâce aux travaux effectués et consignés dans le tableau 4.1, nous avons procédé à une campagne de mesure des résistivités du sol en tenant compte de deux paramètres, l'humidité du sol et l'humidité de l'air. Les différents résultats sont consignés dans le tableau 4.2 qui est très parlant de lui-même. Il est à rappeler que les résultats obtenus sont le fruit d'une campagne de mesures effectuées sur cinq années, soit soixante (60) mois à travers toutes les saisons en vue d'avoir une grande fiabilité.

Lieu	Nature du sol	Résistivité (en Ohm.mètre)	Humidité du sol en %	Humidité de l'air en %
- Campus Agronomie	Sables argileux	60 à 246	8.13 à 18.72	56 à 79
- Campus Nord	Silts argile peu plastiques	74 à 202	3.8 à 14	56 à 89
- Campus DAAS	Silts argile peu plastiques	95 à 160	5.22 à 14	56 à 89
- Campus Secrét. Dir.	Silts argile peu plastiques	63.2 à 136	6.24 à 14.33	50 à 69
- Campus Jardin B.	Sables argileux	103 à 130	11.62 à 13.65	50 à 81
- Agbalepedogan	Sables argileux	67 à 85	14.46 à 15.78	57 à 79
- Agoenyive	Sables argileux	88 à 122	11.22 à 13.26	59 à 71
- Hedzranawoe	Sables argileux	63 à 75	15 à 18	57 à 69
- Ahanoukope	Sables mal gradués	7.2 à 16	17.74 à 22.62	50 à 71
- Bè	Sables mal gradués	202 à 335	2.14 à 6.88	50 à 71
- Sovie pé	Sable silteux	74 à 103	7.46 à 10.85	50 à 71

Tableau 4.2 : Résistivités des sols de Lomé et ses environs.

Nous rappelons que les mesures se poursuivront encore sur une dizaine d'années après cette première publication.

## 4.4 - VALIDATION EXPERIMENTALE DES MESURES DE RESISTIVITE DU SOL ET DE RESISTANCE DES PRISES DE TERRE

L'analyse géotechnique des sols de Lomé et ses environs nous a permis de sélectionner un certain nombre de sites sur lesquelles ont été menées nos campagnes de mesure in situ sur une période d'environ soixante (60) mois.

Initialement, nous avons choisi 12 sites répartis géographiquement sur Lomé et ses environs. Grâce aux travaux effectués dans le laboratoire de mécanique des sols de l'ENSI (Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs), ce nombre a été réduit à quatre (04). Cette restriction correspond à une limitation aux sols standard les plus répandus à Lomé à savoir :

- sables silteux
- sables (mal gradués)
- silts argiles peu plastiques
- sables argileux

### 4.4.1 - Méthodologie

#### a) - Mesure de la résistivité

La méthode utilisée est celle dite de WENNER ou méthode des quatre électrodes décrite largement dans le chapitre 1 au paragraphe 1.6.2.

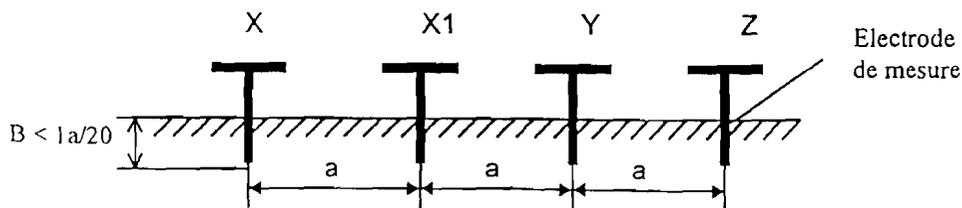


Fig. 4.13 : Méthode de WENNER.

Sachant qu'à Lomé, il existe deux saisons sèches (une grande et une petite) et deux saisons de pluies (une grande et une petite), nous avons opté pour une campagne de mesure à travers toute l'année et ceci sur 60 mois environ comme nous l'avons mentionné au point 6.1.

Afin d'obtenir une bonne précision sur l'évaluation des paramètres qui interviennent dans le dimensionnement des prises de terre, une périodicité de deux semaines est adoptée pour la fréquence des mesures.

Pour la mesure des résistivités du sol et de la résistance des prises de terre, nous avons utilisé un (1) tellurohmmètre, un contrôleur numérique de terre de marque TERCA.

La mesure de la résistivité étant une manipulation très fastidieuse, nous l'avons réalisée sur tous les sites choisis.

Dans notre cas d'espèce, (Fig. 4.13), la valeur de la distance « a » est convenue à 8 m sur le campus, en faisant de telle sorte que  $3a$  soit sensiblement 20 m comme l'exige la notice technique du constructeur. Parfois, en ville telle qu'à Bè, Ahanoukopé, etc., « a » est sensiblement égale à 6 m et ceci est lié à l'environnement de travail.

Les variations climatiques saisonnières influent sur la résistivité des couches superficielles d'un terrain. C'est pourquoi nous avons noté soigneusement les conditions climatiques lors des différentes mesures.

#### *b) - Mesure des résistances de terre*

Il existe plusieurs méthodes de mesure des résistances de terre. La méthode la plus sûre est la méthode de la « chute de potentiel » utilisant un tellurohmmètre.

Sachant que la valeur de la résistivité en un lieu donné peut être obtenue indirectement par la connaissance de la résistance de la terre et vice versa, nous n'avons réalisé cette dernière que sur le site de Soviépe et une déduction a été faite pour les autres sites.

#### 4.4.2 - Résultats

Dans ce paragraphe, nous présentons les différents graphes de la résistivité et de la résistance des prises en fonction des différents paramètres pour quelques sites choisis en tenant compte des sols standards les plus répandus à Lomé.

La première observation qui est faite pour les quatre sites est que la résistivité des sols augmente fortement ou diminue fortement selon qu'on est en saison sèche ou pluvieuse. Les variations sont illustrées pour les courbes tracées en fonction des dates et du taux d'humidité du sol. Le paramètre humidité de l'air montre une dispersion beaucoup plus importante pour le type de sol « silt argileux » peu plastique.

En comparant les quatre types de sols obtenus, l'on s'aperçoit que le sol « sable fin gradué » ne nécessite pas une préparation spécifique comme il en faudra nécessairement pour les trois autres types. Ceci se justifie par le fait que ces sols sont déjà saturés et salins car à 0,5 mètre déjà, on trouve la nappe phréatique.

Il faudrait noter que le sel et le charbon de bois entrent dans la confection ou la préparation des sols dans la réalisation pratique des prises de terre comme il est indiqué aux schémas d'implantation des prises de terre sur des sites « silteux argileux peu plastiques » et « sableux argileux » des figures 4.14 et 4.15.

Les graphes que nous présentons dans ce paragraphe sont les résultats d'une modélisation des points expérimentaux de mesures sur les sites de la ville de Lomé (voir les courbes de résistance de prise de terre en fonction des dates pour les sols « silteux argileux peu plastiques » et « sableux argileux » des figures 4.14 et 4.15).

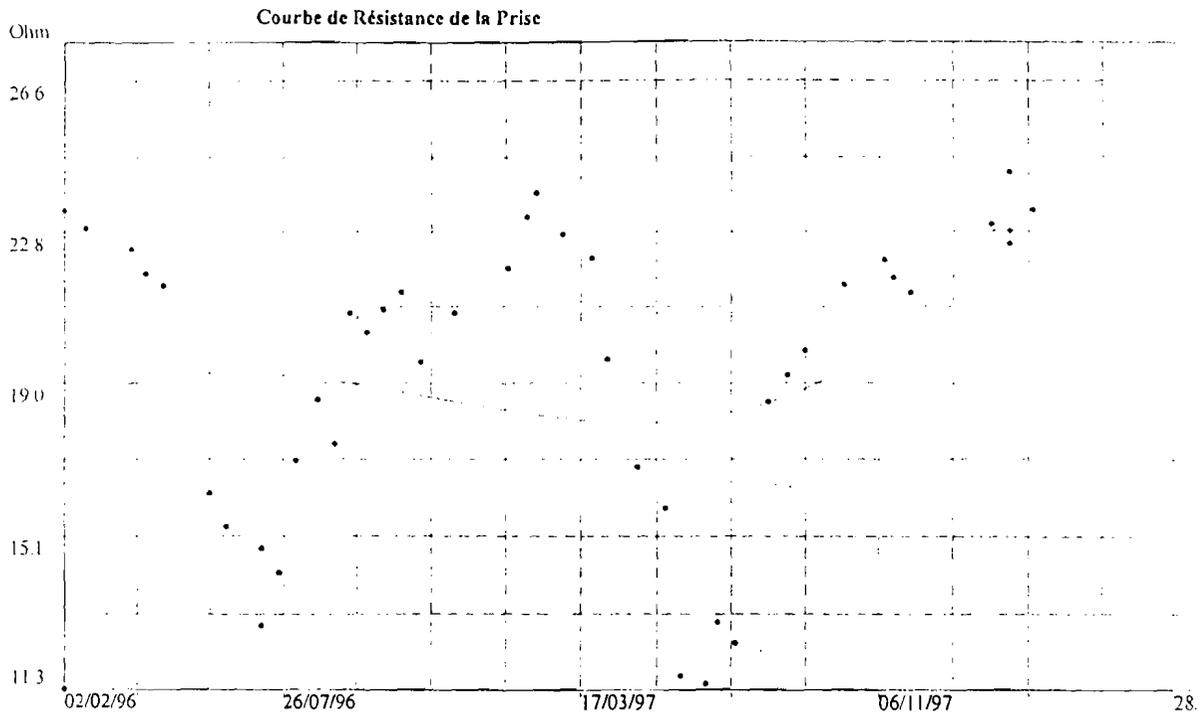
Trouver un modèle analytique c'est déduire, à partir des données de mesure, une expression mathématique (analytique) qui approche au mieux l'évolution des paramètres utilisés dans le calcul [42], [43].

# PRISE DE TERRE: projet "Silts Argiles Peu Plastiques"

**Données de Calcul :**

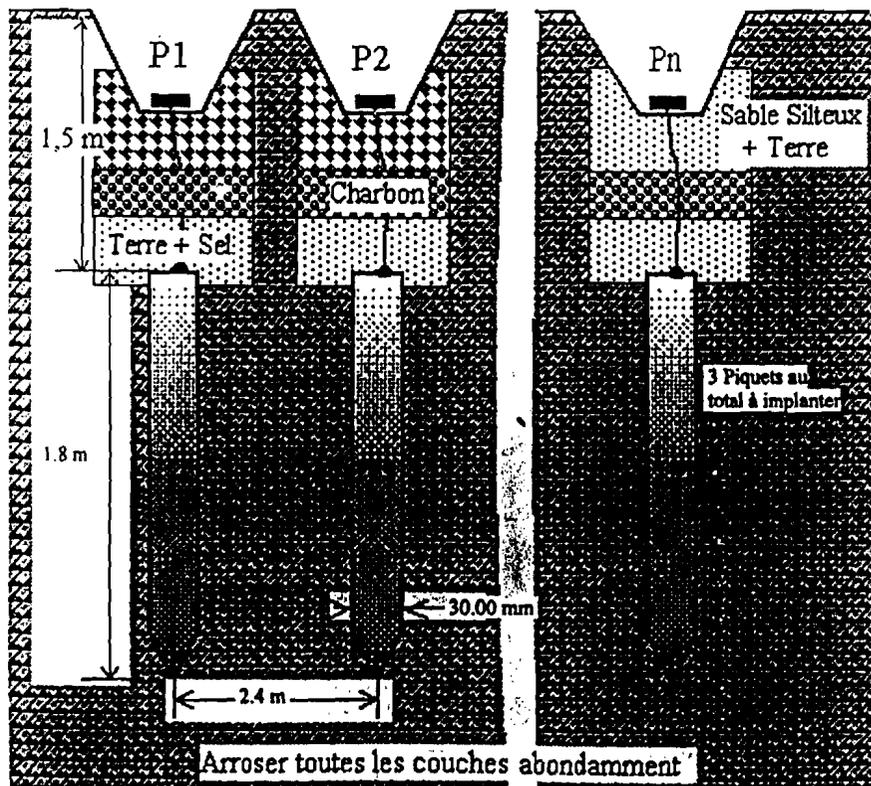
Tension Sécurité : 24 V  
 Valeur des différentiels : 1000 mA  
 Type de Sol : Silts Argiles Peu Plastiques

Graphes d'évolution de la résistance de la Prise de Terre: Résistance = f(Date)



Echelle de la Courbe  
 Abscisse : 0.17 mm/Unité  
 Ordonnée : 5.23 mm/Ohm

**Schéma d'implantation de la Prise de Terre en "3" Piquets": (Coupe longitudinale)**



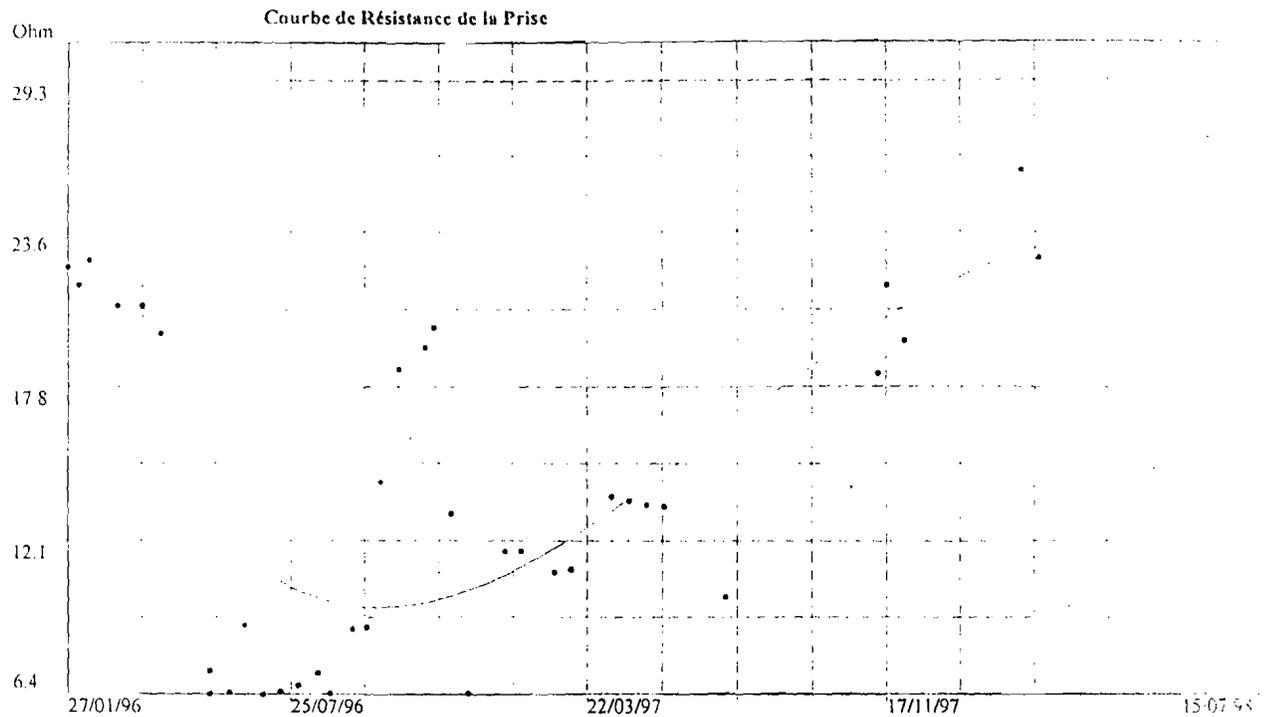
**Fig. 4.14 :** Graphes d'évolution (Courbe analytique 'modèle' & points expérimentaux) de la résistance de prise de terre en fonction de la date et schéma d'implantation de prise pour des sols « Silts Argiles Peu Plastiques ».

## PRISE DE TERRE: projet "Sable Argileux"

**Données de Calcul :**

Tension Sécurité : 24 V  
 Valeur des différentiels : 1000 mA  
 Type de Sol : Sable Argileux

**Graphes d'évolution de la résistance de la Prise de Terre: Résistance = f(Date)**



**Echelle de la Courbe**  
 Abscisse : 0.17 mm/Unité  
 Ordonnée : 3.49 mm/Ohm

**Schéma d'implantation de la Prise de Terre en "4" Piquet": (Coupe longitudinale)**

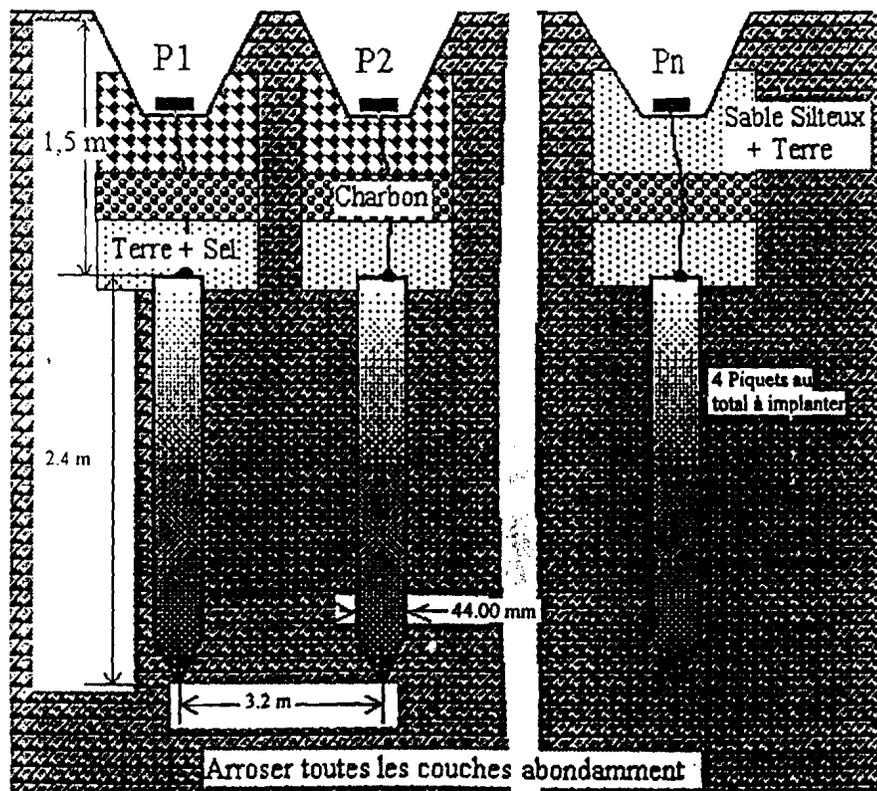


Fig. 4.15 :

Graphes d'évolution (Courbe analytique 'modèle' & points expérimentaux) de la résistance de prise de terre en fonction de la date et schéma d'implantation de prise pour des sols « Silteux Argileux ».

Nous avons procédé à cette modélisation par voie informatique, en réalisant un logiciel de dimensionnement de prise de terre qui prend en ligne de compte le processus de modélisation de certaines données.

Nous avons détaillé dans le chapitre 3 ledit logiciel, ses possibilités et ses capacités, tandis que le paragraphe 2.7 du chapitre 2 a expliqué la méthode de modélisation que nous avons utilisée.

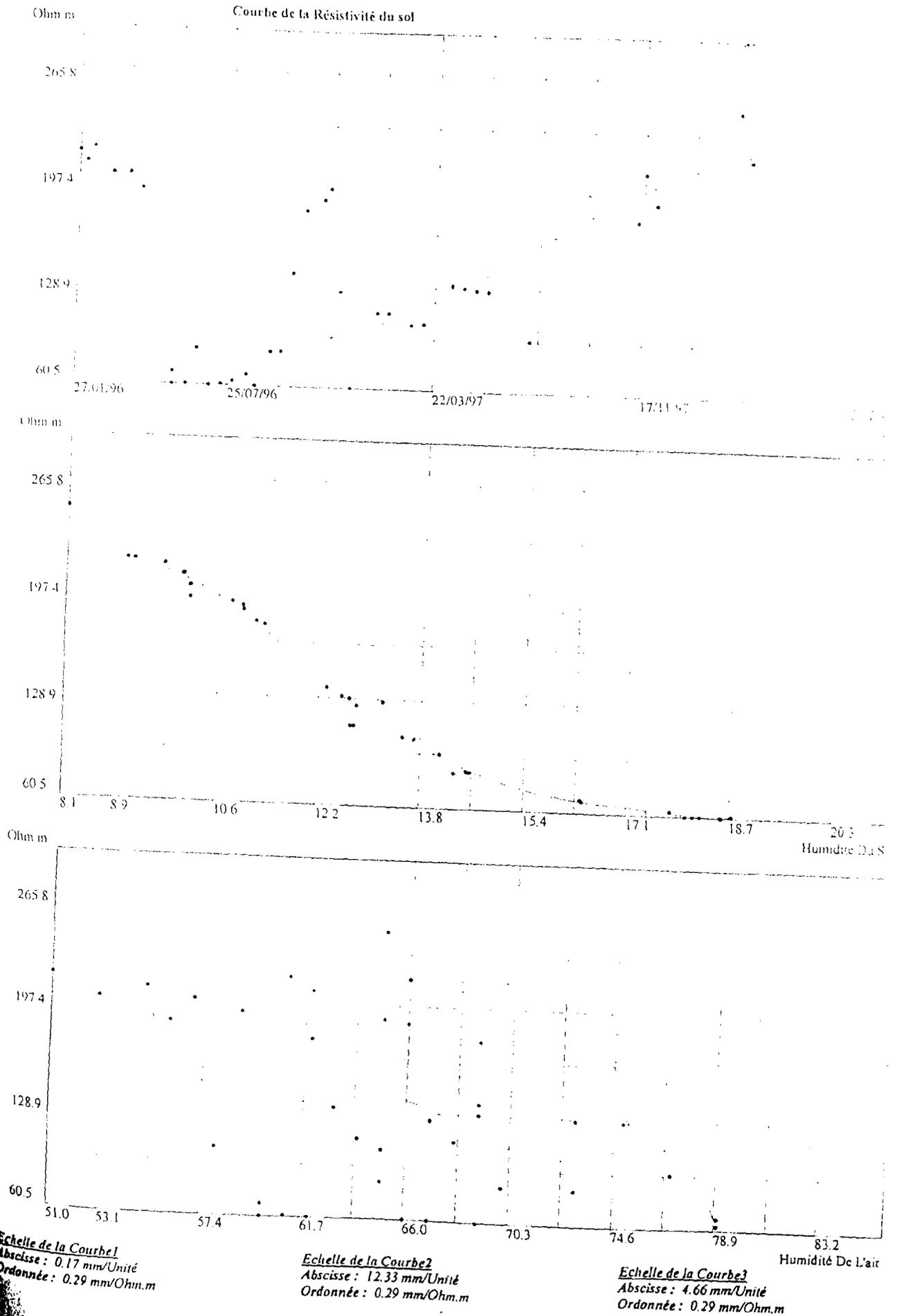
Les trois courbes modèles (résistivité en fonction de la date (saison), de l'humidité de l'air et de l'humidité du sol) obtenues à partir des mesures effectuées sur le terrain (à partir des points expérimentaux) pour chacun des douze (12) sites de la ville de Lomé et ses environs sont respectivement représentées par les figures 4.16 et 4.27.

#### 4.4.3 - Commentaires

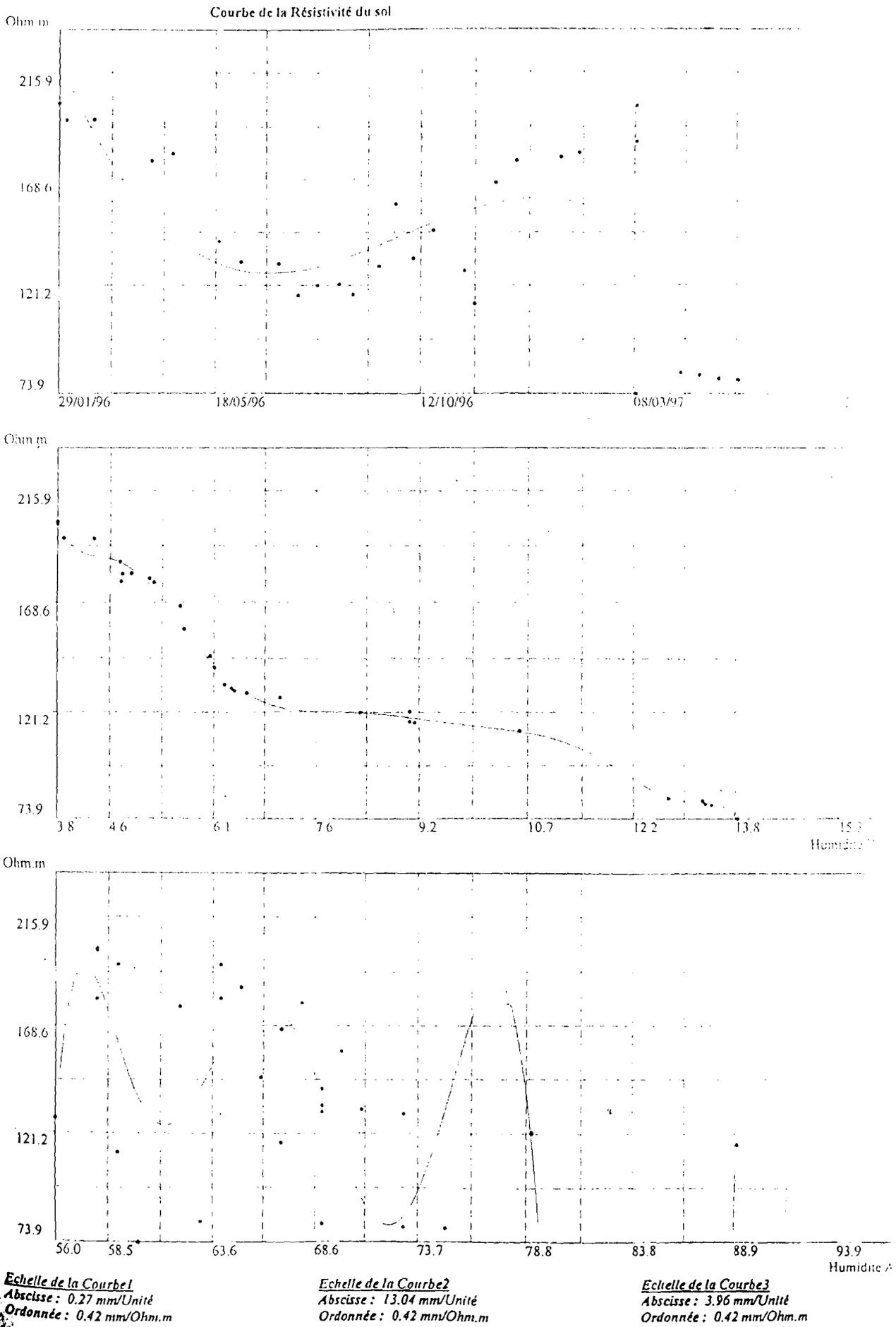
Les relevés des caractéristiques sur les sites choisis, les résultats de calculs et leurs interprétations par les différentes courbes dans le paragraphe 4.3 nous permettent d'élucider la similitude entre les données des tableaux standards relatives à l'évolution des valeurs de la résistance de la prise de terre et celles de la résistivité des sols.

Les résultats de ces expériences menées sur les terrains cibles nous confirment également le comportement des sols par leur résistivité en fonction des variations climatiques saisonnières. La température, l'humidité du sol et de l'air, le renouvellement de ces mesures à des époques différentes de l'année constituent des facteurs très importants. Toutefois les variations irrégulières observées sur certaines courbes nous conduisent à justifier la présence des corps métalliques (canalisations par exemple), des couches de terrains très résistantes par endroit. Ces éléments qui constituent des obstacles à franchir par l'électrode d'injection produisent une modification du cheminement dans le sol du filet de courant et par-là même du champ électrique.

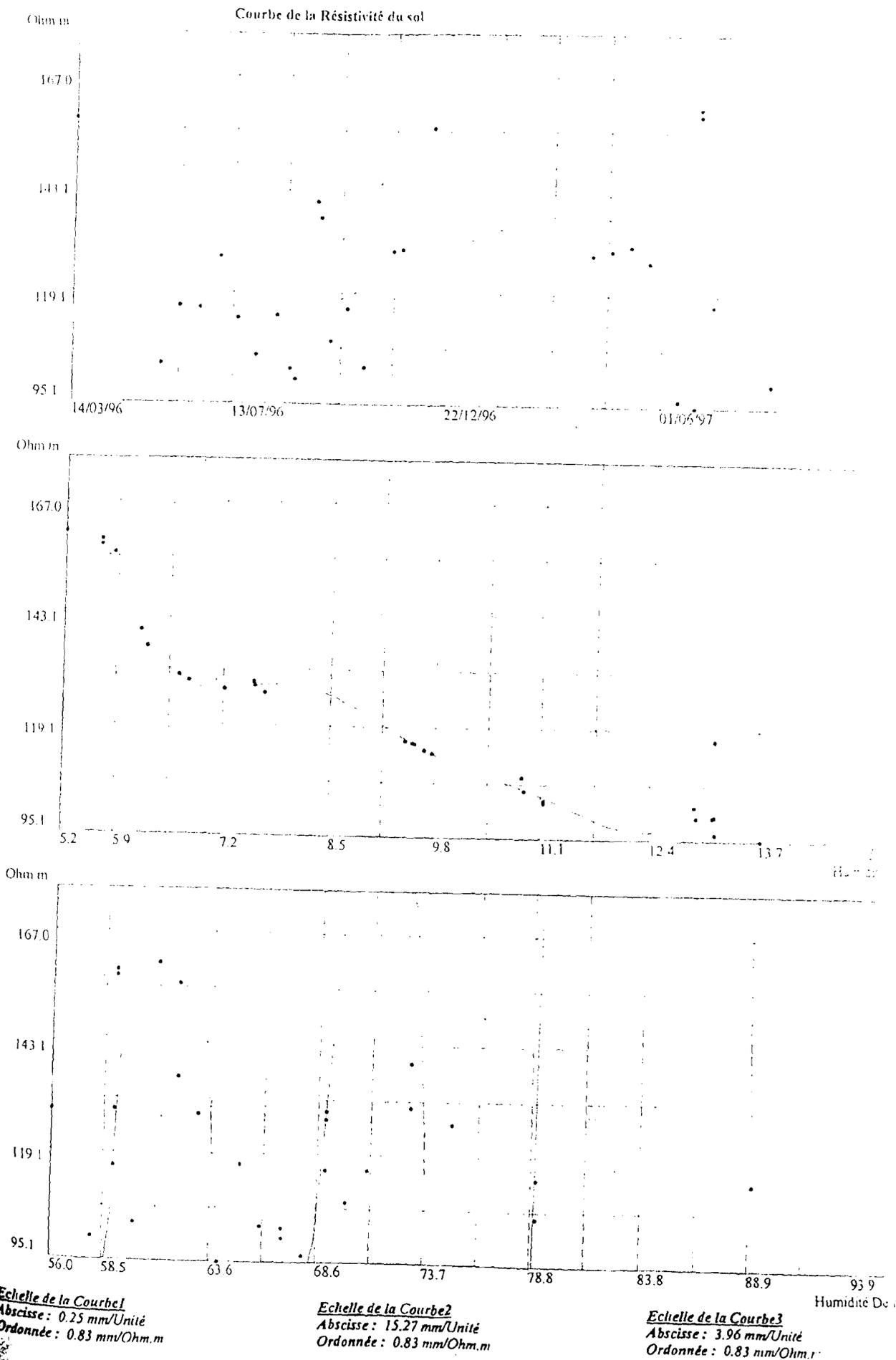
Graphique d'évolution de la résistivité du sol du site: Résistivité = f(Taux des Paramètres de base)



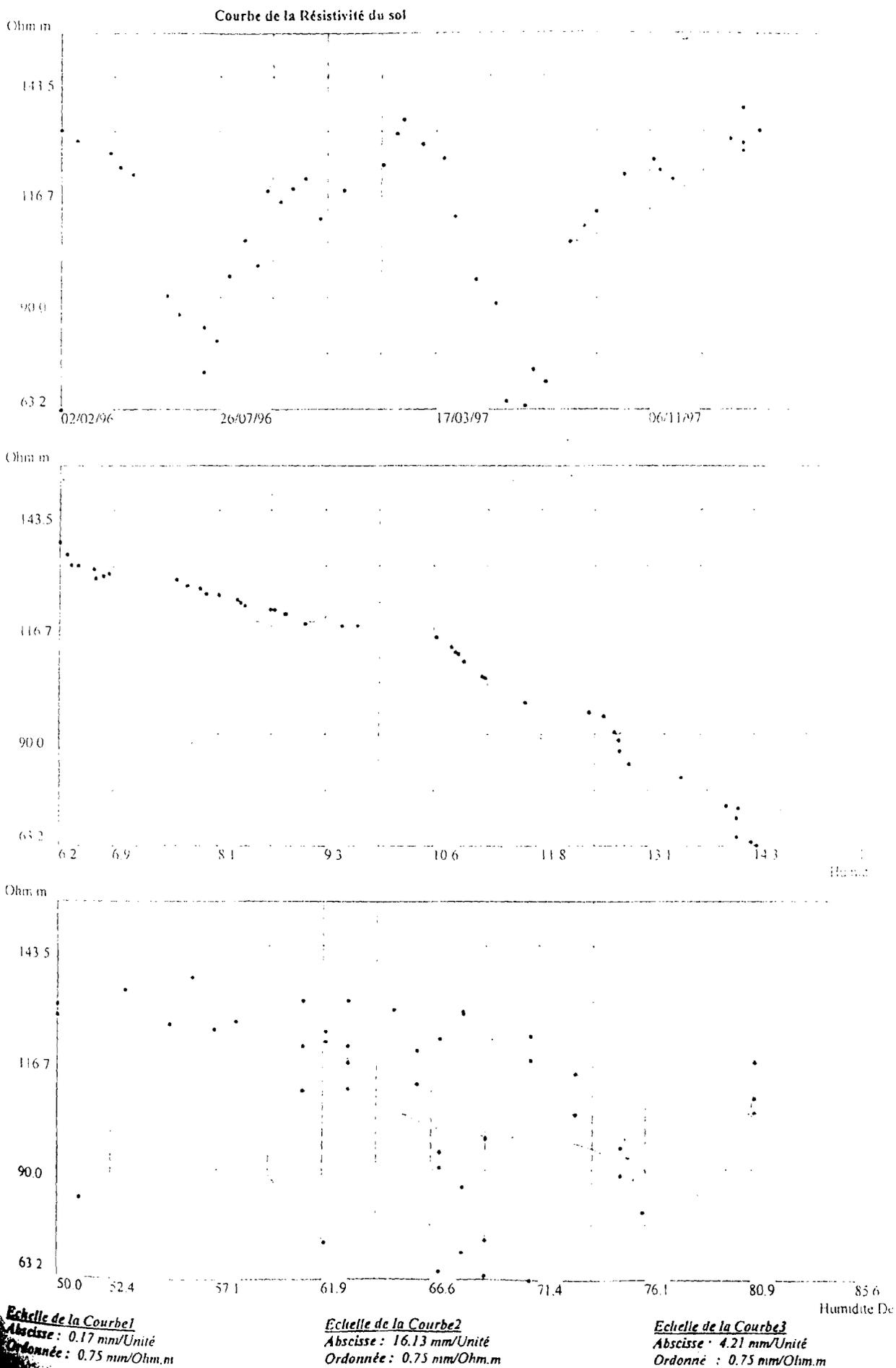
Graphie d'évolution de la résistivité du sol du site: Résistivité = f(Taux des Paramètres de base)



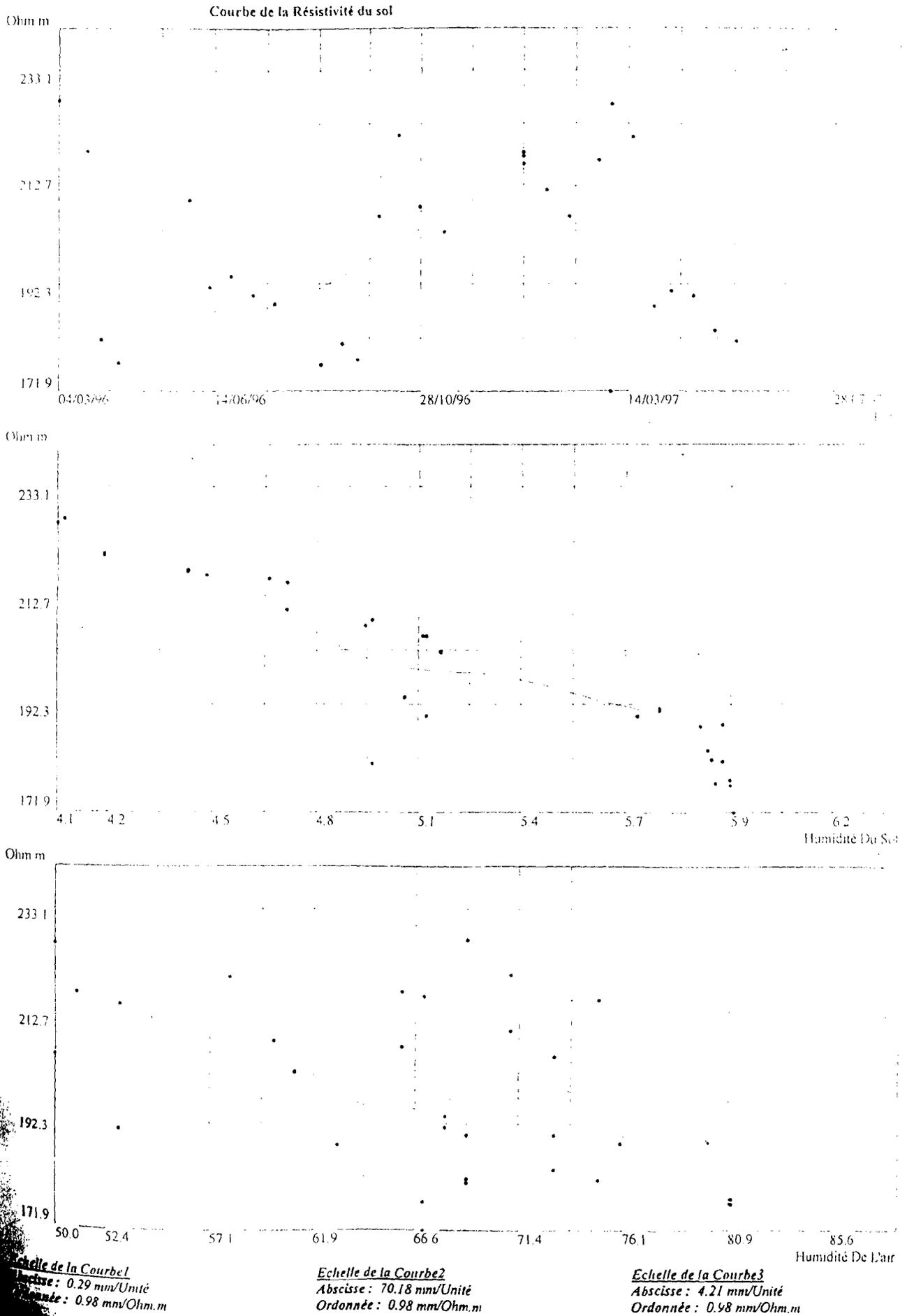
Graphie d'évolution de la résistivité du sol du site: Résistivité = f(Taux des Paramètres de base)



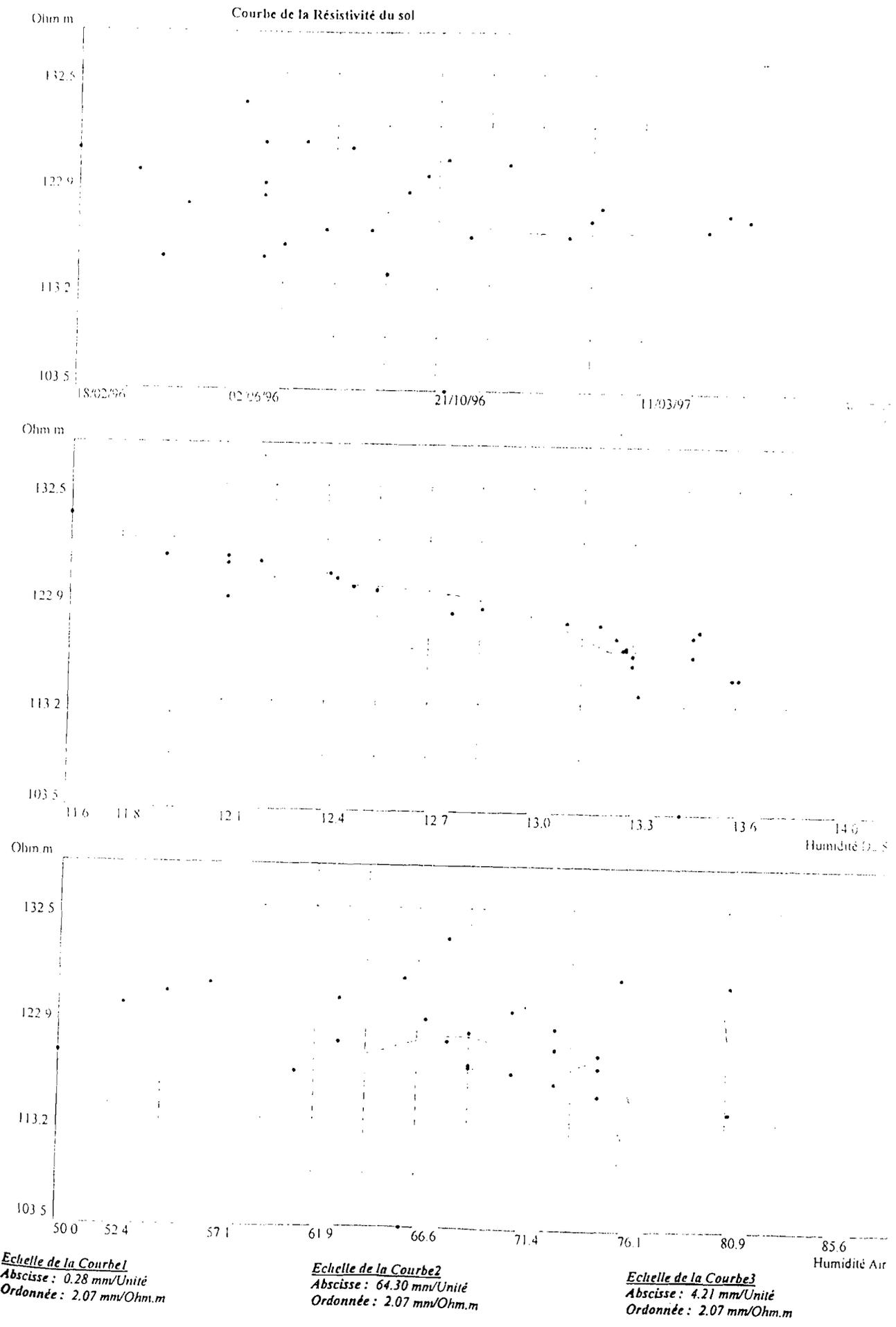
Graph de l'évolution de la résistivité du sol du site: Résistivité = f(Taux des Paramètres de base)



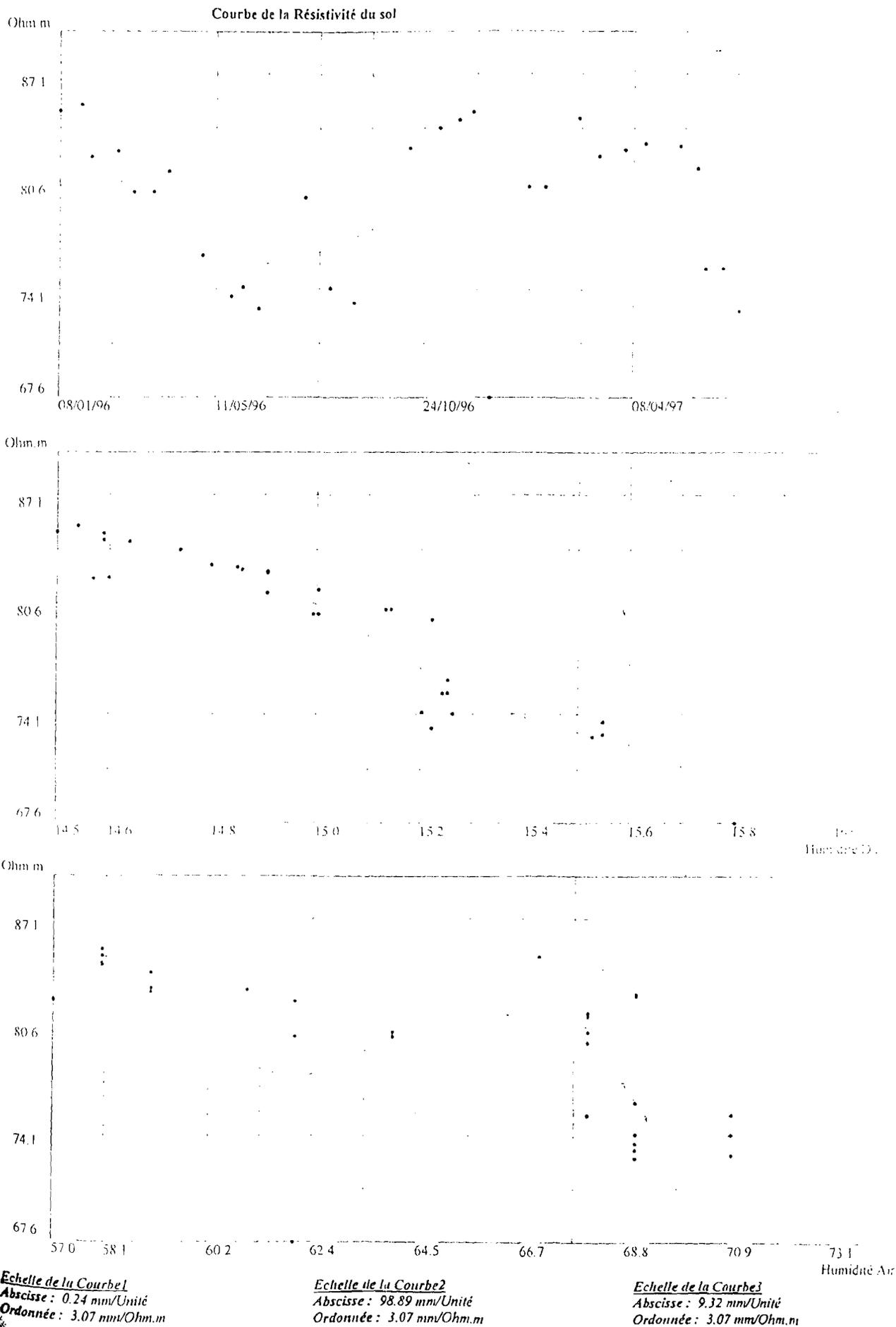
Graphique d'évolution de la résistivité du sol du site: Résistivité = f(Taux des Paramètres de base)



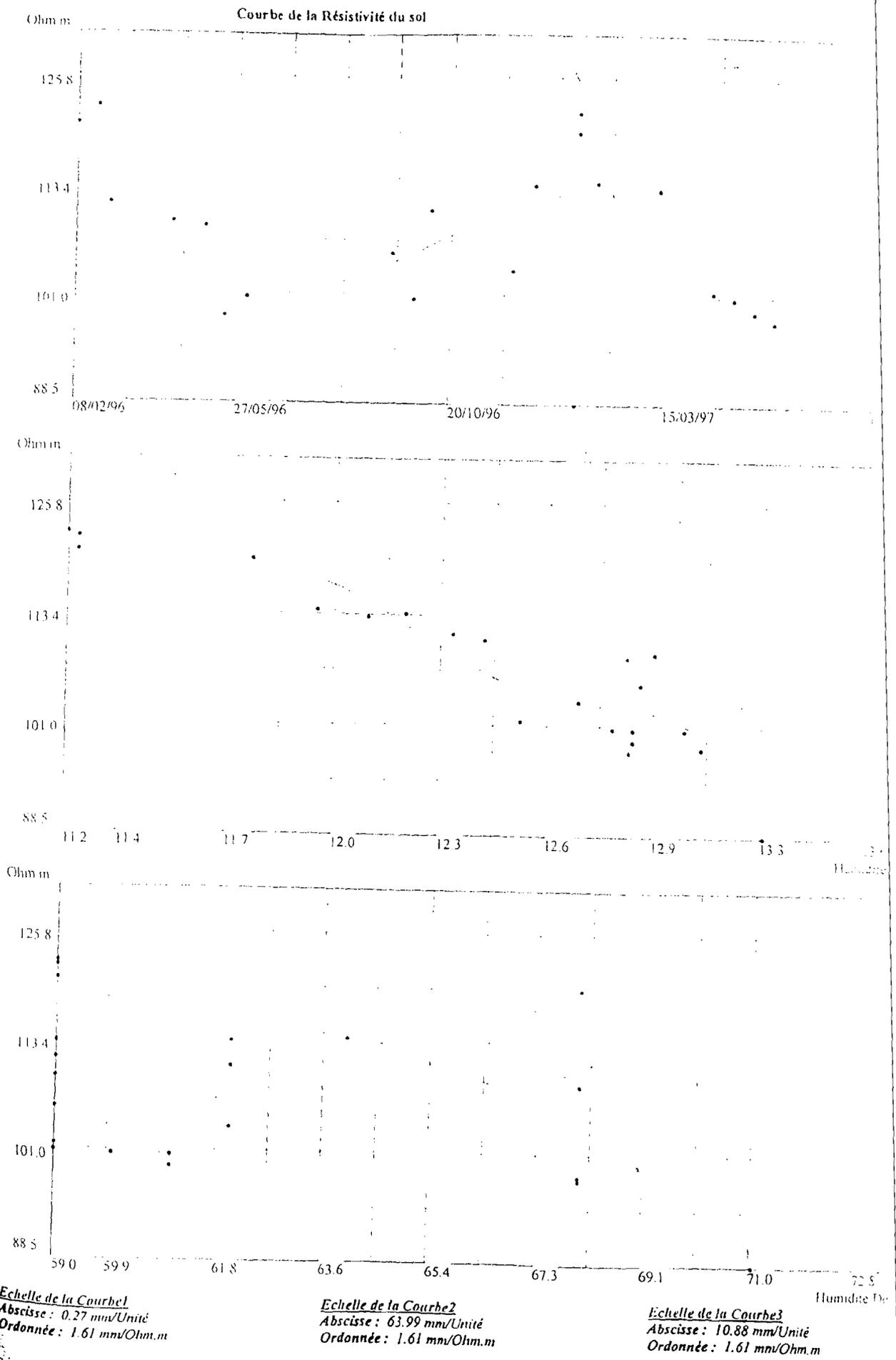
Graphes d'évolution de la résistivité du sol du site: Résistivité = f(Taux des Paramètres de base)



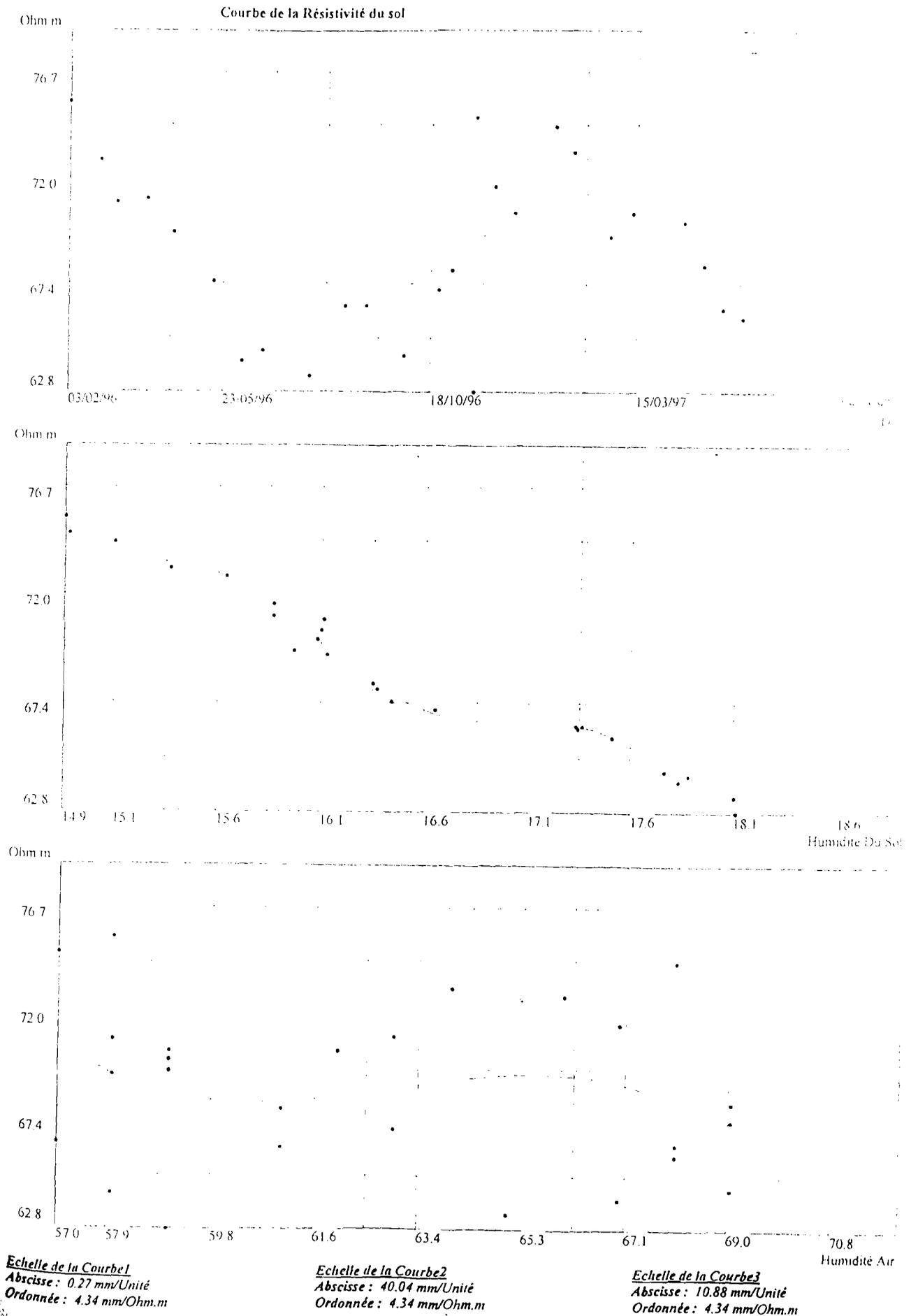
Graphique d'évolution de la résistivité du sol du site: Résistivité = f(Taux des Paramètres de base)



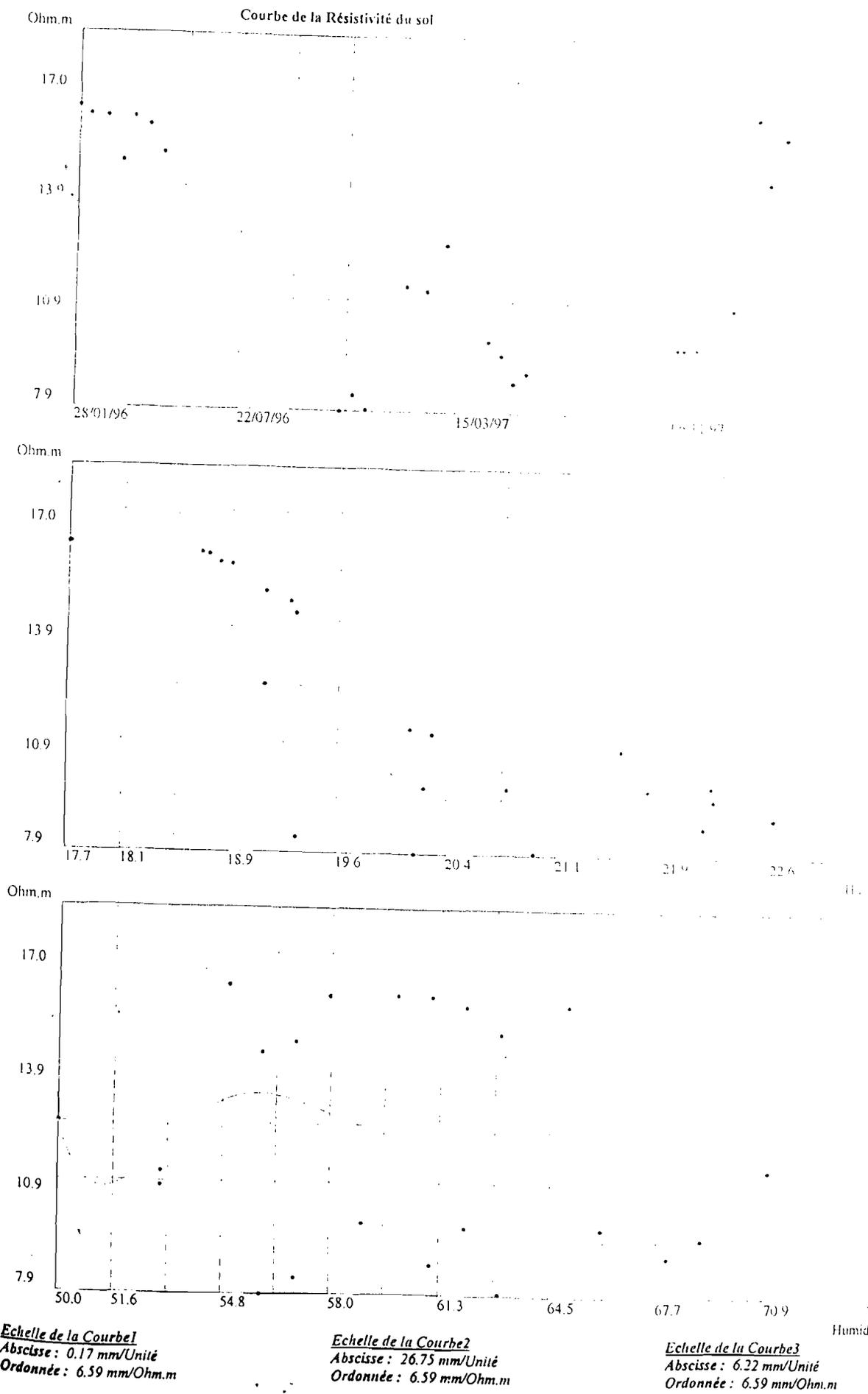
Graphique d'évolution de la résistivité du sol du site: Résistivité = f(Taux des Paramètres de base)



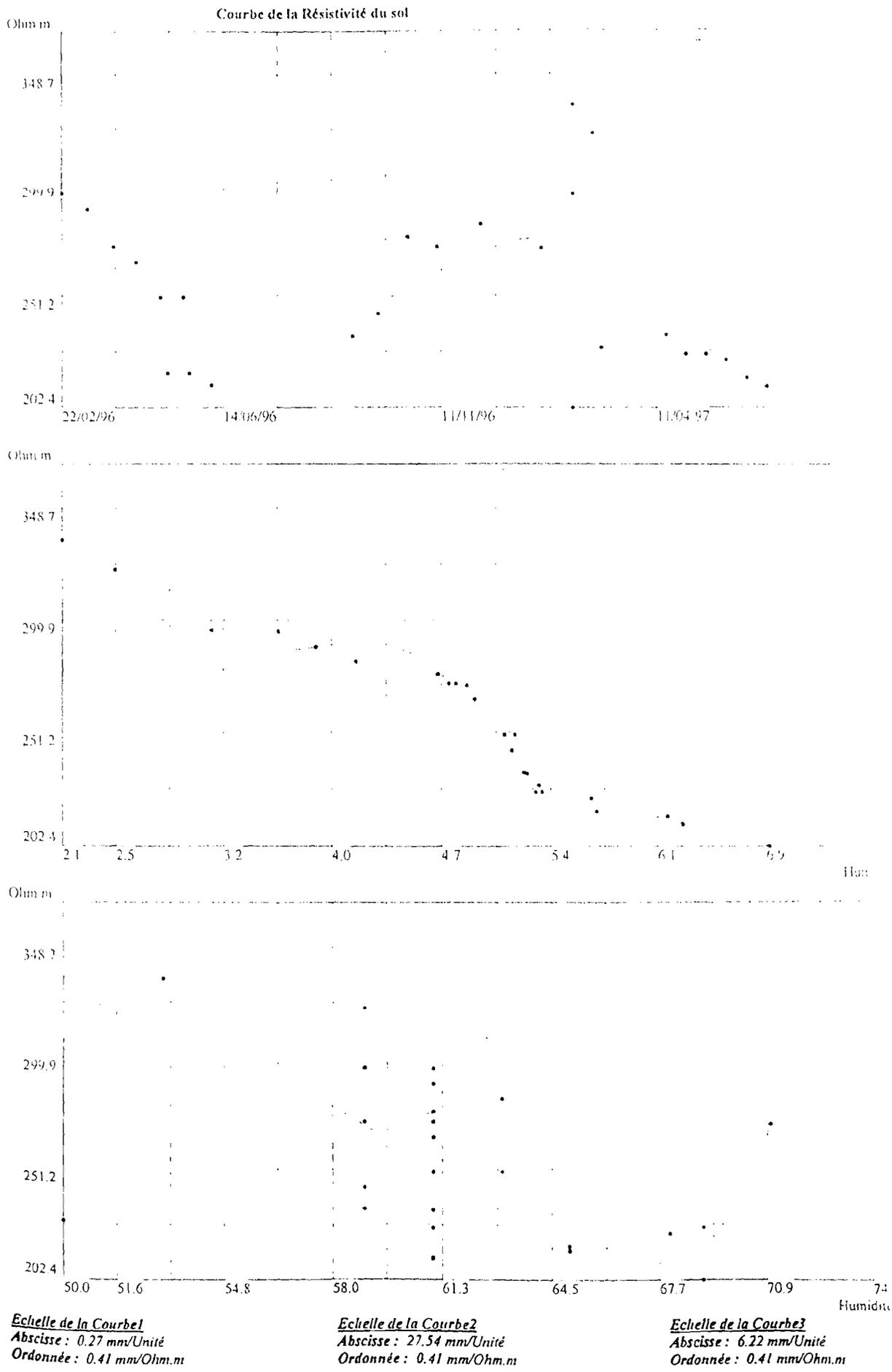
Graphes d'évolution de la résistivité du sol du site: Résistivité = f(Taux des Paramètres de base)



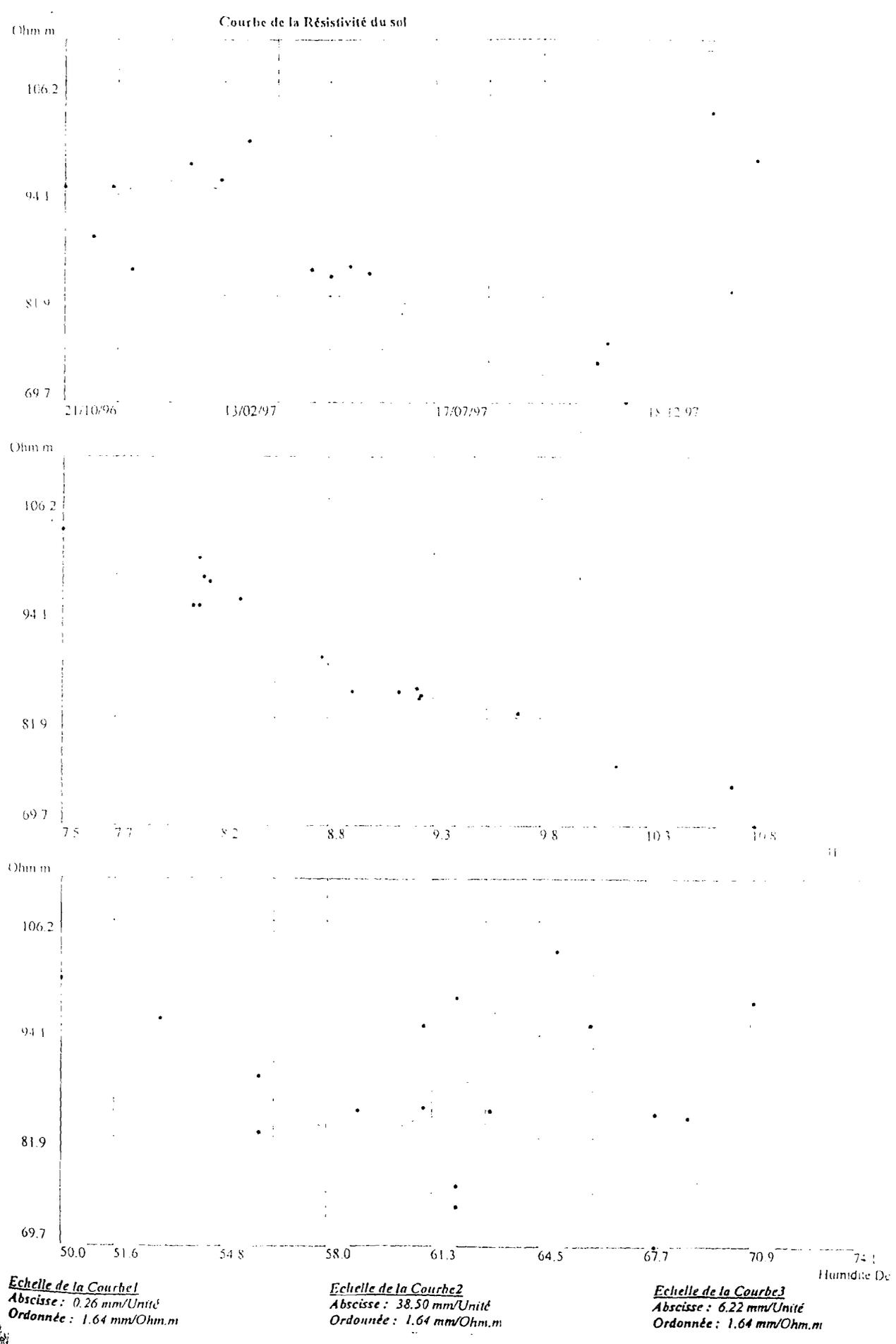
Graphie d'évolution de la résistivité du sol du site: Résistivité = f(Taux des Paramètres de base)



Graphes d'évolution de la résistivité du sol du site: Résistivité = f(Taux des Paramètres de base)



Graphique d'évolution de la résistivité du sol du site: Résistivité = f(Taux des Paramètres de base)



## 4.5 - CONCLUSION

Ce chapitre qui présente les résultats de l'une des recherches appliquées effectuées terrain et qui est d'une importance capitale, montre que :

- les sols de Lomé et ses environs ne sont ni homogènes ni identiques ;
- sur le campus universitaire, il existe deux types de sols ;
- Lomé et ses environs comportent quatre types de sols ;
- le quartier Ahanoukopé , sable mal gradué est saturé et salin.

Enfin cette étude prouve une fois de plus que la connaissance de la résistivité du terrain est indispensable pour la réalisation d'une bonne prise de terre.

- ❖ La résistivité du terrain joue un rôle très important dans la réalisation et la mesure prises de terre.
- ❖ La résistivité du terrain varie d'un point à un autre suivant :
  - La profondeur ;
  - Le taux d'humidité ;
  - Le climat ( la température ) ;
  - Le type de terrain.
- ❖ La réalisation de la prise de terre doit tenir compte du type de terrain en face duquel l'on se trouve afin de mieux réaliser sa préparation.

Aussi, les modèles de sols obtenus constituent-ils des éléments archivaux très importants, sur le plan géographique, météorologique, géotechnique et technique pour les bureaux d'études en matière de conception, de réalisation et implantation des prises de terre.

## CONCLUSION GENERALE

L'utilisation de l'énergie électrique a débuté aux environs de 1900. Progressivement, les installations électriques ont beaucoup évolué et l'électronique est aujourd'hui partout. Pour limiter les inconvénients liés à la jouissance de l'électricité, les normalisateurs du 'Nord' ont porté une attention toute particulière aux dispositions à mettre en œuvre pour assurer la protection des personnes et des biens contre ses effets.

Ainsi dans tous les pays industrialisés, les réseaux et récepteurs BT sont mis à l'abri pour des raisons de sécurité face au danger que représente le courant électrique pour les personnes et les biens. Les objectifs ont été les mêmes, à savoir :

- fixer le potentiel des conducteurs par rapport à la terre en fonctionnement normal ;
- limiter la tension entre les masses des matériels électriques et la terre en cas de défaut d'isolement ;
- mettre en œuvre les dispositifs de protection qui suppriment le risque d'électrisation voire d'électrocution des personnes ;
- limiter les montées de potentiel dues aux défauts d'origine MT ou HT.

Si les trois (3) premiers objectifs ci-dessus énumérés sont du domaine SLT-BT (Système de Liaisons à la Terre en Basse Tension), le quatrième a des répercussions non négligeables sur la sécurité des personnes et des biens en BT.

Le souci d'amener le 'Sud', notamment la zone tropicale et plus particulièrement le TOGO, à rechercher les mêmes objectifs (sécurité des installations électriques) que ceux du 'Nord' comme mentionné ci-dessus a justifié le contexte du travail actuel.

Vu la prolifération des systèmes numériques communicants (informatique, vidéo, automatique, Gestion technique des Bâtiments etc.), il est essentiel qu'un état des lieux en matière des mesures de protection soit fait.

Ceci fut fait et il en ressort que :

- les prises de terre sont conçues et réalisées sous forme empirique et de ce fait ne reposent sur aucune base scientifique ;
- leur installation ne prend pas en compte la spécificité de l'environnement sur le plan géotechnique ;
- les réalisations deviennent plus onéreuses parce que le choix du type de prise ne répond à aucun critère judicieux ;
- les personnes et les équipements électriques ne sont pas du tout protégés ou mal protégés.

A la lumière de ces constats, il est apparu impératif sinon très important et indispensable de rechercher la sécurité des installations électriques pour la protection des personnes, surtout la longévité des équipements très onéreux que les "pays du Sud" acquièrent difficilement.

La détermination de la résistivité du sol est essentielle à l'installation de la prise de terre. Elle varie d'un point à un autre suivant :

- la profondeur ;
- le taux d'humidité ;
- le climat (température, ...) ;
- le type de terrain.

La qualité d'une prise de terre dépendant non seulement de ses dimensions et de la forme mais aussi de la résistivité du terrain dans lequel elle doit être implantée, une partie de la recherche a porté sur l'étude géotechnique des sols de Lomé et de ses environs.

Cette étude géotechnique a montré clairement qu'il existe quatre (4) types de sol :

- sable argileux ;
- sable mal gradué ;
- sable silteux ;
- silts argile peu plastique.

On peut ainsi affirmer que la terre de barre longtemps limitée à la hauteur de TOKOIN, se situe au-delà du quartier d'Agoènyivé.

Vu la nécessité de protéger plus efficacement les biens et les personnes en tenant compte désormais de la nature des sols, nous avons senti le besoin de mettre au point un outil scientifique et fiable pour aider les Ingénieurs et les Techniciens dans la conception et la réalisation pratique des prises de terre. Cet outil est le logiciel **GEPТЕРRE** réalisé en **VISUAL BASIC** sous un environnement **WINDOWS**.

- Cet outil veut permettre une optimisation des prises de terre normalisées (la plupart du temps achetées dans le commerce et qui ne sont pas toujours adaptées aux conditions locales).
- Le logiciel « **GEPТЕРRE** » offre, à ses différents utilisateurs (Ingénieurs, Techniciens, Etudiants et Chercheurs) :
  - la précision,
  - l'analyse statistique des données telluriques,
  - la conception optimale des prises de terre,
  - l'uniformisation de la démarche.

C'est un outil de travail très souple et convivial qui n'est qu'à sa première édition. Il sera amélioré par la suite et converti dans un langage plus évolué. Il existe déjà un outil similaire **CYMGROUND** au Canada. L'originalité de **GEPТЕРRE** réside dans le fait que « **GEPТЕРRE** » a repris les fonctionnalités de **CYMGROUND**, l'ensemble de l'analyse propre aux zones tropicales et dispose de projets archivés.

- Ce travail se situe bien dans le cadre de la recherche appliquée au développement car il vise à sortir de l'empirisme et à mettre un outil informatique performant à la disposition des Ingénieurs et Techniciens Supérieurs intervenant dans les domaines de l'énergie électrique et des télécommunications.

- « GEPTERRE » outre l'option *novice* (option par défaut) dispose de l'option *expert* pour des chercheurs qui s'y connaissent en génie électrique et souhaitent approfondir leur analyse.
- Ce matériel doit enfin permettre d'améliorer la qualité des services aux clients qui pourront désormais choisir en toute connaissance de cause grâce à une meilleure étude de faisabilité, la forme de prise adaptée à leurs besoins.

En dehors des prestations de service, GEPTERRE, dès la publication de nos travaux, pourra aussi être utilisé comme matériel didactique pour la formation de nos élèves Ingénieurs et Techniciens.

A court terme, d'autres travaux de recherches nous permettront d'établir une collaboration avec le Département de Géographie de la Faculté des Lettres, Art et Sciences Humaines (FLASH), la carte de résistivité de la ville de Lomé et ses environs.

A long terme on pourrait envisager d'étendre l'étude des sols et leurs résistivités aux autres régions du pays.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AGUET M., BLECH Ph., IANOVICI M., SCHAEDELI B., : *Influence des prises de terre durant un choc de foudre*. Proc. 14<sup>ème</sup> Conférence Internationale pour la Protection contre la Foudre, Gdansk (Pologne), 1978.
- [2] AGUET M., IANOZ M. : *Haute Tension, Traite d'Electricité, d'Electronique et d'Electrotechnique*. Editions Dunod, 1987.
- [3] ALMARIC J. : *La ferro-resonance*. Cahier Technique Merlin Gerin N° 31.
- [4] ANDERSON R. B., Van NIEKERK H.R., KRONINGER H., MEAL D. R. : *Development and field evaluation of a lightning earth flash-counter*. IEE Proc., 131. Part A, n°2, pp. 118, 1984.
- [5] ANDERSON R. B., Van NIEKERK H.R., KRONINGER H., MEAL D. R. : *Ninth progress report on the development and testing of lightning flash counters in the Republic of South Africa during 1976:1977*. Special report ELEK 122, May 1977.
- [6] APETI Th. : *Circuit et prise de terre*. Communauté Electrique du Bénin, Juin 1994. CFPP, Calavi.
- [7] BEDJA K. : *Contribution à la caractérisation tissulaire par spectroscopie ultrasonore d'antidiffusion*. Thèse de Docteur Ingénieur FDS/UB Lomé (1986).
- [8] BEDJA K., ANIFRANI O., AJAVON A.S. : *Etude d'un guide d'onde à lame diélectrique en rexolite dans le domaine de 4 à 20 Ghz* . Revue CAMES N° 00 Juin 1998 pp.48-53.
- [9] LISHOU C. : *Etude, Modélisation et Simulation en temps réel de systèmes photovoltaïques à stockage d'énergie. Application à la sûreté de fonctionnement de centrales solaires hybrides*. Thèse d'Etat FDS/UCK Dakar (1998).
- [10] BENT R. S., LYONS W. A. : *Theoretical evaluations and initial operational experiences of LPATS (Lightning Position and Tracking System) to monitor lightning ground strike using a time of arrival (TOA) technique*. In reprints, 7th International Conference on Atmospheric Electricity June 3-8, Albany, New-York, Boston, MA American Meteorological Society, 1984, pp. 317 - 324.

- [11] BERGER G., HERMANT A. : *Le phénomène de la foudre en milieu tropical*. R N°9, Octobre 1996, pp. 27-32.
- [12] BERGER K., ANDERSON R. B., KRONINGER H. : *Paramètres des coups foudre*. Electra, N°41, 1975, pp. 23-27.
- [13] BONAMY A. : *La foudre : courant électrique atmosphérique*. EDF/DER, Juillet 1996.
- [14] BONNARD G. : *Origine et nature des perturbations dans les réseaux industriels et de distribution*. Revue Générale de l'Electricité, Janvier 1982.
- [15] BOURGEOIS R., COGNIEL D. : *Mémotech Electrotechnique*. 3<sup>ème</sup> Edition. Castella, 1990.
- [16] BOURIOT B., DE RAEMY E. : *Evaluation des risques encourus par des hommes en cas de foudroiement*. REE N°6, Juin 1997, pp. 64-69.
- [17] BREITKRENTZ B. FRERE A. : *Core balance ground fault protection of motors on a low resistance grounded, medium voltage system*. IEEE transactions vol 31 N°6. Nov. - Dec. 1995, p. 1398 - 1401.
- [18] BEDJA K., AJAVON S. : *Mesure de la phase des lignes images diélectriques dans la bande 26-40 Ghz*. Annales de l'Université du Bénin Série Sciences. Tome XI 1995 pp. 155-156.
- [19] BURKE G. J., MILLER E. K. : *Modeling antennas near to and Penetrating a Lossy Interface*. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP.32, N°10, pp. 1040 - 1049, October 1984.
- [20] BURKLIN G. A. : *Essai d'une nouvelle hypothèse de l'orage et de la foudre*. Proc. 13<sup>ème</sup> Conférence Internationale pour la Protection contre la Foudre, R-5.2, Venise. 1976.
- [21] BONNEFOI P. : *Introduction à la conception de la sûreté*. Cahier Technique Merlin Gerin N°144.
- [22] CCITT : *Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electricity lines*. Geneva 1963.
- [23] CHALMES J. A. : *Atmospheric Electricity*. Int. Series of Monographs in Natural Philosophy, Vol. 11, Pergamon Press, London, 1967.
- [24] CHABI-SIKA K. : *Contribution à la détermination de la distance minimale d'approche entre prises de terre piquet en milieu hétérogène*. Thèse de doctorat, CPU/UNB, Cotonou, 1997.

- [25] COEURDACIER S. : *Les Composants discrets non linéaires*. Editions DUNOD. 1979.
- [26] COMPOINT R. : *Exploitation des réseaux de distribution*, Réédition 1972.
- [27] CONTACT ACTUALITE : *Revue Technique d'Information*. N° 28, Novembre 1989.
- [28] COORDINATION DE L'ISOLEMENT : *Définitions principes et règles*. Publications CEI 71 - 1, 1993.
- [29] LISHOU C., DIEYE NG., ROUAN P., PROTIN L. : *Software Simulation of Renewable Energy Power Plant on the site of Dakar*. ISES Solar World Congress. pp. 245-250 - Harare Zimbabwe, Septembre (1995).
- [30] DAWALIBI F. : *Etude sur modèle réduit d'une prise de terre dans un sol non homogène*, 1972.
- [31] DEJEAN J. P., MUKHEDKAR D., GERVAIS Y. : *Laboratory simulation of Multiple layer soils*. I.E.E.E. Paper N°72 TP 3.
- [32] DICK E. P., ERVEN C. C., HARVEY S. M. : *Grounding system tests for analysis of fault-induced voltages on communication cables*. IEEE Trans. on PAS 98, pp. 2115 - 2125, 1979.
- [33] LISHOU C., ROUAN P., DAKYO B., PROTIN L. : *Application of PETRI nets to the modelling of a wind solar power plant control system*. Proceeding, vol 1 - pp. 186-190. INTELEC 93, Paris (1981).
- [34] Electra : *Guide de l'ingénierie électrique des réseaux internes d'usines*. Technique & Documentation. Edition Lavoisier, TEC & DOC, 1986.
- [35] Electrical Engineer's Reference Book : 14 th Edition Butterworths, 1985.
- [36] ENDRENYI J. : *Evaluation of resistivity test for design of station grounds in non uniform soil*. AIEE Trans, December 1963, p 966.
- [37] FAELTHAMMAR C. G. : *Electric Fields in Space-A Survey*. Planetary Electrodynamics, Gordon and Breach, New York, Vol. 2, Chap. 7.1, 1996.
- [38] GARY C. : *La foudre et les phénomènes orageux*. Revue Générale de l'Electricité (Paris), 1989, N°3, pp. 3 - 11.
- [39] GERVAIS Y. : *Mise à la terre des postes de transformation*. Thèse de Maîtrise. Ecole Polytechnique de Montréal.

- [40] GIAO T. N., SARMA M. P. : *On the potential and fields distribution around a ground electrode for HVDC transmission*. I.E.E.E. paper N° 71 TP 182-PWR, Febr. 1971.
- [41] GIAO T. N., SARMA M. P. : *Effect of two layer Earth on the electric field near HVDC ground electrodes*. I.R.E.Q.
- [42] GOURDIN A., BOUNAHRAT M. : *Méthodes Numériques Appliquées*. 4<sup>ème</sup> Editions TEC & DOC (Lavoisier), Paris.
- [43] GRAIS B. : *Méthodes statistiques*. Editions Dunod (1988).
- [44] GRCEV L. D. : *Computation of Transient Voltages Near Complex Grounding Systems Caused by lightning Currents*. Proc. of IEEE 1992 International Symposium EMC, 92CH3169-O pp. 393 - 399.
- [45] GRCEV L. D. : *Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems*. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11 N°2, April 1996, pp. 815 - 818.
- [46] GREMY F., LETEVRIER. F. : *Eléments de biophysique*. Editions Flammarion, pp. 659-669, 1975.
- [47] GREV L., DAWALIBI F. : *An electromagnetic model for transients in grounding systems*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 5 N°4. November 1990.
- [48] GROSS E. T. B., THAPAR B. : *Grounding grids for high voltage stations*. AIEE trans, October 63, pp. 782-788.
- [49] HABIB P. : *Précis de géotechnique, Applications de la mécanique des sols et des roches*. Editions Dunod, 1982.
- [50] HEIMBACH M., GRCEV L. D. : *Grounding systems analysis in transients programs applying electromagnetic fields approach*. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 12 N°1, January 1997.
- [51] IEEE Standard 81 : *Recommended guide for measuring ground resistance and potential gradients in the earth*, (1980).
- [52] JOHANNET P. : *Comportement des prises de terre en régime impulsionnel : Application de la Transformée de Laplace Inverse (Code LAPIN 3.5)*. EDF, Bulletin de la Direction des Etudes et de la Recherche, Série B, N°2, 1987, pp. 49 - 58.
- [53] KRIDER E. P. : *Physics of lightning today*. RGE, N°6/94, Juin 1994, pp. 2 - 7.
- [54] LACROIX B., CALVAS R. : *Les schémas des Liaisons à la terre en BT (régimes du neutre)*. Cahier Technique Merlin Gerin N° 172.

- [55] LACROIX B., CALVAS R. : *Les schémas des Liaisons à la terre dans le monde en évolution*. Cahier Technique Merlin Gerin N° 173.
- [56] LANOIE R., DESBIENS C., COTE S.P. : *Lightning position and tracking analysis using 'LPATS' of HydroQuebec*. Ninth International Symposium On High Voltage Engineering, August 28 - September 1, 1995, Graz Convention Center, Austria.
- [57] BEDJA K., AJAVON S. LISHOU C. : *GEPTERRE*, Logiciel d'analyse et de dimensionnement des prises de terre dans les zones tropicales. Article soumis à la Revue de Physique Appliquée.
- [58] LAURENT G. : *Guide sur le calcul, l'exécution et la mesure des prises de terre*. RGE- Tome 81 N° 7/8 Juillet /Août.
- [59] LECOURT M. : *Cours d'Electronique 1989*. Université Laval - Quebec (Canada).
- [60] LYTHE R. J., LAGER D. L. : *Numerical Evaluation of Sommerfeld Integrals*. UCRL 51688, Lawrence Livermore Laboratory, 1974.
- [61] MERLIN A. : *La maîtrise du risque foudre : un enjeu pour demain*. REE n°6. Juin 1997, pp. 62-63.
- [62] MERLIN GERIN : *Guide de l'installation électrique*. Janvier 1982.
- [63] Microsoft Visual Basic : *Guide de l'utilisateur - Environnement de développement pour Windows, Version 3.0 & 5.0*, Microsoft Corporation, 1993 & 1998.
- [64] MOUSSA A. M. : *The soil ionisation gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes*. IEEE Transactions on Power Delivery Vol.9 N°3, July 1994, pp.1669 -1677.
- [65] MUKHEDKAR D. : *Ground grid design*. E.I.C. The Engineering journal ». Feb 1968, pp 36.
- [66] KOUTEYNIKOFF P., «GOUPIL» : *Un programme numérique pour calculer la résistance d'une prise de terre dans le sol*. Journées SEE sur l'utilisation de l'informatique pour l'étude des lignes aériennes et la conception de leurs éléments constitutifs, 1978 .
- [67] NAKATA T., TAKAHASI N., FUJIWARA K., SHIRAKI Y. : *3D magnetic field analysis using special elements* ». IEEE Transactions on Magnetics, Vol.26 N°5, Septembre 1990, pp. 2379 - 2381.
- [68] NEKHOUL B., GUERIN C., LABIE P., FEUILLET R. & al., : *A finite element method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol.31 N°3, 1995, pp. 2150 - 2153.
- [69] Norme CEI 364 : *Installation Electrique des bâtiments*.

- [70] Norme CEI 479 : *Effets de courant passant par le corps humain.*
- [71] NFC 13-100 : *Installation Electrique à Haute Tension comprise entre 1 et 22 kV. l'intérieur d'un bâtiment.*
- [72] NFC 13-200 : *Installation Electrique à Haute Tension comprise entre 1 et 63 kV.*
- [73] Norme NFC 15-100 : *Installation Electrique à Basse Tension, (février 1981).*
- [74] OLSEN R. G., WILLIS M. C. : *A Comparison of Exact and Quasi-Static methods for Evaluating Grounding Systems at High Frequencies.* 1995 IEEE/PES Summer Meeting, Portland, OR, IEEE Paper 95, SM 395 - 4 PWRD.
- [75] PAPALEXOPOULOS A. D., MELIOPOULOS A. P. : *Frequency dependent characteristics of grounding systems* ». IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, October 1987.
- [76] PEZZANI R., BERNIER E. : *Une démarche d'intégration fonctionnelle et technologique : le cas des composants de protection pour les réseaux téléphoniques.* REE N°4, Avril 1997, pp. 26 - 31.
- [77] Principes de conception et de réalisation des mises à la terre : EDF/Centre de Normalisation HI15, Janvier 1984.
- [78] Protection de lignes : Code 203002. CFP/PT, France Télécom/Sofrecom Befor 94 1301, Edition 1.
- [79] RAJOTTE Y., FORTIM J. : *Impedance of multigrounded neutrals on rural distribution systems.* IEEE transactions vol.10 N°3, July 1995 p. 1453 - 1459.
- [80] REITER J. R. : *Felder, Ströme und Aerosole in der unteren Troposphäre.* Dr. Dietrich Stein Kopff Verlag, Darmstadt, 1964.
- [81] ROUSSEAU A. : *Choix d'un parafoudre basse tension basé sur l'analyse du risque.* Publifoudre, Soulé. traduit de l'anglais, publié à Power Quality 95. Brém. - Allemagne, 6-9 Novembre 1995.
- [82] ROUSSEAU A. : *Coordination de parafoudres dans les installations basse tension.* Publifoudre, Soulé. Traduit de l'anglais, publié à Intelec 95, La Haye Hollande. 29 Octobre- 1 Novembre 1995.
- [83] TCHOUATE S., YUNKAP K. S., NGUNOAM J. M. : *Etude comparative des procédés artificiels d'amélioration des prises de terre.* Technique et Développement. Vol 4, N° 1, Septembre 1989.
- [84] TCHOUATE S., TONYE E., FOUDET A. : *Determination of electrical potential distribution in grounding systems.* Computers in Industry (1992) pp. 307-315.

- [85] SAUTRIAU F. : *Mise à la terre du neutre dans un réseau industriel Haute Tens.* Cahier Technique Merlin Gerin N° 62.
- [86] SCHWARTZ S. J. : *Analytical expressions for the resistance of grounding system*. AIEE trans., vol. 73, pp 1011.
- [87] SELJESTH H., FEIST K. H., KUUSSAARI M. : *Mise à la terre des postes vue sur les aspects de la sécurité et des interférences.* Electra N° 71, pp. 47 - 69.
- [88] SOBRAL S., EDVAL T., NOVAES O. : *Improvement of transmission Line ground circuit current carrying limit after system interconnections.* IEEE Transaction, vol N°4, October 1993 p 2023-2030.
- [89] Standard graphs for Resistivity Prospecting. European Association of Exploratory Geophysicists (La Haye).
- [90] CADWELL E. : *Le dossier des circuits de terre.* Dossier technique.
- [91] SUNDE E. D. : *Earth conduction effects in transmission systems.* Dover Publications, New-York, 1968.
- [92] Principe de conception et de réalisation des mises à la terre. EDF 1984.
- [93] SWINDLER D. L., FREDERICKS C. J. : *Modified differential ground fault protection for systems having multiple sources and grounds.* IEEE transaction vol. 30 N° 6 Nov. - Dec. 1994 p. 1490 - 1505.
- [94] TABBAGH A., HESSE A., GRARD R.. : *Determination of electrical properties of the ground at shallow depths with an electrostatic quadrupole : field trials on archeological sites.* Geophysical Prospecting 41, 579 - 597, 1993.
- [95] TAGG G. F. : *Earth Resistance.* G.Newnes Ltd.
- [96] TAILLET J. : *Présent et avenir des recherches sur la foudre.* ONERA, tiré à part : T.P. N° 1979-92.
- [97] THAPAR B., PURI K. K. : *Mesh potential in high voltage grounding grids.* I.E.E.E. Trans. on P.A.S. vol N°2, Feb. 67, pp.249.
- [98] THRASHER M. : *A solid state solution.* Telephony, June 12, 1989.
- [99] VENIKOV V. A. : *Theory of similarity and simulation.* Max Donald tech. and scient. London 1969.
- [100] VERMA R., MUKHEDKAR D. : *Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Grounding Grids.* IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, March 1981, pp. 1023 - 1030.

- [101] VERSCHOORE J., QUILLION N. : *Choix du régime du neutre d'un réseau industriel de 1 à 36 kV*. Cahier Technique Merlin Gérin N° 109.
- [102] WEIDMAN C. D., KRIDER E. P. : *The fine structure of lightning return stroke waveforms*. J. Geophys Res. Vol. 83, pp. 6239 - 6247.
- [103] WENNER F. : *A method of measuring earth resistivity*. Scientific paper of the bureau of standards N°258.
- [104] ZEDDAM A. : *Protection des installations de télécommunications contre la foudre*. RGE N°6, Juin 1994. pp. 38 - 44.