

---

# REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE



## CAMES-2023

CANDIDATURE A L'INSCRIPTION SUR LA LISTE  
D'APTITUDE AUX FONCTIONS DE MAITRE DE CONFERENCES  
(LAFMC)

**CTS : SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGENIEUR**

**SPECIALITE : INFORMATIQUE (INTELLIGENCE ARTIFICIELLE)**

---

---

# Mémoire de Thèse de Doctorat

---

---

**Monsieur ACHIEPO Odilon Yapo Mélaine**

**Maître-Assistant**

28 BP 536 Abidjan 28 (Côte d'Ivoire)

Tél. : +225 0708883378

Email : [yapo.achiepo@uvci.edu.ci](mailto:yapo.achiepo@uvci.edu.ci)

---



République de Côte d'Ivoire  
Union - Discipline - Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique

Institut National Polytechnique Houphouët  
Boigny de Yamoussoukro

DOCTORAT THESE UNIQUE



EDP  
École Doctorale Polytechnique

Discipline :

**SCIENCE INFORMATIQUE**

Spécialité :

**Mathématiques Computationnelles et Intelligence Artificielle**

Thème :

**MODELISATION COMPUTATIONNELLE DES PROCESSUS  
DE RESILIENCE SOCIALE**

Présentée par :

**ACHIEPO Odilon Yapo Méline**

Soutenue publiquement le 15 décembre 2016 devant le jury composé de :

<b>YAO Benjamin</b>	Professeur Titulaire, INP-HB, Côte d'Ivoire	<b>Président du Jury</b>
<b>MENSAH Edoété Patrice</b>	Maître de Conférences, INP-HB, Côte d'Ivoire	<b>Directeur de Thèse</b>
<b>MAMA Ouattara</b>	Professeur Titulaire, CIRES, Côte d'Ivoire	<b>Rapporteur</b>
<b>MULLON Christian</b>	Directeur de Recherche, IRD, France	<b>Rapporteur</b>
<b>BABRI Michel</b>	Maître de Conférences, INP-HB, Côte d'Ivoire	<b>Examineur</b>

---

## I) DEDICACE

---

**En hommage à mon père, ESSOA Achiépo Louis Joseph**

**A la mémoire de ma mère, KOFFI Chi-Koffi Agnès**

Quand ils ont demandé au Dalai Lama ce qui le surprenait le plus chez l'être humain, il a répondu :

« L'Homme ! Parce qu'il sacrifie sa santé pour gagner de l'argent. Puis, il sacrifie son argent pour recouvrer la santé. Il est si anxieux du futur qu'il ne vit pas dans le présent. Il vit comme s'il n'allait jamais mourir. Et finalement, il meurt sans jamais avoir vraiment vécu. »

---

## II) REMERCIEMENTS

---

Je tiens à exprimer ici ma gratitude envers les nombreuses personnes qui m'ont aidé et soutenu d'une façon ou d'une autre dans la réalisation de cette thèse. Tout d'abord, mes remerciements vont à l'endroit du Prof. Mensah Patrice, mon Directeur de thèse, dont la disponibilité, les conseils, les orientations et la confiance qu'il m'a accordé m'ont été extrêmement précieux. Que tous les membres du LARIT trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance, en particulier nos différents encadreurs à savoir Prof. Babri Michel, Directeur du LARIT ; Prof. Loum Georges, Directeur du Conseil Scientifique du LARIT qui a eu l'amabilité de corriger minutieusement cette thèse avec toute l'attention qu'on lui connaît et Prof. Oumatnaga Souleymane dont les encouragements et la disponibilité ont été une aide inestimable. Un merci particulier pour tous les membres de l'équipe « Modélisation, Intelligence Artificielle et Bases de Données » (MIADB) du LARIT pour leur aide sans faille, en particulier Dr. N'Guessan Gérard et Coulibaly Tiékoura. Je profite de l'occasion pour remercier sincèrement les responsables de l'INP-HB de Yamoussoukro avec à sa tête Dr. Koffi N'Guessan, le Directeur Général ; ainsi que toute la dynamique équipe de l'Ecole Doctorale Polytechnique (EDP), en particulier Prof. Yao Kouassi Benjamin, Directeur de l'EDP et Dr. Soro Doudjo pour tout le travail qu'ils font avec détermination ; Je n'oublierai pas Prof. Zoueu Thouakesséh Jérémie, Directeur de l'UMRI Electronique et Electricité Appliquée (UMRI 78) dont mon laboratoire d'accueil, le LARIT, fait partie.

Je tiens aussi à remercier tous les membres de l'Unité Mixte Internationale de Recherche sur la Résilience (UMI Résilience) en particulier Prof. Mama Ouattara, Prof. Mahieu Regis, Dr. Émérite Jean-Luc Dubois, Dr. Pierre Morand, Mme Djedje Magali et tous ceux que je n'ai pas pu citer ici. Le fait de m'avoir accueilli et d'avoir intégré le projet de Résiliométrie comme un axe de recherche de l'UMI Résilience m'a donné l'opportunité de participer aux différentes rencontres et colloques internationaux sur la résilience et surtout de bénéficier de la très grande expertise des membres de cet unité. Qu'ils trouvent encore l'expression de toute ma gratitude. Un merci particulier à Dr. Alice Odounfa qui a bien voulu mettre à ma disposition les données sur l'observatoire de la résilience dans la ville de Bouaké, fruit de plusieurs années de travail ; Je n'oublierai pas Nathalie Rabemalanto pour les applications sur les données de Madagascar au cours de mon séjour en France. Un merci tout particulier à Dr. Christian Mullon pour avoir pris le temps de corriger intégralement cette thèse et m'avoir fait bénéficier de ses nombreuses années d'expérience en tant que Mathématicien travaillant sur les questions de modélisation de la résilience. Le séjour qu'il m'a offert pour travailler avec lui à Bondy m'a permis d'améliorer considérablement ce travail. Enfin, je ne peux clore ces remerciements sans en adresser à mes enfants pour ces années de privation et surtout à ma femme, qui n'a cessé de m'encourager tout au long de ce travail. Merci également à Monnet Rodatine, Agroéconomiste, qui a bien voulu lire cette thèse et y apporter son point de vue.

---

## III) RESUME

---

### Résumé

La résilience est un concept systémique, inobservable et multidimensionnel. Issue de la physique des matériaux dans laquelle elle désigne la capacité d'un système à résister aux chocs, la notion de résilience s'est étendue à de nombreux autres domaines. Ces dernières années, face à l'instabilité politique de nombreux pays, doublée de la crise financière qui a secoué le monde entier, l'usage de la résilience dans les sciences sociales est devenu une préoccupation majeure. La résilience étant perçue ici comme la capacité d'un système à rebondir face à un choc ayant engendré une rupture dans les habitudes sociales. Cependant, l'étude des processus de résilience sociale est confrontée à des difficultés de modélisation. L'objet de cette thèse est donc de proposer des modèles adaptés à la mesure, à l'analyse et à la simulation des processus de résilience dans les sciences sociales. Plus précisément, cette thèse vise à poser les fondements d'une discipline de modélisation de la résilience sociale, baptisée « Résiliométrie », dont l'objectif est de proposer des adaptations des modèles computationnels existants à la résilience sociale.

L'ensemble des travaux nous a permis de proposer une nouvelle discipline, la résiliométrie, qui comprend une terminologie, une théorie, un ensemble de modèles et une méthodologie. D'abord, des outils de représentation des processus de résilience et une typologie des acteurs intervenant dans les processus de résilience ont été proposés. Ensuite, des modèles de mesure de la résilience ainsi qu'une théorie de caractérisation mathématique de la résilience, appelée théorie stochastique de la résilience, ont été proposés. Puis les travaux ont donné lieu à de nombreux modèles permettant d'atteindre divers objectifs dont la caractérisation des individus traumatisés, la compréhension de la dynamique des processus de résilience, l'analyse des causes et effets les plus significatifs chocs traumatiques, l'analyse des espoirs individuels à la résilience, la détermination des actions les plus efficaces pour accroître la résilience des individus et la simulation de l'impact des politiques de résilience sur la situation de individus. Enfin, une méthodologie globale pour effectuer une étude de la résilience, du moins par l'approche résiliométrique, a été proposée ainsi qu'une application des méthodes développées sur des données issues de l'observatoire de la résilience chez les populations adultes de Bouaké suite à la crise ivoirienne.

**Mots clés :** *Résiliométrie, Résilience Sociale, Modèles à Variables Latentes, Modèles d'Equations Structurelles, Modèles Graphiques Probabilistes, Apprentissage Artificiel, Statistique Multidimensionnelle, Systèmes Multi-Agents.*

## Abstrat

Resilience is a systemic, unobservable and multidimensional concept. Originated from the physics of materials where it refers to the ability of a system to withstand shocks, the concept of resilience has reached many other areas. In these recent years, in face of political instability that has affected many countries, coupled with the financial crisis that shook the world, the use of resilience in social sciences has become a major concern. Here, resilience is seen as the ability of a system to bounce back from a shock that has caused a rupture in the social habits. However, the study of social resilience process faces modeling challenges. The purpose of this thesis is to propose models for the measurement, analysis and simulation of resilience processes in the social sciences. Specifically, this thesis aims to lay the foundations of a modeling discipline of social resilience, called « Resiliometrics », whose objective is to propose adaptations of existant computational models for social resilience.

All the work allowed us to propose a new discipline, resiliometrics including a terminology, a theory, a set of models and a methodology. First, several tools to represent the processes of resilience and a typology of the actors involved in the process of resilience were proposed. Then, models for measuring resilience and a mathematical theory of resilience characterization, called the stochastic theory of resilience, were proposed. The work resulted in a number of models for achieving various goals, including characterizing traumatized individuals, understanding the dynamics of resilience processes, analyzing the most significant causes and effects of traumatic shocks, analyzing Individual hopes to resilience, determining the most effective actions to increase the resilience of individuals and simulating the impact of resilience policies on the situation of individuals. Finally, a comprehensive methodology for carrying out a resilience study, at least by a resiliometrics approach, has been proposed as well as an application of the methods developed on data from the observatory of resilience in the adult populations of Bouaké following the Ivorian crisis.

**Keywords :** *Resiliometrics, Social Resilience, Latents Variables Models, Structural Equation Modeling, Probabilistic Graphical Modeling, Machine Learning, Multidimensional Statistics, Multi-Agents Systems.*

---

---

## IV) TABLE DES MATIERES

---

---

i) Dédicace.....	2
ii) Remerciements.....	3
iii) Résumé.....	4
iv) Table des matières.....	6
v) Sigles et abbréviations.....	8
vi) Liste des figures.....	9
vii) Liste des tableaux.....	13
viii) Liste des algorithmes.....	14
INTRODUCTION GENERALE.....	16
PARTIE I : LES FONDEMENTS DE LA PROPOSITION D'UNE RÉSILIOMÉTRIE.....	21
Chapitre 1 : Les processus de résilience sociale.....	22
1.1) Les schémas traumatiques des processus de résilience.....	23
1.2) Le schéma comportemental des processus de résilience.....	25
1.3) L'ontologie des processus de résilience.....	30
Chapitre 2 : Les fondements des modèles résiliométriques.....	35
2.1) Les modèles d'équations structurelles à variables latentes.....	35
2.2) Les aspects algorithmiques de l'approche PLS.....	38
PARTIE II : LES METHODES DE BASE DE LA PROPOSITION D'UNE RÉSILIOMÉTRIE.....	46
Chapitre 3 : La mesure et la caractérisation de la résilience.....	47
3.1) Les modèles de mesure de la résilience.....	48
3.2) La théorie stochastique de la résilience.....	54
3.3) L'identification des états traumatiques latents.....	66
Chapitre 4 : L'identification des profils et des relations.....	75
4.1) Le calcul des profils des états psychologiques.....	76
4.2) L'identification des causes des chocs traumatiques.....	81
4.3) La détection des interactions entre les dimensions.....	92
PARTIE III : LES MODELES AVANCES DE LA PROPOSITION D'UNE RÉSILIOMÉTRIE.....	104

Chapitre 5 : L'analyse de la dynamique des processus de résilience.....	105
5.1) Les transitions entre les états de vulnérabilité.....	105
5.2) La perception de la souffrance et états de vulnérabilité.....	113
5.3) Les réseaux bayésiens.....	124
5.4) L'analyse des actions de résilience .....	136
Chapitre 6 : L'analyse de la dynamique d'évolution des individus.....	140
6.1) Le calcul des trajectoires d'espoir à la résilience.....	140
6.2) Les systèmes multi-agents .....	150
6.3) Les modèles de dynamique individuelle .....	156
PARTIE IV : L'APPLICATION PRATIQUE DE LA PROPOSITION D'UNE RÉSILIOMÉTRIE.....	159
Chapitre 7 : La pratique de la modélisation résiliométrique .....	160
7.1) Le protocole de collecte de données en Résiliométrie .....	160
7.2) Les éléments d'analyse résiliométrique .....	166
7.3) Les analyses résiliométriques sur données statiques.....	170
Chapitre 8 : Les analyses résiliométriques sur données de panels.....	182
8.1) Les analyses de base sur données de panels .....	184
8.2) L'analyse de la dynamique des états de vulnérabilité .....	195
8.3) L'analyse des espoirs individuels à la résilience.....	198
CONCLUSION GENERALE.....	204
ANNEXES .....	207
Annexe A : Rappels sur la théorie de la mesure.....	207
Annexe B : Références des publications de la thèse.....	209
Annexe B : Implémentation des outils de base en R.....	210
Annexe C : Quelques résultats des simulations.....	213
Annexe D : Extrait du questionnaire « adulte » de l'observatoire de Bouaké .....	214
BIBLIOGRAPHIE .....	216

---

## V) SIGLES ET ABBREVIATIONS

---

<b>CART</b>	: Classification and Regression Tree
<b>CCPR</b>	: Carte Comportementale des Processus de Résilience
<b>CTPR</b>	: Carte Traumatique des Processus de Résilience
<b>ECSI</b>	: European Customer Satisfaction Index
<b>FI</b>	: Fonctions Institutionnelles
<b>GSCA</b>	: Generalized Structural Component Analysis
<b>HCD</b>	: Hypothèse des Capacités Décroissantes
<b>HMM</b>	: Hidden Markov Models
<b>INP-HB</b>	: Institut National Polytechnique Houphouët Boigny
<b>IRD</b>	: Institut de Recherche et Développement
<b>LARIT</b>	: Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunication
<b>LCM</b>	: Latent Class Models
<b>LGCM</b>	: Latent Growth Curve Modeling
<b>LISREL</b>	: Linear Structural Relationships
<b>LRREM</b>	: Laboratoire de Recherche en Electronique et Electricité Appliqués
<b>MCDL</b>	: Modèles de Croissance Douce Linéaire
<b>MCDQ</b>	: Modèles de Croissance Douce Quadratique
<b>MCI</b>	: Modèles à Causes Indépendantes
<b>MCL</b>	: Modèles à Causes Liées
<b>MDP</b>	: Modèles Dynamiques Perceptuels
<b>MDI</b>	: Modèles de Dynamique Individuelle
<b>MDT</b>	: Modèles de Dynamique Transitionnelle
<b>MGP</b>	: Modèles Graphiques Probabilistes
<b>MES</b>	: Modèles d'Equations Structurelles
<b>MESVL</b>	: Modèles d'Equations Structurelles à Variables Latentes
<b>MGSL</b>	: Modèles Génétiques à Structures Latentes
<b>MIADB</b>	: Modélisation, Intelligence Artificielle et Bases de Données
<b>MIMIC</b>	: Multiple Indicators Multiple Causals
<b>MDM</b>	: Modèles Dynamiques de Mesure
<b>MMR</b>	: Modèles de Mesure de la Résilience
<b>MSM</b>	: Modèles Statiques de Mesure
<b>MVA</b>	: Modèles de Variables d'Actions
<b>PLSPM</b>	: Partial Least Square
<b>PLSPM</b>	: Partial Least Square Path Modeling
<b>RàPC</b>	: Raisonnement à Partir de Cas
<b>RB</b>	: Réseaux Bayésiens
<b>RFPC</b>	: Regression on First Principal Component
<b>SMA</b>	: Systèmes Multi-Agents
<b>TSR</b>	: Théorie Stochastique de la Résilience

---

---

## VI) LISTE DES FIGURES

---

---

Figure 1 : Schéma traumatique des processus de résilience .....	23
Figure 2 : Schéma comportemental des processus de résilience.....	26
Figure 3 : Ontologie des processus de résilience .....	31
Figure 4 : Catégories de modèles d'équations structurelles à variables latentes.....	35
Figure 5 : Le modèle ECSI estimé par l'approche PLS sur des jeux de données .....	37
Figure 6 : Graphe associé à un modèle d'équations structurelles à variables latentes.....	38
Figure 7 : Structure d'une relation réflexive .....	39
Figure 8 : Structure d'une relation formative.....	40
Figure 9 : Structure d'une relation MIMIC.....	40
Figure 10 : Exemple de relations entre variables latentes.....	41
Figure 11 : Exemple de modèle statique sans interactions .....	49
Figure 12 : Exemple de modèle statique avec interactions .....	50
Figure 13 : Exemple de modèle dynamique sans interactions.....	51
Figure 14 : Exemple de modèle dynamique avec interactions.....	52
Figure 15 : Exemple d'arbre de décision appliqué à la pratique du golf.....	76
Figure 16 : Exemple de modèle de causes indépendantes à effets indépendants.....	82
Figure 17 : Exemple de modèle de causes indépendantes à effets liés.....	83
Figure 18 : Exemple de modèle de causes liées à effets indépendants.....	84
Figure 19 : Exemple de modèle de causes liées à effets liés .....	85
Figure 20 : Exemple de données structurées en dimensions .....	92
Figure 21 : Exemple de chromosome codé sur 20 bits.....	99
Figure 22 : Principe de déroulement d'un algorithme génétique.....	100
Figure 23 : Exemple d'opération de croisement en un point.....	101
Figure 24 : Exemple d'opération de mutation à un bit.....	101
Figure 25 : Exemple de chaîne de Markov.....	108
Figure 26 : La structure de transition entre les états de vulnérabilité .....	111
Figure 27 : Exemple de modèle de Markov caché .....	114

Figure 28 : Exemple de structure temporelle d'un modèle dynamique perceptuel.....	120
Figure 29 : Automate interne d'un modèle dynamique perceptuel .....	121
Figure 30 : Relations entre états observés et états cachés dans les MDP .....	122
Figure 31 : Catégories de modèles graphiques probabilistes.....	125
Figure 32 : Exemple de graphe décrivant un processus .....	125
Figure 33 : Exemple de tables de probabilités dans un réseau bayésien .....	128
Figure 34 : Exemple de représentation causale .....	128
Figure 35 : Exemple de relation causale.....	129
Figure 36 : Types de connexions entre trois nœuds.....	130
Figure 37 : Exemple de réseau bayésien avec GeNIes .....	135
Figure 38 : Exemple de graphe d'un modèle d'actions statiques .....	137
Figure 39 : Exemple de graphe d'un modèle d'actions dynamiques.....	138
Figure 40 : Exemple de modèle d'actions statiques.....	139
Figure 41 : Structure type de base d'un modèle de courbe de croissance latente.....	141
Figure 42 : Exemple de modèle de croissance douce linéaire .....	143
Figure 43 : Principales formes de courbes de croissance linéaire.....	144
Figure 44 : Formes de courbes de croissance à évolution constante .....	145
Figure 45 : Exemple de modèle de croissance douce quadratique .....	146
Figure 46 : Formes de courbes de croissance quadratique unidirectionnelle .....	147
Figure 47 : Formes de courbes de croissances quadratiques bidirectionnelles .....	148
Figure 48 : Les types d'utilisation des systèmes multi-agents .....	150
Figure 49 : Structure d'un agent .....	152
Figure 50 : Exemple de communication par partage d'informations.....	154
Figure 51 : Exemple de communication par envoi de messages.....	154
Figure 52 : Exemple d'un SMA dans NetLogo.....	155
Figure 53 : Exemple de code NetLogo .....	156
Figure 54 : Exemple de modèle de dynamique individuelle .....	158
Figure 55 : Extrait de la base de données d'observatoire de la résilience de Bouaké.....	170
Figure 56 : Importance des états de vulnérabilité dans un cas statique.....	173

Figure 57 : Degrés de perte des caractéristiques dans le cas statique en pourcentage.....	174
Figure 58 : Profils des états de vulnérabilité .....	175
Figure 59 : Classes latentes des individus dans un cas statique.....	176
Figure 60 : Résilience dans les états latents pour un cas statique.....	176
Figure 61 : Profils des états latents dans un cas statique.....	177
Figure 62 : Relations identifiées entre les dimensions dans un cas statique.....	178
Figure 63 : Modèle structurel d'un modèle de choc .....	181
Figure 65 : Importance des états de vulnérabilité au temps $t = 2$ .....	186
Figure 66 : Importance des types de résilience au temps $t = 3$ .....	187
Figure 67 : Degrés de pertes de caractéristiques en pourcentage au temps $t = 1$ .....	188
Figure 68 : Degrés de pertes de caractéristiques en pourcentage au temps $t = 2$ .....	188
Figure 69 : Degrés de pertes de caractéristiques en pourcentage au temps $t = 3$ .....	189
Figure 70 : Profils des états de vulnérabilité au temps $t = 1$ .....	189
Figure 71 : Profils des états de vulnérabilité au temps $t = 2$ .....	190
Figure 72 : Profils des états de vulnérabilité au temps $t = 3$ .....	190
Figure 73 : Profils des états latents au temps $t = 1$ .....	191
Figure 76 : Relations entre les dimensions au temps $t = 1$ .....	193
Figure 77 : Relations entre les dimensions au temps $t = 2$ .....	194
Figure 78 : Relations entre les dimensions au temps $t = 3$ .....	194
Figure 79 : Evolution des états de vulnérabilité dans le temps .....	195
Figure 80 : Evolution des pertes de caractéristiques dans le temps .....	195
Figure 81 : Importance initiale des états de vulnérabilité .....	196
Figure 82 : Evolution des transitions entre états de vulnérabilité.....	197
Figure 83 : Evolution des opinions selon les états de vulnérabilité.....	198
Figure 84 : Modèle externe estimé d'un modèle douce linéaire.....	199
Figure 85 : Modèle structurel estimé d'un modèle douce linéaire .....	199
Figure 86 : Modèle externe estimé d'un modèle douce quadratique .....	200
Figure 87 : Modèle structurel estimé d'un modèle douce quadratique .....	200
Figure 88 : Sens d'espoir à la résilience de l'individu 1.....	202

Figure 89 : Vitesse d'évolution de l'espoir à la résilience de l'individu 1 .....	202
Figure 90 : Sens d'espoir à la résilience de l'individu 2 .....	203
Figure 91 : Vitesse d'évolution de l'espoir à la résilience de l'individu 2.....	203
Figure 92 : Résilience de Holling à la proposition d'une Résiliométrie.....	204
Figure 93 : Modèle structurel de mesure dans un cas statique .....	213
Figure 94 : Modèle structurel de mesure dans un cas dynamique.....	213

---

## VII) LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1 : Types de relations de base des processus de résilience .....	32
Tableau 2 : Types prédéfinis dans les processus de résilience.....	33
Tableau 3 : Types de modèles de mesure de la résilience .....	48
Tableau 4 : Paramètres de calcul dans les arbres de décision .....	77
Tableau 5 : Effectifs de transition sur deux périodes.....	111
Tableau 6 : Effectifs de transition sur plus de deux périodes.....	112
Tableau 7 : Matrice de transition entre les états de vulnérabilité .....	121
Tableau 8 : Matrice de relations entre auto-perceptions et états de vulnérabilité .....	122
Tableau 9 : Matrice des états initiaux de vulnérabilité .....	123
Tableau 10 : Variables des études des actions.....	162
Tableau 11 : Variables des études des chocs .....	162
Tableau 12 : Variables des études des processus de résilience.....	163
Tableau 13 : Solutions analytiques de base de la Résiliométrie.....	166
Tableau 14 : Solutions analytiques prototypes de la Résiliométrie.....	167
Tableau 15 : Dimensions de la résilience et indicateurs retenus.....	168
Tableau 16 : Variables retenues pour des rôles particuliers .....	169
Tableau 17 : Estimations de la résilience et ses dimensions dans un cas statique.....	172
Tableau 18 : Estimation statique des degrés de rebond et des états de vulnérabilité.....	173
Tableau 20 : Résultats de significativité des causes .....	181
Tableau 21 : Résultats de significativité des effets .....	181
Tableau 22 : Estimation de la résilience et ses dimensions dans un cas dynamique .....	184
Tableau 23 : Estimations dynamique des degrés de rebond et états de vulnérabilité.....	185
Tableau 24 : Estimations des degrés de perte de caractéristiques dans un cas dynamique .....	187
Tableau 25 : Catégories d'espoir à la résilience .....	201

---

---

## VIII) LISTE DES ALGORITHMES

---

---

Algorithme 1 : PLS Path Modeling de base .....	43
Algorithme 2 : Estimation de la résilience et de ses dimensions .....	53
Algorithme 3 : Calcul des types de capacité et des degrés de rebond.....	63
Algorithme 4 : Calcul de la matrice de Phi-similarité.....	74
Algorithme 5 : Identification des états traumatiques latents .....	80
Algorithme 6 : B-test de significativité des blocs latents.....	87
Algorithme 7 : R-test de significativité des blocs latents.....	90
Algorithme 8 : Identification des causes significatives des chocs.....	91
Algorithme 9 : Modèle Génétique des Structures Latentes .....	103
Algorithme 10 : Calcul de la matrice de transition entre les états de vulnérabilité .....	113
Algorithme 11 : Algorithme de Baum-Welch.....	117
Algorithme 12 : Calcul de la fonction forward .....	118
Algorithme 13 : Calcul de la fonction backward.....	118
Algorithme 14 : Algorithme de Viterbi.....	119
Algorithme 15 : Calcul d'estimation des modèles dynamiques perceptuels .....	124
Algorithme 16 : Prévion des séquences d'états de résilience .....	124
Algorithme 17 : Algorithme PC d'apprentissage de structure.....	134
Algorithme 18 : Modèles d'actions.....	139
Algorithme 19 : Calcul des courbes linéaires d'espoir à la résilience .....	145
Algorithme 20 : Calcul des courbes quadratiques d'espoir à la résilience .....	149
Algorithme 21 : Prétraitement des données et génération des bornes de résilience avec R.....	170
Algorithme 22 : Mise en œuvre d'un modèle statique de mesure avec R.....	171
Algorithme 23 : Typologie en états latents avec modèle statique .....	176
Algorithme 24 : Interactions entre les dimensions pour cas statique .....	178
Algorithme 25 : Génération de données simulées en R .....	179
Algorithme 26 : Mise en oeuvre d'analyse des chocs avec R.....	180
Algorithme 27 : Génération de données dynamiques en langage en R .....	182

Algorithme 28 : Mise en œuvre d'un modèle dynamique de mesure avec R .....	183
Algorithme 29 : Typologie en états latents avec modèle dynamique.....	191
Algorithme 30 : Interactions entre les dimensions pour cas dynamique.....	193
Algorithme 31 : Mise en oeuvre des modèles d'espoir à la résilience avec R.....	201
Algorithme 32 : Spécification des variables à partir de formules en R.....	210
Algorithme 33 : Calcul des positions des manifestes en R.....	210
Algorithme 34 : Ordre optimal des latentes de la matrice structurelle en R.....	211
Algorithme 35 : Calcul de la matrice des relations structurelles en R.....	211
Algorithme 36 : Calcul des paramètres d'un PLSPM à partir des formules en R.....	212
Algorithme 37 : Estimation d'un PLSPM spécifié par des formules en R.....	212

---

# INTRODUCTION GENERALE

---

Le concept de résilience est un concept polysémique, systémique, inobservable et multidimensionnel. Sur le plan étymologique, le mot résilience vient du latin « resiliere » qui signifie « rebondir ». Son étude scientifique est issue de la physique des matériaux dans laquelle elle désigne la capacité d'un système à résister aux chocs, puis s'est étendue à de nombreux domaines dont l'ingénierie, l'écologie, la psychologie, la sécurité alimentaire et les sciences environnementales. Ces dernières années, on assiste à un nombre important de programmes et tentatives de compréhension et de maîtrise de la résilience dans l'ensemble des sciences sociales. Cet intérêt suscite des travaux de recherches aussi bien au niveau théorique que pratique. Loin d'être une mode, la notion de résilience semble s'imposer comme la dimension conceptuelle nouvelle qui, si elle n'est pas prise en compte, rendrait non seulement infructueuse toute tentative de compréhension des chocs et leurs impacts, mais aussi rendrait inefficace les politiques sociales dans le contexte actuel de la mondialisation. En effet, les chocs, qui étaient rares dans les décennies passées, sont devenus les événements de la vie quotidienne avec lesquels il faudrait pouvoir s'accommoder. De nos jours, la survie de tout système social semble donc dépendre de plus en plus de ses capacités de résilience. C'est dans ce cadre que se situe cette thèse dont l'objet est d'apporter une contribution mathématique et informatique aux questions relatives à la modélisation de la résilience dans le domaine des sciences sociales.

## Contexte

La notion de résilience est une notion très ancienne dont l'origine remonte entre le I<sup>er</sup> et le II<sup>e</sup> siècle après Jésus-Christ ([IDR15]). Le sens qui lui est attribué a évolué au fil du temps. Dans les premiers siècles, le concept a été utilisé essentiellement dans le domaine littéraire. Ainsi, Ovide s'en est servi pour désigner l'action de rétrécissement ou le fait de se contracter et Sénèque l'a utilisé pour désigner l'action de bondir ([ALE13]). Parmi ses anciens sens littéraires figure son usage par Cicéron pour désigner le fait de revenir en sautant ([GAF34]). Au XVII<sup>e</sup> siècle, le terme résilience a été utilisé dans le domaine de la lexicographie par Thomas Blount comme étant le fait de revenir sur un mot ([ROG12]). C'est surtout au XIX<sup>e</sup> siècle que le concept a commencé à être un sujet d'étude dans les domaines scientifiques et techniques avec les travaux de Rankine en métallurgie. La résilience désignait alors le retour d'un solide à son état initial suite à une déformation de celui-ci causée par une force extérieure ([RAN58]). Dans cette même période, le concept a resurgit dans le domaine de la littérature grâce à Lewis et Short. D'ailleurs, c'est à ces auteurs que l'on doit l'idée de rebond associée à la résilience et qui est admise encore de nos jours ([LEW79], [LEW90]).

En 1973, la notion de résilience va connaître une renaissance particulière avec les travaux de Holling au point que celui-ci sera considéré comme le père de la résilience en tant que sujet d'étude scientifique. En effet Holling s'est intéressé non seulement à l'usage de la notion de résilience dans le domaine de la physique des matériaux, mais aussi et surtout à la possibilité de son extension en écologie. Il introduit deux définitions de la résilience dans l'optique de

rendre le concept opérationnel ([CSH73]). Selon la première définition, la résilience est perçue comme la résistance aux perturbations. Cette résilience, que Holling qualifie d'ingénierie, peut être mesurée par la vitesse de retour à un état d'équilibre après un choc. Selon la seconde définition opérationnelle, la résilience est assimilée au processus de rebond, suite à un choc, vers une situation de non-équilibre. La résilience se calcule, dans un tel cas, par l'amplitude de la perturbation pouvant être absorbée avant que le système se restructure en quelque chose de nouveau. Holling qualifie cette dernière de résilience écologique. Dès lors, la capacité à absorber une perturbation, l'homéostasie et la persistance sont associés à la notion de résilience. A partir des travaux de Holling, l'étude du concept de résilience va se généraliser dans les sciences environnementales, humaines et sociales. Dans les années 80, les auteurs comme Werner, Smith, Garnezy et Masten se sont penchés sur le concept de résilience dans un cadre purement psycho-sociale. Dans ce contexte, la résilience est définie comme la capacité à faire face à une adversité ou un traumatisme. Elle traduit donc la capacité de continuer à vivre malgré des contraintes psychologiques et sociales ([WER82], [GAR86]).

Depuis le début du XXI<sup>e</sup>, la résilience est devenue une préoccupation d'ordre scientifique, industrielle et politique. En 2002, elle est étudiée dans les systèmes socio-écologiques par Gunderson et Holling. Ces auteurs ont mis en exergue le fait que la notion de résilience pouvait correspondre à une transformation et une auto-réorganisation ([GUN02]). Ce type de travaux scientifiques s'est intensifié à cause des nombreux chocs constatés. En effet, depuis plus d'une décennie, le monde entier fait face à un nombre important de catastrophes naturelles comme le problème des estuaires au Sénégal; de chocs techniques comme la panne d'électricité d'août 2003 aux Etats unis qui a touché 50 millions de personnes dans les États de l'est et du Midwest; de situations d'instabilité politique comme la crise en Côte d'Ivoire; de chocs économiques à l'image de la crise financière qui a secoué le monde entier. En Janvier 2005, à la conférence mondiale sur la prévention des catastrophes organisée par l'Organisation des Nations Unies (ONU), les différents pays ont adopté la déclaration dite de Hyogo ([NAT05a], [NAT05b]). Il s'agit d'un engagement des Etats à développer une culture de résilience dans leurs différentes organisations. Cette forme de résilience, appelée résilience organisationnelle par Benoît Robert ([BER09]) correspond à la capacité de survie des systèmes organisationnels (structures, infrastructures et populations) face aux chocs naturels, technologiques et économiques. Cet engagement a conduit à la mise en place d'importantes politiques de sécurité nationale dont l'objectif est d'accroître la résilience des populations. Dans bon nombre de pays comme les Etats Unis, l'Australie et le Canada, ces politiques sont matérialisées par la création de départements de résilience ayant pour objet de développer et d'implanter des démarches managériales pour accroître la résilience de leurs systèmes. En Afrique, un programme dénommé « Alliance Global pour la Résilience Sahel et Afrique de l'Ouest » (AGIR) a été initié par les pays de l'Union Economique et Monétaire Ouest Africaine (UEMOA) dans le but d'accroître la résilience des cultures et des systèmes de production alimentaire face aux menaces issues notamment du changement climatique. Il s'agit d'assurer la sécurité alimentaire des peuples africains et d'éradiquer la faim.

Dans les milieux universitaires la recherche de moyens d'opérationnalisation du concept de résilience semble s'imposer et réoriente certains travaux de recherche. Le premier aspect est la prise en compte d'un ensemble de comportement dans l'étude de la résilience comme les capacités adaptatives des systèmes mise en relief par Walker, Adger et leurs collaborateurs ([WAL06], [ADG11]). Certains auteurs comme Walker, Cooper et Welch se sont penchés sur les question de gouvernance adaptative, le fait de faire face et de s'adapter aux chocs ([WAL11], [WEL13]). D'autres comme Rogers, Walkate ont abordé la résilience en examinant le fait de rebondir de l'avant à partir des expériences vécues et des leçons apprises ([ROG12], [WAK13]). Parmi ces travaux de plus en plus nombreux, un certain nombre se préoccupe plus de la recherche d'un cadre analytique opérationnel de la résilience. C'est dans cet optique que se situe le projet RIMA mise en place par la FAO et destiné à adapter la modélisation économétrique à l'analyse de la résilience. C'est dans ce même ordre d'idée qu'en 2010, une unité mixte internationale de recherche sur la résilience (UMI Résilience) a été créée conjointement par le Centre Ivoirien de Recherches Economiques et Sociales (CIRES) et l'Institut de Recherche et de Développement (IRD). A la date de rédaction de cette thèse, elle regroupait des chercheurs de la France, de la Côte d'Ivoire, du Sénégal, du Madagascar et du Mali. Les travaux de l'UMI Résilience visent à redéfinir la notion de résilience en termes de capacité de rebond et de processus comme souligné par Dubois et Mama ([JLU14]) et en tant qu'éthique de la souffrance à partir des travaux de Mahieu ([FRA14]). A terme, les recherche devraient permettre de clarifier le sens des termes associés, de formaliser les théories afférentes provenant des disciplines comme la sociologie, l'anthropologie, la psychologie, l'économie, l'écologie, etc. en les intégrant dans un cadre conceptuel et analytique cohérent, d'identifier les différents acteurs impliqués dans les processus de résilience, de définir une ontologie du domaine et de développer des outils mathématiques et informatiques dédiés à la conception des études ainsi qu'à l'analyse et à la modélisation des processus de résilience.

## **Problématique**

Les différentes rencontres mondiales sur la résilience, les rencontres relatives au projet AGIR, les rencontres scientifiques de l'UMI Résilience et beaucoup d'autres encore centrées sur les questions de résilience ont permis de mieux cerner les contours de la notion de résilience quant à son application aux sciences sociales. Cependant, malgré des avancées considérables, les théories développées sont nombreuses et leur harmonisation n'est pas toujours facile. Une analyse des conclusions des différents débats dans ces rencontres et colloques montre que de nombreuses questions restent à élucider. Toutefois, un consensus semble se dégager sur des points essentiels à savoir la nécessité :

- d'avoir une compréhension commune des processus de résilience
- d'identifier les différents acteurs des processus de résilience
- de disposer de modèles de mesure de la résilience et de ses dimensions
- de disposer de modèles de compréhension des processus de résilience
- de disposer de modèles de simulation des processus de résilience

Cette thèse vise essentiellement à définir un mécanisme capable de fournir des réponses mathématiques et informatiques claires aux préoccupations ci-dessus énumérées. La solution proposée consiste à développer une discipline de modélisation propre à l'étude de la résilience. L'objet de cette thèse est de poser les fondements de cette discipline. Il s'agit d'une discipline, que nous proposons de baptiser « Résiliométrie » ([ACH15], [AHM13]). Elle est comparable à l'économétrie, la biométrie et la sociométrie mais adaptée à la modélisation des processus de résilience sociale. Nous proposons de développer la Résiliométrie en nous servant de la panoplie de modèles computationnels existants en Mathématiques Appliquées (modèles mathématiques) et en Intelligence Artificielle (modèles informatiques). La caractéristique principale que nous assignons à la Résiliométrie est de privilégier les modèles dont les résultats s'obtiennent par un processus algorithmique (modèles computationnels) et produisant des résultats sous la forme de graphiques intuitifs et faciles à interpréter par des non spécialistes. Les différents modèles de Résiliométrie pourront être implémentés avec des logiciels et langages informatiques libres afin de les rendre accessibles aux personnes intéressées par la modélisation de la résilience sociale.

### **Approche méthodologique**

Le contenu de cette thèse sera constitué de revues de littérature sur les processus de résilience dans les sciences sociales et de présentation de techniques de modélisation mathématique et informatique retenues. Ces recherches documentaires seront complétées par des travaux plus techniques visant à l'adaptation des techniques de modélisation retenues au contexte de la résilience sociale. Pour les besoins de cette thèse, l'approche de modélisation principale retenue est celle des Modèles d'Equations Structurelles à Variables Latentes. Elle est complétée par d'autres méthodes comme la théorie mathématique de la mesure, les Modèles Graphiques Probabilistes (Réseaux Bayésiens), les Systèmes Multi-Agents (Simulation Multi-Agent), les automates probabilistes (Processus Markoviens), l'Ingénierie des Ontologies et l'Apprentissage Artificiel. L'ensemble du travail de cette thèse est composé de huit (8) chapitres subdivisées en quatre (4) parties de deux (2) chapitres chacune.

La première partie est libellée « Les fondements de la proposition d'une Résiliométrie » et comprend les chapitres 1 et 2. Le chapitre 1 intitulé « Les processus de résilience sociale » présente des outils de cartographie des processus de résilience, une ontologie des processus de résilience et les acteurs intervenant dans les processus de résilience. Ce chapitre vise à faciliter la compréhension des processus de résilience à travers la mise en place d'outils universels simples utilisables quel que soit le processus de résilience étudié. Le chapitre 2 intitulé « Les fondements des modèles résiliométriques » décrit la principale catégorie de modèles sur laquelle s'appuie le développement de la Résiliométrie, à savoir les modèles d'équations structurelles à variables latentes, et principalement l'approche PLS (PLS Path Modeling). Ce chapitre est une revue de littérature sur cette approche de modélisation. Il insiste, de ce fait, sur les aspects théoriques sous-jacents et les algorithmes qui en découlent. La présentation se limite à la base théorique nécessaire au développement initial des modèles résiliométriques. Elle ne vise donc pas à présenter toutes les extensions possibles de ce type de modèles.

La deuxième partie est intitulée « Les méthodes de base de la proposition d'une Résiliométrie » et comprend les chapitres 3 et 4. Le chapitre 3 intitulé « Caractérisation et mesure de la résilience » présente les premiers outils de Résiliométrie. Il s'agit des contributions relatives à la caractérisation mathématique de la résilience et à la mesure de la résilience. Ce chapitre présente la théorie stochastique de la résilience proposée pour permettre un calcul mathématique, via un algorithme approprié, permettant d'analyser les capacités de rebond et les propensions à la souffrance des individus traumatisés. Il présente aussi des modèles de mesure de la résilience qui constituent l'approche résiliométrique de mesure de la résilience et des dimensions de celle-ci. Le chapitre 4 intitulé « Chocs et dimensions de la résilience » présente l'approche résiliométrique permettant d'effectuer l'identification des causes des chocs traumatiques étudiés. Cette approche est basée sur des tests dont l'objectif est de fournir une identification des causes les plus significatives du choc considéré. Le chapitre présente aussi des modèles permettant de comprendre les interactions entre les dimensions.

La troisième partie est libellée « Les modèles avancés de la proposition d'une Résiliométrie » et comprend les chapitres 5 et 6. Le chapitre 5 intitulé « Etats psychologiques latents des individus » présente l'approche résiliométrique permettant de classer les individus selon leurs états cognitifs latents. L'enjeu d'une telle typologie est de permettre l'établissement de profils des individus qui ont l'aptitude à la résilience. Le chapitre décrit aussi l'approche résiliométrique pour calculer les trajectoires que suivent les espoirs que les individus ont de devenir résilient au fil du temps. Le chapitre 6 intitulé « dynamique des processus de résilience » présente l'approche résiliométrique de compréhension des lois régissant la dynamique d'évolution des transitions d'états de résilience des individus dans le temps. Il s'agit d'une part du passage des individus d'un état de résilience à un autre, et d'autre part, des relations entre la perception que les individus ont de leur propre situation de souffrance et leur état effectif de résilience. Ce chapitre présente aussi l'approche résiliométrique pour l'analyse de l'efficacité des politiques et actions de résilience. Il s'agit de modèles destinés d'une part à l'analyse de politiques et actions qui ont déjà été effectuées. D'autre part, ces mêmes modèles sont utilisables pour l'identification des politiques et actions optimales susceptibles d'avoir un impact significativement positif sur la résilience des individus souffrants.

La dernière partie est intitulée « L'application pratique de la proposition d'une Résiliométrie » et comprend les chapitres 7 et 8. Le chapitre 7 intitulé « Pratique de la modélisation résiliométrique » présente les aspects méthodologiques de collecte de données adaptés à une étude de la résilience par l'approche de modélisation résiliométrique. Ce chapitre contient les principes de conception d'une étude de la résilience. Il présente aussi des applications pratiques de la Résiliométrie sur des données relatives à la crise ivoirienne ainsi que des illustrations des principaux algorithmes de Résiliométrie applicables sur des données en coupe instantanée. Le chapitre 8 intitulé « Les analyses résiliométriques sur données de panels » présente les différents types d'analyses et de résultats que l'on peut obtenir lorsque les mêmes données sont collectées sur les mêmes individus sur plusieurs périodes. On y décrit des

extensions des analyses statiques au cas dynamique ainsi que des méthodes utilisables uniquement sur ce type de données.

---

# PARTIE I : LES FONDEMENTS DE LA PROPOSITION D'UNE RÉSILIOMÉTRIE

---

---

# CHAPITRE 1 : LES PROCESSUS DE RESILIENCE SOCIALE

---

La modélisation des processus de résilience passe par la maîtrise des différentes étapes d'évolution de ces processus. Pour mieux cerner les contours, une bonne compréhension de la résilience est plus que nécessaire du point de vue théorique. Dans ce contexte, la résilience n'a pas de définition unique. La définition donnée à la résilience dépend du domaine dans lequel elle est étudiée. Dans le domaine de la physique, la résilience est définie comme la capacité d'un matériel à retrouver son état initial à la suite d'un choc ou d'une déformation ([CSH73]). En écologie, le même terme traduit la capacité d'un écosystème ou d'une espèce à retrouver un fonctionnement et/ ou un développement normal après avoir subi un traumatisme ([SYL05]). En psychologie, elle correspond à la capacité de surmonter un choc traumatique grave pour se refaire une vie et s'épanouir à nouveau ([KOU14a]). Cette thèse s'intéresse principalement à la résilience d'un point de vue social. Dans ce domaine, la définition de l'Ethologue français d'origine juive, Boris Cyrulnik, adoptée par l'UMI Résilience, est celle qui sera retenue. Selon Boris Cyrulnik, la résilience se définit comme la capacité d'une personne, d'un groupe social ou d'un environnement à surmonter une souffrance ; cette capacité dépendant du niveau de vulnérabilité face à la souffrance ([BCY03], [BCY82]). Ainsi, la fragilité de chaque personne aux différents moments de son existence est très importante dans la définition de la résilience. Régis Mahieu soutient que la fragilité traduit nécessairement la perte générale de capacité. Or, cette perte générale de la capacité est, selon Ricœur, la caractérisation éthique de la souffrance, la douleur ayant trait à « des affects ressentis comme localisés ». Il est donc clair que la résilience, en économie et dans les sciences sociales, n'est qu'une éthique de la souffrance. Par conséquent, la résilience désigne la perte d'un élément de la capacité et permet de distinguer les cas de souffrance ([MAH12]).

La résilience socio-économique s'intéresse uniquement aux cas de souffrance. En effet, les cas des personnes, des groupes sociaux ou des environnements non souffrants ne peuvent pas être discernés, ce qui est connu comme étant l'effet Anna Karenine. L'étude et la modélisation de la résilience doit donc se concentrer et se limiter uniquement à tout ce qui concerne les situations de souffrance. La modélisation de la résilience n'est donc qu'une modélisation de la souffrance des individus, des groupes sociaux ou des environnements. Ces modèles doivent prendre en compte des informations sur les modes de résilience, les types et les quantités de souffrance notamment morale, l'origine et la nature de la souffrance ressentie, le partage de cette souffrance avec les autres membres de la société, l'intensité de la souffrance mesurée par des variables d'échelles, les conséquences de ce ressentiment, les moyens perçus pour rebondir en insistant sur les sentiments négatifs comme la vengeance, l'envie, la frustration, etc. Et il est essentiel, d'après Mahieu, qu'une telle modélisation puisse mettre en exergue l'élément perturbant à l'origine de la souffrance ([MAH11]).

## 1.1) LES SCHEMAS TRAUMATIQUES DES PROCESSUS DE RESILIENCE

Les processus de résilience sont très complexes. Dans la littérature actuelle, les mécanismes sous-jacents à la résilience sont décrits de différentes manières. Cependant, si l'on s'en tient à la résilience comme éthique de la souffrance, nous proposons de résumer tout processus de résilience à l'aide de deux représentations :

- ✓ une représentation centrée sur le choc traumatique (schéma traumatique)
- ✓ une représentation centrée sur l'individu traumatisé (schéma comportemental)

### 1.1.1) LES CARACTERISTIQUES DU SCHEMA TRAUMATIQUE

Du point de vue global par rapport au choc, nous proposons de schématiser tout processus de résilience par la figure suivante :

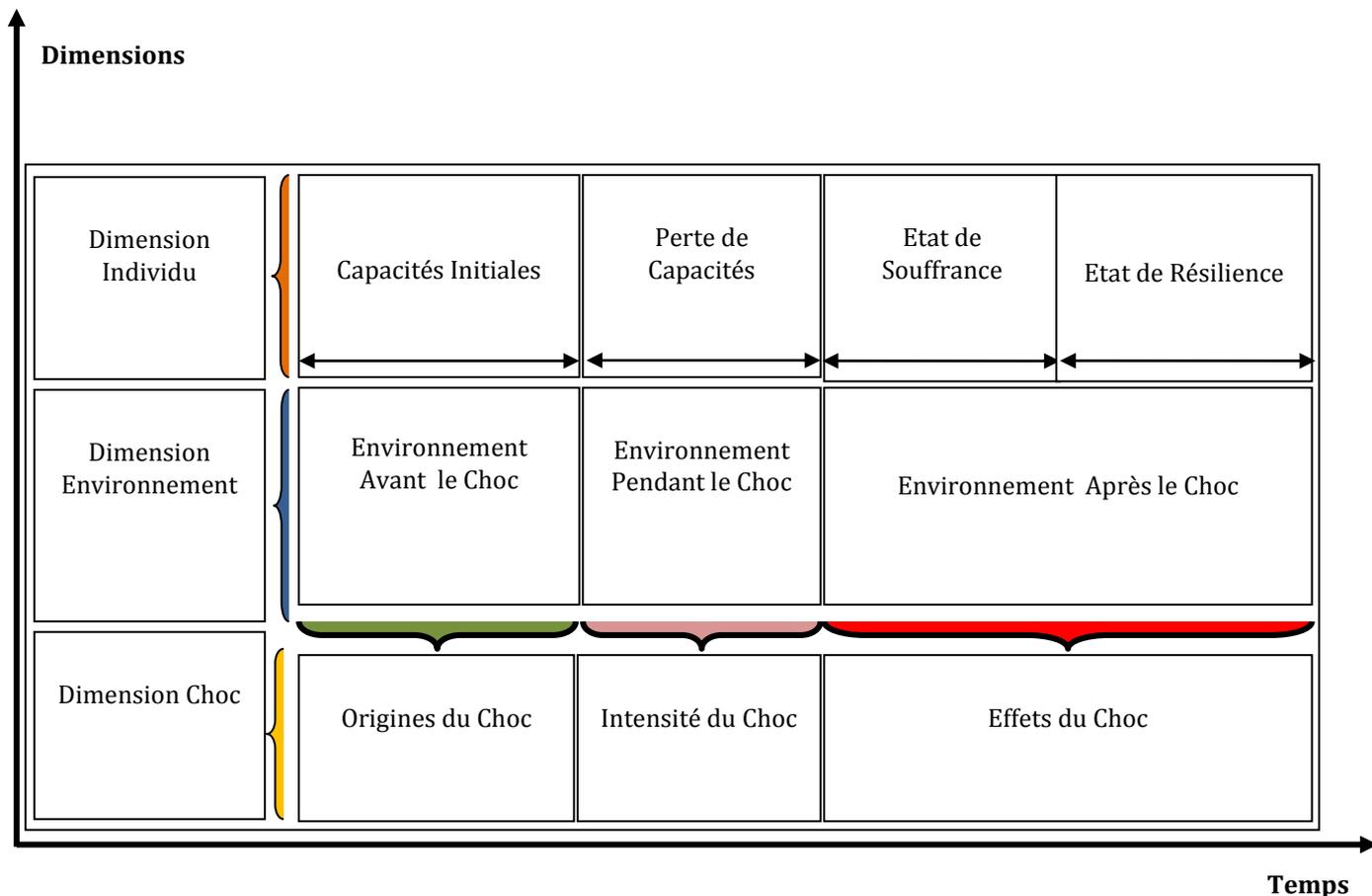


Figure 1 : Schéma traumatique des processus de résilience

Le schéma traumatique des processus de résilience est un outil fournissant une visualisation globale des processus de résilience centrée sur un choc traumatisant. Elle a été élaborée à partir des théories et des descriptions issues de différents travaux sur la résilience

([BCY03], [BCY01a], [BCY01b], [JMA14], [MAH12], [MAH11]). Son premier objectif est de fournir un langage commun de communication et une compréhension uniforme et consensuelle de tout processus de résilience sociale. Le schéma traumatique des processus de résilience met en relief trois principales dimensions à prendre en compte dans la modélisation de la résilience à savoir le choc, l'environnement social et les individus de l'environnement. En plus des différentes dimensions, le schéma traumatique des processus de résilience sert aussi à visualiser la dynamique des différentes dimensions et leurs différentes interactions. Ainsi, on y découvre un découpage temporel des états du choc en trois phases qui sont respectivement la phase des origines du choc, la phase de l'intensité du choc et la phase des effets du choc. Quant à l'environnement social, il passe aussi par trois stades à savoir la situation avant le choc, la situation pendant le choc et la situation après le choc. Enfin, contrairement à la dynamique des deux autres dimensions, les différents individus connaissent quatre étapes d'évolutions qui sont respectivement l'étape des pleines capacités (initialement), le moment de la perte des capacités, la période de la souffrance et la période de résilience.

### 1.1.2) LE CADRE DU TRAUMATISME

#### **La dimension choc**

Un choc provient d'un ensemble de facteurs qui sont à l'origine du choc. Une fois le choc déclenché, la gravité de ces facteurs détermine son intensité. Et lorsqu'il prend fin, il laisse des effets aussi bien sur l'environnement socio-économique que sur les individus évoluant dans cet environnement.

#### **La dimension Environnement**

L'environnement socio-économique, par rapport au choc, passe par trois phases. Une première phase de violence sournoise située avant le choc. Cette phase comporte les éléments non nécessairement visibles préparant au choc, les facteurs dont le choc tire ses origines. Puis, le déclenchement du choc induit une phase dans laquelle l'environnement est caractérisé par des turbulences socio-économiques qui peuvent aller de quelques secondes à de nombreuses années. Enfin, lorsque prend fin les temps de turbulence, l'environnement rentre dans une phase de stabilité relative par rapport à la phase de turbulence.

#### **Les individus traumatisés**

La dimension individu est certainement la plus complexe car la plus analysée avec des théories différentes et selon des axes de réflexions divers. Cependant, la conception de la résilience comme éthique de la souffrance permet de faire le point sur les différents acquis en la matière. Avant le choc, chaque individu dispose d'un certain nombre de capacités. Ici, la notion d'individu doit être comprise au sens statistique du terme. Les individus peuvent être des personnes physiques ou morales, des groupes sociaux ou des environnements physiques. Lorsque survient le choc, chaque individu perd progressivement de ses capacités jusqu'à la fin

du choc. Cette perte de capacité peut être brutale comme relativement lente. Une fois le choc achevé, chaque individu se trouve dans un état de souffrance. Dès lors, l'individu met en jeu trois comportements antagonistes à savoir l'adaptabilité, la résignation et la résilience. Dans le cas où la capacité d'adaptation prime, l'individu arrive à un stade où sa capacité de transformation lui permet de se frayer un chemin pour rebondir. Dès cet instant, il passe de la contenance de sa souffrance au développement d'une résilience.

### **L'hypothèse du cycle cognitif traumatique**

Sur le plan de la réalité sociale, il n'est pas rare de voir des individus ayant perdu des capacités (suite à un licenciement par exemple) s'assimiler eux-mêmes à des enfants qui ont besoin d'être pris en charge. De façon similaire, un sujet humain devenu très âgé est généralement réduit au stade d'enfant aussi bien dans ses besoins quotidiens qu'au niveau psychique et intellectuel. Il est donc réaliste de supposer que, lorsque survient un choc, tout individu traumatisé passe nécessairement par les trois stades identifiés par Cyrulnik ([BCY01b]). Ainsi, chaque individu traumatisé passe d'abord par un stade affectif, puis par un stade intime, et fini par se retrouver dans un stade spirituel : c'est l'hypothèse du cycle cognitif traumatique.

---

## **1.2) LE SCHEMA COMPORTEMENTAL DES PROCESSUS DE RESILIENCE**

---

La compréhension de l'évolution du comportement des individus traumatisés est essentielle dans l'étude de la résilience. Contrairement à le schéma traumatique, le schéma comportemental des processus de résilience prend appui sur une hypothèse fondamentale. L'hypothèse de base qui soutient la cartographie comportementale est que le processus de résilience « naturel » découvert dans le suivi de l'évolution des sujets humains par Boris Cyrulnik n'est pas spécifique au cycle de vie allant de l'enfance à l'âge adulte. Il s'agit plutôt d'un principe général qui est applicable à tout individu ayant subi un choc traumatique. Ainsi, tout individu ayant subi un choc traumatique devient un enfant d'un point de vue cognitif et non d'un point de vue physique.

### **L'universalité du cycle cognitif traumatique**

Les travaux du professeur Cyrulnik ont concerné des sujets humains (enfants) de diverses classes sociales observés pendant trente (30) ans. Même si la plupart des auteurs généralisent les différents stades identifiés et les mécanismes par lesquels ils deviennent résilients, cette généralisation se limite à la nature biologique des sujets (enfance, adolescence et adulte). L'intérêt de l'hypothèse du cycle cognitif traumatique est de relâcher la contrainte « biologique » et de reconsidérer l'interprétation initiale d'un point de vue cognitif (enfance, adolescence et adulte). La substitution de l'interprétation biologique par l'interprétation cognitive établit l'universalité des mécanismes sous-jacents aux processus de résilience sociale.

## L'origine de l'interprétation cognitive du cycle traumatique

L'interprétation cognitive n'est vraiment pas nouvelle, elle a simplement été négligée par les théoriciens de la résilience et n'a pas été sérieusement étudiée. En effet, les travaux du professeur Cyrulnik établissaient une évolution des réponses cognitives et du développement du cerveau en accord avec les réponses sociales observées. Il faudrait donc s'appropriier cette interprétation car son adoption permet d'apporter des réponses à de nombreuses préoccupations, notamment celles liées à l'identification des agents intervenant dans les processus de résilience sociale.

### 1.2.1) LES STADES COGNITIFS

#### Les phases du schéma comportemental

Les phases comportementales par lesquelles passent les individus traumatisés peut être obtenue par la figure suivante :

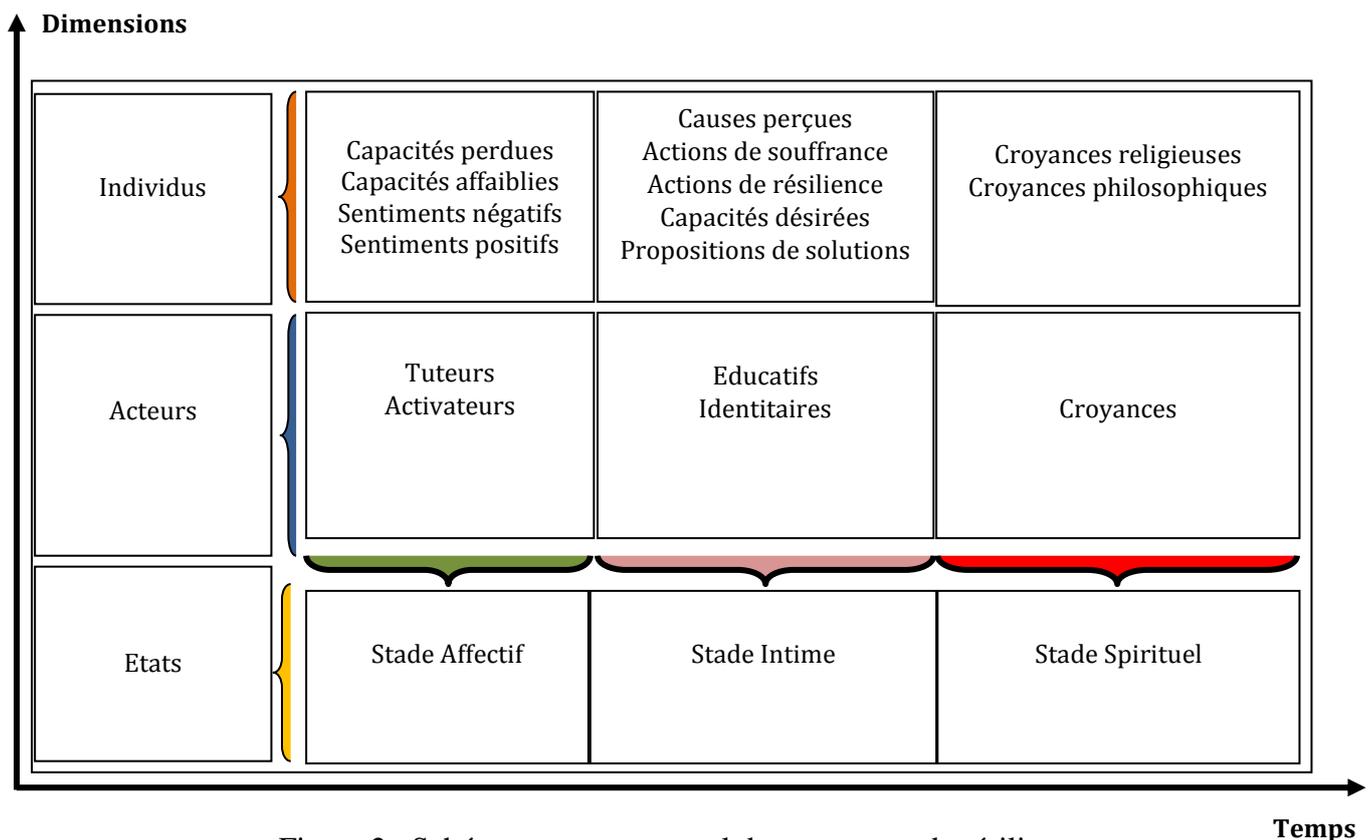


Figure 2 : Schéma comportemental des processus de résilience

Le schéma comportemental des processus de résilience est un outil fournissant une visualisation compacte des processus de résilience centrée sur un individu traumatisé. Elle a été élaborée à partir des théories et des descriptions issues des différents travaux du professeur Boris Cyrulnik sur la compréhension des mécanismes qui gouvernent les processus de résilience chez les sujets humains, depuis l'enfance jusqu'à l'âge adulte en passant par l'adolescence. L'objectif du schéma comportemental des processus de résilience est de fournir un langage commun de communication et une compréhension commune des comportements individuels dans les processus de résilience sociale.

## 1.2.2) LES AGENTS DES PROCESSUS DE RESILIENCE

### **L'identification des agents**

Sur la base de l'hypothèse du cycle cognitif traumatique, l'un des apports de la cartographie comportementale des processus de résilience est l'identification des acteurs intervenant dans les processus de résilience. L'identification des acteurs des processus de résilience est très importante pour une compréhension des mécanismes de résilience sociale. La première tentative en la matière a consisté en une adaptation des secteurs institutionnels classiques utilisés en comptabilité nationale à savoir les institutions financières, les institutions non financières, l'administration publique, les institutions sans but lucratif au service des ménages, les ménages et le reste du monde. Cependant, cette adaptation pose essentiellement trois problèmes. D'abord, un secteur institutionnel comme celui des institutions sans but lucratif au service des ménages peut servir de tuteur de résilience comme d'individu dont la résilience est à étudier. Ensuite, plusieurs secteurs institutionnels peuvent être par exemple des tuteurs de résilience à la fois. Enfin, les secteurs institutionnels sont conçus sans référence à la nature positive ou négative de leurs actions sur l'économie, les individus et l'environnement. Par conséquent, il est évident qu'il est impossible d'adapter les secteurs institutionnels à la résilience dans le but d'identifier les grandes catégories d'acteurs socio-économiques. Du fait des limitations dans l'adaptation des secteurs institutionnels à la résilience, il est nécessaire de changer de paradigme et de s'orienter vers la recherche d'acteurs du point de vue fonctionnel relativement à la résilience en prenant en compte l'impact positif ou négatif de leurs actions sur celle-ci. Dans ce contexte, il vaut mieux parler d'agents de résilience en les regroupant en des Fonctions Institutionnelles (FI) au lieu de secteurs institutionnels (SI). On distingue ainsi six Fonctions Institutionnelles à savoir les agents individus, les agents activateurs, les agents tuteurs, les agents identitaires, les agents éducateurs et les agents de croyance.

### **Les agents individus**

Les agents individus sont les agents dont on étudie la résilience pour un choc traumatique donné. Il en existe quatre (4) types à savoir les personnes (physiques), les groupes (groupes de personnes physiques), les personnes morales (structures) et les espaces

(zones géographiques). Avant le choc, les individus disposent d'un certain nombre de capacités. Mais lorsque survient un choc traumatique, certaines capacités sont affaiblies et d'autres perdues ; ce qui met l'individu dans un état de souffrance relativement accentué selon la gravité des pertes subies. Ces capacités peuvent être aussi bien d'ordre économique que sanitaire, moral, etc. La souffrance met l'individu dans un état affectif dans lequel les émotions priment sur la raison. Dans cette phase, le besoin d'un ou plusieurs tuteurs est essentiel car la sensibilité de l'individu à la souffrance et aux actions pour l'atténuer est très forte. Le besoin de tuteurs devient une préoccupation majeure pendant cette période dont la durée dépend des capacités de l'individu et de l'intensité relative du choc sur l'individu. La disponibilité ou non de tuteurs et les comportements de ces tuteurs créent un ensemble de ressentiments plus ou moins négatifs chez l'individu. Ces ressentiments peuvent être une entrave à la résilience de l'individu en cas de démission des tuteurs (non réponses à l'appel de détresse) ou de prison affectif (aide excessive). Pour que l'individu soit résilient au stade affectif (résilience précoce ou infantile), les tuteurs doivent alterner les soutiens avec des non réponses de façon judicieuse (selon Cyrulnik).

Passée la phase affective, l'individu rentre dans une phase intime dans laquelle le raisonnement prend le dessus. Dans cette phase, l'individu s'est déjà forgé une opinion sur le comportement de la société à son endroit face à sa souffrance et a adopté un ensemble de comportements selon son vécu dans la phase affective. Une fois la phase intime (qui est la plus longue) passée, l'individu entre dans une dernière phase qui est la phase spirituelle. Elle est caractérisée par un intérêt de l'individu marqué pour la spiritualité. Dans cette dernière phase, les individus, n'ayant pas réussi à être résilients dans la phase affective et dans la phase intime, ont encore une chance de l'être selon le niveau de solidité de leurs croyances religieuses ou philosophiques.

## **Les agents tuteurs**

On retrouve dans la littérature sur la résilience, la notion de tuteurs de résilience qui correspond globalement aux auteurs des actions en direction des individus traumatisés en vue d'accroître la résilience. Cependant, la littérature ne fait pas cas de la nature des actions explicites en direction des individus visant à accroître leur souffrance. Cette catégorie d'actions peut être qualifiée d'actions de souffrance en opposition aux actions de résilience qui visent à accroître la résilience. Ainsi, un tuteur n'est pas nécessairement un tuteur de résilience car il peut être aussi un tuteur de souffrance selon les impacts de ses actions sur la résilience des individus traumatisés. La notion de tuteur de souffrance peut sembler dans un premier temps étrange. Mais de nombreuses situations montrent le bien fondé de cette catégorie de tuteurs. En effet, selon Mahieu ([MAH12]), Harsanyi remet en cause le moralisme de l'analyse économique qui s'interdit les actes immoraux. Dans ce même ordre d'idée, Mahieu ([MAH11]) précise que la résilience a le mérite de rappeler comment l'économie produit entre autres de la violence, ce qui fait de la souffrance la principale caractéristique de l'humanité. Et cette souffrance n'est pas exceptionnelle car la tendance perverse des acteurs économiques n'est pas interpersonnelle mais plutôt inhérente à la nature

même de l'économie, qu'elle soit une pure théorie libérale de la production ou une dictature du prolétariat. On peut renchérir en remarquant que la notion de tuteur de souffrance est en accord avec les théories de Boris Cyrulnik car le tuteur peut amener l'individu traumatisé à être résilient (tuteur de résilience) ou pas (tuteur de souffrance) s'il l'emprisonne dans une prison affective ou est absent par rapport aux cris de détresse des individus qu'il est censé soutenir. Il semble aussi opportun de préciser que la notion de tuteur doit aussi être circonscrite car son usage actuel inclut les acteurs éducatifs de la phase intime. Il faudrait limiter le terme tuteur seulement dans les premiers instants du traumatisme (la phase affective) en accord avec Boris Cyrulnik, le tuteur n'étant nécessaire que pour un individu dans une situation d'enfance cognitive, faible et ayant besoin d'une protection et d'un soutien avant de savoir ce qu'il convient de faire par lui-même.

### **Les agents activateurs**

Les théories de base sur la résilience définissent des tuteurs de résilience comme tous ceux qui contribuent d'une manière ou d'une autre à accroître la résilience des individus. Cette vision est très restrictive car trop globale. En effet, certaines actions sont délibérément orientées vers les individus tandis que d'autres impactent les individus de façon indirecte comme des externalités positives ou négatives. C'est aux acteurs de cette deuxième catégorie d'impact que le terme activateur est réservé. Les activateurs mènent des actions sur l'environnement en réponse à un choc aux premiers instants de la survenue de celui-ci. Ces actions sont menées par les activateurs dans le but de se protéger eux-mêmes ou pour profiter du choc et ont pour effet l'accroissement indirect de la résilience ou de la souffrance des individus dans la phase affective. Il est important de comprendre que les activateurs ne visent pas explicitement les individus et leurs actions n'impactent les individus que de façon indirecte. Selon le type d'impact que les actions des activateurs ont sur la résilience des individus (à l'image des tuteurs), on a deux types d'activateurs, à savoir les activateurs de résilience et les activateurs de souffrances.

### **Les agents identitaires**

En cas de démission des tuteurs dans la phase affective, un individu traumatisé arrivé au stade intime voudrait combler l'affection qu'il n'a pas reçue en intégrant des groupes identitaires (appelés groupes affectifs par B. Cyrulnik) avec lesquels il pose des actions négatives l'éloignant de plus en plus d'un état résilient. L'individu qui intègre un groupe identitaire le fait dans le but de pouvoir s'affirmer. Ce groupe identitaire devient pour lui un substitut de l'affection qu'il n'a pas reçue. Mais un groupe identitaire est caractérisé par les comportements et les actes socialement négatifs qui éloignent ses adeptes de la résilience (bandes de malfaiteurs, groupes terroristes, groupes de rébellion, cercle de prostituées, groupe de brouteurs, etc.)

## **Les agents éducatifs**

Lorsqu'un individu traumatisé, à la phase affective, a été mis dans une prison affective (aide ou soutien excessif), cette aide ne pouvant perdurer du fait même de son caractère très ponctuel, à terme, l'individu se sent déboussolé, dépressif et sans repère et adopte un comportement de résignation à l'état intime qui l'éloigne de plus en plus d'un état résilient. Dans ces deux situations, c'est à la société, via les acteurs éducatifs, que revient le devoir de remplacer valablement l'absence de tuteurs. Toutefois, pour être efficaces, les acteurs éducatifs doivent éviter d'apporter une aide directe de type affectif. Ils doivent plutôt jouer un rôle d'encadrement et fournir un espace d'expression dans lequel les individus s'expriment, exercent leurs talents, réalisent leurs rêves et apportent de l'aide et du soutien à la société toute entière. Il s'agit d'une seconde chance de résilience que possèdent les individus n'ayant pas acquis la capacité de résilience à l'état affectif, de devenir résilient (résilience construite, adolescente). Cette responsabilité incombe aux acteurs éducatifs qui, en cas de faillite à leur mission, conduiront la société dans un malaise social profond qui aura pour corollaire l'augmentation des vices sociaux tels que les crimes, les bandes armées, la prostitution, les dépressions, les suicides, les rébellions, le terrorisme, etc.

## **Les agents de croyance**

Les acteurs du stade affectif sont essentiellement les agents de croyance. En effet, lorsque les individus traumatisés arrivent à l'état spirituel sans être résilients, ceux qui auront développé un attachement à des valeurs et croyances spirituelles solides deviendront résilients, que ces croyances soient religieuses ou issues de philosophies de vie. Selon Boris Cyrulnik, les individus qui deviennent résilients à la phase spirituelle (résilience tardive ou adulte) ne sont pas troublés lorsqu'on remet en cause le salut auquel ils croient, leur foi étant bien enracinée et leur procurant une sérénité et une stabilité cognitive leur permettant de rebondir face au traumatisme. Mais ceux qui n'arrivent pas à être résilients, même s'ils ont des croyances, sont déstabilisés et manifestent de la colère ou de l'agressivité dès lors que leur salut, objet de leur croyance est remis en cause. Il s'en suit que les structures sociales garant de telles valeurs et croyances ont une très grande importance dans les processus de résilience, et ce sont ces organisations qui sont désignées sous le terme d'agents de croyances.

---

### **1.3) L'ONTOLOGIE DES PROCESSUS DE RESILIENCE**

---

La résilience sociale n'ayant pas encore connu de consensus sur les concepts et les terminologies utilisés, la nécessité d'une ontologie approuvée par tous est d'une importance capitale. Une ontologie peut être définie, selon Gruber, comme une spécification rendant partiellement compte d'une conceptualisation. Cette spécification implique ou comprend une certaine vue du monde par rapport à un domaine donné. Cette vue est souvent conçue comme un ensemble de concepts, leurs définitions et leurs interactions ([ABD07], [AUD07]). Plus précisément, l'ontologie consiste en la définition d'un ensemble d'objets reconnus comme

existant dans un domaine. Par conséquent, construire une ontologie c'est aussi décider de la manière d'être et d'exister des objets. Les ontologies sont donc des moyens de formaliser des connaissances d'un domaine et de les partager ([SYL05]). Dans la littérature, les ontologies ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche. En Intelligence Artificielle, elles sont utilisées essentiellement pour le développement du web sémantique. Du point de vue technique, les ontologies sont exprimées dans les langages de la logique de description. Le langage de base de description des ressources d'une ontologie sont le Ressource Description Framework (RDF) et son extension à RFD Schéma (RDFS). Cependant, avec les besoins du web sémantique, certains langages formels se sont imposés et ont été standardisés par le consortium WWW. Le langage OWL (Ontology Web Language) est aujourd'hui la référence en matière de spécification des concepts et des relations entre les concepts (ontologie) ; et le langage SPARQL est utilisé comme langage de requête pour interroger les ontologies ([THI11]). Dans le cadre de cette thèse, l'essentiel de l'usage des ontologies se limite à une représentation formelle des processus de résilience.

### 1.3.1) LES ENTITES DE L'ONTOLOGIE

La définition d'une ontologie commence par la spécification des entités du domaine. Une entité peut être définie comme un élément tangible ou intangible, un objet, un concept ou une réalité qui prend « vie » dans l'univers modélisé. Dans le cas des processus de résilience, la figure suivante présente les différentes entités que l'on retrouve dans tout processus de résilience, quel qu'en soit la nature :

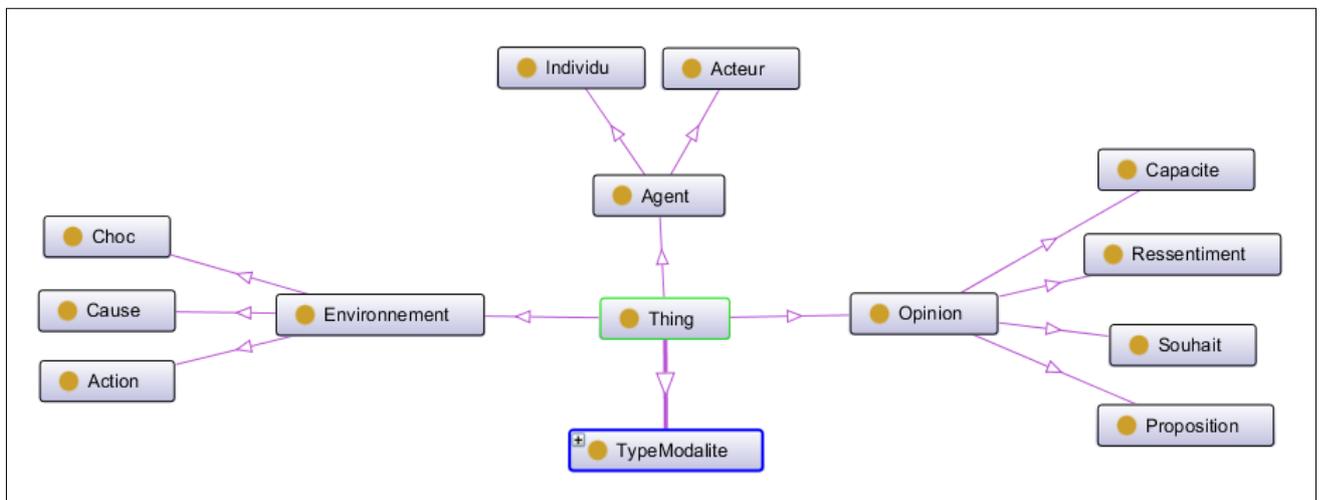


Figure 3 : Ontologie des processus de résilience

Cette figure montre que tout processus de résilience doit comporter un environnement caractérisé par un choc, les causes de ce choc et les actions que les différents agents (individus et acteurs) posent dans cet environnement. L'environnement doit comporter des agents formés

d'une part, par des individus traumatisés et d'autre part, par les acteurs dont les actes influent directement ou indirectement sur les individus. Ces actions peuvent aussi bien accentuer la souffrance des individus qu'augmenter leur propension à la résilience. Enfin, les individus étant les principaux agents des processus de résilience, c'est auprès de ceux-ci que seront collectées les informations de compréhension des processus de résilience. Ces informations concernent aussi bien les informations relatives aux capacités des individus, à leurs ressentiments, leurs souhaits et les moyens par lesquels ils pensent pouvoir sortir de la souffrance (propositions).

### 1.3.2) LES RELATIONS ENTRE LES ENTITES

Dans une ontologie, les différentes entités entretiennent des relations entre elles et disposent de propriétés. Ces caractéristiques sont représentées généralement sous la forme de relations au sens mathématique du terme. Ces relations peuvent donc être fonctionnelles, transitives, admettre une relation inverse, etc.

#### **Les catégories de relations**

Le tableau suivant donne les relations communes aux processus de résilience :

Tableau 1 : Types de relations de base des processus de résilience

<b>Sujet</b>	<b>Relation</b>	<b>Objet</b>	<b>Types propriétés</b>
Choc	Est un choc de type	Type choc	Object
	A une intensité	Numérique	Data
Cause	Est une cause de type	Type cause	Object
	Est une cause du choc	Choc	Object
Acteur	Est un acteur de type	Type acteur	Object
	Est originaire de	Type origine	Object
Individu	Est dans l'état de type	Type état	Object
	Est un individu de type	Type individu	Object
Capacité	Est une capacité de type	Type capacité	Object
	Est possédée par	Individu	Object
Sentiment	Est un sentiment de type	Type sentiment	Object
	Est un sentiment éprouvé par	Individu	Object
Souhait	Est un souhait de type	Type souhait	Object
	Est un souhait de	Individu	Object
Proposition	Est une proposition de type	Type proposition	Object
	Est une proposition de	Individu	Object
Action	Est une action de type	Type action	Object
	Est une action menée par	Agent (act. + indiv)	Object

Les propriétés identifiées dans ce tableau sont celles qui sont communes à tous les processus de résilience, quelles qu'elles soient. Cependant, selon les particularités des processus étudiés, d'autres relations peuvent être ajoutées. Il s'agit généralement des caractéristiques propres au choc considéré, à chaque type d'acteurs et aux individus.

### Les types prédéfinis

Les ontologies comportent des types non primitifs. Dans le cas des processus de résilience, les types de chocs, d'individus, de capacités, d'états, de sentiments, d'acteurs, d'origines et d'actions sont nécessaires dans la définition d'un certain nombre de relations. Le tableau suivant donne les modalités que peuvent prendre ces types :

Tableau 2 : Types prédéfinis dans les processus de résilience

<b>Environnement</b>	<b>Types</b>	<b>Description</b>	<b>Modalités</b>
Choc	Type choc	Catégories possibles de chocs traumatisants	Social, Economique, Environnemental, Technologique
Individu	Type individu	Catégories possibles d'individus concernés par la résilience sociale	Personne, Groupe, Structure, Espace
	Type capacité	Caractérisation des capacités des individus traumatisés	Affaiblie, Perdues, Désirée
	Type état	Etat par lesquels passent les individus traumatisés	Affectif, Intime, Spirituel
	Type sentiment	Nature des ressentiments des individus traumatisés	Positif, Négatif
Environnement	Type acteur	Catégories d'acteurs intervenant dans les processus de résilience	Tuteur, Activateur, Identitaire, Educatif, Croyance
	Type origine	Environnement géographique de vie des acteurs des processus de résilience	Locale, Etrangère
	Type action	Résultats des actions menées par les acteurs des processus de résilience	Résilience, Souffrance

Ces types prédéfinis sont communs à tous les processus de résilience. En général, les relations spécifiques à une catégorie particulière de résilience ne nécessitent pas de types complexes, mais plutôt des types standards comme les nombres entiers, réels et les chaînes de caractères

L'ontologie intègre les schémas traumatique et comportemental des processus de résilience. Elle prend en compte les interactions entre ceux-ci et possède l'avantage d'être un modèle informatique qui peut servir à partager cette conception des processus de résilience à l'échelle mondiale. En effet, l'enjeu des outils proposés dans ce chapitre réside dans le fait qu'ils permettent d'avoir une compréhension uniforme des processus de résilience et de partager cette compréhension dans l'ensemble de la communauté scientifique. Le schéma traumatique, le schéma comportemental et l'ontologie fournissent des niveaux de détails différents et leur utilisation conjointe permet de mieux cerner les processus de résilience. Le schéma traumatique met en relief les grandes étapes de tout processus de résilience, le schéma comportemental décrit les grands stades d'évolution des individus ayant subits un traumatisme et l'ontologie permet de les combiner dans un composant logiciel qui peut servir à développer des applications informatique redistribuables à grande échelle (Bases de données à base ontologique, recherche d'informations pour une étude de la résilienc, développement d'applications basés sur les données des processus de résilience, etc.).

---

# CHAPITRE 2 : LES FONDEMENTS DES MODELES RESILIOMETRIQUES

---

La Résiliométrie se propose d'adapter les modèles issus des Mathématiques Appliquées et de l'Intelligence Artificielle aux réalités des processus de résilience. Toutefois, le développement de la Résiliométrie reste, en grande partie, centré sur les modèles d'équations structurelles à variables latentes, et particulièrement autour de l'approche PLS. Cette classe de modèles présente l'avantage de fournir des outils permettant d'analyser des concepts de haut niveau non directement mesurables comme la pauvreté, la loyauté, le doute, la vulnérabilité, la spiritualité, l'intelligence, etc. Le recours à ces concepts exige qu'ils soient décrits par un ensemble d'indicateurs observables ou mesurables. Ce type de modèles reste très utilisé pour l'étude des relations complexes et de concepts de haut niveau en sciences sociales, notamment en psychologie.

---

## 2.1) LES MODELES D'EQUATIONS STRUCTURELLES A VARIABLES LATENTES

---

Les modèles d'équations structurelles à variables latentes (MESVL) sont une classe de méthodologies statistiques qui permettent d'estimer et d'analyser des relations complexes entre des variables latentes mesurées elles-mêmes au travers de variables observées dites manifestes. Les MESVL comportent un certain nombre de catégories avec des spécificités propres comme le montre la figure suivante:

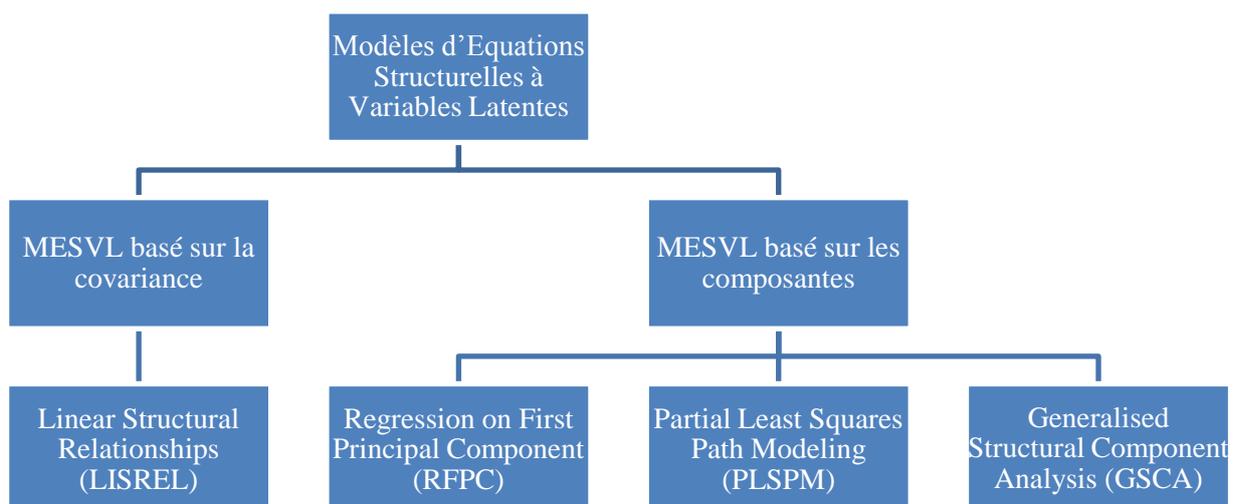


Figure 4 : Catégories de modèles d'équations structurelles à variables latentes

Les modèles d'équations structurelles à variables latentes utilisent un vocabulaire spécifique. Ce vocabulaire cherche à établir une correspondance entre les concepts réels et le formalisme mathématique utilisé. La plupart des notions utilisées correspondent à une réalité concrète.

**Définition 2.1.1 : Variable manifeste**

*Une variable manifeste est une variable pour laquelle on peut fournir directement une mesure. Ce type de variables correspond à des mesures ou des observations (âge, sexe, revenu, information recueillie par une variable d'échelle, etc.)*

**Définition 2.1.2 : Variable latente**

*Une variable latente est une variable dont il est impossible de fournir directement une mesure. Ce type de variables correspond en général à des concepts (résilience, souffrance, vulnérabilité, émergence, etc.)*

Dans les MESVL, chaque variable latente est décrite par une ou plusieurs variables manifestes, le nombre de variables manifestes pouvant varier d'une variable latente à une autre. Pour une variable latente donnée, il est possible de calculer un score à attribuer à chaque individu sur la base des variables manifestes utilisées pour décrire la variable latente en question. Ce score, qui n'est qu'une mesure statistique, est appelé abusivement « estimation de la variable latente ». Il est très important de garder à l'esprit que l'estimation de la variable latente ne peut être considérée comme une quantification absolue du dit concept. Il s'agit simplement d'une représentation scientifiquement acceptable de ce concept inobservable dans un espace mathématique arbitraire. Le seul intérêt d'une telle mesure est de permettre d'effectuer valablement des raisonnements statistiques.

**Définition 2.1.3 : Modèle d'équations structurelles à variables latentes**

*Un modèle d'équations structurelles à variables latentes est un système d'équations reliant d'une part chaque variable latente à ses variables manifestes et d'autre part, les différentes variables latentes entre elles.*

**Définition 2.1.4 : Modèle de mesure (modèle externe)**

*Le modèle de mesure (ou modèle externe) d'un modèle d'équations structurelles à variables latentes est le sous-modèle du MESVL décrivant les relations entre chaque variable latente et les variables manifestes qui lui sont associées.*

**Définition 2.1.5 : Modèle structurel (modèle interne)**

*Le modèle structurel (ou modèle interne) d'un modèle d'équations structurelles à variables latentes est le sous-modèle du MESVL décrivant les relations entre les différentes variables latentes.*

### Définition 2.1.6 : Graphe associé à un MESVL

Un graphe associé à un modèle d'équations structurelles à variables latentes est un graphe orienté dont les nœuds sont les variables. Dans ce graphe, les nœuds correspondants aux variables manifestes sont représentés par des carrés et ceux correspondants aux variables latentes sont représentés par des cercles. Les arcs du graphe traduisent les relations de causalité entre les différents nœuds.

Un exemple de MESVL utilisé dans le domaine du Marketing est le modèle ECSI (European Customer Satisfaction Model). Une estimation de ce modèle est donnée par la figure suivante:

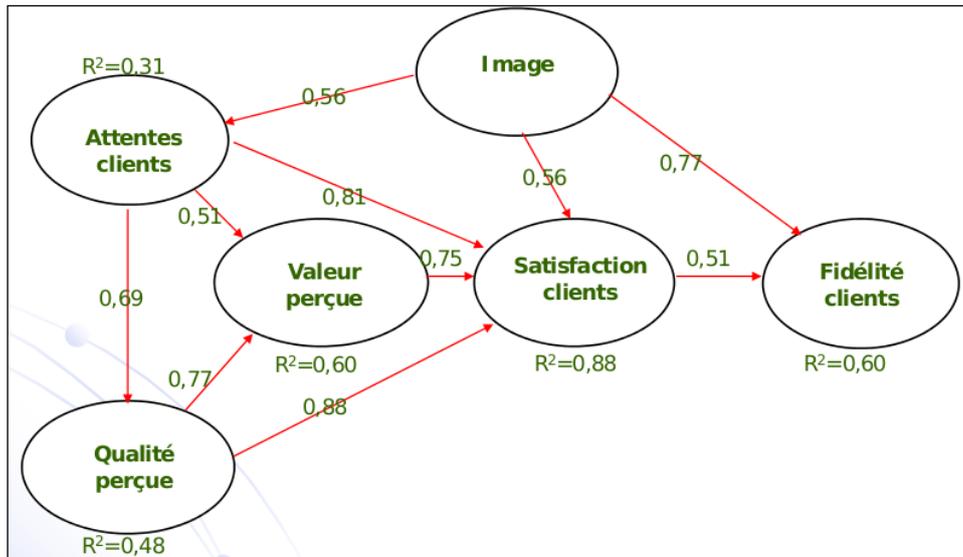


Figure 5 : Le modèle ECSI estimé par l'approche PLS sur des jeux de données<sup>1</sup>

Le graphe associé à un modèle d'équations structurelles à variables latentes est basé sur un ensemble de conventions qui sera utilisé tout au long de cette thèse. Ces conventions concernent aussi bien les nœuds du graphe que leurs arcs. Selon ces conventions, les rectangles désignent les variables manifestes, les cercles sont réservés aux variables latentes et les arcs étant orientés de la variable « cause » vers la variable « effet » ou « conséquence ».

Dans la littérature, les MESVL comprennent deux grandes approches. La première approche, la méthode LISREL, a été développée par Jöreskog en 1970 et la seconde approche, l'approche PLS, a été développée par Herman Wold en 1982. Ces deux approches ont toujours été opposées au point où la méthode LISREL est qualifiée de « modélisation dure » (hard modeling) et l'approche PLS de « modélisation douce » (soft modeling). Le lecteur intéressé par l'approche PLS et ses applications pourra consulter les références [BAH96], [BAY00], [BKL02], [CHI96], [JOR00] et [TEN99]. La thèse de Doctorat de Jacobowics ([EMJ08]) fournit certainement une vision plus générale et plus détaillée de l'approche PLS. La figure

<sup>1</sup><http://cedric.cnam.fr/~saporta/STA201%20-%20Equations%20structurelles%20-%20201%20-%20Jakobowicz.pdf>

suivante donne la structure du graphe correspondant à un modèle d'équations structurelles à variables latentes :

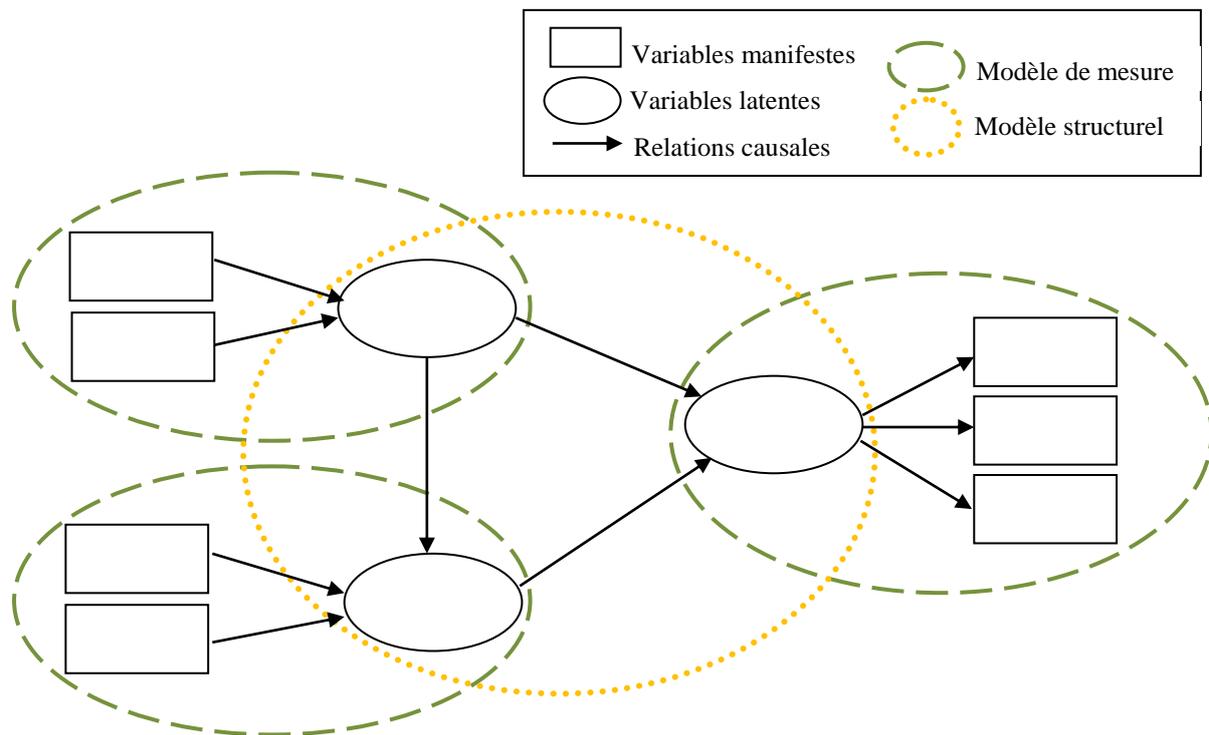


Figure 6 : Graphe associé à un modèle d'équations structurelles à variables latentes

Du point de vue de la théorie des MESVL, l'approche PLS est la version la plus connue et la plus utilisée d'une classe de modèles plus vaste connue sous l'appellation de MESVL basée sur des composantes. Dans cette catégorie de modèles, la causalité est formulée en termes d'espérance conditionnelle linéaire. En plus, cette catégorie d'approches privilégie la recherche d'une optimalité prédictive. Ainsi, plutôt que de valider un modèle sur le plan de la qualité d'ajustement, on utilisera des indices de qualité prédictive proposés par Chin en 1998, Tenenhaus et al. en 2005.

## 2.2) LES ASPECTS ALGORITHMIQUES DE L'APPROCHE PLS

Du point de vue de la Résiliométrie, les MESVL basés sur la covariance (essentiellement la méthode LISREL), ne sont pas appropriés. En effet, ce type de modèles analyse directement la structure de covariance sans fournir une estimation explicite des variables latentes. Par conséquent, pour développer des modèles de mesures de la résilience et de ses dimensions, seuls les MESVL basés sur les composantes seront exploités. Le formalisme des modèles d'équations structurelles à variables latentes basés sur les composantes est donc le formalisme de référence en Résiliométrie. Sur le plan technique, la méthode LISREL exige de fortes hypothèses sur la distribution des données et demande des centaines d'observations; alors que l'approche PLS nécessite très peu d'hypothèses sur la distribution des données et est utilisable dans des situations où l'on ne dispose que d'un petit nombre d'observations.

Ainsi, dans le contexte de la Résiliométrie, seule l'approche PLS est utilisée du fait qu'elle répond à une logique computationnelle et est moins exigeante en terme d'hypothèses distributionnelles, critères fondamentaux en Résiliométrie dans la mesure où les modèles sont a-théoriques. D'une façon générale, tous les modèles d'équations structurelles à variables latentes basés sur les composantes (PLSPM, FPCA, GSCA) ont une formulation mathématique de base très proche. Pour la présentation des bases des MESVL, le formalisme PLSPM sera utilisé. Pour ce faire, posons :

- ✓  $K$  le nombre de variables latentes
- ✓  $\xi_k$  la  $k^{eme}$  variable latente
- ✓  $J_k$  le nombre de variables manifestes associées à  $\xi_k$
- ✓  $x_{ki}$  la  $i^{eme}$  variable manifeste associée à  $\xi_k$  (bloc  $k$ )
- ✓  $N$  le nombre total de variables manifestes (tous les blocs confondus)

Les notations utilisées classiquement dans les MESVL et introduites dans ce chapitre sont propres aux situations de coupes instantanées. Dans le cas de la résilience, les données utilisées peuvent être des données de panels ; ce qui nécessite des versions de notations relativement plus complexes. Par conséquent, selon les chapitres, d'autres notations plus spécifiques seront introduites lorsque cela s'avère nécessaire. Le rôle des notations supplémentaires est de prendre en compte des particularités des méthodes développées dans les chapitres dans lesquels elles seront introduites.

### Spécification du modèle structurel : cas réflexif

Une variable latente est dite réflexive lorsque toutes les variables manifestes sont des conséquences ou des résultats de la variable latente. Une telle relation a la représentation graphique suivante :

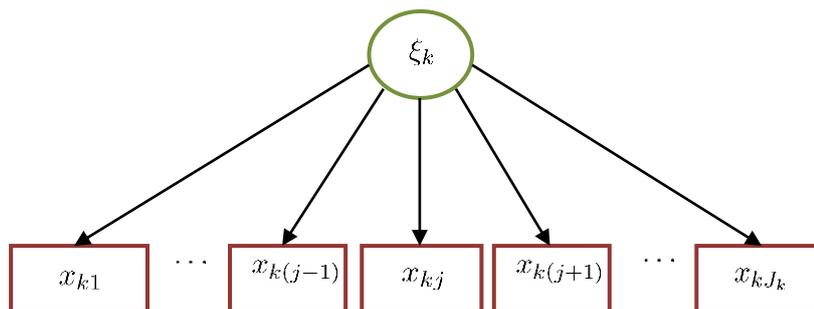


Figure 7 : Structure d'une relation réflexive

Si on note  $\pi_{kj}$  le coefficient (ou loading) représentant la relation entre  $x_{kj}$  et  $\xi_k$  et  $\epsilon_{kj}$ , le terme d'erreur associé à la mesure de  $x_{kj}$ , le modèle de mesure correspondant à un bloc réflexif se formalise sous la forme de  $J_k$  équations du type :

$$x_{kj} = \pi_{kj}\xi_k + \epsilon_{kj}$$

### Spécification du modèle structurel : cas formatif

Une variable latente est dite formative lorsque les variables manifestes sont des causes de la variable latente. Une telle relation a la représentation graphique suivante :

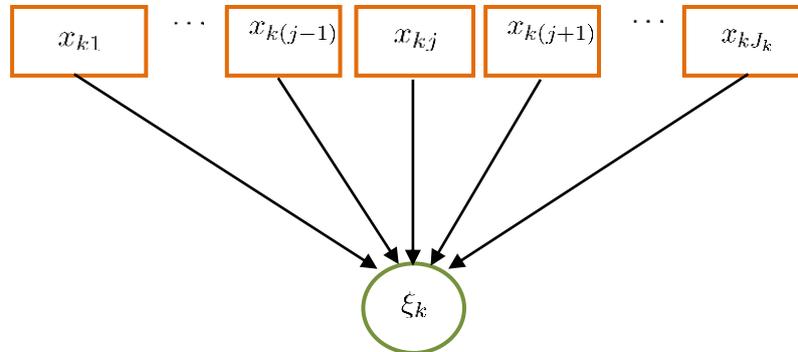


Figure 8 : Structure d'une relation formative

Si on note  $\omega_{kj}$  le coefficient (poids externes) représentant la relation entre  $\xi_k$  et  $x_{kj}$  et  $\delta_k$ , le terme d'erreur correspondant à cette spécification, le modèle de mesure correspondant à un bloc formatif se formalise sous la forme d'une équation du type :

$$\xi_k = \sum_{j=1}^{J_k} \omega_{kj} x_{kj} + \delta_k$$

### Spécification du modèle structurel : cas MIMIC

La variable latente est dite à indicateurs multiples et à causes multiples (MIMIC) lorsqu'elle entretient des relations réflexives avec certaines variables manifestes et formatives avec d'autres. Une telle relation a la représentation graphique suivante :

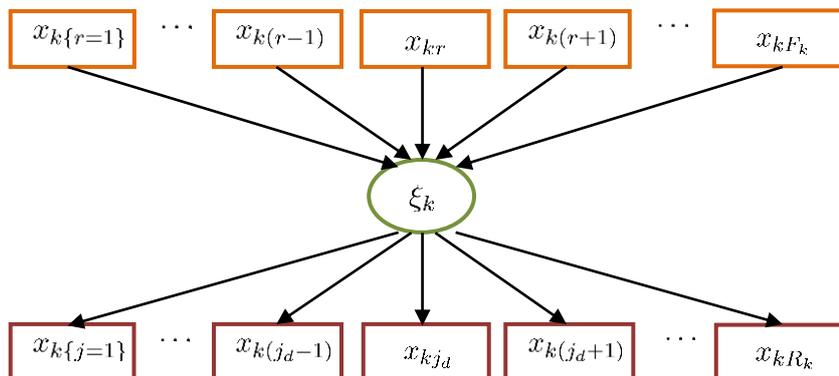


Figure 9 : Structure d'une relation MIMIC

Si on note  $R_k$  et  $F_k$  le nombre de variables manifestes réflexives et formatives respectivement d'un bloc MIMIC, le modèle de mesure utilisant un schéma MIMIC se

formalise sous la forme de  $R_k$  équations de type réflectif et d'une équation du type formatif suivants :

$$x_{kr} = \pi_{kr}\xi_k + \epsilon_{kr}$$

$$\xi_k = \sum_{j=1}^{F_k} \omega_{kj}x_{kj} + \delta_k$$

### Spécification du modèle structurel

La relation entre une variable latente endogène  $\xi_k$  et les variables latentes  $\xi_j$  ( $j \neq k$ ) qui sont censées l'expliquer a la structure graphique suivante :

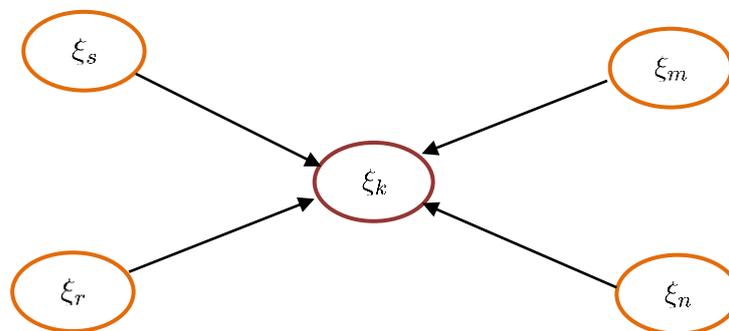


Figure 10 : Exemple de relations entre variables latentes

Si l'on note  $\beta_{jk}$  les coefficients structurels représentant la relation entre  $\xi_k$  et les  $\xi_j$  qui lui sont liées,  $\zeta_k$  l'erreur associée à cette spécification et  $\xi_j \rightarrow \xi_k$  le fait que  $\xi_j$  est une variable explicative de  $\xi_k$ , le modèle structurel est formé d'une équation de la forme suivante :

$$\xi_k = \sum_{\xi_j \rightarrow \xi_k} \beta_{kj}\xi_j + \zeta_k$$

Dans la littérature PLSPM, le modèle structurel, c'est-à-dire les différentes relations entre les variables latentes, peut être estimé par des techniques légèrement différentes. Ces techniques sont appelées des schémas d'estimation.

## Les schémas d'estimation du modèle structurel

Pour présenter les différents schémas d'estimation utilisés dans les modèles PLSPM, considérons les notations suivantes :

- ✓  $\hat{\xi}_k^{ext}$  l'estimation de  $\xi_k$  en utilisant les équations du modèle externe
- ✓  $\hat{\xi}_k^{int}$  l'estimation de  $\xi_k$  en utilisant les équations du modèle interne
- ✓  $\hat{\beta}_{kj}$  l'estimation des coefficients structurels  $\beta_{kj}$
- ✓  $X_k$  le vecteur des variables manifestes  $x_{ki}$  associées à  $\xi_k$
- ✓  $\propto$  l'opérateur d'égalité après standardisation de la valeur correspondante
- ✓  $cfols(y|x)$  le coefficient de régression linéaire simple de  $y$  sur  $x$
- ✓  $cor(x, y)$  le coefficient de corrélation linéaire entre  $x$  et  $y$

En plus de ces notations, considérons l'opérateur  $sign(x)$  permettant de capter le signe de  $x$  et définie par :

$$sign(x) = \begin{cases} +1 & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x = 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

Si l'on suppose connus tous les poids externes  $\omega_{kj}$  reliant les variables latentes à leurs manifestes, l'estimation PLS d'une variable latente endogène se fait par la relation :

$$\hat{\xi}_k^{int} \propto \sum_{\xi_j \rightarrow \xi_k} c_{kj} \hat{\beta}_{kj} \hat{\xi}_j^{ext}$$

Dans cette relation, les coefficients  $c_{kj}$  sont destinés à capter les relations qu'entretiennent les différentes variables latentes entre elles. Ainsi :

$$c_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{si } \xi_j \rightarrow \xi_k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Les coefficients  $\hat{\beta}_{kj}$ , qui sont des estimations des coefficients structurels  $\beta_{kj}$  peuvent être obtenus de trois (3) façons différentes. Dans la théorie PLS, les différentes manières d'obtenir des estimations des coefficients structurels sont appelées des schémas. Ainsi, on a :

- **Schéma centroïde** :  $\hat{\beta}_{kj} = sign(cor(\hat{\xi}_k^{ext}, \hat{\xi}_j^{ext}))$
- **Schéma factoriel** :  $\hat{\beta}_{kj} = cor(\hat{\xi}_k^{ext}, \hat{\xi}_j^{ext})$
- **Schéma structurel** :  $\hat{\beta}_{kj} = \begin{cases} cfols(\hat{\xi}_k^{ext} | \hat{\xi}_j^{ext}) & \text{si } \xi_j \rightarrow \xi_k \\ cor(\hat{\xi}_k^{ext}, \hat{\xi}_j^{ext}) & \text{si } \xi_j \leftarrow \xi_k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

## Les modes de mise à jour des poids d'estimation

L'approche PLS est une approche computationnelle, donc algorithmique. Le jeu d'estimation prend appui essentiellement sur les poids externes  $\omega_{kj}$ . A la première itération, ces poids sont choisis arbitrairement, ce qui permet d'effectuer les premières estimations. Toutefois, pour effectuer les calculs aux itérations suivantes, ces poids sont mis à jour, à chaque itération. Il existe deux (2) manières d'effectuer ces mises à jours. Les différentes manières de mettre à jour les poids externes sont appelées des modes d'estimations. Ainsi, si l'on note  $\omega_k = (\omega_{kj})_{1 \leq j \leq J}$  le vecteur rassemblant tous les poids externes (tout bloc confondu), on a les deux modes d'estimations suivants :

- **Mode A** :  $\omega_k = ({}^t \hat{\xi}_k \hat{\xi}_k^{int})^{-1} ({}^t X_k) \hat{\xi}_k^{int}$

- **Mode B** :  $\omega_k = ({}^t X_k X_k)^{-1} ({}^t X_k) \hat{\xi}_k^{int}$

Quel que soit le mode d'estimation choisi (mode A ou mode B), les différents coefficients sont calculés sous la contrainte que  ${}^t \omega_k {}^t X_k X_k \omega_k = J$ .

## L'algorithme d'estimation PLSPM

L'estimation du modèle PLSPM se fait par l'algorithme PLS. En désignant par  $i$  les différentes itérations, le principe de l'algorithme PLSPM est le suivant :

---

### Algorithme 1 : PLS Path Modeling de base

---

1. *Fixer arbitrairement les poids du modèle externe :*

$$\omega_{kj} = (\omega_{kj})_{i=0}$$

2. *Estimer les variables latentes en se basant sur les poids externes initiaux :*

$$\hat{\xi}_k^{ext} \propto \sum_{j=1}^{J_k} \omega_{kj} x_{kj}$$

3. *Ré-estimer les variables latentes en se basant sur le modèle interne :*

$$\hat{\xi}_k^{int} \propto \sum_{\xi_j \rightarrow \xi_k} c_{kj} e_{kj} \hat{\xi}_j^{ext}$$

4. *Mettre à jour les poids en utilisant le mode A ou le mode B*
  5. *Répéter les étapes 2) et 3) et 4) jusqu'à convergence de l'algorithme*
- 

En théorie, la convergence de l'algorithme est prouvée dans le cas de deux variables latentes. Cependant, même si au-delà de deux dimensions, cette convergence n'est pas prouvée mathématiquement (pas encore démontrée), elle est constatée dans les applications réelles.

## L'estimation du modèle structurel

L'algorithme PLS de base fournit uniquement des scores standardisés pour les variables latentes. Les coefficients structurels estimés  $\hat{\beta}_{kj}$  ne constituent pas des estimateurs définitifs, mais plutôt des poids intermédiaires pour le calcul des scores  $\xi_k^{int}$  des variables latentes  $\xi_k$ . Une fois ces scores disponibles, les coefficients structurels définitifs  $\hat{\beta}_{kj}^{struct}$  sont obtenus grâce à une régression linéaire multiple de scores des variables latentes endogènes sur les scores des variables latentes qui leur sont associés :

$$\xi_k^{int} = \sum_{\xi_j \rightarrow \xi_k} \beta_{kj} \xi_j^{int} + \zeta_k$$

Il est important de noter que l'usage de la régression linéaire multiple (OLS) peut entraîner l'obtention de coefficients de régression négatifs lorsque des variables latentes estimées  $\xi_k^{int}$  présentent une multicollinéarité. Dans ce cas, Tenenhaus ([TEN98]) suggère l'utilisation de la régression PLS<sup>2</sup> en lieu et place de la régression OLS. Toutefois, en Résiliométrie, un tel sens de variation peut être exploité judicieusement pour mettre en exergue des comportements spécifiques à certains individus.

## Les indicateurs locaux de qualité

Il existe, dans la littérature, de nombreux indicateurs de mesure de la qualité du PLSPM. Dans cette partie nous présentons deux de ces indices à savoir la communauté (communality) et la redondance (redundancy).

- **La communauté** : la communauté associée au bloc  $k$  ( $H_k^2$ ) est la proportion de la variance de toutes les variables manifestes  $x_{kj}$  expliquée par la variable latente  $\xi_k$ . Elle évalue la qualité du modèle de mesure du bloc  $k$  et est définie par :

$$H_k^2 = \frac{1}{J_k} \sum_{j=1}^{J_k} \text{cor}^2(x_{kj}, \hat{\xi}_k^{int})$$

- **La redondance** : la redondance associée au bloc  $k$  ( $F_k^2$ ) est la proportion de la variance de toutes les variables manifestes  $x_{kj}$  et latentes  $\{\xi_j | \xi_j \rightarrow \xi_k\}$  expliquée par la variable latente  $\xi_k$ . Elle évalue la qualité du modèle de mesure localisé autour du bloc  $k$ . Si on note  $R_{y \times \{x_1, \dots, x_p\}}^2$  le coefficient de détermination associé à la régression linéaire multiple de la variable  $y$  sur les  $p$  variables  $x_1, \dots, x_p$ , l'indice de redondance associé au bloc  $k$  est donné par :

$$F_k^2 = H_k^2 \times R_{\xi_k^{int} \times \{\hat{\xi}_j^{int} | \xi_j \rightarrow \xi_k\}}^2$$

<sup>2</sup> La régression PLS (une technique de régression) est à distinguer de l'Approche PLS (un MESVL)

## La qualité du modèle global

La communauté et la redondance sont des indicateurs de qualité ne permettant que d'évaluer une partie du modèle. Tenenhaus et al (2004) ont proposé un indicateur de qualité globale du modèle PLSPM appelé « Goodness of Fit » (*GoF*). Si on considère l'ensemble des redondances  $H_k^2$  associées à toutes les  $J$  variables latentes  $\xi_k$  (donc des blocs), la moyenne arithmétique des communautés est donnée par :

$$\overline{H}^2 = \frac{1}{J} \sum_{k=1}^J H_k^2$$

De façon similaire, en notant  $E_{endo}$  l'ensemble des variables latentes endogènes, si l'on considère l'ensemble des coefficients de détermination  $R_k^2$  associés à toutes les variables latentes endogènes  $\xi_k \in E_{endo}$ , la moyenne arithmétique des coefficients de détermination est donnée par :

$$\overline{R}^2 = \frac{1}{\text{card}(E_{endo})} \sum_{\xi_k \in E_{endo}} R_k^2$$

**L'indicateur GoF :** L'indicateur Goodness of Fit (*GoF*) est défini comme la moyenne géométrique de la moyenne des communautés de tous les blocs du modèle et de la moyenne arithmétique des coefficients de détermination associés aux variables latentes endogènes. Il fournit une mesure acceptable de la qualité globale du modèle et est défini par :

$$GoF = \sqrt{\overline{H}^2 + \overline{R}^2}$$

---

## PARTIE II : LES METHODES DE BASE DE LA PROPOSITION D'UNE RÉSILIOMÉTRIE

---

---

## CHAPITRE 3 : LA MESURE ET LA CARACTERISATION DE LA RESILIENCE

---

L'une des opérations fondamentales dans l'étude de la résilience est sans aucun doute la construction d'une mesure fiable de celle-ci. Dans la littérature, un certain nombre de travaux relatifs à la mesure de la résilience ont été déjà effectués. Toutes ces tentatives sont menées en considérant la résilience par rapport à la situation d'équilibre qui est la situation avant la survenue du choc traumatique. Selon une synthèse des différentes approches, effectuées dans [CAR11], Rimm et Lawton se servent des théories spectrales de l'algèbre linéaire en utilisant les valeurs propres de la dynamique à l'équilibre comme mesure de la résilience qu'ils calculent par simulation. Quant aux auteurs Ortiz et Wolf, ils proposent d'utiliser le temps de retours dans un état proche de l'état avant perturbations comme mesure de la résilience. Cet indicateur est plutôt lié à l'usage originel de la notion de résilience dans les sciences physiques dans laquelle la résilience est synonyme de reprise de la forme initiale d'un matériau lorsque celui-ci subit une déformation ou un choc (tests de résilience). D'autres travaux sont basés sur la théorie du chaos. C'est dans ce cadre que se situent les travaux de Van Coller et al qui utilisent la taille des bassins d'attraction à l'équilibre comme mesure de la résilience. Toujours selon [CAR11], les travaux de Ludwig et al, basés sur la théorie du chaos, préconisent de prendre, comme mesure de la résilience, la distance aux points de bifurcation. De nombreux travaux relativement récents ont recours à la théorie de la viabilité. En général, cette théorie est utilisée pour fournir une caractérisation mathématique de la résilience. Cependant, sur la base de cette théorie, Sophie Martin a proposé un indicateur de mesure de la résilience basé sur les caractéristiques du noyau de viabilité ([SOP05b]).

Il faut souligner que tous ces travaux, basés sur la notion d'équilibre, définissent la résilience d'une manière particulière afin qu'elle coïncide avec la mesure fournie. Mais aucune d'elle ne cherche à estimer directement la résilience car elle est inobservable par nature, donc pas directement mesurable. Néanmoins, la tendance actuelle est de proposer une estimation directe du concept de résilience en utilisant la théorie statistique des modèles d'équations structurelles à variables latentes (MESVL) à travers l'approche PLS ([AAP13], [CON03], [KOU14b]). Dans le contexte de la résilience, la construction d'un modèle de mesure doit prendre en compte deux éléments essentiels, à savoir, les différentes dimensions de la résilience et les évolutions des variables observées (manifestes) dans le temps. La résilience et ses différentes dimensions sont essentiellement des concepts inobservables et multidimensionnels. La mesure de la résilience et de ses dimensions nécessitent donc une approche de modélisation des systèmes complexes capables de fournir une évaluation des variables latentes. Les modèles que nous proposons se situent donc dans ce cadre et ont l'avantage d'être généraux et plus adaptés à la nature inobservable (latente) et multidimensionnelle de la résilience.

### 3.1) LES MODELES DE MESURE DE LA RESILIENCE

Les modèles proposés sont essentiellement des versions de modèles PLSPM. Toutefois, la prise en compte de la dimension temporelle et des éventuelles interactions complexifient les notations par rapport à l'approche PLS. Pour ce faire, posons :

- ✓  $D$  le nombre de dimensions de résilience prise en compte
- ✓  $T$  l'horizon temporel de mesure de la résilience
- ✓  $N$  le nombre de panélistes utilisés dans la collecte de données
- ✓  $N_{endo}$  le nombre total de variables latentes endogènes du modèle (hors résilience)
- ✓  $n_d^t$  le nombre de variables manifestes du bloc  $d \in [1, D]$  au temps  $t \in [1, T]$
- ✓  $X_{dj}^t$  la  $j^{eme}$  variable manifeste associée à la dimension  $\xi_d^t$  (bloc  $d$ )
- ✓  $x_{dj}^t$  le vecteur de valeurs de la variable manifeste  $X_{dj}^t$  prise par les panélistes
- ✓  $\xi_d^t$  l'estimation de la dimension  $d \in [1, D]$  au temps  $t \in [1, T]$
- ✓  $\xi_d^t$  l'estimation de la résilience avec les informations collectées en  $t$
- ✓  $\xi^{t_1:t_2}$  l'estimation de la résilience avec les informations collectées de  $t_1$  à  $t_2$
- ✓  $\omega_{dj}^t$  le coefficient de la régression de  $\xi_d^t$  sur  $X_{dj}^t$
- ✓  $\delta_d^t$  le terme d'erreur de la régression de  $\xi_d^t$  sur  $X_{dj}^t$
- ✓  $\beta_{dk}^t$  le coefficient de la régression de la dimension  $\xi_d^t$  sur la dimension  $\xi_k^t$
- ✓  $\gamma_{dk}^t$  le coefficient de la régression de la dimension  $\xi_d^t$  sur la dimension  $\xi_k^{t-1}$
- ✓  $\zeta_d^t$  le terme d'erreur de la régression de la dimension  $\xi_d^t$  sur les dimensions  $\xi_k^t$  et  $\xi_k^{t-1}$
- ✓  $\pi_{dj}^t$  le coefficient de la régression de la variable manifeste  $X_{dj}^t$  sur la résilience  $\xi^t$
- ✓  $\nu_{dj}^t$  le terme d'erreur de régression de la variable manifeste  $X_{dj}^t$  sur la résilience  $\xi^t$
- ✓  $\theta_d^t$  le coefficient de la dimension  $d$  dans l'équation de la résilience au temps  $t$
- ✓  $\mu^t$  le terme d'erreur associé à l'équation de la résilience au temps  $t$

Il existe essentiellement quatre modèles résiliométriques de mesures de la résilience. Le tableau suivant décrit les spécificités de chaque modèle :

Tableau 3 : Types de modèles de mesure de la résilience

		INTERACTIONS TEMPORELLES	
		SANS INTERACTION	AVEC INTERACTION
HORIZON TEMPOREL	STATIQUE	Modèle statique de mesure sans interaction	Modèle statique de mesure avec interaction
	DYNAMIQUE	Modèle dynamique de mesure sans interaction	Modèle dynamique de mesure avec interaction

### 3.1.1) LES MODELES STATIQUES DE MESURE

Les modèles statiques de mesure sont caractérisés par le fait que la résilience est mesurée uniquement avec les informations collectées à une date  $t = \tau$  fixée. Il en existe de deux types selon que l'on prenne en compte les interactions entre les différentes dimensions ou pas.

#### Modèles statiques de mesure sans interactions

La structure graphique du modèle statique de mesure sans interaction est donnée par la figure suivante :

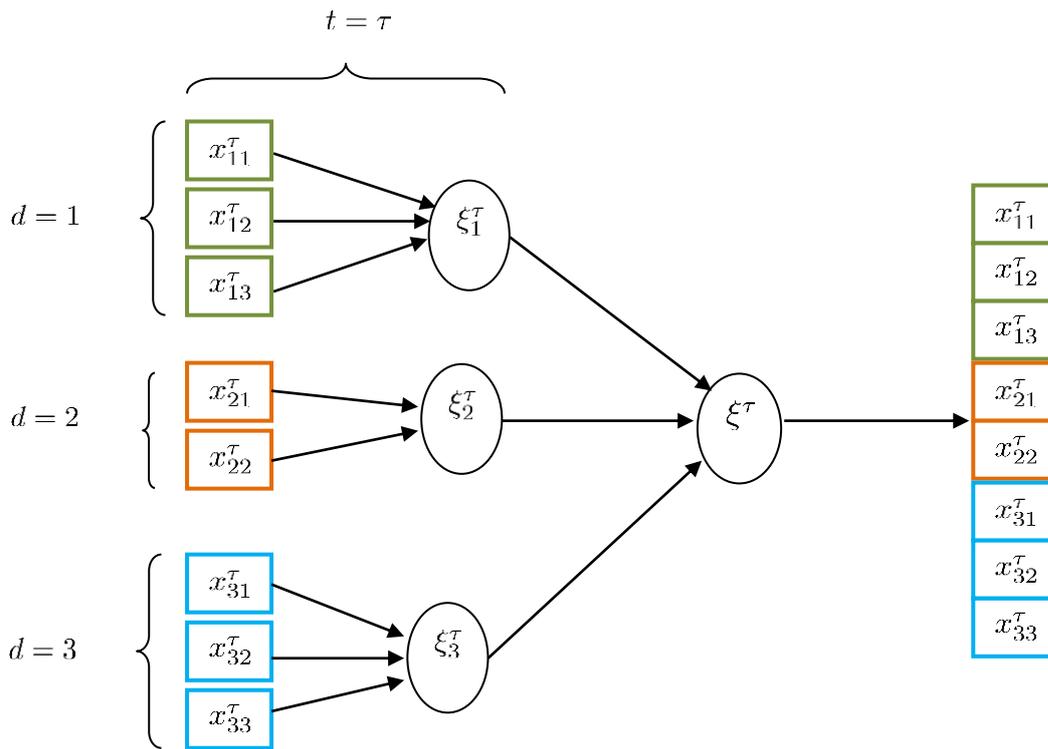


Figure 11 : Exemple de modèle statique sans interactions

Le modèle statique de mesure sans interactions comporte autant de blocs formatifs que de dimensions considérées et un unique bloc réflectif dont les variables manifestes sont toutes les variables manifestes considérées, tout bloc confondu. Ainsi, le modèle statique de mesure sans interaction correspond au système formé par les  $D(n + 1) + 1$  équations suivantes :

$$\begin{cases} \xi_d^\tau = \sum_{j=1}^{n_d} \omega_{dj}^\tau x_{dj}^\tau + \delta_d^\tau & (\text{il y a } D \text{ equations}) \\ x_{dj}^\tau = \pi_{dj}^\tau \xi^\tau + \nu_{dj}^\tau & (\text{il y a } D \times n \text{ equations}) \\ \xi^\tau = \sum_{d=1}^D \theta_d^\tau \xi_d^\tau + \mu^\tau & (\text{il y a } 1 \text{ equation}) \end{cases}$$

## Modèle statique de mesure avec interactions

La structure graphique du modèle statique de mesure avec interactions est donnée par la figure suivante :

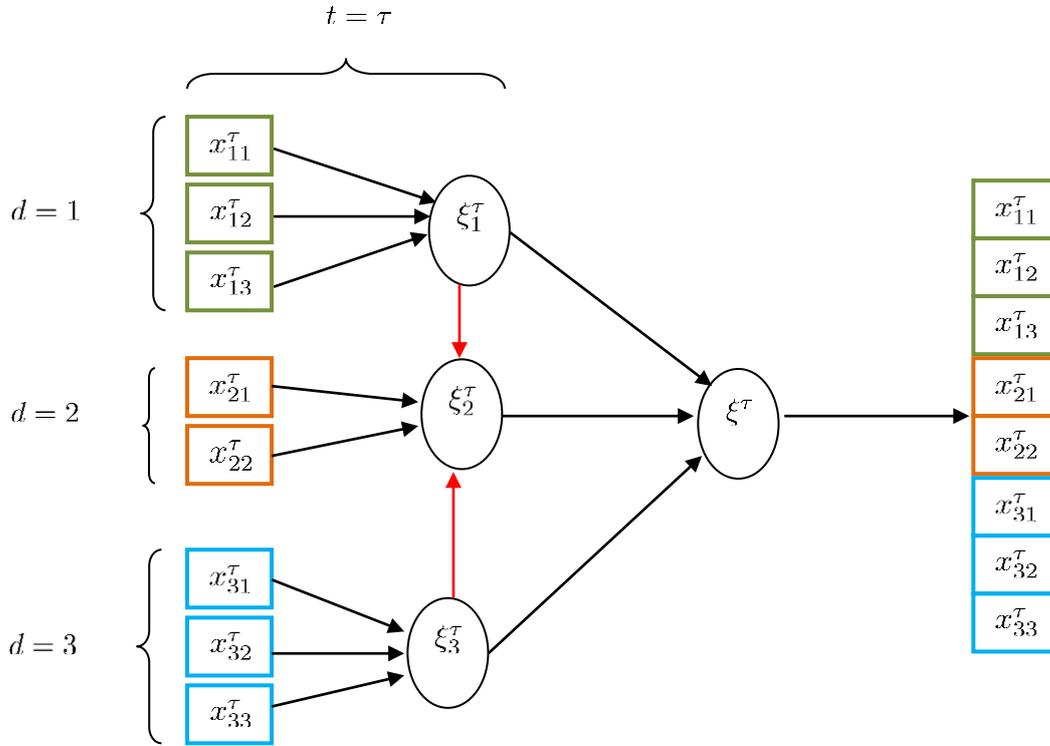


Figure 12 : Exemple de modèle statique avec interactions

Le modèle statique de mesure avec interactions comporte autant de blocs formatifs que de dimensions considérées et un unique bloc réflectif dont les variables manifestes sont toutes les variables manifestes considérées, tout bloc confondu. Ainsi, le modèle statique avec interaction correspond au système formé par les  $D(n + 1) + N_{endo} + 1$  équations suivantes (certaines pouvant être nulles) :

$$\begin{cases} \xi_d^\tau = \sum_{j=1}^{n_d} \omega_{dj}^\tau x_{dj}^\tau + \delta_d^\tau & (\text{il y a } D \text{ equations}) \\ \xi_d^\tau = \sum_{k=1}^D \beta_{dk}^\tau \xi_k^\tau + \zeta_d^\tau & (\text{il y a } N_{endo} \text{ equations}) \\ x_{dj}^\tau = \pi_{dj}^\tau \xi^\tau + \nu_{dj}^\tau & (\text{il y a } D \times n \text{ equations}) \\ \xi^\tau = \sum_{d=1}^D \theta_d^\tau \xi_d^\tau + \mu^\tau & (\text{il y a } 1 \text{ equation}) \end{cases}$$

### 3.1.2) LES MODELES DYNAMIQUES DE MESURE

Dans les modèles dynamiques, les informations sont collectées sur plusieurs périodes  $\{1, \dots, T\}$ . Il en existe de deux types, avec ou sans interactions.

#### Modèle dynamique de mesure sans interactions

La structure graphique du modèle dynamique de mesure sans interactions est donnée par la figure suivante :

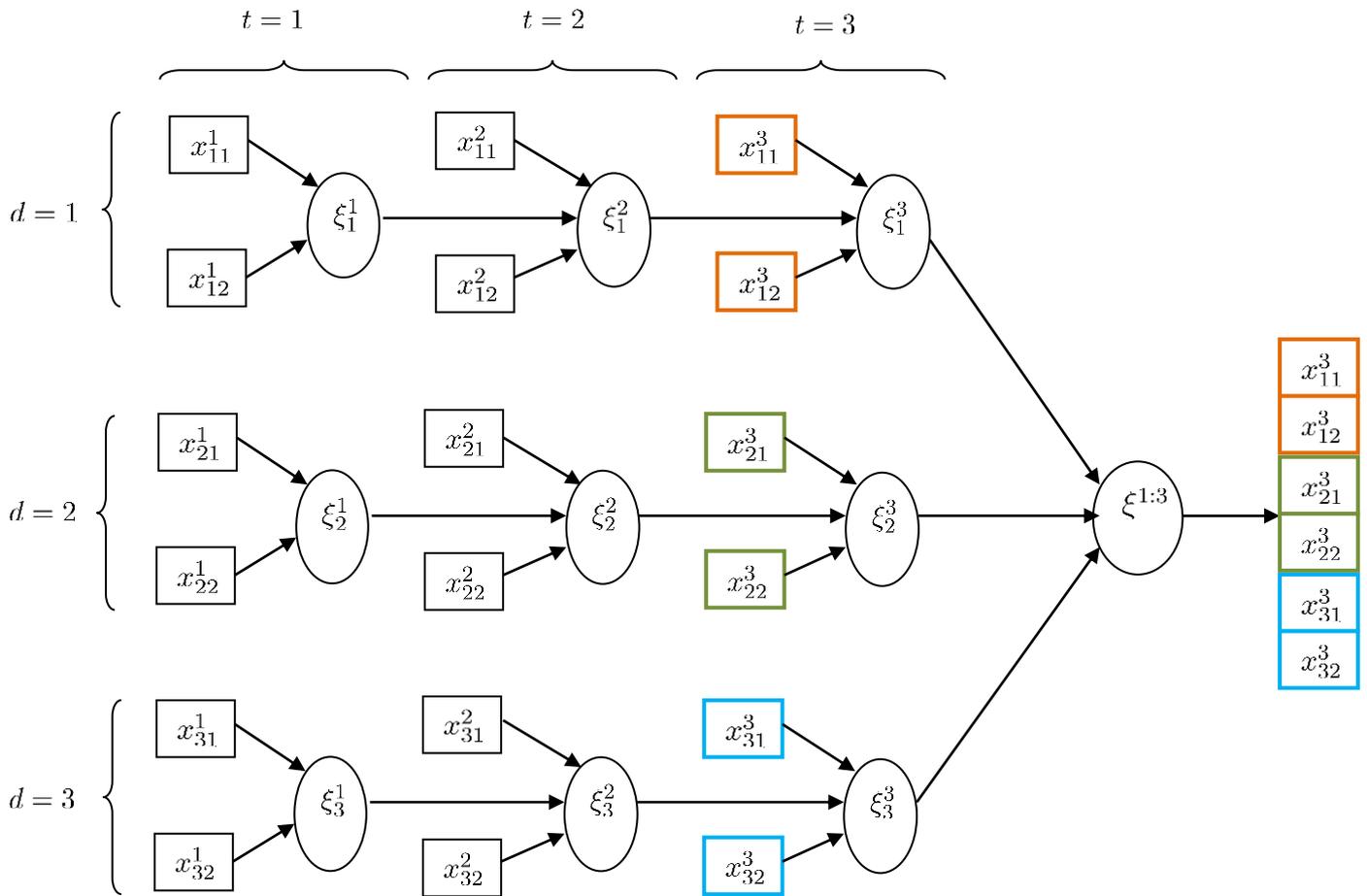


Figure 13 : Exemple de modèle dynamique sans interactions

Ce modèle correspond au système formé par les  $D(2T + n - 1) + 1$  équations suivantes :

$$\begin{cases} \xi_d^t = \sum_{j=1}^{n_d} \omega_{dj}^t x_{dj}^t + \delta_d^t & (\text{il y a } D \times T \text{ equations}) \\ \xi_d^t = \gamma_{dd}^t \xi_d^{t-1} + \zeta_d^t & (\text{il y a } D(T - 1) \text{ equations}) \\ x_{dj}^T = \pi_{dj}^T \xi_d^T + \nu_{dj}^T & (\text{il y a } D \times n \text{ equations}) \\ \xi^{1:T} = \sum_{d=1}^D \theta_d^T \xi_d^T + \mu^T & (\text{il y a } 1 \text{ equation}) \end{cases}$$

## Modèle dynamique de mesure avec interactions

La structure graphique du modèle dynamique de mesure avec interactions est donnée par la figure suivante :

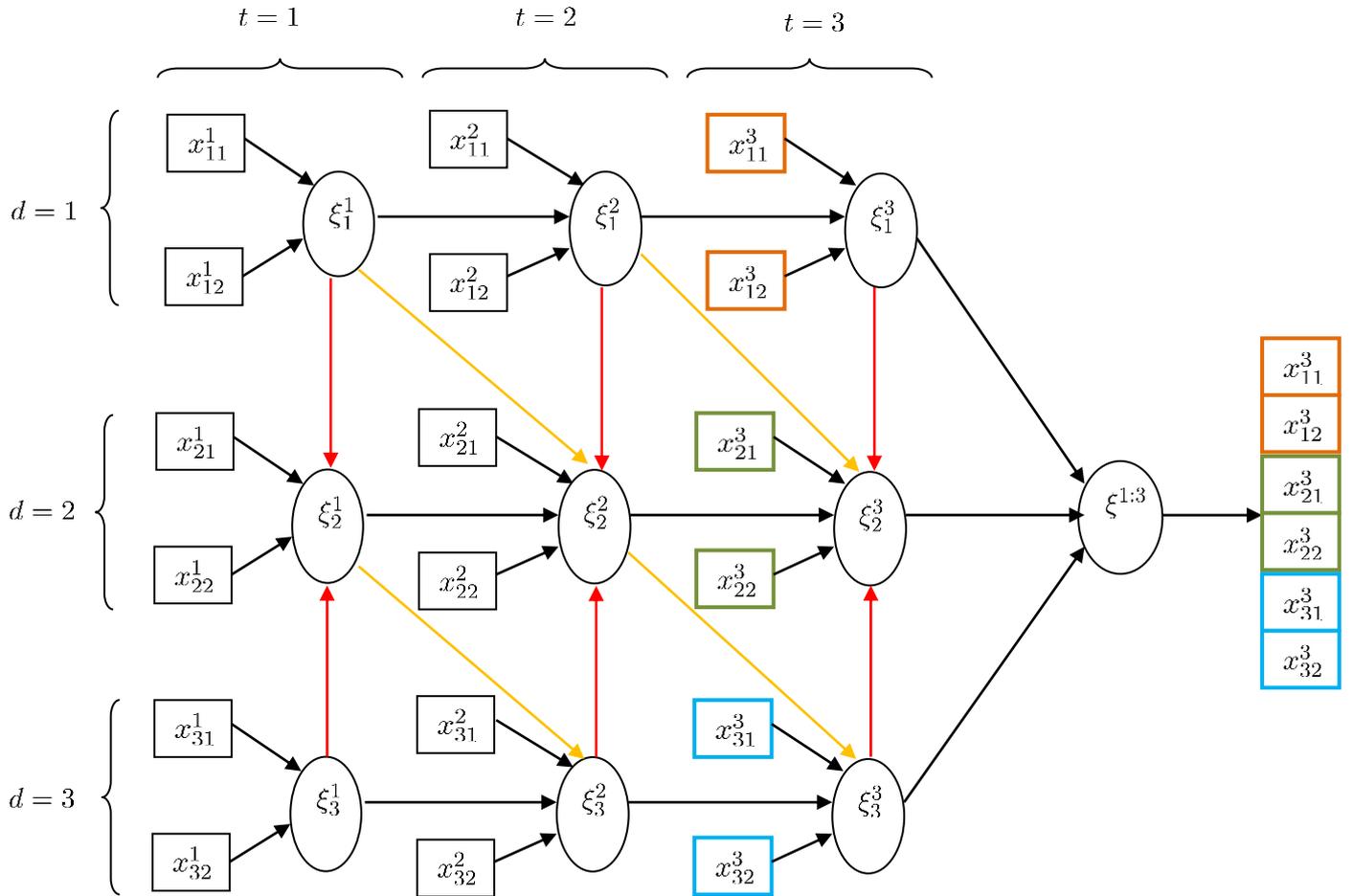


Figure 14 : Exemple de modèle dynamique avec interactions

Le modèle dynamique de mesure avec interactions comporte autant de blocs formatifs que de dimensions considérées pour chaque date  $t$ . Le nombre de blocs réflexifs est donc important. La résilience est estimée en considérant toutes les variables manifestes de la dernière période  $T$ , toute dimension confondue. Ce modèle correspond au système formé par les  $D(2T + n - 1) + N_{endo} + 1$  équations suivantes :

$$\begin{cases} \xi_d^t = \sum_{j=1}^{n_d} \omega_{dj}^t x_{dj}^t + \delta_d^t & (\text{il y a } D \times T \text{ equations}) \\ \xi_d^t = \sum_{\xi_k^t \rightarrow \xi_d^t} \beta_{dk}^t \xi_k^t + \sum_{\xi_k^{t-1} \rightarrow \xi_d^t} \gamma_{dk}^t \xi_k^{t-1} + \zeta_d^t & (\text{il y a } D(T-1) + N_{endo} \text{ equations}) \\ x_{dj}^T = \pi_{dj}^T \xi_d^T + \nu_{dj}^T & (\text{il y a } D \times n \text{ equations}) \\ \xi^{1:T} = \sum_{d=1}^D \theta_d^T \xi_d^T + \mu^T & (\text{il y a } 1 \text{ equation}) \end{cases}$$

## Algorithme des modèles de mesure

Du point de vue de la Résiliométrie, l'essentiel de l'estimation des modèles de mesure de la résilience se fait avec l'algorithme PLS classique. Les différents types de modèles ne sont rien d'autre que différentes modes de spécification du PLSPM. Techniquement, l'algorithme PLS a pour rôle de fournir une estimation du modèle externe et du modèle interne. Son usage n'a d'intérêt que dans la mesure où il est possible de récupérer les estimations numériques du concept de résilience et des dimensions considérées. Par conséquent, en notant  $pls_{pm}(\cdot)$  l'opération d'estimation d'un MESVL par l'approche PLS, l'algorithme de mesure de la résilience et de ses dimensions est le suivant :

---

### Algorithme 2 : Estimation de la résilience et de ses dimensions

---

1.  $\Omega_D = \{d \mid d \in [1, D]\}$  // Ensemble des dimensions considérées
  2.  $\mathcal{M} = \{m_i \mid i \in [1, 4]\}$  // Ensemble des 4 Modèles de mesure
  3.  $\mathcal{R}(\hat{\xi}_d^t, \hat{\xi}) = pls_{pm}(\Omega_D, \mathcal{M})$  // Estimation PLSPM du modèle spécifié
  4.  $\Theta_{\mathcal{R}} = \emptyset$  // Ensembles des estimations totales
  5. Pour ( $d$  in  $\Omega_D$ ) {
  6.     a)  $\Delta_d = \emptyset$  // Ensemble des estimations de  $\xi_d$
  7.     b) Pour ( $t$  in  $[1, T]$ ) {
  8.         i)  $\hat{\xi}_d^t | \mathcal{R} \leftarrow \frac{\{\hat{\xi}_d^t | \mathcal{R}\} - E(\{\hat{\xi}_d^t | \mathcal{R}\})}{\sigma_{\{\hat{\xi}_d^t | \mathcal{R}\}}}$
  9.         ii)  $\Delta_d \leftarrow \Delta_d \cup \{\hat{\xi}_d^t | \mathcal{R}\}$
  10.     c)  $\Theta_{\mathcal{R}} = \Theta_{\mathcal{R}} \cup \Delta_d$
  11.     }
  12.     }
  13.     }
  14.     }
  15.  $\mathfrak{R} = \Theta_{\mathcal{R}} \cup \{\hat{\xi} | \mathcal{R}\}$  // Sortie de l'algorithme de mesure
- 

Les modèles de mesure de la résilience sont des modèles PLSPM de type hiérarchique avec une ou plusieurs variables latentes d'ordre 1. Ces variables latentes d'ordre 1 sont essentiellement celles qui représentent la résilience. Elles ne disposent à priori pas de variables manifestes propres. Le fait de leur donner comme variables manifestes l'ensemble de toutes les variables latentes utilisées a une justification théorique bien fondée due à l'usage de l'approche PLS comme modèle de mesure ([TEN01]). Il aussi est important de remarquer que, dans l'algorithme d'estimation de la résilience et de ses dimensions, les valeurs estimées par PLSPM sont centrées et réduites dans le résultat final. En effet, ces valeurs numériques obtenues ne sont que des « proxys » et n'ont pas de sens dans l'absolu en dehors des traitements qualitatifs qu'on peut en faire. De ce fait, nous préconisons qu'elles soient centrées et réduites pour éliminer l'effet d'éventuelles unités de mesure des variables manifestes. Techniquement, cette opération permet de stabiliser les différentes variabilités, les ramenant toutes à l'unité (1). Elle brisent aussi le cycle des interprétations fallacieuses des valeurs moyennes de la résilience et de ses dimensions en les ramenant à zéro (0), ce zéro désignant un comportement centriste en terme de résilience ou de ses dimensions.

---

## 3.2) LA THEORIE STOCHASTIQUE DE LA RESILIENCE

---

L'une des questions les plus légitimes qui vient à l'esprit lorsqu'on parle de résilience est certainement la suivante : « Etant donné un individu souffrant d'un choc traumatique bien précis, est-il résilient ou pas à l'instant où il est observé ? ». Cette question soulève le problème général de la caractérisation de la résilience. L'approche actuellement utilisée dans le cadre de la résilience est basée sur la théorie mathématique de la viabilité développée par le Mathématicien Français Jean-Pierre Aubin ([AUB97], [AUB91]). Le développement de la théorie de viabilité a commencé depuis la fin des années 1980 à partir de l'analyse multivoque pour étudier les évolutions des systèmes complexes en avenir incertain soumis à des contraintes de viabilité. Son champ d'application, initialement centré sur les systèmes évolutionnaires en sciences économiques, s'est élargi aux sciences sociales, à la démographie, à la finance, à l'environnement et aux sciences de l'ingénieur.

Cependant, la théorie de la viabilité modélise les capacités sous la forme d'équations différentielles ou d'inclusions différentielles, ce qui est problématique du fait du caractère aléatoire de l'évolution des capacités. Une autre limite sérieuse de l'approche par la théorie de la viabilité est l'usage de variables de contrôles car cette théorie est développée dans le cadre des systèmes commandés ([SOP05a], [SOP05b]). Or, l'étude de la résilience, notamment sociale, ne suppose pas qu'il faille nécessairement contrôler le système étudié. En plus, dans la théorie de viabilité, les contraintes de viabilités (limites des capacités) non seulement doivent être en petit nombre (4 à 6 au maximum), mais doivent surtout être constantes pour une capacité donnée, donc indépendantes des individus et du temps. Cette hypothèse n'est pas réaliste dans le cadre de la résilience, dans la mesure où un niveau d'une capacité peut être insuffisant pour un individu et largement au-dessus des espérances d'un autre et même varier avec le temps pour un individu donné. Enfin, la notion fondamentale de noyau de viabilité tel que défini dans la théorie de viabilité souffre d'une inadaptation aux situations de résilience portant seulement sur une partie des capacités considérées et non sur l'ensemble de toutes les capacités.

Face à ces insuffisances, et dans le souci d'être plus proche des idées intuitives qui gouvernent la notion de résilience, nous proposons une approche de caractérisation de la résilience appelée « théorie stochastique de la résilience ». L'objet de la théorie stochastique de la résilience est de fournir un cadre formel et une approche mathématique permettant de caractériser la résilience et de fournir une identification de l'état de résilience des individus dans l'espace axiomatique résiliométrique considéré. En effet, le problème de caractérisation de la résilience met en exergue quatre sous problèmes fondamentaux qui peuvent être mis en exergue par les questions suivantes : De quel choc s'agit-il et quels sont les individus considérés ? Quel est l'instant ou la période à laquelle l'état de résilience est-il recherché ? Quelles sont les capacités individuelles par rapport auxquelles la résilience est recherchée ? La résilience concerne combien de capacités considérées à la fois ?

Ces questions montrent que le problème d'identification de l'état de résilience des individus souffrants est un problème mal posé. Tout d'abord, il ne peut y avoir d'individus résilients ou non dans l'absolu. En effet, les individus sont résilients ou pas dans l'environnement d'un choc précis, à un instant précis de la dynamique sociale et relativement à un ensemble bien défini de capacités considérées. Ensuite, la notion même de résilience est ambiguë et mérite d'être spécifiée. En effet, la résilience peut concerner aussi bien une seule capacité, une partie de celles-ci ou l'ensemble de toutes les capacités considérées. C'est donc pour pallier aux insuffisances de la théorie de viabilité dans le contexte de la résilience qu'une nouvelle théorie est proposée dans le cadre de cette thèse pour caractériser la résilience. La théorie stochastique de la résilience est basée sur l'axiomatique des espaces résiliométriques. Les espaces dits résiliométriques sont construits à partir des fondements de la théorie mathématique de la mesure (voir annexe A). Il s'agit de définir des notions nouvelles rendant opérationnelles la résilience sur le plan mathématique en levant toute ambiguïté. Cette axiomatique est un cadre formel dans lequel le problème d'identification des états de résilience des individus est décidable avec un ensemble de solutions acceptables.

Il est cependant très important de noter que la résilience comporte deux aspects indissociables, à savoir la capacité de rebond des individus traumatisés et le processus par lequel ceux-ci arrivent à rebondir. La théorie stochastique de la résilience se limite à caractériser essentiellement la capacité de rebond. Toutefois, son utilisation successive sur plusieurs périodes différentes (aspect dynamique) permet d'apprécier des propriétés de la dynamique du processus de rebond.

Pour une présentation plus formelle de le TSR, notons :

- ✓  $C$  un choc traumatique
- ✓  $\Omega_I$  l'ensemble des individus considérés
- ✓  $\Omega_X$  l'ensemble des caractéristiques quantifiées (variables) considérées
- ✓  $\mu$  une mesure (résiliométrique) de la résilience et de ses dimensions
- ✓  $T$  l'horizon temporel de mesure de la résilience

### 3.2.1) LES ESPACES E-RESILOMETRABLES

Une analyse du concept de résilience en termes de capacité de rebond montre qu'en plus du choc considéré, la spécification des individus étudiés et des caractéristiques observées chez ceux-ci constituent le strict minimum dont on a besoin pour discuter sur la résilience. Pour mettre en exergue ce noyau irréductible comme fondement de toute analyse de la capacité de rebond, la notion d'environnement résiliométrique a été introduite.

#### **Définition 3.2.1.1 : Environnement résiliométrique**

*On appelle environnement résiliométrique, noté  $E$ , la spécification d'un choc traumatique, d'un ensemble d'individus dont la résilience au choc spécifié est étudiée et d'un ensemble de variables décrivant les caractéristiques des individus dont on souhaite étudier l'évolution par rapport au choc, ces variables devant être structurées en dimensions. Un environnement résiliométrique est donc la donnée d'un triplet  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  dans lequel  $C$  désigne un choc traumatique,  $\Omega_I$  représente l'ensemble des individus considérés et  $\Omega_X$  est l'ensemble des capacités (variables) considérées structurées en dimensions.*

Une fois l'environnement résiliométrique défini, l'ensemble de l'axiomatique des espaces résiliométriques est déduit de la théorie mathématique de la mesure avec quelques adaptations permettant de prendre en compte les spécificités de la résilience. L'enjeu d'une telle adaptation réside dans le fait de donner une interprétation concrète aux notions définies.

#### **Définition 3.2.1.2 : Filtration résiliométrique fondamentale**

*Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement résiliométrique. On appelle filtration résiliométrique fondamentale, la filtration  $(\Omega_t)_{t \in [1, T]}$  des cumuls d'observations faites sur les individus étudiés sur la période d'étude relativement aux variables spécifiées dans  $E$ . Les éléments de cette filtration sont définis par  $\forall t \in [1, T], \Omega_t = \{X_{i\tau}^j | i \in \Omega_I, X_j \in \Omega_X, \tau \leq t\}$ .*

#### **Définition 3.2.1.3 : Ensemble résiliométrique fondamental**

*Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement résiliométrique et  $(\Omega_t)_{t \in [1, T]}$  la filtration résiliométrique fondamentale associée. On appelle ensemble résiliométrique fondamental, l'ensemble  $\Omega$  des observations faites sur les individus étudiés sur la période d'étude relativement aux variables spécifiées dans  $E$ . On a donc :*

$$\Omega_E = \bigcap_{t=1}^T \Omega_t$$

#### **Définition 3.2.1.4 : Tribu résiliométrique fondamentale**

*Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement résiliométrique,  $(\Omega_t)_{t \in [1, T]}$  la filtration résiliométrique fondamentale associée. On appelle tribu résiliométrique fondamentale, la tribu  $\mathcal{F}$  engendrée par l'ensemble des éléments de la filtration résiliométrique fondamentale. Ainsi, on a  $\mathcal{F}_E = \sigma(\Omega_t, t \in [1, T])$ .*

### **Définition 3.2.1.5 : Espace E-résilométrable**

Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement résiliométrique ayant pour ensemble résiliométrique fondamental, l'ensemble  $\Omega$  et pour tribu résiliométrique fondamentale  $\mathcal{F}$ . On appelle espace E-résilométrable, l'espace mesurable  $(\Omega_E, \mathcal{F}_E)$ .

L'espace E-résilométrable est avant tout un espace mesurable au sens de la théorie de la mesure. Cependant, sa définition est tributaire à l'ensemble résiliométrique fondamental. Il est donc impératif de bien définir l'environnement résiliométrique considéré. L'intérêt d'utiliser la notion d'ensemble résiliométrique fondamental est de pouvoir ramener le calcul des espaces résiliométriques aux principes de la théorie des ensembles en accord avec le sens pratique et intuitif qu'ils peuvent revêtir. Cette approche présente l'avantage de permettre une prise en compte de situations complexes avec des algorithmes relativement simples se réduisant à la manipulation d'ensembles au sens mathématique du terme.

## 3.2.2) LES ESPACES E-RESILOMETRES

L'espace E-résilométrable contient tout ce qui est nécessaire comme information pour mesurer la résilience et analyser la capacité de rebond des individus. Toutefois, il ne fournit aucune méthode permettant une mesure effective de la résilience. C'est pourquoi la définition d'une mesure de résilience s'impose pour parachever l'axiomatique. Pour y parvenir, les notions de mesures résiliométriques et d'espaces E-mesurés sont introduites.

### **Définition 3.2.2.1 : mesure résiliométrique**

Soit  $E$  un environnement résiliométrique et  $(\Omega_E, \mathcal{F}_E)$  un espace E-résilométrable. On appelle mesure résiliométrique sur  $\mathcal{F}_E$ , toute application  $\mu : \mathcal{F}_E \rightarrow [-1, 1]$  telle qu'il existe un graphe  $G_X$  sur  $\Omega_X$  avec  $\forall A \subset \mathcal{F}_E, \mu(A|G_X) \in [-1, 1]$ .

Telle que définie, une mesure résiliométrique est une application capable de fournir un ensemble de valeurs comprises entre  $-1$  et  $1$  à partir d'un ensemble de données collectées sur des variables et d'une structure graphique établissant des relations entre ces variables. Le fait qu'une mesure résiliométrique puisse prendre des valeurs négatives est très important. En effet, cela permettra, dans certaines conditions, de distinguer des situations de dégradation des capacités de rebonds, des situations d'amélioration de celles-ci. La propriété de non positivité des mesures résiliométriques est donc imposée par des considérations purement pratiques liées aux réalités sociales. L'hypothèse mathématique de positivité d'une mesure est donc relâchée pour des raisons évidentes de nécessité d'interprétation et de portée pratique de la TSR.

### Propriété des mesures résiliométriques

Toute application permettant de déterminer la valeur de résilience d'un individu en utilisant les modèles résiliométriques statiques et dynamiques de mesure, est une mesure résiliométrique. Il est important de comprendre que les modèles de mesure de la résilience, qu'ils soient statiques ou dynamiques, ne sont pas eux-mêmes des mesures résiliométriques. En effet, ces modèles fournissent des vecteurs de valeurs comprises entre  $-1$  et  $1$  alors qu'une mesure résiliométrique ne doit fournir qu'une seule valeur dans cet intervalle. Ce sont donc les procédures, basées sur ces modèles, mais fournissant des valeurs uniques (donc individuelles) qui sont des mesures résiliométriques.

#### Définition 3.2.2.2 : Espace E-résilométré

Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement résiliométrique auquel est associé un espace E-résilométrable  $(\Omega_E, \mathcal{F}_E)$ . Soit  $\mu$  une mesure résiliométrique définie sur  $\mathcal{F}_E$ . On appelle espace E-résilométré, l'espace mesuré  $(\Omega_E, \mathcal{F}_E, \mu)$ .

L'espace E-résilométré contient aussi bien les informations que les modèles nécessaires pour mesurer la résilience. Il a l'avantage de clarifier le contexte analytique de la capacité de rebond. Son usage assure l'unicité de la représentation du problème d'étude de la résilience en termes de capacité de rebond et fournit un moyen de communication unique permettant de porter un jugement scientifiquement pertinent sur les résultats des analyses.

### 3.2.3) LES FORMES DE CAPACITE ET DEGRE DE REBOND

L'axiomatique des espaces résiliométriques permet de bien clarifier les éléments de base sur lesquels prend appui une analyse des capacités de rebond. Il s'agit du point de départ pour une caractérisation mathématique de la résilience. Cependant, cette axiomatique à elle seule est insuffisante pour lever toute ambiguïté. En effet, dans un espace résilométré, le sens du terme résilience en tant que capacité de rebond face au choc considéré, choc ayant altéré éventuellement les caractéristiques considérées, reste bien défini lorsque cet espace ne contient qu'une seule caractéristique. Dès lors que le nombre de caractéristiques considérées excède l'unité, le sens pratique de la capacité de rebond reste encore flou, ce qui est le cas en général. Il devient donc impératif de fournir des définitions opérationnelles de la capacité de rebond susceptibles de lever toute ambiguïté dans la compréhension de ce qu'on évalue et étudie exactement. Pour ce faire, Notons :

- ✓  $C$  un choc traumatique considéré
- ✓  $\Omega_I$  l'ensemble des individus sur lesquels le choc est étudié
- ✓  $\Omega_X$  l'ensemble des caractéristiques quantifiables (variables) considérées chez les individus
- ✓  $T$  l'horizon temporel de mesure de la résilience
- ✓  $N$  le nombre d'individus utilisés dans la collecte de données
- ✓  $J$  le nombre de caractéristiques quantifiables considérées structurées en dimension

## **Caractéristiques quantifiables et capacités**

Il est bon de comprendre qu'une capacité est un concept inobservable. La capacité de rebond est donc appréciée par les caractéristiques quantifiables des individus. La théorie stochastique de la résilience étudie donc la capacité de rebond des individus sur la base de leurs caractéristiques quantifiables. La quantification d'une caractéristique est importante. Les caractéristiques peuvent être quantifiées par nature (revenue, notes d'évaluation, etc) ou l'être par des transformations mathématiques (analyses factorielles, indicateurs synthétiques, etc.). Toutefois, certaines hypothèses sont effectuées sur cette capacité latente pour qu'elle soit cohérente avec la théorie proposée.

## **Hypothèse des capacités décroissantes (HCD)**

Le principe de base d'un espace résiliométrique est que le choc induit nécessairement de la souffrance résultant d'une perte de capacités. Dans les espaces résiliométriques, les capacités sont étudiées indirectement via les caractéristiques des individus. Nous partons du principe que la perte d'une capacité se traduit par une diminution des caractéristiques quantifiables associées à cette capacité et qu'une telle diminution des caractéristiques quantifiables est compatible avec l'idée d'une dégradation de la capacité de rebond : c'est l'hypothèse des capacités décroissantes.

## **Portée de l'HCD et résilience**

Sous l'hypothèse des capacités décroissantes, un individu est résilient par rapport à une capacité donnée si la baisse de capacité se traduit par une diminution des caractéristiques quantifiables associées à cette capacité, à un niveau acceptable pour lui, compte tenu de ses responsabilités sociales. Cette conception est conforme à l'idée que l'on a intuitivement du concept de résilience. Il est donc logique de considérer ce principe comme une caractérisation de la résilience et d'en fournir une formalisation mathématique afin de rendre opérationnelle la notion de résilience.

### **Définition 3.2.3.1 : Bornes de résilience individuelles**

*Le niveau minimum d'une caractéristique quantifiable à partir duquel un individu n'est plus à même de faire face à ses responsabilités sociales liées à cette caractéristique est appelé la borne de résilience de la caractéristique en question pour l'individu considéré.*

Il est important de comprendre que cette borne est individuelle et non collective. Si, sous l'effet initial du choc, le niveau de la caractéristique diminue sans franchir cette borne, on dira que l'individu a développé une adaptabilité par rapport à cette caractéristique. Mais si cette borne est dépassée sous l'effet initial du choc, l'individu est dans un état de souffrance par rapport à la capacité incriminée. Dans cette deuxième situation, si les actions des tuteurs et activateurs de résilience (stade affectif), des agents éducatifs (stade intime) et des agents de croyance (stade spirituel) arrivent à rehausser le niveau de cette caractéristique au-dessus de la borne de résilience, l'individu a acquis une capacité de rebond suffisante pour devenir résilient par rapport à cette caractéristique. Les bornes de résilience individuelles deviennent donc les éléments fondamentaux de caractérisation de la capacité de rebond d'un individu par

rapport à une caractéristique de l'espace résiliométré considéré. Et il est fondamental de comprendre que, pour un individu, sa borne de résilience relative à une caractéristique donné peut changer avec le temps compte tenu des réalités du moment.

### Définition 3.2.3.2 : Support de rebond

Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement résiliométrique. Soit  $\mathcal{D}_X \subset \Omega_X$  une partie non vide des caractéristiques et  $\alpha_{ij}^t$  la borne de résilience de l'individu  $i$  pour la caractéristique  $X_j$  compatible avec son mode de vie à l'instant  $t$  donné. On appelle support de rebond sur  $E$  relativement à  $\mathcal{D}_X$  au temps  $t$ , l'ensemble  $\mathcal{R}_{\mathcal{D}_X}^t = \{i \in \Omega_I | X_{ij}^t \geq \alpha_{ij}^t, X_j^t \in \mathcal{D}_X\}$  des individus ayant leurs caractéristiques  $\mathcal{D}_X$  au-delà des bornes de résilience individuelles correspondantes.

### Propriétés

- $1 \leq \text{Card}(\mathcal{D}_X) \leq \text{Card}(\Omega_X)$
- $0 \leq \text{Card}(\mathcal{R}_{\mathcal{D}_X}^t) \leq \text{Card}(\Omega_I)$

### Définition 3.2.3.3 : Capacité relative de rebond

Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement résiliométrique. Soit  $\mathcal{D}_X \subset \Omega_X$  une partie des caractéristiques et  $\alpha_{ij}^t$  la borne de résilience de l'individu  $i$  pour la caractéristique  $X_j$  compatible avec son mode de vie à l'instant  $t$ . On dit que l'individu  $i$  a une capacité de rebond dans  $E$  par rapport aux caractéristiques  $\mathcal{D}_X$  au temps  $t$  s'il appartient au support de rebond  $\mathcal{R}_{\mathcal{D}_X}^t$  de  $E$ .

### Définition 3.2.3.4 : Incapacité relative de rebond

Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement résiliométrique. Soit  $\mathcal{D}_X \subset \Omega_X$  une partie des caractéristiques et  $\alpha_{ij}^t$  la borne de résilience de l'individu  $i$  pour la caractéristique  $X_j$  compatibles avec son mode de vie à l'instant  $t$ . On dit que l'individu  $i$  a une incapacité de rebondir dans  $E$  par rapport aux caractéristiques  $\mathcal{D}_X$  au temps  $t$  s'il n'appartient pas au support de rebond  $\mathcal{R}_{\mathcal{D}_X}^t$  de  $E$ .

### Définition 3.2.3.5 : Degré de rebond

Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement résiliométrique. Soit  $\alpha_{ij}^t$  la borne de résilience de l'individu  $i$  pour la caractéristique  $X_j$  compatible avec son mode de vie à l'instant  $t$  donné et soit  $\mathcal{D}_{it}^X \subset \Omega_X$  l'ensemble des caractéristiques de  $E$  pour lesquelles l'individu  $i$  a une capacité de rebond à l'instant  $t$ . On appelle degré de rebond de l'individu  $i$ , notée  $\delta_{it}$ , la proportion de caractéristiques de  $E$  relativement auxquelles cet individu a une capacité de rebond, c'est-à-dire :

$$\delta_{it}^X = \frac{\text{Card}(\mathcal{D}_{it}^X)}{\text{Card}(\{\Omega_X | t\})}$$

## Propriétés

$$\forall (i, t) \in \Omega_I \times [1, T], 0 \leq \delta_{it}^X \leq 1$$

La capacité de rebond est toujours relative à un environnement résiliométrique donné et spécifique à un instant  $t$  donné. Cependant, deux situations particulières méritent d'être soulignées. La première concerne les situations dans lesquelles on ne s'intéresse qu'à une seule caractéristique à la fois (cas unitaires). Quant à la seconde, elle concerne les situations dans lesquelles l'on prend en compte toutes les caractéristiques à la fois (cas absolus).

### Définition 3.2.3.6 : Capacité unitaire de rebond

Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement résiliométrique. Soit  $X_j \subset \Omega_X$  une caractéristique donnée et  $\alpha_{ij}^t$  la borne de résilience de l'individu  $i$  pour la caractéristique  $X_j$  compatible avec son mode de vie à l'instant  $t$  donné. On dit que l'individu  $i$  a une capacité unitaire de rebond dans  $E$  par rapport à  $X_j$  au temps  $t$ , si et seulement si il a une capacité de rebond par rapport à l'ensemble constitué de la seule caractéristique  $\mathcal{D}_{it}^X = \{X_j^t\}$ .

### Définition 3.2.3.7 : Incapacité unitaire de rebond

Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement résiliométrique. Soit  $X_j \subset \Omega_X$  une caractéristique donnée et  $\alpha_{ij}^t$  la borne de résilience de l'individu  $i$  pour la caractéristique  $X_j$  compatible avec son mode de vie à l'instant  $t$  donné. On dit que l'individu  $i$  a une incapacité unitaire de rebond dans  $E$  par rapport à  $X_j$  au temps  $t$ , si et seulement si il a une incapacité de rebond par rapport à l'ensemble constitué de la seule caractéristique  $\mathcal{D}_{it}^X = \{X_j^t\}$ .

### Théorème 3.2.3.1

Dans l'analyse de toute capacité unitaire de rebond, le support de rebond est l'ensemble des individus pour lesquels l'unique caractéristique considérée est au-delà des bornes de résilience individuelles compatibles avec les modes de vie des individus à l'instant  $t$  donné. Le support de rebond est donc égal à  $\mathcal{R}_{\mathcal{D}_X}^t = \{i \in \Omega_I | X_{ij}^t \geq \alpha_{ij}^t\}$  et, pour tout individu  $i$  ayant une capacité unitaire de rebond, son degré de rebond est donné par :

$$\delta_{it}^X = \begin{cases} \frac{1}{\text{Card}(\{\Omega_X | t\})} & \text{si l'individu } i \text{ a une capacité de rebond} \\ 0 & \text{si l'individu } i \text{ a une incapacité de rebond} \end{cases}$$

### Preuve du théorème 3.2.3.1

Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement résiliométrique. Soit  $X_j \subset \Omega_X$  une caractéristique donnée et  $\alpha_{ij}^t$  la borne de résilience de l'individu  $i$  pour la caractéristique  $X_j$  compatibles avec son mode de vie à l'instant  $t$  donné. L'individu  $i$  a une capacité unitaire de rebond dans  $E$  par rapport à  $X_j$  au temps  $t$ , si et seulement si  $\mathcal{D}_{it}^X = \{X_j^t\}$  et  $X_{ij}^t \geq \alpha_{ij}^t$ , d'où :

$$\begin{aligned}
\mathcal{R}_{\mathcal{D}_X}^t &= \{i \in \Omega_I \mid X_{ik}^t \geq \alpha_{ik}^t, X_k^t \in \mathcal{D}_X\} \\
&= \{i \in \Omega_I \mid X_{ij}^t \geq \alpha_{ij}^t, X_j^t \in \mathcal{D}_X\} \cup \underbrace{\{i \in \Omega_I \mid X_{ik}^t \geq \alpha_{ik}^t, X_k^t \in \mathcal{D}_X\}}_{k \neq j, = \emptyset} \\
&= \{i \in \Omega_I \mid X_{ij}^t \geq \alpha_{ij}^t, X_j^t \in \mathcal{D}_X\} \\
&= \{i \in \Omega_I \mid X_{ij}^t \geq \alpha_{ij}^t\} \\
\delta_{it} &= \frac{\text{Card}(\mathcal{D}_{it}^X)}{\text{Card}(\{\Omega_X|t\})} = \frac{\text{Card}(\{X_j\})}{\text{Card}(\{\Omega_X|t\})} = \frac{1}{\text{Card}(\{\Omega_X|t\})}
\end{aligned}$$

### Définition 3.2.3.8 : Capacité absolue de rebond

Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement. On dit que l'individu  $i$  a une capacité absolue de rebond dans  $E$  au temps  $t$  si et seulement s'il a une capacité de rebond par rapport à l'ensemble de toutes les caractéristiques  $\mathcal{D}_{it}^X = \{\Omega_X|t\}$

### Définition 3.2.3.9 : Incapacité absolue de rebond

Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement résiliométrique. On dit que l'individu  $i$  a une incapacité absolue de rebond dans  $E$  au temps  $t$ , si et seulement s'il a une incapacité de rebond par rapport à l'ensemble de toutes les caractéristiques  $\mathcal{D}_{it}^X = \{\Omega_X|t\}$

### Théorème 3.2.3.2

Dans l'analyse de toute capacité absolue de rebond, le support de rebond est l'ensemble des individus pour lesquels toutes les caractéristiques considérées sont au-delà des bornes de résilience individuelles compatibles avec le mode de vie des individus à l'instant  $t$  donné. Le support de rebond est donc égal à  $\mathcal{R}_{\mathcal{D}_X}^t = \{i \in \Omega_I \mid \bigcap_{j=1}^J \{X_{ij}^t \geq \alpha_{ij}^t\}\}$ .

### Preuve du théorème 3.2.3.2

Soit  $E = (C, \Omega_I, \Omega_X)$  un environnement résiliométrique. Soit  $X_j \subset \Omega_X$  une caractéristique donnée et  $\alpha_{ij}^t$  la borne de résilience de l'individu  $i$  pour la caractéristique  $X_j$  compatible avec son mode de vie à l'instant  $t$  donné. l'individu  $i$  est a une capacité absolue de rebond au temps  $t$  si et seulement si  $\mathcal{D}_{it}^X = \{\Omega_X|t\}$ . D'où :

$$\begin{aligned}
\mathcal{R}_{\mathcal{D}_X}^t &= \{i \in \Omega_I \mid \bigcap_{j=1}^J \{X_{ij}^t \geq \alpha_{ij}^t, X_j^t \in \mathcal{D}_X\}\} \\
&= \{i \in \Omega_I \mid \bigcap_{j=1}^J \{X_{ij}^t \geq \alpha_{ij}^t, X_j^t \in \Omega_X\}\} \\
&= \{i \in \Omega_I \mid \bigcap_{j=1}^J \{X_{ij}^t \geq \alpha_{ij}^t\}\} \\
\delta_{it} &= \frac{\text{Card}(\mathcal{D}_{it}^X)}{\text{Card}(\{\Omega_X|t\})} = \frac{\text{Card}(\{\Omega_X|t\})}{\text{Card}(\{\Omega_X|t\})} = 1
\end{aligned}$$

## Algorithme de calcul des types de degrés de rebond

L'évaluation des différents types de capacité et degrés de rebond s'effectue de façon individuelle. L'algorithme suivant en fournit les principes de calcul:

---

### Algorithme 3 : Calcul des types de capacité et des degrés de rebond

---

1. Entrées :  $t \in [1, T], \mathcal{D}_X^t \subset \Omega_X$  et  $\{\alpha_{ij}^t, (i, j) \in \Omega_I \times \mathcal{D}_X^t\}$
  2.  $Card(\Omega_I) = n$  et  $Card(\mathcal{D}_X^t) = J_t$
  3. // Calcul de la capacité relative de rebond
  4.  $T = 0_{(n, J_t)}$
  5. Pour  $(i \in [1, n])\{$
  6.     Pour  $(j \in [1, J_t])\{$
  7.          $\Delta_{ij}^t = X - \alpha_{ij}^t$
  8.         Si  $(\Delta_{ij}^t \geq 0)$   $T[i, j] = 1$
  9.     }
  10. }
  11. // Calcul des degrés de rebond
  12.  $D_r = 0_{1:n}$
  13. Pour  $(i \in [1, n])\{$
  14.      $D_r[i] = sum(T[i, ])/J_t$
  15. }
  16. // Calcul de la capacité absolue de rebond
  17.  $R_a = 0_{1:n}$
  18. Pour  $(i \in [1, n])\{$
  19.     Si  $(D_r[i] == 1)$   $R_a[i] = 1$
  20. }
  21. Sortie :  $T, D_r, R_a$
- 

### 3.2.4) LA PERTE DE CARACTERISTIQUES ET SOUFFRANCE

La théorie stochastique de la résilience permet de donner un sens précis à la notion de capacité de rebond et définit la notion de degré de rebond. Toutefois, l'analyse de la capacité de rebond est un premier pas à une analyse de la propension à la souffrance induite par la vulnérabilité causée par la perte de caractéristiques. La capacité de rebond et la propension à la souffrance peuvent être perçues comme des problèmes duaux. Il s'ensuit que la théorie stochastique de la résilience peut fournir des éléments techniques permettant d'analyser la propension à la souffrance de façon plus directe. Cette analyse prend appui sur l'idée qu'une perte de caractéristique augmente la propension à la souffrance, du moins au sens d'une augmentation du niveau de vulnérabilité suite à l'altération de la caractéristique concernée.

**Définition 3.2.4.1 : Degré de perte d'une caractéristique**

On appelle degré de perte d'une caractéristique  $X_j \in \Omega_X$  au temps  $t \in [1, T]$ , la proportion d'individus ayant une incapacité unitaire de rebond par rapport à cette capacité, c'est-à-dire :

$$\mu_{X_j}^t = 1 - \frac{\text{Card}(\mathcal{R}_{\{X_j\}}^t)}{\text{Card}(\Omega_T)}$$

Le degré de perte d'une caractéristique permet d'apprécier l'impact du choc traumatique sur cette caractéristique au sein de la population. Plus le choc a un impact négatif sur une caractéristique, plus le degré de perte de cette caractéristique est élevé (proche de 1). Les caractéristiques les moins impactées négativement par le choc au sein de la population ont un degré de perte faible (proche de 0).

**Définition 3.2.4.2 : Propension à la souffrance d'un individu**

On appelle propension à la souffrance d'un individu  $i$  au temps  $t \in [1, T]$  relativement aux capacités  $\mathcal{D}_X \subset \Omega_X$ , la proportion de caractéristiques  $X_j \in \mathcal{D}_X$  pour lesquels cet individu a une incapacité unitaire de rebond.

**Propriété**

A une date  $t$  donnée, la propension à la souffrance d'un individu par rapport à un ensemble de caractéristiques est égale au complémentaire à un de son degré de rebond par rapport à ce même ensemble de capacités. Ainsi, on a :

$$S_{it}(\mathcal{D}_X) = 1 - \delta_{it}^X$$

La propension à la souffrance d'un individu par rapport à un ensemble de capacités est une mesure de la propension à la souffrance de cet individu si l'on ne considère que ces caractéristiques. Ainsi, une propension à la souffrance faible (proche de 0) traduit une possibilité de souffrance faible, voir une possibilité d'absence de souffrance dans l'accomplissement des responsabilités liées à l'ensemble des capacités considérées. De même, une propension à la souffrance élevée (proche de 1) traduit une possibilité élevée de souffrance dans l'accomplissement des responsabilités liées à l'ensemble des capacités considérées, voir une possibilité de souffrance résultant d'une incapacité totale d'accomplir ces responsabilités. Il est important de comprendre que, tout comme la résilience, la souffrance, bien que résultant d'un sorte de privation, est un processus relativement complexe. L'approche analytique utilisée dans la théorie stochastique de la résilience se limite essentiellement à apprécier la privation de capacités par la dégradation de caractéristiques. Cette approche ne permet donc que d'aborder la souffrance en terme de possibilité plus ou moins grande de souffrir suite à la détérioration de caractéristiques; et doit être compris et interpréter comme tel. Il ne s'agit donc nullement de spéculer sur l'existence et la quantification d'une souffrance avec certitude, mais plutôt de mettre en lumière le niveau risque de souffrance résultant d'une perte de caractéristiques.

### 3.2.5) LES ETATS DE VULNERABILITE

La théorie stochastique de la résilience fournit un moyen simple et efficace pour savoir si un individu a une capacité ou une incapacité de rebond et permet de calculer le degré de rebond de celui-ci. Il permet aussi d'apprécier le risque de souffrance à travers le niveau de perte des caractéristiques de l'individu suite au choc traumatique subit. Il reste toutefois possible de regrouper les individus selon leur degré de rebond. Il est toutefois raisonnable de considérer que le degré de rebond est un bon indicateur du niveau de vulnérabilité de l'individu. Partant de ce principe, la théorie stochastique de la résilience classe les individus en des catégories, appelés états de vulnérabilité, selon leur degré de rebond.

D'un point de vue technique, il existe une infinité de manière de procéder. Toutefois, il semble naturel qu'un regroupement par quartile soit privilégiée d'une part à cause de la nature interprétable de ces indicateurs en Statistique et d'autre part, à cause de leur robustesse face aux individus atypiques. Ainsi, en utilisant la médiane (le 2<sup>e</sup> quartile), quatre états de vulnérabilités peuvent être définis :

- ✓ La vulnérabilité absolue (VA)
- ✓ La vulnérabilité grave (VG)
- ✓ La vulnérabilité légère (VL)
- ✓ La non vulnérabilité (NV)

#### **Définition 3.2.5.1 : Vulnérabilité absolue**

*Un individu est dit absolument vulnérable s'il a une incapacité absolue de rebond, c'est à dire un degré de rebond nul.*

#### **Définition 3.2.5.2 : Vulnérabilité grave**

*Un individu est dit gravement vulnérable s'il a une capacité de rebond à un degré strictement inférieur à 50%.*

Les individus non résilients et absolument résilients ne peuvent être résilients inférieurs. Cette notion ne concerne que les individus relativement résilients dans l'absolu, c'est-à-dire ayant un degré de vulnérabilité compris dans l'intervalle  $]0, 100[$  (en %).

#### **Définition 3.2.5.3 : Vulnérabilité légère**

*Un individu est dit légèrement vulnérable s'il a une capacité de rebond à un degré supérieur ou égal à 50%.*

#### **Définition 3.2.5.4 : Non vulnérabilité**

*Un individu est dit non vulnérable s'il a une capacité absolue de rebond, c'est à dire un degré de rebond égal à 1.*

---

### 3.3) L'IDENTIFICATION DES ETATS TRAUMATIQUES LATENTS

---

L'univers post-choc est un univers complexe dans lequel les individus traumatisés subissent de nombreuses évolutions cognitives. En dehors du fait que certains individus sont résilients et d'autres pas, ceux-ci adoptent des comportements particuliers. Il est donc possible d'établir une typologie des individus sur la base de l'évolution de leurs situations. Du point de vue pratique, un des enjeux de la Résiliométrie est de pouvoir identifier les états latents (non observables directement) dans lesquels se trouvent les individus traumatisés. Ces états sont des dispositions psychologiques qui gouvernent ou expliquent l'aptitude à la résilience des individus. Pour un individu donné, son état psychologique latent qui engendre son comportement réel face au choc, dépend de la situation sociale qui prévaut non seulement au niveau de son environnement, mais aussi au niveau de l'évolution même de ses capacités individuelles intrinsèques. Une des préoccupations majeures de la Résiliométrie est de pouvoir identifier l'état psychosociologique dans lequel se trouvent chacun des individus traumatisés considérés. Comme le souligne Raymond Boudon ([RAY62]), « les sciences humaines sont, dans une certaine mesure, des sciences de la classification : l'étude des stratifications sociales, les typologies sociologiques, l'étude des aptitudes psychologiques, celle des zones socio-économiques en écologie, etc., impliquent, de par leur nature, des problèmes de classification. ». D'une manière générale, l'intérêt d'identifier des états latents réside dans la possibilité d'établir une typologie des individus selon leurs états psychologiques latents. D'un point de vue technique, cette caractérisation nécessite le recours aux méthodes de classification non supervisées (clustering, typologie). Parmi les méthodes de typologies existantes, la technique qui semble mieux adaptée à la résilience est le modèle des classes latentes (MCL ou LCM). Des présentations de la théorie de base des MCL pourraient être trouvées dans [BKL02] et [CEL92].

#### 3.3.1) LE MODELE DES CLASSES LATENTES

Le modèle des classes latentes permet d'effectuer un regroupement des individus selon leur appartenance à des groupes inobservables directement appelés des classes latentes. Les modèles de classes latentes constituent une approche de classification automatique (classification non supervisée ou clustering) basée sur la théorie des probabilités. Ils utilisent essentiellement la technique des modèles de mélanges. En effet, il est intuitif de considérer une population comme étant composée d'un mélange de groupes d'individus ayant des comportements semblables. Sur le plan probabiliste, on considère les distributions des variables décrivant les classes comme invariantes à l'intérieur d'une classe et différentes d'une classe à une autre.

## Notations mathématiques

Dans le contexte de la résilience, l'utilisation du modèle des classes latentes nécessite des informations sur la résilience et les dimensions de celle-ci. Plus précisément, la classification prend appui sur des mesures de la résilience et de ses dimensions. Toutefois, comme le modèle des classes latentes requiert des variables qualitatives, un mécanisme de discrétisation des valeurs numériques est nécessaire. Ainsi, considérons les notations suivantes :

- ✓  $T$  l'horizon temporel de mesure de la résilience
- ✓  $N$  le nombre d'individus utilisés dans la collecte de données
- ✓  $\xi$  le nombre de dimensions considérées
- ✓  $K_j$  le nombre de modalités issues de la discrétisation de la dimension  $X_j$  ( $j \in [1, J]$ )
- ✓  $X_{jk}$  la  $k^{eme}$  modalité de la dimension  $X_j$  discrétisée
- ✓  $Y_{ijk}^t$  la variable binaire prenant la valeur 1 si le  $i^{eme}$  individu prend la modalité  $X_{jk}$  de la variable  $X_j$  au temps  $t \in [1, T]$ , et 0 sinon
- ✓  $Y_{ij}^t = (Y_{i1j}, \dots, Y_{iK_jj})$  les valeurs prises par le  $i^{eme}$  individu relativement au vecteur binaire orthogonal associé aux modalités de la dimension discrète  $X_j$  à l'instant  $t$
- ✓  $Y_i^t = (Y_{i1}, \dots, Y_{iJ})$  les valeurs binaires prises par le  $i^{eme}$  individu pour toutes les variables qualitatives orthogonalisées au temps  $t$
- ✓  $R$  le nombre de classes latentes recherchées (états cognitifs latents)
- ✓  $C_r$  la  $r^{eme}$  classe latente recherchée ( $r \in [1, R]$ )
- ✓  $p_r$  le poids associé à la classe latente  $C_r$ .

## Discrétisation des variables

Pour la résilience, sa discrétisation se fait par le calcul des états de résilience via la théorie stochastique de la résilience. Cependant, la discrétisation des dimensions se fait en utilisant les quantiles d'ordre  $\alpha$ , plus précisément, les quartiles. Il est aussi possible d'utiliser les déciles pour une discrétisation plus fine.

## Modélisation des classes latentes

La probabilité qu'un individu du groupe  $C_r$  (classe latente inconnue) choisisse la modalité  $X_{jk}$  de la variable  $X_j$  au temps  $t$  est donnée par  $\pi_{jkr}^t = \mathbb{P}(Y_{ijk}^t = 1 \mid C_r)$ . On peut en déduire le profil d'un individu  $i$  relativement à ses valeurs pour les variables binaires  $Y_j^t$  à un instant  $t$  donné par  $\forall t \in [1, T]$  :

$$f(Y_i^t, \pi_r^t) = \prod_{j=1}^J \prod_{k=1}^{K_j} (\pi_{jkr}^t)^{Y_{ijk}^t} \text{ avec } \sum_{k=1}^{K_j} \pi_{jkr}^t = 1$$

Si l'on considère l'ensemble des dimensions discrétisées pondérées par l'importance de leurs modalités, le profil d'un individu peut s'écrire  $\forall t \in [1, T]$  :

$$\mathbb{P}(Y_i^t | \pi^t, p^t) = \sum_{r=1}^R p_r^t \prod_{j=1}^J \prod_{k=1}^{K_j} (\pi_{jkr}^t)^{Y_{ijk}^t} \quad \text{avec} \quad \sum_{r=1}^R p_r^t = 1$$

Ainsi, la vraisemblance d'appartenance des individus à chaque classes latente est données par :

$$\mathcal{L}(\pi^t, p^t) = \prod_{i=1}^N \mathbb{P}(Y_i^t | \pi^t, p^t) = \prod_{i=1}^N \left[ \sum_{r=1}^R p_r^t \prod_{j=1}^J \prod_{k=1}^{K_j} (\pi_{jkr}^t)^{Y_{ijk}^t} \right]$$

Par conséquent, la log-vraisemblance de la loi régissant la répartition des valeurs des dimensions entre les différents individus est :

$$\mathcal{L}(\pi^t, p^t) = \log(\mathcal{L}(\pi^t, p^t)) = \sum_{i=1}^N \ln \left( \sum_{r=1}^R p_r^t \prod_{j=1}^J \prod_{k=1}^{K_j} (\pi_{jkr}^t)^{Y_{ijk}^t} \right)$$

### Estimation des paramètres

La maximisation de la log-vraisemblance permet d'obtenir les paramètres  $\hat{\pi}_{jkr}^t$ ,  $\hat{\pi}_{jkr}^t$ ,  $\hat{p}_r^t$  et  $p_r^t$  nécessaires pour avoir une meilleure description des profils de répartition des individus dans les classes latentes. Ainsi, la probabilité d'appartenance de chaque individu à une classe donnée est fournie par :

$$\mathbb{P}(C_r | Y_i^t) = \frac{\hat{p}_r^t f(Y_i^t, \hat{\pi}_r^t)}{\sum_{q=1}^R \hat{p}_q^t f(Y_i^t, \hat{\pi}_q^t)}$$

Ces probabilités sont très complexes à déterminer. Dans la pratique, on se sert de l'algorithme dite EM (Expectation-Maximisation) qui fournit une estimation empirique des probabilités d'appartenance des individus aux différentes classes latentes (groupes inobservables). Les résultats de ces simulations sont des estimations correspondant aux quantités suivantes:

- $\hat{p}_r^{t(new)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\mathbb{P}}(C_r | Y_i^t)$
- $\hat{\pi}_{jr}^{t(new)} = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N Y_{ij} \hat{\mathbb{P}}(C_r | Y_i^t)}{\sum_{i=1}^N \hat{\mathbb{P}}(C_r | Y_i^t)}$

## Nombre de classes

Le modèle des classes latentes fournit des probabilités d'appartenance à des classes latentes dont le nombre est fixé a priori. Toutefois, ces probabilités n'ont pas une interprétation naturelle et intuitive. En plus de cela, ces classes latentes sont des états cognitifs qui ne sont connus qu'à travers les individus qui sont dans ces états (individus affectés à ces classes).

### 3.3.2) LA DISTANCE PHI-H ET LA PHI-SIMILARITE

Dans cette thèse, la méthode de classification automatique (clustering) utilisée est le modèle de classes latentes. Le choix de ce modèle résulte de l'objectif visé qui est d'identifier des classes de comportements inobservables (classes latentes) qui sont interprétables comme autant d'états psychologiques latents dans lesquels peuvent se trouver les individus traumatisés. Cela n'exclut en rien la possibilité de regrouper les individus en classes homogènes sur la base d'un certain nombre de critères fixés a priori. Cependant, de nombreuses méthodes existantes pour effectuer de telles typologies sont basées sur des métriques (k-means, k-méloïdes, classification hiérarchique, etc.). Or, dans le cadre de la résilience, de tels regroupements seront d'autant plus riches et intéressants qu'il est possible de prendre en compte à la fois des informations numériques (revenu par exemple), qualitatives (situation matrimoniale par exemple) ou textuelles (les avis sur des questions précises par exemple). Le livre très complet de Lebart L., Morineau A. et Piron M. ([LEB06]) fournit une présentation très technique avec des illustrations pratiques de nombreuses techniques de classification automatique.

Dans la littérature, les mesures de similarités utilisées ne prennent pas en compte les données textuelles. En plus, les approches utilisées sur les données qualitatives sont le plus souvent liées à de simples dénombrements d'individus qui n'ont pas nécessairement un sens du point de vue statistique. Pour ce faire, il nous a semblé judicieux de proposer un indice de similarité plus approprié. Sur le plan technique, une mesure de similarité doit posséder les propriétés suivantes :

- ✓ **Réflexivité** : Un individu étant, par principe, similaire à lui-même, la mesure de similarité doit être nécessairement réflexive.
- ✓ **Symétrie** : Si un individu A est similaire à un autre individu B alors il est nécessaire que B soit aussi similaire à A en utilisant la mesure de similarité.
- ✓ **Non-transitivité** : Une mesure de similarité ne doit pas nécessairement être transitive. Par conséquent, si un individu A est similaire à un individu B ; et si B est similaire à un autre individu C, il n'est pas impératif que l'application de la mesure de similarité permette de déduire que A est forcément similaire à C. La non exigence de la transitivité provient du fait que les caractéristiques qui définissent les similarités entre A et B et entre B et C ne sont pas nécessairement les mêmes.

Ainsi, l'indice de similarité proposé est développé en respectant les propriétés mathématiques ci-avant énumérées.

## Notations mathématiques de base

Considérons les notations mathématiques suivantes :

- $\mathcal{S} = (X_1, \dots, X_S) = (X_j)_{1 \leq j \leq S}$ , l'ensemble des  $S$  critères (variables) prises en compte dans l'évaluation des proximités entre les différents individus
- $\mathcal{N}$  l'ensemble des  $N$  critères numériques parmi tous les critères pris en compte dans l'évaluation des proximités entre les différents individus
- $\mathcal{Q}$  l'ensemble des  $Q$  critères catégoriels parmi tous les critères pris en compte dans l'évaluation des proximités entre les différents individus
- $\mathcal{T}$  l'ensemble des  $T$  critères textuels parmi tous les critères pris en compte dans l'évaluation des proximités entre les différents individus

Tout d'abord, on peut écrire que  $\mathcal{S} = \mathcal{N} \cup \mathcal{Q} \cup \mathcal{T}$  et on a  $S = N + Q + T$ . Ensuite, si on note  $I_s$  et  $I_c$  deux individus décrits par les critères considérés, et si l'on note  $Sim(\cdot)$  la mesure de la similarité entre ces deux individus et  $\Phi$  une réécriture de  $Sim(\cdot)$ , on a :

$$\begin{aligned} Sim(I_s, I_c) &= Sim(\mathcal{S}_s, \mathcal{S}_c) \\ &= Sim(\{\mathcal{N}_s \cup \mathcal{Q}_s \cup \mathcal{T}_s\}, \{\mathcal{N}_c \cup \mathcal{Q}_c \cup \mathcal{T}_c\}) \\ &= \Phi(\{(\mathcal{N}_s, \mathcal{N}_c), (\mathcal{Q}_s, \mathcal{Q}_c), (\mathcal{T}_s, \mathcal{T}_c)\}) \\ &= \Psi(\alpha(\mathcal{N}_s, \mathcal{N}_c), \beta(\mathcal{Q}_s, \mathcal{Q}_c), \gamma(\mathcal{T}_s, \mathcal{T}_c)) \\ &= \Psi(\alpha(I_s, I_c), \beta(I_s, I_c), \gamma(I_s, I_c)) \end{aligned}$$

Les fonctions  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  désignent des distances entre deux vecteurs de variables respectivement numériques, qualitatives et textuelles. Elles s'appliquent à chaque partie uniforme du vecteur décrivant un individu. Quant à la fonction  $\Psi$ , elle désigne l'expression mathématique finale de la mesure de similarité (la Phi-distance)

### La fonction $\alpha$ entre deux vecteurs numériques

$\alpha$  étant une distance entre deux vecteurs numériques, il semble naturelle de la définir en utilisant une distance de Minkowski. Par conséquent, d'une manière générale, on a :

$$\alpha(I_s, I_c) = \sqrt[p]{\sum_{X_k \in \mathcal{N}} (X_{ks} - X_{kc})^p}.$$

En pratique, on pourra se limiter à  $p = 2$  qui correspond à la distance euclidienne. Ainsi, on prendra comme distance entre les variables numériques, la fonction définie par :

$$\alpha(I_s, I_c) = \sqrt{\sum_{X_k \in \mathcal{N}} (X_{ks} - X_{kc})^2}$$

La métrique  $\alpha$  telle que définie possède les propriétés de réflexivité et de symétrie escomptées. En effet, on a :

- $\alpha(I_s, I_s) = \sqrt{\sum_{X_k \in \mathcal{N}} (X_{ks} - X_{ks})^2} = 0$
- $\alpha(I_s, I_c) = \sqrt{\sum_{X_k \in \mathcal{N}} (X_{ks} - X_{kc})^2} = \sqrt{\sum_{X_k \in \mathcal{N}} (X_{kc} - X_{ks})^2} = \alpha(I_c, I_s)$

### 3.3 La fonction $\beta$ entre deux vecteurs de variables qualitatives

$\beta$  étant une distance entre deux vecteurs de variables qualitatives, il semble naturel de considérer le nombre de modalités communes entre les individus comme base de construction de la métrique. Cependant, il faut prendre en compte le fait qu'il y a plusieurs variables qualitatives. Si on note  $X_{k\omega}$  la modalité de la variable  $X_k$  prise par l'individu  $I_\omega$ , la différence de modalité entre les individus  $I_s$  et  $I_c$  relativement à la variable  $X_k$  est donnée par :

$$\beta_k(I_s, I_c) = \begin{cases} 1 & \text{si } X_{ks} = X_{kc} \\ 0 & \text{si } X_{ks} \neq X_{kc} \end{cases}$$

La métrique  $\beta$  est définie par :

$$\beta(I_s, I_c) = \frac{K - \sum_{k=1}^K \beta_k(I_s, I_c)}{1 + \sum_{k=1}^K \beta_k(I_s, I_c)}$$

La métrique  $\beta$  telle que définie, possède les propriétés de réflexivité et de symétrie escomptées. En effet, on a :

- $\beta(I_s, I_s) = \frac{K - \sum_{k=1}^K \beta_k(I_s, I_s)}{1 + \sum_{k=1}^K \beta_k(I_s, I_s)} = \frac{K - K}{1 + K} = 0$
- $\beta(I_s, I_c) = \frac{K - \sum_{k=1}^K \beta_k(I_s, I_c)}{1 + \sum_{k=1}^K \beta_k(I_s, I_c)} = \frac{K - \sum_{k=1}^K \beta_k(I_c, I_s)}{1 + \sum_{k=1}^K \beta_k(I_c, I_s)} = \beta(I_c, I_s)$

### La fonction $\gamma$ entre deux vecteurs de données textuelles

La fonction  $\gamma$  est une distance entre deux vecteurs de variables textuelles. Pour la définir, nous considérerons la distance appelée « distance cosinus ». Comme plusieurs variables textuelles sont en jeu, nous proposons de construire une distance cosinus par variable puis, de faire leur somme pondérée par le poids relatif de chaque variable textuelle relativement aux séquences de mots communs (à un facteur correctif près).

$\forall X_k \in \mathcal{T}$ , notons  $\Delta_{ks}$  et  $\Delta_{kc}$  les corpus de la variable textuelle  $X_k$  correspondant respectivement aux individus  $I_s$  et  $I_c$  obtenus à partir d'une même suite d'opérations linguistiques, en particulier la même opération de segmentation de textes (tokenisation). Nous conseillons les opérations de mise en minuscule des textes, de suppression des espaces vides, de suppression des valeurs numériques, de suppression des ponctuations, de suppression des mots vides et de tokenization par mots. Une fois la tokenization effectuée, l'ensemble des mots de  $X_k$  communs aux individus  $I_s$  et  $I_c$  est donné par  $\Delta_k = \Delta_{ks} \cap \Delta_{kc}$ .

Notons  $\tau_{kj} \in \Delta_k$  un terme (mot) rencontré  $\delta_j^{ks}$  fois dans  $\Delta_{ks}$  et  $\delta_j^{kc}$  fois dans  $\Delta_{kc}$ . Le nombre de fois que le terme  $\tau_{kj}$  est rencontré dans  $\Delta_k$  est  $\delta_{kj} = \text{Min}(\delta_j^{ks}, \delta_j^{kc})$ . La distance cosinus est définie par :

$$\text{cosine}_k(I_s, I_c) = \frac{\langle X_{ks}, X_{kc} \rangle}{\|X_{ks}\| \cdot \|X_{kc}\|} = \frac{\sum_{j=1}^{\text{card}(\Delta_k)} \delta_j^{ks} \cdot \delta_j^{kc}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{\text{card}(\Delta_k)} \delta_j^{ks}} \sqrt{\sum_{j=1}^{\text{card}(\Delta_k)} \delta_j^{kc}}}$$

En considérant les poids  $\lambda_k = \frac{1 + \text{Card}(\Delta_k)}{\sum_{k=1}^{k=T} (1 + \text{Card}(\Delta_k))}$ , on obtient :

$$\begin{aligned} \gamma(I_s, I_c) &= \sum_{k=1}^{k=T} \lambda_k (1 - \text{cosine}_k(I_s, I_c)) \\ &= \frac{1}{\sum_{k=1}^{k=T} (1 + \text{Card}(\Delta_k))} \sum_{k=1}^{k=T} (1 + \text{Card}(\Delta_k)) \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^{\text{card}(\Delta_k)} \delta_j^{ks} \cdot \delta_j^{kc}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{\text{card}(\Delta_k)} \delta_j^{ks}} \sqrt{\sum_{j=1}^{\text{card}(\Delta_k)} \delta_j^{kc}}}\right) \end{aligned}$$

Par construction, la métrique  $\gamma$  telle que définie possède les propriétés de réflexivité et de symétrie escomptées. En effet, on a :

$$\begin{aligned} \gamma(I_s, I_s) &= \sum_{k=1}^{k=T} \lambda_k (1 - \text{cosine}_k(I_s, I_s)) = \sum_{k=1}^{k=T} \lambda_k \left(1 - \frac{\langle X_{ks}, X_{ks} \rangle}{\|X_{ks}\| \cdot \|X_{ks}\|}\right) = 0 \\ \gamma(I_s, I_c) &= \sum_{k=1}^{k=T} \lambda_k \left(1 - \frac{\langle X_{ks}, X_{kc} \rangle}{\|X_{ks}\| \cdot \|X_{kc}\|}\right) = \sum_{k=1}^{k=T} \lambda_k \left(1 - \frac{\langle X_{kc}, X_{ks} \rangle}{\|X_{kc}\| \cdot \|X_{ks}\|}\right) = \gamma(I_c, I_s) \end{aligned}$$

### La fonction $\Psi$ de similarité globale

Les mesures  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont des distances. Pour en déduire une mesure de similarité, on utilisera une interpolation polynomiale de Lagrange sur l'intervalle  $[0, 1]$ . En effet, notons  $d_\alpha$ ,  $d_\beta$  et  $d_\gamma$  les valeurs normalisées de  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ . On a donc  $d_v = 1 - \frac{1}{1+v}$  avec  $v \in \{\alpha, \beta, \gamma\}$  et en posant  $\mu = \frac{d_\alpha + d_\beta + d_\gamma}{3} = 1 - \frac{\frac{1}{1+\alpha} + \frac{1}{1+\beta} + \frac{1}{1+\gamma}}{3}$ , on a par construction  $\mu \in [0, 1]$ .

On veut construire la fonction  $\Psi$  de telle sorte que  $\Psi(0) = 100$ , ( $i \in [1, n]$ ),  $\Psi(\frac{1}{2}) = 50$ ,  $\Psi(\frac{3}{4}) = 25$  et  $\Psi(1) = 0$ . On dispose donc dans le plan d'un ensemble de 5 points  $(x_i, y_i)_{1 \leq i \leq 5}$  qui est l'ensemble  $\{(0, 100), (\frac{1}{4}, 75), (\frac{1}{2}, 50), (\frac{3}{4}, 25), (1, 0)\}$ . Le polynôme de Lagrange associé à chaque couple  $(x_i, y_i)$  est donné par  $l_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^{j=5} \frac{x - x_j}{x_i - x_j}$ , ce qui permet

d'obtenir :

$$\Psi(x) = \sum_{i=1}^{i=5} y_i l_i(x) = 100(1 - x)$$

Si on se conforme aux notations définies, on peut prendre comme mesure de similarité globale, la quantité définie par :

$$\begin{aligned} Sim(T_s, T_c) &= \Psi(\mu(T_s, T_c)) \\ &= 100(1 - \frac{\frac{1}{1+\alpha(T_s, T_c)} + \frac{1}{1+\beta(T_s, T_c)} + \frac{1}{1+\gamma(T_s, T_c)}}{3}) \end{aligned}$$

Où :

- $\alpha(I_s, I_c) = \sqrt{\sum_{X_k \in \mathcal{N}} (X_{ks}^2 + X_{kc}^2)}$
- $\beta(I_s, I_c) = \frac{K - \sum_{k=1}^K \beta_k(I_s, I_c)}{1 + \sum_{k=1}^K \beta_k(I_s, I_c)}$
- $\gamma(I_s, I_c) = \frac{1}{\sum_{k=1}^{k=T} (1 + Card(\Delta_k))} \sum_{k=1}^{k=T} (1 + Card(\Delta_k)) (1 - \frac{\sum_{j=1}^{card(\Delta_k)} \delta_j^{ks} \cdot \delta_j^{kc}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{card(\Delta_k)} \delta_j^{ks}} \sqrt{\sum_{j=1}^{card(\Delta_k)} \delta_j^{kc}}})$

L'indice de similarité tel que défini est décroissant avec le niveau de dissemblance des individus les uns par rapport aux autres, réflexive, symétrique et borné entre 0 et 100. En effet :

- $Sim(I_s, I_s) = 100(1 - \frac{\frac{1}{1+\alpha(I_s, I_s)} + \frac{1}{1+\beta(I_s, I_s)} + \frac{1}{1+\gamma(I_s, I_s)}}{3}) = 0$
- $Sim(I_s, I_c) = 100(1 - \frac{\frac{1}{1+\alpha(I_s, I_c)} + \frac{1}{1+\beta(I_s, I_c)} + \frac{1}{1+\gamma(I_s, I_c)}}{3})$   
 $= 100(1 - \frac{\frac{1}{1+\alpha(I_c, I_s)} + \frac{1}{1+\beta(I_c, I_s)} + \frac{1}{1+\gamma(I_c, I_s)}}{3})$   
 $= Sim(I_c, I_s)$
- Le maximum de  $Sim(I_c, I_s)$  est obtenu si  $\alpha(I_c, I_s) = \beta(I_c, I_s) = \gamma(I_c, I_s) = \infty$ . Dans ce cas, on a  $Sim(I_c, I_s) = 100(1 - 0) = 100$ .
- Le minimum de  $Sim(I_c, I_s)$  est obtenu si  $\alpha(I_c, I_s) = \beta(I_c, I_s) = \gamma(I_c, I_s) = 0$ . Dans ce cas, on a  $Sim(I_c, I_s) = 100(1 - 1) = 0$ .

La Phi-distance est un indice de similarité très général. Son application va au-delà de la Résiliométrie. De par sa nature globale, la métrique peut être adaptée à d'autres domaines comme la statistique multidimensionnelle, l'apprentissage artificiel, la fouille de données et la

science des données (Data Science) dans lesquelles la variété des types de données est une caractéristique fondamentale.

### L'algorithme de calcul de la matrice de Phi-similarité

Dans la plupart des méthodes utilisant les indices de similarités, il s'agit d'évaluer les similarités entre plusieurs individus, ce qui revient à calculer les distances entre tous les couples possibles d'individus considérés sous la forme d'une matrice de similarités. En notant  $\Omega_I$ , l'ensemble des individus considérés, l'algorithme de calcul de la matrice de Phi-similarité entre plusieurs individus est le suivant :

---

#### Algorithme 4 : Calcul de la matrice de Phi-similarité

---

1. Entrée :  $\mathcal{N}, \mathcal{Q}, \mathcal{T}, \Omega_I$
  2.  $M = 0_{1:n, 1:n}$  // Matrice des similarités entre les individus
  3. Pour ( $i \in \Omega_I$ ) {
  4.     Pour ( $j \in \Omega_I$ ) {
  5.         Si ( $i < j$ ) {
  6.             a) Calculer  $\alpha(I_i, I_j)$
  7.             b) Calculer  $\beta(I_i, I_j)$
  8.             c) Calculer  $\gamma(I_i, I_j)$
  9.             d) Calculer  $\Psi(I_i, I_j) = 100[1 - (\frac{1}{1+\alpha(I_i, I_j)} + \frac{1}{1+\beta(I_i, I_j)} + \frac{1}{1+\gamma(I_i, I_j)})/3]$
  10.            e)  $M[i, j] = \Psi(I_i, I_j)$
  11.         } Sinon {
  12.         }
  13.     }
  14. }
  15. Sortie :  $M$
- 

Une des applications d'un tel indice, dans l'analyse de la résilience, pourrait être la construction de systèmes de raisonnement à partir de cas (RàPC). Ce type de systèmes informatiques utilise essentiellement des métriques et, dans le contexte de la résilience, peut servir à la capitalisation des expériences en matière de politiques de résilience. Les indices de similarités classiques utilisés dans les systèmes actuels de RàPC ne prennent pas en compte les informations textuelles. En plus de cela, la prise en compte des données qualitatives est limitée à des tableaux d'absence-présence creuses avec un nombre de valeurs nulles croissant avec le nombre de modalités de chaque variable. Dans ce contexte, l'intérêt de l'indice de similarité proposé est double. D'une part, il prend en compte la diversité des types de données généralement recueillies dans le cadre de l'évaluation des proximités entre les individus (numérique, qualitative et textuelle) ; et d'autre part, elle présente l'avantage de préserver les deux propriétés théoriques de base d'un tel type d'indicateur, à savoir la réflexivité et la symétrie. En outre son caractère borné entre les valeurs 0 et 100 peut lui conférer une interprétation pratique en terme de pourcentage.

---

## CHAPITRE 4 : L'IDENTIFICATION DES PROFILS ET DES RELATIONS

---

L'un des problèmes les plus importants dans l'analyse de la résilience et préconisé par de nombreux auteurs est l'établissement du profil des individus qui ont l'aptitude à la résilience. Une solution à ce problème consiste à modéliser les états de vulnérabilité. Dans ce même ordre d'idée, la caractérisation des états psychologiques latents est essentielle. Cependant, d'un point de vue technique, une telle caractérisation peut se faire en modélisant les classes latentes obtenues. Ainsi, l'élaboration des profils des individus qui ont l'aptitude à la résilience ou les profils des individus qui se trouvent dans les états cognitifs latents peut se faire par les mêmes techniques de modélisation. Compte tenu de l'objectif de lisibilité et de facilité d'interprétation des résultats des modèles résiliométriques, la technique des arbres de décision sera utilisée pour cette modélisation.

Outre la détermination des profils des individus, la recherche des causes à l'origine d'un choc traumatique est une préoccupation majeure des analystes de la résilience. En effet, le choc est l'élément initiateur de tout processus de résilience. Il revêt donc un caractère particulièrement important. De nombreux auteurs préconisent que l'analyste de la résilience fasse une rétrospection pour examiner les causes principales significatives à l'origine du choc. Ainsi, Régis Mahieu précise que l'analyse de la résilience doit mettre en relief l'origine et la nature de la souffrance ressentie et qu'il est essentiel que la modélisation de la résilience puisse mettre en exergue l'élément perturbant à l'origine de la souffrance. C'est pourquoi la Résiliométrie se propose de fournir un cadre de référence pour l'examen des causes probables les plus significatives à l'origine du choc considéré.

En plus du choc, un des concepts fondamentaux dans l'étude de la résilience est sans aucun doute la notion de dimensions de la résilience. En effet, tout le monde s'accorde sur le fait que la résilience est inobservable, mais qu'elle peut revêtir plusieurs formes. Plus précisément, on admet que la résilience comporte plusieurs aspects que l'on désigne sous le terme « dimensions ». Malheureusement, cette notion de dimension est utilisée à tort et à travers au point que de nombreuses études l'utilisent pour désigner des variables observables directement. Sans entrer dans les détails théoriques, la notion de dimensions représente uniquement des aspects inobservables et correspond exactement à la notion de variable latente. Chaque dimension est décrite par un certain nombre d'indicateurs quantifiables numériquement appelés variables manifestes ou observables. La position de la Résiliométrie est que la résilience ne peut être étudiée directement à partir d'indicateurs observables. Les indicateurs observables doivent être regroupés en dimensions qui, elles, sont les constituants de la résilience. De ce fait, la résilience ne peut être étudiée que par ses dimensions qui, à leur tour, possèdent des variables numériques ou numérisables permettant de les caractériser.

C'est pourquoi, ce chapitre présente des modèles résiliométriques permettant d'établir les profils des individus, d'identifier les causes et effets significatifs des chocs et de détecter les interactions entre les différentes dimensions

## 4.1) LE CALCUL DES PROFILS DES ETATS PSYCHOLOGIQUES

Les états psychologiques latents sont la clé pour établir le profil des individus qui ont l'aptitude à la résilience. Il est évident que l'aptitude à la résilience est dans une certaine mesure tributaire à l'espoir que les individus ont à devenir résilients. En effet, il n'y a rien à attendre d'un individu qui se résigne et ne trouve plus de raison ou ne voit plus la nécessité de se battre pour l'évolution de sa situation de souffrance. Aussi longtemps qu'un individu perd l'espoir de devenir résilient, il inhibe l'évolution due à son propre processus de résilience. Il est donc primordial de pouvoir, à tout instant, déterminer l'espoir que les individus ont de sortir de leur situation de souffrance afin de pouvoir entreprendre efficacement les actions appropriées.

### 4.1.1) LES ARBRES DE DECISION

Les arbres de décision sont une classe de techniques d'apprentissage supervisé qui ont l'avantage de fournir une visualisation simple des résultats de la modélisation comme le montre la figure suivante :

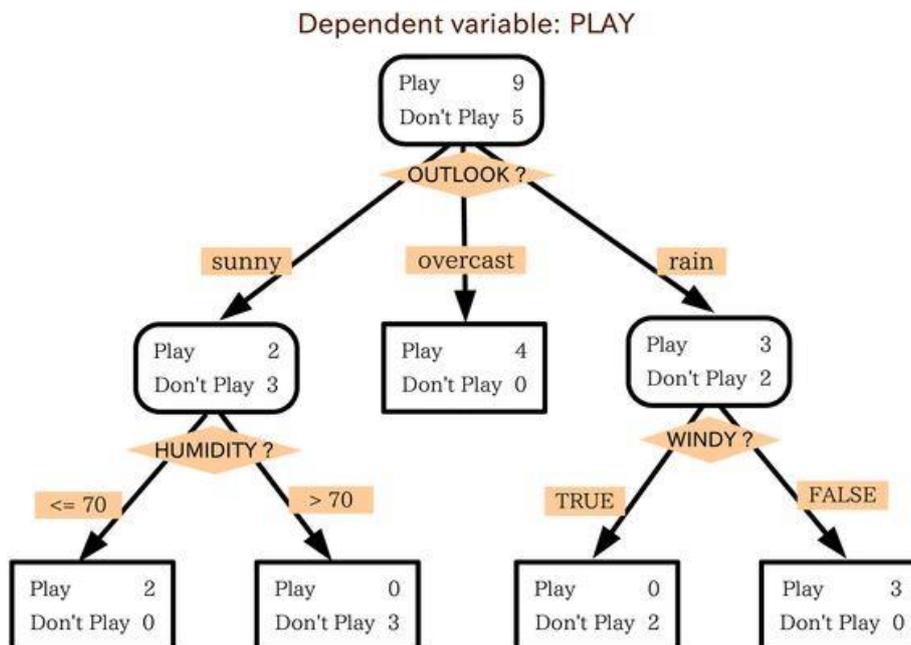


Figure 15 : Exemple d'arbre de décision appliqué à la pratique du golf<sup>3</sup>

<sup>3</sup> [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decision\\_tree\\_model.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decision_tree_model.png)

Cet arbre de décision décrit les conditions de pratique d'un jeu sportif selon un certain nombre de paramètres. Le modèle possède l'avantage de sélectionner automatiquement les paramètres suffisants pour obtenir des règles de décision fiables. Le lecteur intéressé par les détails et une étude avancée des arbres de décision pourra consulter [BRE84], [CBO02], [FES97], [IWI99], [RIK05] et [ZIG00].

### La construction des arbres de décision

Pour mieux comprendre le fondement théorique des arbres de décision, considérons les notations suivantes :

- ✓  $C = \{C_1, \dots, C_K\}$  un ensemble de  $K$  états dans lesquels peut se trouver un individu
- ✓  $X = \{X_1, \dots, X_J\}$  un ensemble de  $J$  variables binaires décrivant chaque individu
- ✓  $V_j = \{a_1, \dots, a_{m_j}\}$  l'ensemble des modalités possibles du descripteur  $X_j \in X$
- ✓  $S_A = \{S_1, \dots, S_Q\}$  l'ensemble des  $Q$  nœuds d'un arbre de décision,  $A$  fournissant une description de classes  $C_k \in C$  à partir des informations  $X_j \in X$ .
- ✓  $N$  le nombre d'individus constituant la population totale
- ✓  $T(s) \in [1, N]$  le nombre d'individus au nœud  $s \in S_A$
- ✓  $\Gamma_k(s)$  le nombre d'individus au nœud  $s \in S_A$  faisant partie de la classe  $C_k \in C$
- ✓  $\Lambda(s, j, l)$  le nombre d'individus aux nœuds  $s \in S_A$  possédant la modalité  $a_l \in V_j$  de la variable  $X_j \in X$
- ✓  $\bar{\Lambda}(s, j, l)$  le nombre d'individus au nœud  $s \in S_A$  ne possédant pas la modalité  $a_l \in V_j$  de la variable  $X_j \in X$
- ✓  $\omega_k(s, j, l)$  le nombre d'individus au nœud  $s \in S_A$ , possédant la modalité  $a_l \in V_j$  de la variable  $X_j \in X$ , qui font partie de la classe  $C_k \in C$
- ✓  $\bar{\omega}_k(s, j, l)$  le nombre d'individus au nœud  $s \in S_A$ , ne possédant pas la modalité  $a_l \in V_j$  de la variable  $X_j \in X$ , qui font partie de la classe  $C_k \in C$

### Le choix des attributs à chaque nœud

Avec les notations définies, on peut dresser, en un nœud  $s \in S_A$ , le tableau correspondant au partitionnement des individus de ce nœud selon une modalité  $a_l \in V_j$  d'une variable  $X_j \in X$  :

Tableau 4 : Paramètres de calcul dans les arbres de décision

Nœud $s \in S_A$	$a_l \in V_j$	$\{a_1, \dots, a_{l-1}, a_{l+1}, \dots, a_{m_j}\}$	
$C_1$	$\omega_1(s, j, l)$	$\bar{\omega}_1(s, j, l)$	$\Gamma_1(s)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$C_k$	$\omega_k(s, j, l)$	$\bar{\omega}_k(s, j, l)$	$\Gamma_k(s)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$C_K$	$\omega_K(s, j, l)$	$\bar{\omega}_K(s, j, l)$	$\Gamma_K(s)$
	$\Lambda(s, j, l)$	$\bar{\Lambda}(s, j, l)$	$T(s)$

A partir des éléments du tableau on a  $\Gamma_k(s) = \omega_k(s, j, l) + \bar{\omega}_k(s, j, l)$ ,  $\Lambda(s, j, l) = \sum_{k=1}^K \omega_k(s, j, l)$ ,  
 $\bar{\Lambda}(s, j, l) = \sum_{k=1}^K \bar{\omega}_k(s, j, l)$  et  $T(s) = \Lambda(s, j, l) + \bar{\Lambda}(s, j, l) = \sum_{k=1}^K \Gamma_k(s)$ .

Lorsque l'on choisit la variable  $X_j$  comme variable de coupure du nœud et la modalité  $a_l$  de cette variable comme critère de répartition des individus dans les classes (états), une mesure du désordre engendré par une telle répartition est donnée par l'entropie. Selon la théorie de l'information, l'entropie correspondant peut être estimée par :

$$E_C(j, l|s) = - \sum_{k=1}^K \left[ \frac{\omega_k(s, j, l)}{T(s)} \log\left(\frac{\omega_k(s, j, l)}{T(s)}\right) + \frac{\bar{\omega}_k(s, j, l)}{T(s)} \log\left(\frac{\bar{\omega}_k(s, j, l)}{T(s)}\right) \right]$$

L'idée est de rechercher le couple  $(j^*, l^*)$  tel que la modalité  $a_{l^*}$  de la variable  $X_{j^*}$  fournisse la partition optimale, c'est-à-dire donnant la plus petite entropie. Techniquement, on a :

$$(j^*, l^*) = \underset{1 \leq j \leq J; 1 \leq l \leq m_j}{\text{ArgMin}} \{E_C(j, l|s)\}$$

Les algorithmes d'arbres de décision sont très efficaces pour effectuer ce type de calculs en un temps raisonnable. Cependant, l'entropie n'est pas le seul critère utilisable. L'indice de Gini et le Khi-deux sont aussi utilisés dans certains algorithmes. Sur la base de nos notations, ces deux indicateurs peuvent être définis respectivement comme suit :

$$G_C(j, l|s) = \sum_{k=1}^K \left[ \frac{\Lambda(s, j, l)\omega_k(s, j, l)}{T(s)\Gamma_k(s)} \left(1 - \frac{\omega_k(s, j, l)}{\Gamma_k(s)}\right) + \frac{\bar{\Lambda}(s, j, l)\bar{\omega}_k(s, j, l)}{T(s)\Gamma_k(s)} \left(1 - \frac{\bar{\omega}_k(s, j, l)}{\Gamma_k(s)}\right) \right]$$

$$\chi_C^2(j, l|s) = \sum_{k=1}^K \left[ \left(\frac{\omega_k(s, j, l) - \Lambda(s, j, l)\Gamma_k(s)/T(s)}{\sqrt{\Lambda(s, j, l)\Gamma_k(s)/T(s)}}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\omega}_k(s, j, l) - \bar{\Lambda}(s, j, l)\Gamma_k(s)/T(s)}{\sqrt{\bar{\Lambda}(s, j, l)\Gamma_k(s)/T(s)}}\right)^2 \right]$$

## L'élagage des arbres de décision

Lorsque le processus de construction d'un arbre de décision est mis en application, il produit un arbre  $G_{max}$  possédant un nombre maximal de nœuds. Les feuilles d'un tel arbre sont pures, c'est-à-dire que les individus affectés aux feuilles de cet arbre appartiennent tous à la même classe  $C_k$ , ( $k \in [1, K]$ ). Du point de vue de la théorie de l'apprentissage artificiel, ce processus engendre un sur-apprentissage en réalisant un apprentissage par cœur. Cette situation traduit une trop grande adaptation du modèle aux données, ce qui nuit au pouvoir de généralisation de ce modèle. En plus de cela, au niveau pratique, un tel arbre est trop long pour être exploité correctement car il est illisible. Pour pallier ces problèmes, les arbres de décision sont élagués afin d'obtenir des feuilles acceptables non nécessairement pures, mais qui font un compromis entre la capacité d'apprentissage et la capacité de généralisation.

Techniquement, plusieurs approches sont possibles. Cependant, en pratique, les algorithmes d'arbres de décision utilisent une procédure de post-élagage qui peut se faire en ayant recours soit à un échantillon test lorsque la quantité de données est importante, soit en utilisant la technique de validation croisée.

#### 4.1.2) LES MODELES D'IDENTIFICATION DES PROFILS

La caractérisation des différents états (de vulnérabilité, latents) est basée sur les arbres de décision. Dans le contexte de la modélisation résiliométrique, le caractère simple et intuitif des résultats est fondamental. Dans ce contexte, les arbres de décision sont une classe de techniques à privilégier pour la caractérisation des états. Il est cependant important de noter que les variables utilisées pour caractériser les états latents doivent être choisies par le modélisateur parmi les variables structurelles décrivant les individus (hors variables manifestes associées aux dimensions). Ces variables peuvent être quantitatives et/ou qualitatives.

##### **La caractérisation des états traumatiques latents**

En plus des notations utilisées pour l'ensemble du chapitre, notons :

- ✓  $X_i^t = (X_1^t, \dots, X_J^t)$  les variables numériques de caractérisations mesurées au temps  $t$
- ✓  $Z_m^t = (Z_1^t, \dots, Z_M^t)$  les variables qualitatives de caractérisations observées au temps  $t$

Sans perte de généralités, on admettra que les variables qualitatives  $Z_m^t$  sont toutes binaires. Cette hypothèse n'est pas restrictive car, dans la pratique, toute variable qualitative polytomique peut être ramenée à une série de variables qualitatives binaires moyennant une opération d'orthogonalisation appropriée. L'objet des arbres de décision est de fournir, sous la forme d'un arbre, une description sous forme de règles logiques du processus de génération des états traumatiques latents. On obtient donc un résultat sous la forme :

Si  $i \in \Delta_\alpha$  et  $i \in \Delta_\beta \dots$  alors  $i \in C_r$

Dans cette formule logique, les ensembles  $\Delta_\omega$  sont des frontières de décisions prenant les formes  $\Delta_\omega = \{X_i^t \leq \omega\}$  et  $\Delta_\omega = \{X_i^t > \omega\}$  pour les variables numériques, et la forme  $\Delta_\omega = \{Z_m^t = \omega\}$  pour les variables qualitatives. Dans le cas des variables de décisions de type numérique,  $\omega \in [\text{Min}(X_i^t); \text{Max}(X_i^t)]$  est un nombre réel alors que, dans le cas des variables qualitatives,  $\omega$  représente une ou plusieurs modalités de la variable  $Z_m^t$ .

Dans le contexte de la caractérisation des états latents traumatiques, l'enjeu des arbres de décision est de trouver, à une itération donnée, non seulement la meilleure variable de décision  $X_i^t$  ou  $Z_{mn}^t$ , mais aussi la meilleure valeur de  $\omega$  permettant d'obtenir la meilleure décision possible. Pour la construction des arbres de décisions, les algorithmes ID3 et CART sont préconisés car ils peuvent fournir correctement la solution recherchée. En effet, ces algorithmes cherchent séquentiellement les meilleures frontières de décision  $\Delta_\omega$  qui optimisent les critères que sont l'entropie, l'indice de Gini et la distance du Chi-deux dont l'efficacité et les propriétés statistiques sont bien connues.

### L'algorithme d'identification des états traumatiques latents

L'algorithme d'identification des états traumatiques latents a pour rôle de fournir un partitionnement des individus traumatisés et de caractériser ces partitions grâce à une description logique à travers un arbre de décision. Par conséquent, notons :

- $lcm(\cdot)$  le partitionnement par le modèle en classes latentes avec  $\mathcal{T}$  comme résultat
  - $dtm(\cdot)$  la modélisation des classes latentes par les arbres de décision de type ID3 ou CART dont les résultats sont représentés par  $\mathcal{A}$
  - $G$  l'arbre de décision sous forme de graphe décrivant les règles logiques
- L'algorithme d'identification des états traumatiques latents est le suivant :

---

#### Algorithme 5 : Identification des états traumatiques latents

---

1. // Ensemble des questions du test de résilience  
 $\Omega_X = \{X_j \mid j \in [1, J]\}$
  2. // Ensemble des descripteurs des classes latentes  
 $\Omega_D = \{D_s \mid s \in [1, S]\}$
  3. // Typologie par modèle des classes latentes  
 $\mathcal{T}(\hat{C}_r \mid r \in [1, R]) = lcm(\Omega_X \mid R)$
  4. // Arbre de décision de caractérisation des classes  
 $\mathcal{A}(\hat{G}) = dtm(\Omega_D \mid \hat{C}_r)$
  5. // Sortie de l'algorithme d'identification  
 $\mathfrak{R} = (\{\hat{C}_r, r \in [1, R] \mid \mathcal{T}\}, \hat{G} \mid \mathcal{A})$
- 

Dans cet algorithme, les probabilités obtenues par le modèle des classes latentes ne sont que des intermédiaires. Dans l'algorithme final, seuls les états traumatiques latents identifiés (classes latentes) et l'arbre de décision utile à la caractérisation des classes sont conservés. La méthode développée consiste à exploiter conjointement les modèles de classes latentes et les arbres de décision dans la perspective d'identification et de caractérisation d'états traumatiques. Dans l'approche résiliométrique, ces deux étapes sont indissociables car l'objectif est de caractériser des classes obtenues par apprentissage non supervisé de type clustering.

---

## 4.2) L'IDENTIFICATION DES CAUSES DES CHOCS TRAUMATIQUES

---

Considérons les notations suivantes :

- ✓  $C$  le nombre de causes du choc
- ✓  $F$  le nombre d'effets du choc
- ✓  $C_{endo}$  le nombre de causes endogènes du choc
- ✓  $E_{endo}$  le nombre d'effets endogènes du choc
- ✓  $\xi$  le choc traumatique considéré
- ✓  $\mathcal{C}_i$  la  $i^{ème}$  cause du choc traumatique
- ✓  $\mathcal{E}_r$  le  $r^{ème}$  effet du choc traumatique
- ✓  $\xi$  le choc traumatique considéré
- ✓  $L$  le nombre de variables d'intensité du choc
- ✓  $n_i$  le nombre de variables manifestes de la cause  $\mathcal{C}_i$
- ✓  $k_r$  le nombre de variables manifestes de l'effet  $\mathcal{E}_r$
- ✓  $X_l$  la  $l^{ème}$  variable d'intensité du choc
- ✓  $x_l$  une observation de la variable d'intensité  $X_l$
- ✓  $Y_{ij}$  la  $j^{ème}$  variable manifeste de la cause latente  $\mathcal{C}_i$
- ✓  $y_{ij}$  une observation de la variable  $Y_{ij}$
- ✓  $Z_{rs}$  la  $s^{ème}$  variable manifeste de l'effet latent  $\mathcal{E}_r$
- ✓  $z_{rs}$  une observation de la variable  $Z_{rs}$
- ✓  $\omega_{ij}$  le coefficient de la régression de  $\mathcal{C}_i$  sur  $Y_{ij}$
- ✓  $\delta_i$  le terme d'erreur de la régression de  $\mathcal{C}_i$  sur  $Y_{ij}$
- ✓  $\rho_{ik}$  le coefficient de la régression de  $\mathcal{C}_i$  sur  $\mathcal{C}_k$
- ✓  $v_i$  le terme d'erreur de la régression de  $\mathcal{C}_i$  sur  $\mathcal{C}_k$
- ✓  $\theta_{rs}$  le coefficient de la régression de  $\mathcal{E}_r$  sur  $Z_{rs}$
- ✓  $\mu_r$  le terme d'erreur de la régression de  $\mathcal{E}_r$  sur  $Z_{rs}$
- ✓  $\lambda_{rs}$  le coefficient de la régression de  $\mathcal{E}_r$  sur  $\mathcal{E}_s$
- ✓  $\eta_r$  le terme d'erreur de la régression de  $\mathcal{E}_r$  sur  $\mathcal{E}_s$
- ✓  $\pi_r$  le coefficient de la régression de  $\mathcal{E}_r$  sur  $\xi$
- ✓  $\nu_r$  le terme d'erreur de la régression de  $\mathcal{E}_r$  sur  $\xi$
- ✓  $\alpha_l$  le coefficient de la régression de  $\xi$  sur  $X_l$
- ✓  $\epsilon$  le terme d'erreur de la régression de  $\xi$  sur  $X_l$
- ✓  $\beta_i$  le coefficient de la régression de  $\xi$  sur  $\mathcal{C}_i$
- ✓  $\zeta$  le terme d'erreur de la régression de  $\xi$  sur  $\mathcal{C}_i$

Il existe essentiellement quatre modèles résiliométriques d'identification des causes des chocs traumatiques. Ces modèles dépendent aussi bien de l'hypothèse que l'on effectue sur les causes (indépendantes ou liées) que de l'hypothèse sur les effets (indépendants ou liés) du choc traumatique considéré.

### 4.2.1) LES MODELES DE CAUSES INDEPENDANTES

Les modèles de causes indépendantes sont basés sur l'hypothèse selon laquelle les causes du choc n'entretiennent pas de relations entre elles. Il en existe deux types selon que l'on fasse l'hypothèse d'une indépendance entre les effets du choc ou pas.

#### Modèles de causes indépendantes à effets indépendants

La structure graphique des modèles de causes indépendantes à effets indépendants est donnée par la figure suivante :

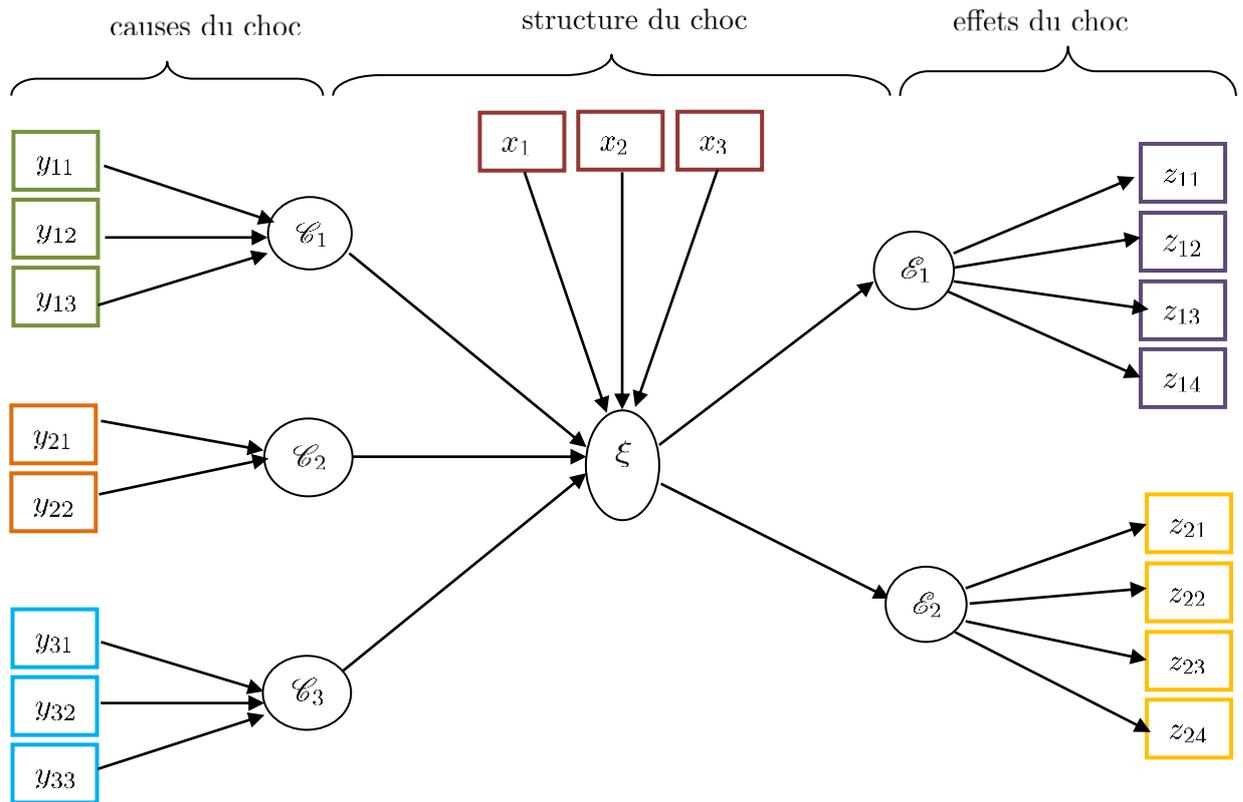


Figure 16 : Exemple de modèle de causes indépendantes à effets indépendants

Ce type de modèles correspond au système de  $\sum_{r=1}^E k_r + E + C + 2$  équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{E}_i = \sum_{j=1}^{n_j} \omega_{ij} y_{ij} + \delta_i \quad (\text{il y a } C \text{ equations}) \\ z_{rs} = \theta_{rs} \mathcal{E}_r + \mu_{rs} \quad (\text{il y a } \sum_{r=1}^E k_r \text{ equations}) \\ \mathcal{E}_r = \pi_r \xi + \nu_r \quad (\text{il y a } E \text{ equation}) \\ \xi = \sum_{l=1}^L \alpha_l x_l + \epsilon \quad (\text{il y a } 1 \text{ equation}) \\ \xi = \sum_{i=1}^C \beta_i \mathcal{E}_i + \zeta \quad (\text{il y a } 1 \text{ equation}) \end{array} \right.$$

## Modèles de causes indépendantes à effets liés

La structure graphique des modèles de causes indépendantes à effets liés est donnée par la figure suivante :

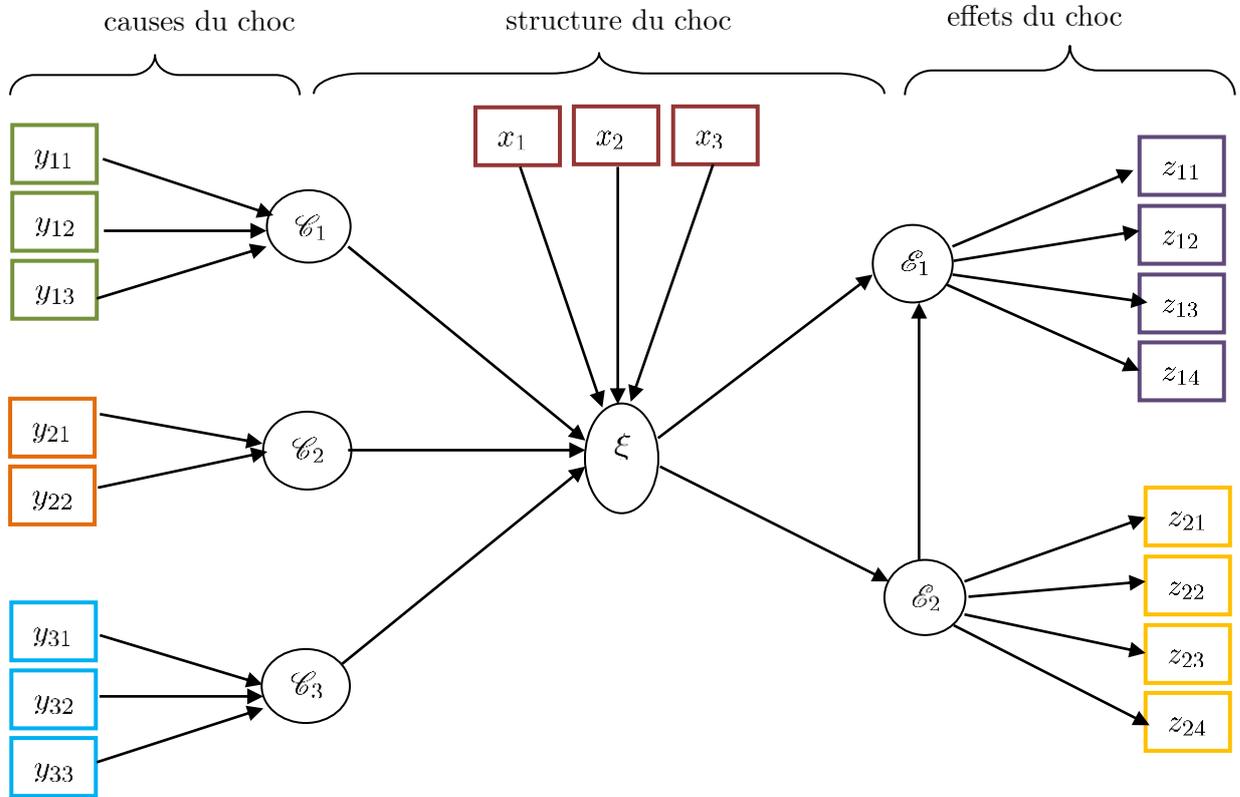


Figure 17 : Exemple de modèle de causes indépendantes à effets liés

Ce modèle correspond au système de  $\sum_{r=1}^E k_r + E + E_{endo} + C + 2$  équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{C}_i = \sum_{j=1}^{n_j} \omega_{ij} y_{ij} + \delta_i \quad (\text{il y a } C \text{ equations}) \\ z_{rs} = \theta_{rs} \mathcal{E}_r + \mu_{rs} \quad (\text{il y a } \sum_{r=1}^E k_r \text{ equations}) \\ \mathcal{E}_r = \pi_r \xi + \nu_r \quad (\text{il y a } E \text{ equation}) \\ \mathcal{E}_r = \sum_{\mathcal{E}_s \rightarrow \mathcal{E}_r} \lambda_{rs} \mathcal{E}_s + \eta_r \quad (\text{il y a } E_{endo} \text{ equations}) \\ \xi = \sum_{l=1}^L \alpha_l x_l + \epsilon \quad (\text{il y a } 1 \text{ equation}) \\ \xi = \sum_{i=1}^C \beta_i \mathcal{C}_i + \zeta \quad (\text{il y a } 1 \text{ equation}) \end{array} \right.$$

### 4.2.2) LES MODELES DE CAUSES LIEES

Dans les modèles de causes liées, les causes du choc sont supposées entretenir des relations entre elles. Il en existe deux types selon que les effets sont indépendants ou pas.

#### Modèles de causes liées à effets indépendants

La structure graphique des modèles de causes liées à effets indépendants est donnée par la figure suivante :

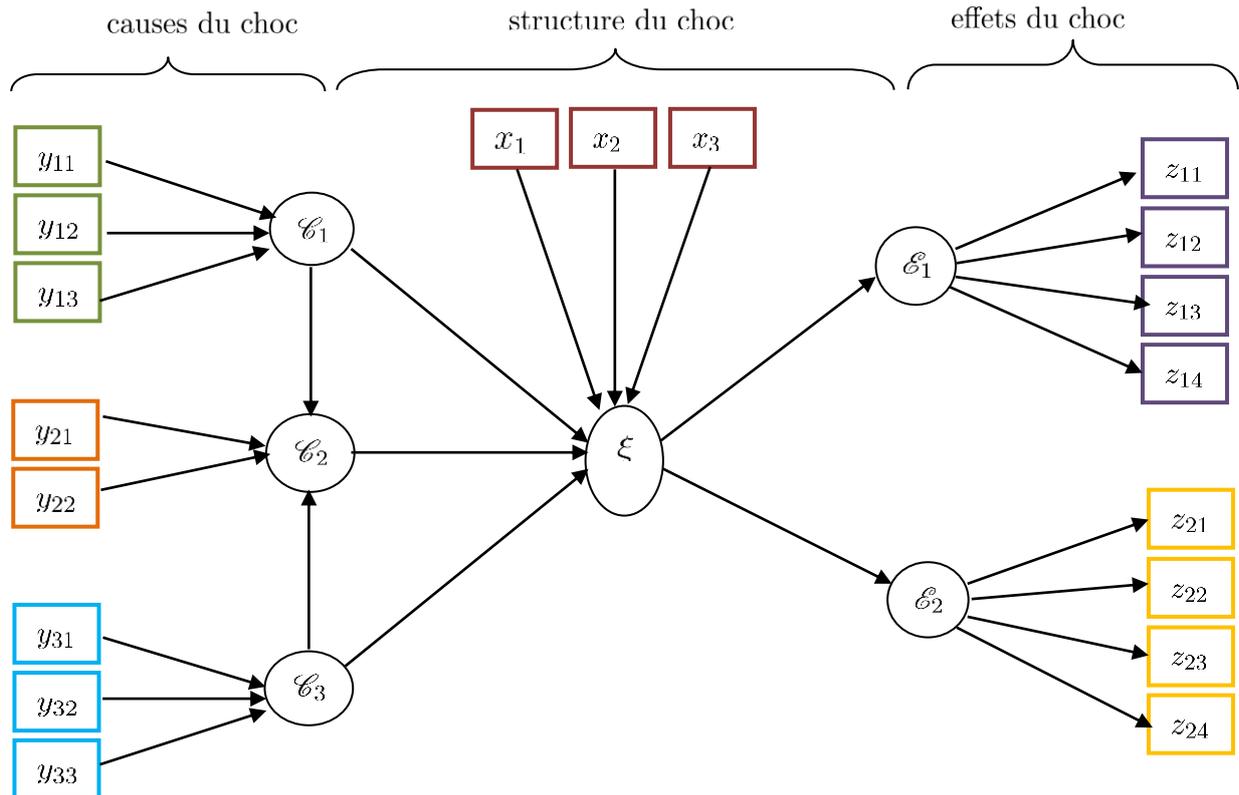


Figure 18 : Exemple de modèle de causes liées à effets indépendants

Ce modèle correspond au système de  $\sum_{r=1}^E k_r + E + C_{endo} + C + 2$  équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{C}_i = \sum_{j=1}^{n_j} \omega_{ij} y_{ij} + \delta_i \quad (\text{il y a } C \text{ equations}) \\ \mathcal{C}_i = \sum_{\mathcal{C}_k \rightarrow \mathcal{C}_i} \rho_{ik} \mathcal{C}_k + v_i \quad (\text{il y a } C_{endo} \text{ equations}) \\ z_{rs} = \theta_{rs} \mathcal{E}_r + \mu_{rs} \quad (\text{il y a } \sum_{r=1}^E k_r \text{ equations}) \\ \mathcal{E}_r = \pi_r \xi + \nu_r \quad (\text{il y a } E \text{ equation}) \\ \xi = \sum_{l=1}^L \alpha_l x_l + \epsilon \quad (\text{il y a } 1 \text{ equation}) \\ \xi = \sum_{i=1}^C \beta_i \mathcal{C}_i + \zeta \quad (\text{il y a } 1 \text{ equation}) \end{array} \right.$$

## Modèles de causes liées à effets liés

La structure graphique des modèles de causes liées à effets liés est donnée par la figure suivante :

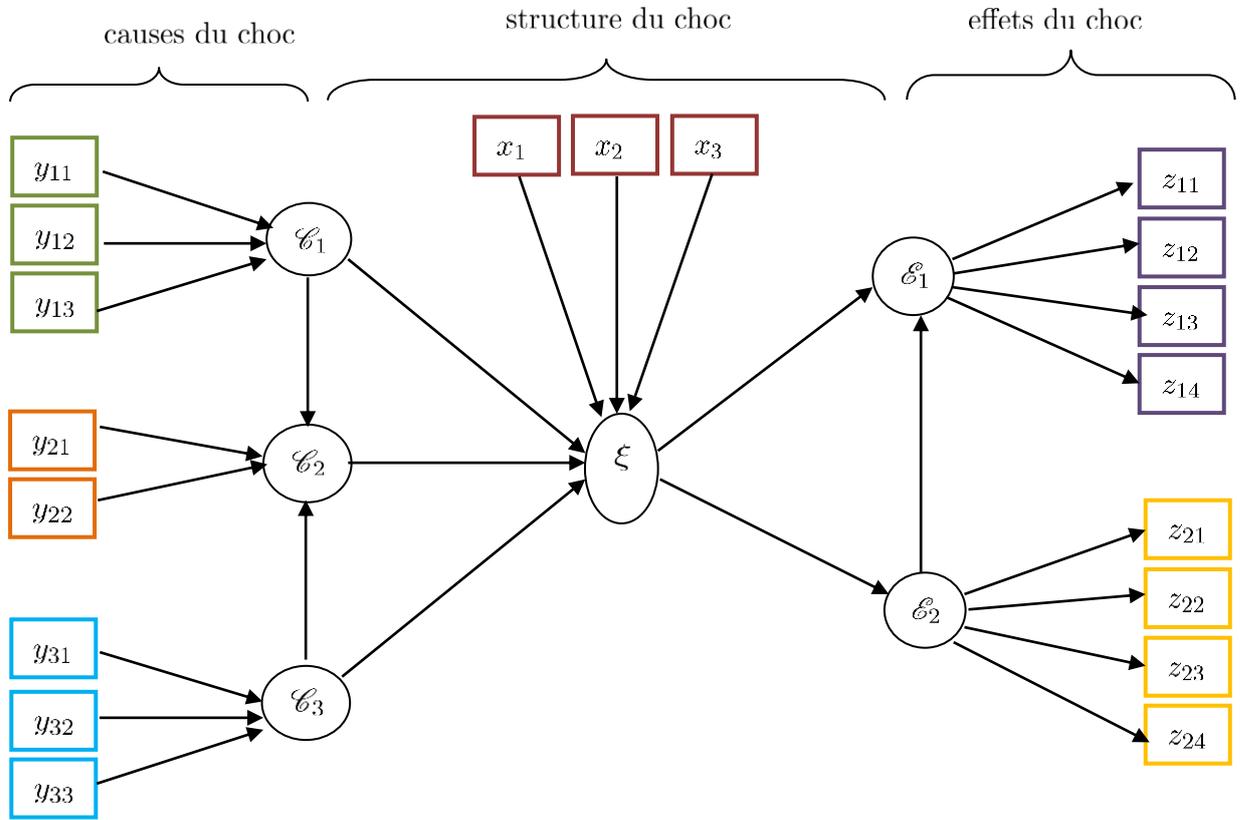


Figure 19 : Exemple de modèle de causes liées à effets liés

Ce modèle correspond au système de  $\sum_{r=1}^E k_r + E + E_{endo} + C_{endo} + C + 2$  équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{C}_i = \sum_{j=1}^{n_j} \omega_{ij} y_{ij} + \delta_i \quad (\text{il y a } C \text{ equations}) \\ \mathcal{C}_i = \sum_{\mathcal{C}_k \rightarrow \mathcal{C}_i} \rho_{ik} \mathcal{C}_k + v_i \quad (\text{il y a } C_{endo} \text{ equations}) \\ z_{rs} = \theta_{rs} \mathcal{E}_r + \mu_{rs} \quad (\text{il y a } \sum_{r=1}^E k_r \text{ equations}) \\ \mathcal{E}_r = \pi_r \xi + \nu_r \quad (\text{il y a } E \text{ equation}) \\ \mathcal{E}_r = \sum_{\mathcal{E}_s \rightarrow \mathcal{E}_r} \lambda_{rs} \mathcal{E}_s + \eta_r \quad (\text{il y a } E_{endo} \text{ equations}) \\ \xi = \sum_{l=1}^L \alpha_l x_l + \epsilon \quad (\text{il y a } 1 \text{ equation}) \\ \xi = \sum_{i=1}^C \beta_i \mathcal{C}_i + \zeta \quad (\text{il y a } 1 \text{ equation}) \end{array} \right.$$

### 4.2.3) LE B-TEST DE SIGNIFICATIVITE DES BLOCS LATENTS

L'enjeu des modèles d'identification des causes est essentiellement de mettre en exergue les causes significatives, et éventuellement les effets significatifs parmi ceux considérés. La modélisation PLS-PM n'est donc pas utilisée ici pour estimer les variables latentes, mais plutôt pour étudier la significativité des variables latentes représentant les causes (et les effets éventuellement). Dans un tel contexte, il est impératif de disposer, du point de vue statistique, d'un mécanisme permettant de tester l'hypothèse de significativité d'un ou de plusieurs blocs dans un modèle d'équations structurelles à variables latentes. Malheureusement, un tel test n'existe pas encore dans la théorie des MESVL. C'est pourquoi, le test de significativité des blocs latents est proposé afin d'apporter une solution à ce problème. Le lecteur intéressé par la théorie des tests pourra consulter [ANI84], [BAR50], [COX77] et [GOD94].

#### **Principe du B-test de significativité des blocs latents**

Considérons les notations mathématiques suivantes :

- ✓  $\mathcal{G}(\xi_1, \dots, \xi_J)$  un MESVL constitué de  $J$  variables latentes  $\xi_1, \dots, \xi_J$ .
- ✓  $\mathcal{G}_j(\xi_1, \dots, \xi_J)$  le MESVL  $\mathcal{G}(\xi_1, \dots, \xi_J)$  dans lequel le bloc  $\xi_j$  a été supprimé
- ✓  $\mathcal{P}_N$  une population de  $N$  individus fournissant les variables manifestes des  $(\xi_j)_{j \in [1, J]}$
- ✓  $K$  le nombre de tirages aléatoires avec remise de  $n \ll N$  individus de  $\mathcal{P}_N$
- ✓  $\mathcal{P}_n^k \subset \mathcal{P}_N$  la  $k^{ieme}$  sous-population de  $\mathcal{P}_N$  d'effectif  $n$  choisie aléatoirement.
- ✓  $\theta_{GoF}(\mathcal{M}|\mathcal{P})$  une valeur de l'indice  $GoF$  du MESVL  $\mathcal{M}$  obtenue avec la population  $\mathcal{P}$
- ✓  $\hat{\theta}_{GoF}(\mathcal{M}|\mathcal{P})$  une estimation du paramètre inconnu  $\theta_{GoF}(\mathcal{M}|\mathcal{P})$

Le B-test de significativité des blocs latents est fondé sur les deux grandes idées suivantes :

- 1) Si une variable latente d'un modèle d'équations structurelles à variables latentes est significative, la suppression du bloc correspondant dans le modèle entraînera une modification significative de l'indice de qualité globale  $GoF$  de ce modèle. Il en est de même d'un groupe de variables latentes.
- 2) La valeur de l'indice de qualité globale  $GoF$  issue de la population  $\mathcal{P}_N$  peut être approchée avec une grande précision par la moyenne arithmétique de cet indice obtenu sur  $K$  sous-populations  $\mathcal{P}_n^k$  issues de tirages aléatoires des individus de  $\mathcal{P}_N$  avec remise. Pour cela, il suffit que  $K$  soit suffisamment grand (théorème central limite).

Partant de ces deux idées, l'étude de la significativité de la variable latente  $\xi_j$  revient à tester les hypothèses suivantes :

$$\begin{cases} H_0 : \Delta(GoF) = \theta_{GoF}(\mathcal{G}|\mathcal{P}) - \theta_{GoF}(\mathcal{G}_j|\mathcal{P}) = 0 \\ H_1 : \Delta(GoF) = \theta_{GoF}(\mathcal{G}|\mathcal{P}) - \theta_{GoF}(\mathcal{G}_j|\mathcal{P}) \neq 0 \end{cases}$$

## Estimation de la statistique de test et de la p-value

Pour effectuer le B-test de significativité des blocs latents, on se sert donc de la statistique de test  $\Delta(GoF) = \theta_{GoF}(\mathcal{G}|\mathcal{P}) - \theta_{GoF}(\mathcal{G}_j|\mathcal{P})$ . Sur chaque sous-population  $\mathcal{P}_n^k$ , cette statistique de test est estimée par  $\hat{\Delta}_{GoF}^k = \hat{\theta}_{GoF}(\mathcal{G}|\mathcal{P}_n^k) - \hat{\theta}_{GoF}(\mathcal{G}_j|\mathcal{P}_n^k)$ . Ainsi, une estimation fiable de la statistique de test est donnée par :

$$\hat{\Delta}_{GoF} = (1/K) \sum_{k=1}^K \hat{\Delta}_{GoF}^k = (1/K) \sum_{k=1}^K (\hat{\theta}_{GoF}(\mathcal{G}|\mathcal{P}_n^k) - \hat{\theta}_{GoF}(\mathcal{G}_j|\mathcal{P}_n^k))$$

En considérant la population  $\mathcal{P}_N$  toute entière,  $\Delta(GoF) = \theta_{GoF}(\mathcal{G}|\mathcal{P}) - \theta_{GoF}(\mathcal{G}_j|\mathcal{P})$  a pour estimation la quantité  $\hat{\Delta}_{GoF}^0 = \hat{\theta}_{GoF}(\mathcal{G}|\mathcal{P}_N) - \hat{\theta}_{GoF}(\mathcal{G}_j|\mathcal{P}_N)$ . La valeur  $|\hat{\Delta}_{GoF}^0|$  sert de valeur « nulle de référence » dont les fluctuations sont étudiées à travers la distribution des valeurs  $\hat{\Delta}_{GoF}^k$  simulées aléatoirement. Considérons le vecteur  $\Psi_{GoF} = (\Psi_{GoF}^k)_{k \in [1, K]}$  de longueur  $K$  et tel que :

$$\forall k \in [1, K], \Psi_{GoF}^k = \begin{cases} 1 : & \text{si } |\hat{\Delta}_{GoF}^k| > |\hat{\Delta}_{GoF}^0| \\ 0 : & \text{si } |\hat{\Delta}_{GoF}^k| \leq |\hat{\Delta}_{GoF}^0| \end{cases}$$

La  $p$  - *value* correspondant au test et obtenue par simulation est donnée par la quantité :

$$\hat{p}_v = (1/K) \sum_{k=1}^K \Psi_{GoF}^k$$

## Algorithme du B-test de significativité des blocs latents

Le B-test de significativité des blocs latents est un test non paramétrique basé essentiellement sur les principes de la simulation. L'algorithme de ce test est le suivant :

---

### Algorithme 6 : B-test de significativité des blocs latents

---

1. Entrées :  $\mathcal{G}(\xi_1, \dots, \xi_J), \mathcal{P}_N, K, \hat{\Delta}_{GoF}^0$
  2.  $\Delta_{GoF} = 0_{1:K}$
  3.  $\Psi_{GoF} = 0_{1:K}$
  4. Pour ( $k \in [1 : K]$ ) {
  5.   a)  $\hat{\Delta}_{GoF}^k = \hat{\theta}_{GoF}(\mathcal{G}|\mathcal{P}_n^k) - \hat{\theta}_{GoF}(\mathcal{G}_j|\mathcal{P}_n^k)$
  6.   b)  $\Delta_{GoF}[k] = \hat{\Delta}_{GoF}^k$
  7.   c) Si ( $|\hat{\Delta}_{GoF}^k| > |\hat{\Delta}_{GoF}^0|$ ) {
  8.        $\Psi_{GoF}[k] = 1$
  9.   } Sinon {
  10.   }
  11. }
  12.  $\hat{\Delta}_{GoF} = (1/K) \sum_{k=1}^K \Delta_{GoF}[k]$
  - 13.
  14.  $\hat{p}_v = (1/K) \sum_{k=1}^K \Psi_{GoF}[k]$
  - 15.
  16. Sorties :  $\hat{\Delta}_{GoF}, \hat{p}_v$
-

### 4.2.3) LE R-TEST DE SIGNIFICATIVITE DES BLOCS LATENTS

Le B-test de significativité des blocs latents suit une procédure classique de construction de tests statistiques par les techniques de simulation. Cependant, il est aisé de constater que ce test ne pourra s'utiliser véritablement que sur des super-calculateurs. En effet, une estimation correcte de la p-value associée à ce test nécessite au minimum dix mille (10.000) réplifications dans le calcul de l'indice  $\Delta_{GoF}$  de chaque bloc. Or, une estimation de  $\Delta_{GoF}$  nécessite deux estimations PLSPM dont une pour le modèle complet (avec tous les blocs) et une pour le modèle contraint (sans le bloc étudié). On a donc besoin, pour un test correct, de vingt milles (20.000) estimations PLSPM. Or, les modèles PLSPM figurent parmi les plus complexes et demandent des temps de calculs relativement importants. Dans R, le temps nécessaire à une seule estimation est environ une seconde. Par conséquent, il faut près de 20.000 secondes, soit 5h30mn, pour effectuer correctement un test pour un seul bloc ! Il s'en suit que, avec la technologie actuelle des micro-ordinateurs, l'usage du B-test reste problématique. Il est donc nécessaire de disposer d'une alternative fiable. L'objet du R-test de significativité des blocs latents est de combler les insuffisances du B-test afin de permettre une évaluation de la significativité des blocs en un temps de calcul acceptable sur un micro-ordinateur ordinaire.

#### **Principe du R-test de significativité des blocs latents**

Considérons les notations mathématiques suivantes :

- ✓  $\mathcal{G}(\xi_1, \dots, \xi_J)$  un MESVL constitué de  $J$  variables latentes  $\xi_1, \dots, \xi_J$ .
- ✓  $\mathcal{G}_j(\xi_1, \dots, \xi_J)$  le MESVL  $\mathcal{G}(\xi_1, \dots, \xi_J)$  dans lequel le bloc  $\xi_j$  a été supprimé
- ✓  $\mathcal{P}_N$  une population de  $N$  individus fournissant les variables manifestes des  $(\xi_j)_{j \in [1, J]}$
- ✓  $\theta_\omega(\mathcal{M}|\mathcal{P})$  les valeurs des lodings du modèle externe du MESVL  $\mathcal{M}$  obtenues avec la population  $\mathcal{P}$
- ✓  $\theta_\omega^j(\mathcal{M}|\mathcal{P})$  les valeurs des lodings  $\theta_\omega(\mathcal{M}|\mathcal{P})$  sans ceux correspondant au bloc  $j \in [1, J]$
- ✓  $\hat{\theta}_\omega(\mathcal{M}|\mathcal{P})$  une estimation du paramètre inconnu  $\theta_\omega(\mathcal{M}|\mathcal{P})$

Le R-test de significativité des blocs latents est fondé sur les deux grandes idées suivantes :

- 1) Si une variable latente d'un modèle d'équations structurelles à variables latentes est significative, la suppression du bloc correspondant dans le modèle entrainera une modification significative des lodings du modèle externe. Il en est de même d'un groupe de variables latentes.
- 2) La significativité des différences entre lodings peut être évaluée correctement par le test des rangs signés de Wilcoxon pour échantillons appariés.

Partant de ces deux idées, l'étude de la significativité de la variable latente  $\xi_j$  revient à tester les hypothèses suivantes :

$$\begin{cases} H_0 : \Delta(\omega) = \theta_{\omega}^j(\mathcal{G}|\mathcal{P}) - \theta_{\omega}(\mathcal{G}_j|\mathcal{P}) = 0 \\ H_1 : \Delta(\omega) = \theta_{\omega}^j(\mathcal{G}|\mathcal{P}) - \theta_{\omega}(\mathcal{G}_j|\mathcal{P}) \neq 0 \end{cases}$$

### Estimation de la statistique de test et de la p-value

Pour effectuer le R-test de significativité des blocs latents, on se sert de la statistique et de la p-value du test des rangs signés de Wilcoxon pour échantillons appariés (test bilatéral). Ainsi, tout le calcul revient à récupérer les lodings  $\hat{\theta}_{\omega}^j(\mathcal{G}|\mathcal{P})$  issus de l'estimation du modèle plein (non contraint) et les lodings  $\hat{\theta}_{\omega}(\mathcal{G}_j|\mathcal{P})$  correspondants issus de l'estimation du modèle contraint. Ces deux types de lodings sont des séries de données numériques de même taille. C'est sur ces séries que s'effectue le test des rangs signés de Wilcoxon pour échantillons appariés dont la statistique de test et la p-value correspondante sont ceux du R-test. Ainsi, notons :

- $\omega_k^j(\mathcal{G})$  la  $k^{eme}$  valeur des lodings  $\hat{\theta}_{\omega}^j(\mathcal{G}|\mathcal{P})$
- $\omega_k(\mathcal{G}_j)$  la  $k^{eme}$  valeur des lodings  $\hat{\theta}_{\omega}(\mathcal{G}_j|\mathcal{P})$

Le test des rangs est basé sur les différences entre les valeurs des lodings de même rang qui sont données par :

$$d_k = \omega_k^j(\mathcal{G}) - \omega_k(\mathcal{G}_j)$$

Une fois ces différences obtenues, on détermine les rangs des éléments de la série des valeurs absolues des différences (application de la statistique d'ordre) :

$$R_k = rang(|d_k|)$$

Lorsque  $S$  rangs  $R_e$  sont ex-aequos, on leur affecte (à tous) le rang moyen  $\bar{R}_S$  correspondant à la moyenne arithmétique de leurs rangs et définie par :

$$\bar{R}_S = \frac{R_e}{S}$$

Ces rangs permettent de calculer la somme des rangs des valeurs absolues des différences. Pour ce faire, on sépare ces rangs en deux parties. On considère, d'une part, les rangs  $R_k$  pour lesquels les différences  $d_k$  sont positives; et d'autre part, les rangs  $R_k$  pour lesquels les différences  $d_k$  sont négatives. Puis on effectue les sommes des rangs de chaque catégorie, ce qui permet d'obtenir deux valeurs (sommes de rangs)  $R^+$  et  $R^-$ .

Techniquement, les deux valeurs  $R^+$  et  $R^-$  sont définies par :

$$R^+ = \sum_{d_k > 0} R_k$$
$$R^- = \sum_{d_k \leq 0} R_k.$$

La statistique du test des rangs signés de Wilcoxon pour échantillons appariés appliquée aux lodings est celle du R-test de significativité des blocs latents et est donnée par :

$$S_R = \min(R^+, R^-)$$

Les valeurs critiques de cette statistique de test sont calculées par simulation Monte-Carlo et sont disponibles dans la majorité des logiciels statistiques. Elles permettent d'obtenir automatiquement les p-values associées aux valeurs de la statistique de test.

### Algorithme du R-test de significativité des blocs latents

Le R-test de significativité des blocs latents est un test non paramétrique basé sur les principes des tests des rangs, et plus précisément du test des rangs signés de Wilcoxon pour échantillons appariés. L'algorithme de ce test est le suivant :

---

#### Algorithme 7 : R-test de significativité des blocs latents

---

1. Entrées :  $\mathcal{G}(\xi_1, \dots, \xi_J), \mathcal{P}_N$
  2. Estimer le modèle PLSPM plein (avec le bloc  $j$ )
  3. Récupérer les lodings  $\hat{\theta}_\omega^j(\mathcal{G}|\mathcal{P})$
  4. Estimer le modèle PLSPM contraint (sans le bloc  $j$ )
  5. Récupérer les lodings  $\hat{\theta}_\omega(\mathcal{G}|\mathcal{P})$
  6. Faire le test des rangs signés de Wilcoxon pour échantillons appariés avec  $\hat{\theta}_\omega^j(\mathcal{G}|\mathcal{P})$  et  $\hat{\theta}_\omega(\mathcal{G}|\mathcal{P})$
  7. Récupérer la statistique de test  $\hat{S}_R$  et la p-value  $\hat{p}_v$  du test effectué
  8. Sorties :  $\hat{S}_R, \hat{p}_v$
-

#### 4.2.4) L'ALGORITHME D'IDENTIFICATION DES CAUSES DES CHOCS

L'identification de la significativité des causes des chocs est une application directe des tests de significativité des blocs latents aux modèles résiliométriques des causes des chocs. Pour présenter l'algorithme correspondant, notons :

- ✓  $m_i$ ,  $i \in [1, 4]$  un des quatre types de modèles résiliométriques des causes des chocs
- ✓  $\mathcal{T}(\mathcal{C}_j | \{m_i, \mathcal{P}_N\})$  un test de significativité du choc  $\mathcal{C}_j$  effectué en considérant le modèle  $m_i$  et les données issues de la population  $\mathcal{P}_N$  (B-test ou R-test)

En considérant les notations utilisées tout au long de ce chapitre ainsi que celles introduites ci-avant, l'algorithme d'identification des causes significatives des chocs est le suivant :

---

Algorithme 8 : Identification des causes significatives des chocs

---

1. Entrées :  $m_i, \mathcal{P}_N$
  2.  $\Omega_S = 0_{1:C}$
  3.  $\Omega_{pv} = 0_{1:C}$
  4. for ( $j \in [1 : C]$ ) {
  5.   a) Faire le test  $\mathcal{T}(\mathcal{C}_j | \{m_i, \mathcal{P}_N\})$
  6.   b) Affecter la valeur de la statistique de test à  $\Omega_S[j]$
  7.   c) Affecter la valeur de la p-value du test à  $\Omega_{pv}[j]$
  8. }
  9. Sorties :  $\Omega_S, \Omega_{pv}$
- 

L'approche d'analyse des causes des chocs est aisément utilisable pour l'analyse des effets significatifs de ces chocs. Cependant, une telle utilisation nécessite une attention particulière sur la signification de ces effets et surtout la définition des dimensions associées (blocs). Il est important de noter que les causes et les effets sont des concepts inobservables, et ce raisonnement doit guider toute conception en modélisation résiliométrique.

Aussi, il faut souligner que les tests de significativité des blocs latents sont des tests d'une portée globale. Ils sont nullement spécifiques à la Résiliométrie et peuvent faire l'objet de nombreuses adaptations. Au niveau du B-test, on peut par exemple envisager un changement de l'indice de mesure de la qualité des modèles, étendre l'algorithme au cas de plusieurs blocs, etc. Quant au R-test, on pourrait envisager l'utilisation des poids externes ou des coefficients structurels en lieu et place des lodings. Enfin, sur le plan purement théorique, le B-test se fonde sur les techniques de bootstrap. C'est une version relativement complexe du test non paramétrique de permutation ([BEF82], [CHI05]).

### 4.3) LA DETECTION DES INTERACTIONS ENTRE LES DIMENSIONS

Pour étudier la structure d'interactions entre les différentes dimensions, considérons les notations suivantes :

- ✓  $D$  le nombre de dimensions de résilience prise en compte
- ✓  $T$  l'horizon temporel de mesure de la résilience
- ✓  $N$  le nombre de panélistes utilisés dans la collecte de données
- ✓  $\xi_d^t$  la variable latente de la dimension  $d \in [1, D]$  au temps  $t \in [1, T]$
- ✓  $X_{dj}^t$  la  $j^{eme}$  variable manifeste associée à la variable latent  $\xi_d^t$  (bloc  $d$ )
- ✓  $x_{dj}^t$  le vecteur de valeurs de la variable manifeste  $X_{dj}^t$  prise par les panélistes
- ✓  $n_d^t$  le nombre de variables manifestes du bloc  $d$  au temps  $t$
- ✓  $n$  le nombre total de variables manifestes (à chaque temps  $t$ )

L'enjeu de la modélisation consiste à découvrir automatiquement la structure des interactions à partir uniquement des informations collectées sur les individus et structurées en dimensions comme le montre la figure suivante :

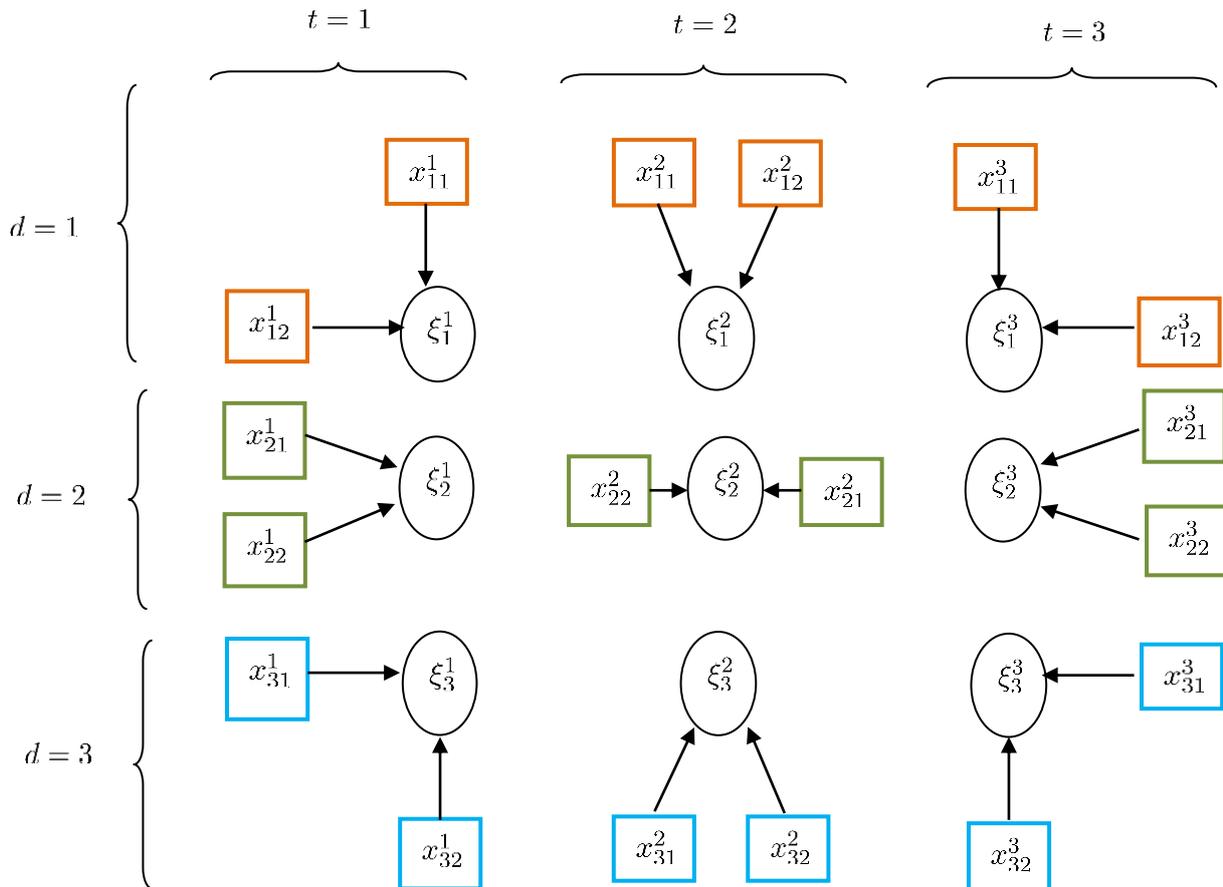


Figure 20 : Exemple de données structurées en dimensions

### 4.3.1) L'APPROCHE STRUCTURELLE GSCA

Les modèles d'équations structurelles à variables latentes en général, et le PLS path modeling (approche PLS) en particulier souffrent d'une limitation importante qui concerne l'absence d'un critère global à optimiser dans l'estimation des paramètres inconnus, à savoir les poids (loadings) des variables manifestes et les coefficients structurels. C'est pour combler cette lacune que le modèle GSCA a été proposé ([HWA84], [MAT93], [TEN08]). Il s'agit d'une méthode de MESVL qui est basée sur l'optimisation d'un critère global tout en conservant tous les avantages liés au PLSPM.

Dans le contexte de la résilience, la méthode GSCA n'est utile que lorsque les relations de causalité entre les différentes dimensions de la résilience sont relativement bien connues. Dans ce cas, la méthode GSCA évalue la pertinence de telles relations au vue des données expérimentales disponibles. Toutefois, si l'on n'a aucune idée des relations qui gouvernent les interactions entre les différentes dimensions de la résilience, les méthodes d'équations structurelles à variables latentes, dans leurs formulations actuelles, ne sont d'aucun secours. En effet, pour l'instant, il n'existe aucune technique d'apprentissage automatique des relations structurelles entre les variables latentes. C'est pourquoi cette thèse propose une variante de MESVL capable d'apprendre automatiquement le modèle structurel exclusivement à partir des données.

Le modèle GSCA sépare les variables endogènes des variables exogènes et applique la notion de variable endogène aussi bien sur les variables latentes que sur les variables manifestes. Ainsi, les variables manifestes des blocs formatifs sont considérées comme exogènes et celles des blocs réfléchitifs sont considérées comme endogènes. Pour faciliter la transposition du cadre GSCA au PLSPM, nous conserverons les notations du type PLSPM utilisées dans le chapitre 2, en exhibant les vecteurs et matrices classiquement utilisés dans les notations GSCA. Dans toute la suite de cette partie, on considèrera les notations supplémentaires suivantes :

- ✓  $Z_{endo}$  le vecteur de toutes les variables manifestes endogènes
- ✓  $Z_{exo}$  le vecteur de toutes les variables manifestes exogènes
- ✓  $L_{endo}$  le vecteur de toutes les variables latentes endogènes
- ✓  $L_{exo}$  le vecteur de toutes les variables latentes exogènes
- ✓  $Z = [Z_{endo}, Z_{exo}]$  le vecteur de toutes les variables manifestes
- ✓  $\Psi = [Z_{endo}, L_{endo}]$  le vecteur de toutes les variables endogènes (manifestes et latentes)
- ✓  $\Gamma = [L_{endo}, L_{exo}]$  le vecteur de toutes les variables latentes
- ✓  $E_I$  le vecteur d'erreurs sur les variables latentes dans le modèle structurel
- ✓  $E_M$  le vecteur d'erreurs d'ajustement des variables manifestes dans le modèle de mesure
- ✓  $E_\delta$  le vecteur d'erreurs d'ajustement des variables latentes dans le modèle de mesure
- ✓  $V$  la matrice des relations endogènes (manifestes réfléchitives et latentes endogènes)

## Notations matricielles des MESVL

Techniquement, si l'on arrive à trouver la structure d'interactions recherchée, elle correspondra au modèle d'équations structurelles à variables latentes décrit par le système d'équations suivant ( $\forall t \in [1, T]$ ) :

$$\begin{cases} \xi_d^t = \sum_{j=1}^{n_d} \omega_{dj}^t x_{dj}^t + \delta_d^t \\ \xi_d^t = \sum_{\xi_k^t \rightarrow \xi_d^t} \beta_{dk}^t \xi_k^t + \sum_{\xi_k^{t-1} \rightarrow \xi_d^t} \gamma_{dk}^t \xi_k^{t-1} + \zeta_d^t \end{cases}$$

Sur la base de ces notations, il est possible de fournir une écriture matricielle du modèle d'équations structurelles à variables latentes. En effet, lorsque le modèle de mesure comporte un ensemble de blocs réfléchifs, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \xi_d^t &= \sum_{j=1}^{n_d} \omega_{dj}^t x_{dj}^t + \delta_d^t \\ \Rightarrow \begin{pmatrix} \xi_1^1 \\ \dots \\ \xi_D^1 \\ \dots \\ \xi_1^T \\ \dots \\ \xi_D^T \end{pmatrix} &= \underbrace{\begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & (\omega_{dj}^t) & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}}_{{}^tW} \underbrace{\begin{pmatrix} x_{11}^1 \\ \dots \\ x_{1n_1}^1 \\ \dots \\ x_{D1}^T \\ \dots \\ x_{Dn_D}^T \end{pmatrix}}_{{}^tZ} + \underbrace{\begin{pmatrix} \delta_1^1 \\ \vdots \\ \delta_{D_e}^1 \\ \dots \\ \delta_1^T \\ \vdots \\ \delta_{D_e}^T \end{pmatrix}}_{{}^tE_\delta} \\ \Rightarrow {}^t\Gamma &= {}^tW {}^tZ + {}^tE_\delta = {}^t(ZW + E_\delta) \\ \Rightarrow \Gamma &= ZW + E_\delta \end{aligned}$$

De la même façon, lorsque le modèle de mesure comporte un ensemble de blocs formatifs, les relations entre les variables manifestes et leurs variables latentes s'écrivent :

$$\begin{aligned} x_{dj}^t &= \pi_{dj}^t \xi_d^t + \epsilon_{dj}^t \\ \Rightarrow \begin{pmatrix} x_{11}^{1(endo)} \\ \dots \\ x_{1n_1}^{1(endo)} \\ \dots \\ x_{I1}^{T(endo)} \\ \dots \\ x_{In_I}^{T(endo)} \end{pmatrix} &= \underbrace{\begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & (\pi_{dj}^t) & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}}_{{}^tC} \underbrace{\begin{pmatrix} \xi_1^1 \\ \dots \\ \xi_D^1 \\ \dots \\ \xi_1^T \\ \dots \\ \xi_D^T \end{pmatrix}}_{{}^t\Gamma} + \underbrace{\begin{pmatrix} \epsilon_{11}^1 \\ \dots \\ \epsilon_{1n_1}^1 \\ \dots \\ \epsilon_{I1}^T \\ \dots \\ \epsilon_{In_I}^T \end{pmatrix}}_{{}^tE_M} \\ \Rightarrow {}^tZ_{endo} &= {}^tC {}^t\Gamma + {}^tE_M = {}^t(\Gamma C + E_M) \\ \Rightarrow Z_{endo} &= \Gamma C + E_M \end{aligned}$$

Enfin, en notant  $D_{endo}$  le nombre de dimensions endogènes ( $D$  étant le nombre total de dimensions), les relations décrites par le modèle structurel, c'est-à-dire les différentes relations entre les variables latentes s'écrivent :

$$\begin{aligned} \xi_d^t &= \sum_{\xi_k^t \rightarrow \xi_d^t} \beta_{dk}^t \xi_k^t + \sum_{\xi_k^{t-1} \rightarrow \xi_d^t} \gamma_{dk}^t \xi_k^{t-1} + \zeta_d^t \\ \Rightarrow \underbrace{\begin{pmatrix} \xi_1^{1(endo)} \\ \dots \\ \xi_{D_{endo}}^{1(endo)} \\ \dots \\ \xi_1^{T(endo)} \\ \dots \\ \xi_{D_{endo}}^{T(endo)} \end{pmatrix}}_{{}^t L_{endo}} &= \underbrace{\begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & (\beta_{dk}^t + \gamma_{dk}^{t+1}) & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}}_{{}^t B} \underbrace{\begin{pmatrix} \xi_1^1 \\ \dots \\ \xi_D^1 \\ \dots \\ \xi_1^T \\ \dots \\ \xi_D^T \end{pmatrix}}_{{}^t \Gamma} + \underbrace{\begin{pmatrix} \zeta_1^1 \\ \dots \\ \zeta_{D_{endo}}^1 \\ \dots \\ \zeta_1^T \\ \dots \\ \zeta_{D_{endo}}^T \end{pmatrix}}_{{}^t E_L} \\ \Rightarrow {}^t L_{endo} &= {}^t B {}^t \Gamma + {}^t E_L = {}^t (\Gamma B + E_L) \\ \Rightarrow L_{endo} &= \Gamma B + E_L \end{aligned}$$

### Principe de la méthode GSCA

Ainsi, les modèles d'équations structurelles à variables latentes peuvent simplement se résumer par le système de trois équations matricielles suivant :

$$\begin{cases} \Gamma = ZW + E_\delta \\ Z_{endo} = \Gamma C + E_M \\ L_{endo} = \Gamma B + E_L \end{cases}$$

Si l'on note  $A = [C, B]$  et  $E = [E_M, E_L]$ , en combinant les deux dernières équations, l'ensemble des variables endogènes est donné par :

$$\begin{aligned} \Psi &= [Z_{endo}, L_{endo}] = [\Gamma C + E_M, \Gamma B + E_L] = \Gamma [C, B] + [E_M, E_L] \\ \Rightarrow \Psi &= \Gamma A + E \end{aligned}$$

Dans la méthode GSCA, les erreurs contenues dans le vecteur  $E_\delta$  sont inexistantes ( $E_\delta = 0$ ). Ceci est dû au fait que l'algorithme d'estimation calcule directement la relation  $\Gamma = ZW$  une fois les lodings  $W$  estimés,  $Z$  étant connu a priori. Par conséquent, en prenant en compte la première relation qui établie que  $\Gamma = ZW + E_\delta = ZW$  on a :

$$\begin{aligned} \Psi &= \Gamma A + E = ZWA + E \\ \Rightarrow E &= \Psi - ZWA \end{aligned}$$

La méthode GSCA cherche les paramètres du MESVL, c'est-à-dire les éléments des matrices  $V$ ,  $W$  et  $A$  qui permettent de minimiser les erreurs de mesure. Techniquement, en notant  $tr(\cdot)$  l'opérateur trace d'une matrice carrée, le problème revient à chercher le minimum de la fonction suivante :

$$\begin{aligned} f(W, C, B) &= tr(E^t E) \\ &= tr[(ZV - ZWA)^t (ZV - ZWA)] \\ &= tr[(\Psi - ZWA)^t (\Psi - ZWA)] \end{aligned}$$

L'optimisation d'une telle fonction est très complexe. Pour ce faire, la méthode GSCA utilise l'algorithme des moindres carrés alternés. La méthode GSCA est très utile pour étudier les relations entre les différentes dimensions de résilience. Cependant, son utilisation exige des connaissances à priori sur ces relations, ce qui n'est pas évident. Pour palier ce défaut, cette thèse propose une variante de MESVL capable d'apprendre automatiquement le modèle structurel exclusivement à partir des données. La méthode proposée consiste à calculer automatiquement le modèle structurel qui permet de minimiser un critère dérivé du critère global de l'approche GSCA en utilisant les algorithmes génétiques.

### 4.3.2) LES ALGORITHMES GENETIQUES

De nombreux problèmes peuvent se formuler sous la forme d'une fonction objective à optimiser en prenant en compte un ou plusieurs critères. La diversité et l'importance des problèmes d'optimisation ont donné naissance à de nombreux travaux de recherches. Dans le domaine de l'Intelligence Artificielle, le développement des méta-heuristiques d'optimisation est de plus en plus privilégié. Ces méthodes ont pour principe de simuler un mécanisme physique ou biologique pouvant conduire à l'obtention de solutions optimales à un problème d'optimisation mathématique, quelle que soit sa complexité. Cette approche a donné des résultats très satisfaisants dans de nombreux domaines. Les méta-heuristiques d'optimisation les plus connues sont les algorithmes génétiques (AG). Le principe des algorithmes génétiques est de fournir une simulation informatique de la théorie néo-darwinienne de l'évolution biologique des espèces. Cette théorie intègre la génétique moderne à la théorie de l'évolution des espèces. La méthode présente l'avantage de fournir une population de solutions grâce à une modélisation mathématique et informatique visant à mimer le processus biologique de génération d'individus selon les opérateurs génétiques de croisement et de mutation. Les individus capables de survivre sont sélectionnés parmi les solutions les plus performantes au sens du critère à optimiser ([BAP06], [BEN01], [JOH03]). L'optimisation est un domaine aux applications illimitées. Initialement étudiées par les mathématiciens, les techniques d'optimisation ont donné lieu à la Recherche Opérationnelle. Depuis de nombreuses années, le domaine s'est enrichi par des méthodes informatiques, notamment celles issues de l'Intelligence Artificielle.

## **Généralités sur l'optimisation**

Une méthode d'optimisation peut être définie comme un procédé permettant d'obtenir de meilleures solutions à des problèmes de maximisation ou de minimisation d'une fonction objective. D'un point de vue pratique, il existe deux catégories d'approches d'optimisation : l'approche mathématique et l'approche par les méta-heuristiques. L'approche mathématique cherche des solutions exactes ou approchées par des procédés mathématiques. Très souvent, ce type d'approche, bien que très efficace sur des problèmes réguliers, reste incapable de trouver des optimums globaux. En effet, les méthodes mathématiques sont en général basées sur l'algorithme de descente du gradient qui a l'inconvénient d'être piégé par les optimums locaux. En ce qui concerne les méta-heuristiques, ce sont des méthodes qui cherchent des solutions aux problèmes d'optimisation par simulation informatique d'une réalité de la vie. Malgré le fait qu'une heuristique, par définition, ne donne aucune garantie d'aboutir à la solution recherchée, les méta-heuristiques d'optimisation donnent des résultats très satisfaisants en pratique. Par conséquent, cette approche est de plus en plus utilisée dans le milieu industriel. L'une des forces des méta-heuristiques d'optimisation est leur capacité de se soustraire du piègeage des optimums locaux (convergent vers les optimums globaux).

Il existe plusieurs catégories de méta-heuristiques d'optimisation. Certaines méta-heuristiques sont issues des modes de résolution de problèmes par l'homme (la méthode de recherche avec tabous), d'autres sont issues d'analogies avec les phénomènes de la physique (la méthode du recuit simulé) et d'autres encore sont dérivées des analogies avec des phénomènes biologiques (les algorithmes évolutionnaires et les essaims particulaires). C'est dans cette dernière catégorie que se situent les algorithmes génétiques qui sont la forme la plus connue des systèmes bio-inspirés de la catégorie des algorithmes évolutionnaires, permettant de résoudre des problèmes de natures diverses, y compris les problèmes d'optimisation difficile. Les algorithmes évolutionnaires sont des méta-heuristiques d'inspiration biologique qui simulent la théorie néo-darwinienne d'évolution biologique des espèces. Ce type de méthodes fournit une population de solutions à un problème d'optimisation et non pas une solution unique comme c'est le cas avec les méthodes d'optimisation mathématique.

## **La théorie Néo-Darwinienne de l'évolution**

Darwin avait développé une théorie sur la manière dont les espèces biologiques (animales, végétales et humaines) évoluent au fil du temps sur la base d'un certain nombre de constats et d'observations. Selon cette théorie, chez les animaux et les végétaux, les descendants sont trop nombreux par rapport à la quantité de ressources disponibles pour leur survie. Par conséquent, il n'y a pas suffisamment de places pour tout le monde dans le jeu de l'évolution. Par exemple, une morue peut pondre plus de six (6) millions d'œufs en une seule fois et un éléphant donne naissance à dix-neuf (19) millions de descendants en 750 ans.

Au niveau des populations humaines, selon les travaux de l'économiste Malthus, la population augmente plus vite que la production des ressources, notamment alimentaires. Cependant, il a été constaté que l'effectif global de la population reste relativement stable d'année en année.

Il ressort de tout ce qui précède que, sans limitation, une population d'espèce s'accroît de façon exponentielle. Mais en réalité, les ressources naturelles et un certain nombre de facteurs limitants empêchent cet accroissement exponentiel des espèces au fil des générations. En plus de ces facteurs limitants dus en général au fait que le caractère limité des ressources entraîne une mortalité aussi importante, il existe des variations entre les individus d'une même espèce qui gouvernent la capacité de survie des espèces. En effet, à chaque génération, les descendants diffèrent non seulement de leurs parents, mais diffèrent aussi entre eux. Par conséquent, les individus qui présentent les meilleures variations par rapport au milieu sont favorisés et engendrent plus de descendants que les moins aptes. Il en résulte que la population se modifie graduellement au fur et à mesure que les caractères favorables s'accumulent au fil des générations : c'est la loi de la sélection naturelle qui est le fondement de l'évolution des espèces.

### **Le Néodarwinisme et sa simulation**

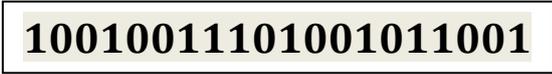
Le Darwinisme, tel que présenté, a connu de nombreuses critiques. Tout d'abord, cette théorie est basée uniquement sur des constats. Elle n'explique ni pourquoi la reproduction des espèces est surabondante, ni ce qui crée la variabilité observée chez les individus d'une même espèce. En plus de cela, la loi de la sélection naturelle ne crée rien de nouveau, elle ne fait que conserver un individu moyen adapté aux conditions de survie. Aussi, la transmission des caractères aux descendants n'est pas en accord avec les lois de la génétique moderne. Enfin, la concurrence vitale et la lutte pour la vie ne sont pas des phénomènes généraux. Face à ces critiques et les nouvelles connaissances en Génétique, la théorie darwinienne a été révisée ; ce qui a donné naissance à la théorie synthétique de l'évolution biologique des espèces encore connue sous le nom de néodarwinisme.

Le néodarwinisme est la synthèse de la théorie de la sélection naturelle (Darwin) et de la théorie de l'hérédité (Mendel). Dans cette théorie, la reproduction des espèces est gouvernée par les gènes qui subissent, au cours des générations, des opérations de recombinaison (croisements) et de mutations. Ainsi, la sélection naturelle se résume à un mécanisme de choix des individus les plus aptes à former la génération suivante et l'évolution correspond au résultat d'une altération progressive des êtres vivants au cours des générations. Selon cette théorie, l'évolution n'agit pas directement sur les êtres vivants, elle opère en réalité sur les chromosomes contenus dans leur ADN. Et cette évolution possède essentiellement deux composantes, à savoir la sélection et la reproduction. La sélection garantit une reproduction plus fréquente des chromosomes les plus forts et la reproduction constitue la phase durant laquelle s'effectue l'évolution des espèces proprement dite.

Dans les années 1960, John H. Holland expliqua comment ajouter de l'intelligence dans un programme informatique avec des procédés d'échanges et de modifications de bits. Du fait de la ressemblance du codage binaire au matériel génétique, il considéra les bits comme du matériel génétique, les opérations d'échanges de bits comme une simulation du croisement génétique et les opérations de modifications des bits comme une simulation de la mutation génétique. En 1975, Holland formalisa ses travaux sous le terme d'algorithmes génétiques. Puis, en 1989, David E. Goldberg ajouta, à la théorie des algorithmes génétiques, une idée nouvelle. Selon celle-ci, le fait que l'individu est lié à un environnement par son code d'ADN pourrait correspondre au fait qu'une solution soit liée à un problème par son indice de qualité. Puis, il se chargea de la vulgarisation de la méthode des algorithmes génétiques. Les algorithmes génétiques sont donc des méta-heuristiques de la catégorie des algorithmes évolutionnaires dont le principe est de simuler, à l'aide d'un ordinateur, la théorie néodarwinienne de l'évolution biologique des espèces. L'objectif d'une telle simulation est de pouvoir apporter un ensemble de solutions plus adaptées à un problème d'optimisation donné.

### **Les bases des algorithmes génétiques**

La théorie des algorithmes génétiques propose une formalisation d'un problème d'optimisation sous la forme des notions de la théorie synthétique de l'évolution sur la base d'un certain nombre d'analogies. Ainsi, un paramètre du problème est un gène, un vecteur de valeurs de tous les paramètres est un chromosome, la position d'un paramètre dans le vecteur est son locus, une solution potentielle correspond à un individu, un ensemble de solutions constitue une population, une itération est une génération et la fonction objective est utilisée pour évaluer le niveau d'adaptabilité des individus. En plus de cela, il faut pouvoir trouver une correspondance binaire à une solution quelconque. Par conséquent, chaque paramètre est codé sous forme d'un gène (ensemble de bits de longueur fixe) et l'on rassemble l'ensemble des valeurs des paramètres dans un vecteur de solution. Ainsi, toute solution doit être codée sous forme d'un chromosome (suite de bits). Un exemple de solution codée sur 20 bits sous la forme d'un chromosome est donné par la figure suivante :



**10010011101001011001**

Figure 21 : Exemple de chromosome codé sur 20 bits

Le principal avantage du codage binaire est que l'on peut facilement coder, en informatique, n'importe quel objet en binaire (méthode utilisée classiquement par les ordinateurs). On peut donc représenter aisément des réels, des entiers, des chaînes de caractères, etc. Pour effectuer la simulation artificielle de l'évolution naturelle, les algorithmes génétiques utilisent le principe décrit à la figure suivante :

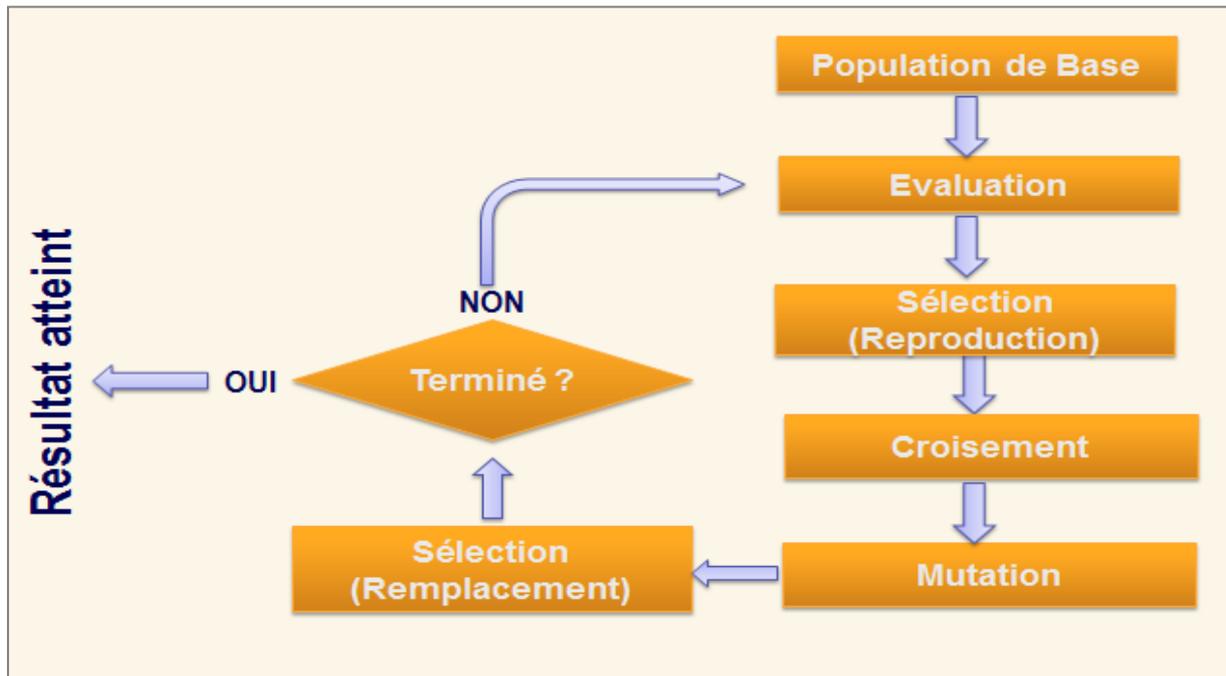


Figure 22 : Principe de déroulement d'un algorithme génétique<sup>4</sup>

Les algorithmes génétiques partent d'un ensemble quelconque de chromosomes de départ (solutions potentielles), qui sont en général choisis aléatoirement. Puis, l'algorithme fait évoluer la population initiale pour aboutir à une population d'arrivée (les chromosomes solutions). Les individus de la population d'arrivée doivent être les plus adaptés (au sens de la fonction à optimiser), c'est-à-dire, doivent permettre d'avoir une valeur minimale ou maximale de la fonction objective, sous la contrainte de maintenir la taille de la population constante au fur et à mesure des itérations successives (de génération en génération). Il existe cinq opérations fondamentales dans la théorie des algorithmes génétiques qui s'effectuent récursivement jusqu'à l'obtention de la population la plus adaptée. Ces opérations sont :

- 1) L'évaluation des performances des chromosomes
- 2) La sélection des chromosomes pouvant participer à la reproduction
- 3) Le croisement de certains chromosomes sélectionnés
- 4) La mutation de certains chromosomes sélectionnés
- 5) La sélection des chromosomes devant constituer la nouvelle génération

### Les opérateurs génétiques

Dans les AG, la simulation de l'acte de sexualité biologique se fait par la sélection pour la reproduction qui consiste en la sélection d'un petit nombre de chromosomes performants qui peuvent subir les opérations génétiques. Les méthodes de sélection pour reproduction sont de plusieurs types (choix proportionnels aux performances, choix proportionnels aux rangs,

<sup>4</sup> <https://reussirlem1info.files.wordpress.com/2012/03/expo-algo-gc3a9nc3a9tiques-ouessai.pptx>

méthode des tournois). Pour effectuer la simulation artificielle de l'évolution naturelle, les algorithmes génétiques partent d'un ensemble de solutions potentielles quelconque de chromosomes dont les performances sont fonctions de l'image des correspondances des chromosomes (en grandeurs réelles) par la fonction objective. Quant à la simulation du croisement génétique, elle se fait avec l'opérateur de croisement dont le principe est d'obtenir deux (2) nouveaux enfants à partir de deux (2) parents choisies aléatoirement selon une probabilité  $p_{crois}$ . Il existe plusieurs types de croisements dont les plus utilisés sont le croisement en 1 point, le croisement en 2 points et le croisement uniforme (avec masque). Par exemple, la figure suivante présente le croisement en 1 point :

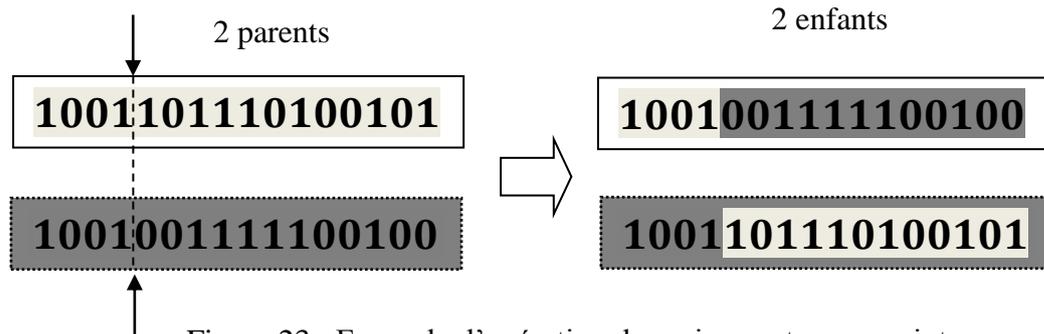


Figure 23 : Exemple d'opération de croisement en un point

La simulation de la mutation génétique se fait par l'opérateur de mutation qui consiste à obtenir un (1) ou deux (2) nouveau(x) enfant(s) à partir d'un (1) seul parent choisi aléatoirement selon une probabilité  $p_{mut}$ . Il existe des mutations à un (1) bit ou des mutations à plusieurs bits. Par exemple, la figure suivante présente une mutation en un seul bit :

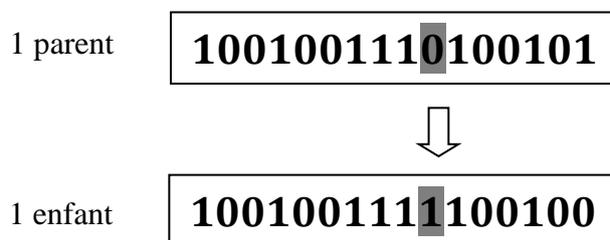


Figure 24 : Exemple d'opération de mutation à un bit

Enfin, le mécanisme de sélection naturelle est simulé par l'opération de sélection pour le remplacement. En effet, comme les opérations de mutation et de croisement augmentent la taille de la population, pour la maintenir constante, il faut choisir les chromosomes les plus aptes à former la génération suivante (population à maintenir constante). Il existe plusieurs méthodes de sélection (roulette du casino, élitisme, méthode des tournois). Pour plus de détails sur les différents opérateurs ainsi que des exemples concrets d'applications industrielles des algorithmes génétiques, le lecteur pourra consulter le livre très complet de Johann Dréo et al ([JOH03]).

### 4.3.3) LE MODELE GENETIQUE DES STRUCTURES LATENTES

Le modèle génétique des structures latentes (MGSL) ou latent's structures genetics modeling (LSGM) se propose d'apprendre le sous-modèle interne d'un modèle d'équations structurelles à variables latentes uniquement à partir des données collectées sur les variables manifestes et la spécification du modèle externe. Elle se sert des algorithmes génétiques pour calculer le modèle structurel en optimisant le critère global dérivé de celui sur lequel est fondée la méthode GSCA.

La méthode MGSL est une contribution de cette thèse au domaine des équations structurelles à variables latentes. Elle est suscitée par un problème issu des besoins de modélisation de la résilience, à savoir la nécessité d'apprendre automatiquement les relations structurelles entre les variables latentes en spécifiant uniquement le modèle de mesure. Bien que la méthode GSCA fournisse un critère global à optimiser, il est quasiment impossible de rechercher directement les paramètres du modèle permettant d'optimiser un tel critère. En pratique, la méthode GSCA utilise une procédure alternée en deux étapes. Cependant, du fait de l'usage de la spécification RAM, l'approche GSCA suscite deux remarques qui peuvent permettre une estimation directe par des techniques d'optimisation :

- 1) L'approche GSCA est fondée sur la spécification RAM (Reticular Action Modeling). Par conséquent, l'équation fondamentale reste l'équation  $ZV = ZWA + E$ . Les matrices  $V$ ,  $W$  et  $A$  sont donc les matrices caractéristiques de l'approche GSCA.
- 2) Si l'on dispose d'une estimation du modèle structurel par l'approche PLS (PLSPM), on peut en déduire des estimations  $\hat{V}$ ,  $\hat{W}$  et  $\hat{A}$  des matrices  $V$ ,  $W$  et  $A$  respectivement.
- 3) Une estimation acceptable du critère  $f(V, W, A) = tr[(ZV - ZWA)^t(ZV - ZWA)]$  peut être donnée par  $\hat{\mathcal{I}}(V, W, A) = tr[(\hat{V} - \hat{W}\hat{A})^t(\hat{V} - \hat{W}\hat{A})]$

Si l'on considère les trois remarques, il est possible de rechercher la structure du modèle PLSPM permettant de minimiser le critère  $\hat{f}(V, W, A)$  par une procédure directe et globale d'optimisation. L'approche MGSL est basée sur ce principe d'estimation en utilisant la technique des algorithmes génétiques comme méthode d'optimisation.

#### **L'algorithme MGSL**

Contrairement au modèle GSCA qui cherche une estimation des paramètres inconnus, l'objectif de la méthode est de rechercher le modèle structurel qui optimise le critère  $\mathcal{I}(\theta)$  en utilisant un algorithme génétique. Comme les relations structurelles peuvent être décrites par une matrice triangulaire supérieure comportant des valeurs 0 ou 1, tout le problème revient à chercher la matrice optimale qui minimise le critère  $\mathcal{I}(\theta)$ ,  $\theta$  étant le triplet  $(V, W, A)$ .

Pour ce faire, posons :

- ✓  $n$  la taille des populations à chaque génération
- ✓  $\mathcal{P}_n^k$  la population de la  $k^{eme}$  génération
- ✓  $I_i^k$  le  $i^{eme}$  chromosome de la population  $\mathcal{P}_n^k$
- ✓  $\mathbb{P}_{crois}$  la probabilité de croisement des chromosomes
- ✓  $\mathbb{P}_{mut}$  la probabilité de mutation des chromosomes
- ✓  $S$  la spécification du modèle externe (modèles de mesure)
- ✓  $D_I$  les informations sur les panélistes (données)
- ✓  $M_i^k$  la matrice du modèle interne correspondant au chromosome  $I_i^k$
- ✓  $\Gamma_i^k = plspm(S, M_i^k)$  l'estimation PLSPM correspondant au chromosome  $I_i^k$
- ✓  $\hat{\mathcal{I}}(\Gamma_i^k)$  la valeur de  $\hat{\mathcal{I}}(\theta)$  du chromosome  $I_i^k$  (pour le modèle  $\Gamma_i^k$ )

Dans les modèles MGSL, le modèle externe est spécifié. Et c'est sur la base de ce modèle et des données collectées que le modèle interne est calculé automatiquement. Dans ce cas, un chromosome est une suite de données binaires correspondant à un modèle interne. Ainsi, En considérant les notations définies, l'algorithme du modèle MGSL est le suivant :

---

Algorithme 9 : Modèle Génétique des Structures Latentes

---

1. Entrée :  $S, D_I, n, \mathbb{P}_{crois}, \mathbb{P}_{mut}$
  2. Pour chaque population  $\mathcal{P}_n^k$
  3.     Pour chaque chromosome  $I_i^k$  :
  4.         a) Créer la matrice  $M_i^k$  du modèle interne correspondant au chromosome  $I_i^k$
  5.         b) Estimer le modèle  $\Gamma_i^k = plspm(S, M_i^k | D_I)$
  6.         c) Calculer la valeur  $\hat{\mathcal{I}}(\Gamma_i^k)$
  7.     Fin pour
  8.     Choisir les individus les plus performants pour la modification
  9.     Croiser les individus sélectionnés selon une probabilité  $\mathbb{P}_{crois}$
  10.     Faire muter les individus sélectionnés avec une probabilité  $\mathbb{P}_{mut}$
  11.     Effectuer les remplacements pour créer la génération  $\mathcal{P}_n^{k+1}$  ( $k = k + 1$ )
  12. Fin Pour
  13. Si convergence non atteinte, aller à 3.
  14. Retenir le meilleur individu de la dernière génération obtenue
  15. Créer la matrice du modèle interne correspondant au meilleur chromosome
  16. Estimer le modèle PLSPM final correspondant au meilleur chromosome
  17. Sortie : le modèle structurel du PLSPM final
-

---

**PARTIE III : LES MODELES  
AVANCES DE LA PROPOSITION  
D'UNE RÉSILIOLOGIE**

---

---

## CHAPITRE 5 : L'ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DES PROCESSUS DE RESILIENCE

---

L'étude de la dynamique des processus de résilience peut revêtir plusieurs formes. Elle n'a de sens que pour des études à passages répétés sur un panel d'individus. Par conséquent, l'utilisation des méthodes d'analyse de la dynamique des processus de résilience exige que les mêmes informations soient collectées sur les mêmes individus à plusieurs périodes de temps. L'idéal est que la périodicité de collecte de données soit constante (chaque semaine, chaque deux semaines, chaque mois, chaque trimestre, chaque semestre, chaque, année, etc.). Cependant, les méthodes résiliométriques n'exigent pas forcément que les intervalles de temps entre les périodes de collectes de données soient uniformes. Cette propriété est simplement souhaitable mais nullement nécessaire. L'essentiel est de disposer des mêmes données collectées sur les mêmes individus à plusieurs dates différentes.

En ce qui concerne la problématique même de la dynamique, cette thèse s'intéresse à trois aspects. Tout d'abord, les individus pouvant changer d'état de vulnérabilité d'une période à une autre, il est légitime de rechercher les caractéristiques de ces transitions d'états de vulnérabilité. Ensuite, les individus ayant leurs propres opinions de leurs situations de souffrance, il est important de pouvoir prévoir les états de vulnérabilité des individus dans le temps à partir des opinions qu'ils ont de leur propre situation de souffrance. Une telle possibilité pourrait être exploitée pour effectuer des études rapides et légères en collectant des informations sur ces opinions, étant entendu que l'état de vulnérabilité peut être prédit avec une précision acceptable. Le nombre de panélistes effectivement utilisé pour les études de résilience devant être limité pour des raisons de coûts par rapport à la population entière, cette modélisation fournit un moyen d'extrapoler les études aux individus ne faisant pas partie des panélistes via une collecte rapide d'informations relativement simples (opinions sur leurs situations de souffrance et variables structurelles caractéristiques). Enfin, la recherche d'actions de résilience efficaces est une préoccupation qui sera abordée dans ce chapitre.

---

### 5.1) LES TRANSITIONS ENTRE LES ETATS DE VULNERABILITE

---

L'étude des transitions entre les différents états de vulnérabilité est de prime abord relativement complexe. En effet, elle dépend des réponses concrètes aux questions que l'on se pose sur la manière de définir des états de vulnérabilité. Cependant, en ce qui concerne la Résiliométrie, une telle question trouve sa réponse dans la théorie stochastique de la résilience. Cette théorie nous fournit un moyen pratique d'identifier les capacités de rebond des individus. En plus de cela, elle offre un moyen de les catégoriser grâce à la notion de degré de rebond. En exploitant judicieusement les notions de cette théorie et en couplant ces notions avec la théorie des chaînes de Markov, il est possible d'étudier les lois qui gouvernent les transitions entre les états de vulnérabilité et d'en étudier les propriétés.

Les chaînes de Markov ont été introduites pour la première fois par le mathématicien russe Andrei Andreevich Markov (1856-1922). A la suite de Markov, l'étude des processus dits markoviens a pris une importance croissante dans le domaine des probabilités. Les chaînes de Markov ont aujourd'hui des applications dans de nombreux domaines dont l'économie, la finance, l'informatique ou la physique.

### 5.1.1) LA THEORIE DES AUTOMATES

La notion d'automate est avant tout une notion mathématique. Il s'agit d'une méthode de modélisation représentable sous une forme graphique. Les automates sont des modèles graphiques utilisés dans la modélisation de plusieurs phénomènes. L'une des applications les plus spectaculaires reste de loin son utilisation à des fins électroniques pour la construction des ordinateurs. Cependant, ce type de modèles mathématiques est utilisé dans de nombreux domaines pour effectuer des tâches aussi diverses que l'implémentation des langages formels, la modélisation de systèmes automatiques (guichets automatiques, etc.), le traitement des chaînes de caractères (expressions régulières), etc. Il s'agit d'un des outils les plus utilisés dans le traitement automatique du langage naturel et dans la modélisation de la parole.

#### **Définition 5.1.1.1 : Automate fini**

On appelle automate fini un quintuplet  $A = (Q, \Sigma, \delta, Q_0, Q_F)$  dans lequel :

- $Q$  désigne un ensemble fini d'états
- $\Sigma$  un alphabet (ensemble fini de symboles)
- $Q_0 \in Q$  le sous-ensemble des états initiaux
- $Q_F \in Q$  le sous-ensemble des états terminaux
- $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow 2^Q$  une fonction de transition décrivant les états  $\delta(q, a)$ , c'est-à-dire donnant le(s) état(s) d'arrivée(s) à partir de la connaissance du nœud de départ ( $q$ ) et d'un symbole d'arc donné ( $a$ ).

Exemple : Considérons le quintuplet  $A = (Q, \Sigma, \delta, Q_0, Q_F)$  définie par :

- $Q = \{1, 2, 3, 4, 5\}, \Sigma = \{a, b, c\}$
- $\delta(1, a) = 3, \delta(3, a) = \{2, 4, 5\}, \delta(1, c) = 5, \delta(3, a) = \{3, 5\}, \delta(3, b) = 4, \delta(2, c) = 1$
- $Q_0 = \{1, 3\}, Q_F = \{1, 2, 5\}$

Le quintuplet  $A = (Q, \Sigma, \delta, Q_0, Q_F)$  tel que spécifié est un automate fini.

#### **Définition 5.1.1.2 : Automate déterministe**

L'automate fini  $A = (Q, \Sigma, \delta, Q_0, Q_F)$  est dit déterministe si et seulement si :

$\forall (q, a) \in Q \times \Sigma, \text{card}(\delta(q, a)) \leq 1$ , c'est-à-dire que les  $\delta(q, a)$  contiennent au plus un seul élément. Les automates finis déterministes sont notés AFD et les automates finis non déterministes sont notés AFN.

**Définition 5.1.1.3 : Automate complet**

L'automate fini  $A = (Q, \Sigma, \delta, Q_0, Q_F)$  est dit complet si et seulement si :

$\forall (q, a) \in Q \times \Sigma, \text{card}(\delta(q, a)) = 1$ , c'est-à-dire que chaque  $\delta(q, a)$  contient exactement un élément. Les automates complets sont donc des automates déterministes particuliers.

**Définition 5.1.1.4 : Graphe d'un automate fini déterministe**

On appelle représentation graphique d'un automate fini déterministe  $A$ , le graphe orienté  $G_A$  pour lequel :

- $Q$  est l'ensemble des nœuds représentés par des cercles
- $\Sigma$  est l'ensemble des symboles des arcs représenté par des flèches orientées
- $Q_0 \in Q$  est l'ensemble des nœuds initiaux comportant une flèche sans nœud d'origine
- $Q_F \in Q$  est l'ensemble des nœuds terminaux représentés par deux cercles
- $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow 2^Q$  est une fonction de transition décrivant les nœuds  $\delta(q, a)$ , c'est-à-dire donnant le(s) nœud(s) d'arrivée à partir du nœud de départ ( $q$ ) et d'un symbole d'arc donné ( $a$ ).

**Définition 5.1.1.5 : Chaîne acceptée par un automate**

La chaîne  $u = a_1 \dots a_l$  sera acceptée par l'automate fini  $A = (Q, \Sigma, \delta, Q_0, Q_F)$  s'il existe une séquence (non unique) de  $l + 1$  états  $(q^0, \dots, q^l)$  telle que :

- $q^0 \in Q_0$
- $q^l \in Q_F$
- $\forall i \in [0, l - 1], q^{i+1} \in \delta(q^i, a_{i+1})$

La notion d'acceptation correspond à la notion de reconnaissance d'une chaîne par l'automate. Il s'agit des chaînes que l'automate est capable de générer du fait de sa structure. C'est cette possibilité des automates qui est exploitée dans les expressions régulières utilisées dans la manipulation des chaînes de caractères par voie logicielle.

**Définition 5.1.1.6 : Langage accepté par un automate**

L'ensemble des chaînes acceptées par l'automate  $A = (Q, \Sigma, \delta, Q_0, Q_F)$  est appelé le langage accepté par cet automate et est noté  $L(A)$ .

**Automate probabiliste**

Un automate probabiliste est une généralisation des automates finis non déterministes. Dans ce type d'automates, chaque transition est équipée d'une probabilité. Les transitions sont représentées par des matrices stochastiques appelées matrices de transition. Les langages reconnus par les automates probabilistes sont appelés des langages stochastiques. Les automates probabilistes sont utilisés dans la modélisation de nombreux processus aléatoires mettant en jeu des transitions dynamiques entre états ou des séquences d'évènements.

Les plus connus et certainement les plus utilisés sont les processus markoviens, en particulier les chaînes de Markov et les modèles de Markov cachés. Le concept d'automate probabiliste a été introduit par Michael Rabin en 1963. Cependant, sans qu'ils soient ainsi nommés, les automates probabilistes ont été introduits dans le domaine des mathématiques à travers le calcul stochastique au début du 20<sup>e</sup> siècle avec les travaux de Markov et de Kolmogorov.

### 5.1.2) LES CHAINES DE MARKOV

L'objet des chaînes de Markov ([AGI10], [CHI05a], [CHI05b]) est l'étude des processus dits sans mémoire dont l'évolution future ne dépend que du passé immédiat qui a conduit à l'état présent. Les chaînes de Markov sont des automates probabilistes comme le montre la figure suivante :

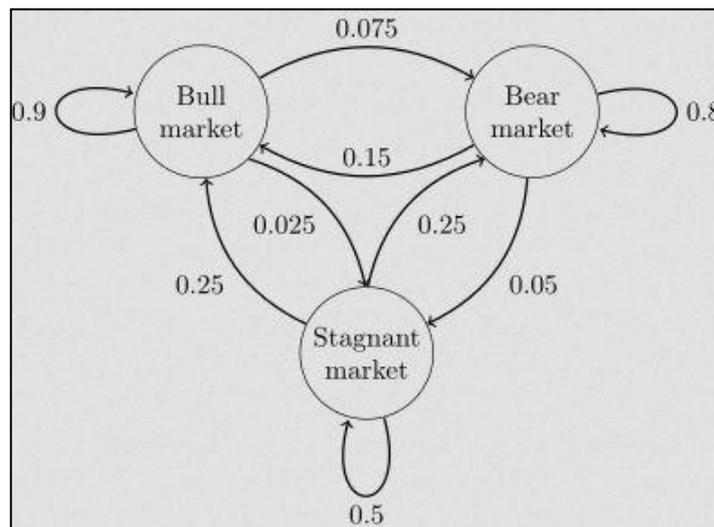


Figure 25 : Exemple de chaîne de Markov<sup>5</sup>

#### Notations mathématiques

Pour mieux présenter cette théorie, considérons les notations suivantes :

- $E = \{E_1, \dots, E_S\}$  un ensemble fini de  $S$  états
- $\mathcal{F}$  une tribu sur  $E$
- $(\mathcal{F}_t)_{1 \leq t \leq T}$  une filtration de  $E$
- $\mathbb{P}$  une mesure de probabilités sur l'espace mesurable  $(E, \mathcal{F})$

<sup>5</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Markov\\_chain](https://en.wikipedia.org/wiki/Markov_chain)

De manière concrète,  $E$  représente l'ensemble des états dans lesquels peut se trouver le processus étudié. La filtration représente le temps et  $\forall t \in [1, T]$ , la tribu  $\mathcal{F}_t$  contient les informations disponibles sur l'évolution du processus jusqu'à cet instant  $t$  (inclus).

### Définition 5.1.2.1 : Matrice de transition

On appelle matrice de transition  $P$  sur  $E$ , un ensemble de valeurs numériques  $(p(i, j))_{1 \leq i, j \leq S}$  tel que :

- $\forall (i, j) \in [1, S]^2, p(i, j) \geq 0$
- $\sum_{j=1}^S p(i, j) = 1$

Dans cette définition, il est important de remarquer que  $\forall i \in [1, S], p(i, \cdot)$  est une probabilité. Les matrices de transition possèdent des propriétés remarquables. On a :

- $p^0(i, j) = \delta_{ij}$  correspondant à la matrice identité sur  $E$
- $p^1(i, j) = p(i, j)$
- $\forall n \in \mathbb{N}, p^{n+1}(i, j) = \sum_{k=1}^S p^n(i, k)p(k, j)$

Ces relations montrent que si  $P$  est une matrice de transition,  $\forall n \in \mathbb{N}, P^n$  est aussi une matrice de transition. En plus de cela,  $\forall n \in \mathbb{N}, P^n$  représentera la probabilité que, partant de l'état  $i$ , le processus se retrouve dans l'état  $j$  en  $n$  unités de temps plus tard.

### Définition 5.1.2.2 : Chaînes de Markov

On appelle chaîne de Markov (homogène), tout processus aléatoire  $(X_t)_{1 \leq t \leq T}$ , de loi de probabilité initiale  $\mu$  à valeurs dans  $E$ , et de matrice de transition  $P$  telle que :

- $X_0 \sim \mu$
- $\forall t \in \mathbb{N}, \mathbb{P}(X_{t+1} = E_s | \mathcal{F}) = \mathbb{P}(X_t = E_s)$

Le second point de la définition traduit le fait que le processus est sans mémoire, ce qui est connue comme étant la propriété de Markov.

### Définition 5.1.2.3 : Temps de retour dans un état

Considérons le nombre entier positif défini par l'expression suivante :

$$\sigma(s) = \inf\{t \geq 1, X_t = E_s\}.$$

Du point de vue des probabilités,  $\sigma(s)$  est bel et bien un temps d'arrêt. En effet,  $\forall t \in \mathbb{N}^*, \{\sigma(s) \leq t\} = \bigcup_{\tau=0}^t \{X_\tau = E_s\}$  est  $\mathcal{F}_t$ -mesurable car tous les constituants  $X_t$  sont  $\mathcal{F}_t$ -mesurables (donc les  $X_\tau$ ).

## Caractérisation d'un état et du processus

Soit  $(X_t)_{1 \leq t \leq T}$  un processus markovien et  $\sigma(s) = \inf\{t \geq s, X_t = E_s\}$  le temps de retour à l'état  $E_s$ . On a les propriétés suivantes :

- Si  $\mathbb{P}(\{\sigma(s) \leq \infty\}) = 1$  l'état  $E_s$  est dit récurrent
- Si  $\mathbb{P}(\{\sigma(s) \leq \infty\}) < 1$  l'état  $E_s$  est dit transient
- Si  $\forall j \in [1, S], \mathbb{P}(\{X_{t+1} = E_s | X_t = E_s\}) = 1$ , l'état  $E_s$  est dit absorbant

Le fait que l'état  $E_s$  soit récurrent signifie qu'une fois que le processus passe par l'état  $E_s$ , on est sûr et certain qu'il y retournera en un temps fini. Par conséquent, le processus passera une infinité de fois dans cet état presque sûrement. Pour un état transient, lorsque le processus y passe une fois, on est sûr qu'il n'y repassera qu'un nombre fini de fois. Quant à un état absorbant, le processus ne peut pas en sortir une fois qu'il y entre. Le processus  $(X_t)_{1 \leq t \leq T}$  est dit récurrent si tous ses états sont récurrents. De même, il est dit transient si tous ses états sont transients.

### 5.1.3) LES MODELES DYNAMIQUES TRANSITIONNELS

Dans cette thèse, le modèle d'analyse des transitions se limitera essentiellement aux quatre états de vulnérabilité obtenus avec la médiane. Sa généralisation à d'autres types de décompositions reste relativement simple.

#### Processus de transition entre les états de vulnérabilité

Pour étudier les transitions entre les différents états de vulnérabilité, considérons les notations suivantes :

- $E = \{VA, VG, VL, NV\}$  l'ensemble des états de vulnérabilité (selon les quartiles)
- $\mathcal{P}(E)$  l'ensemble des parties de  $E$
- $\mathbb{P}$  la probabilité uniforme sur  $(E, \mathcal{P}(E))$
- $n_{ij}$  le nombre d'individus qui sont passés de l'état  $E_i$  à la date  $t$  à  $E_j$  à  $t + 1$
- $P = (p(i, j))_{1 \leq i, j \leq 4}$  la matrice de transition entre les différents états

Les chaînes de Markov sont des modèles qui peuvent se représenter aisément sous la forme d'un graphe de relations entre les différents états. La chaîne de Markov correspondante aux transitions entre les états de vulnérabilité est décrite par le schéma suivant :

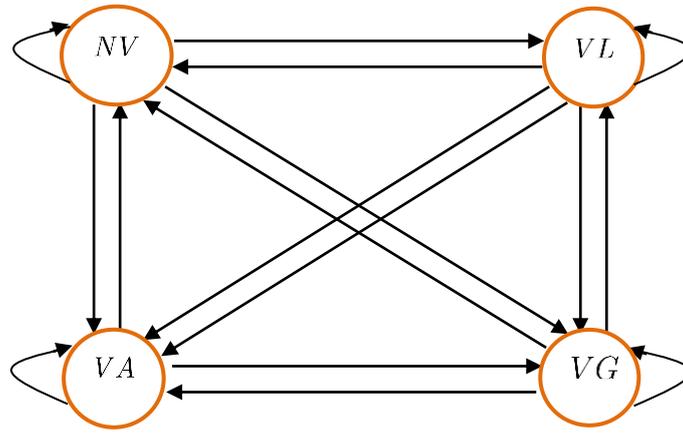


Figure 26 : La structure de transition entre les états de vulnérabilité

La chaîne de Markov est décrite totalement lorsqu'on associe au graphe de l'automate, la distribution des probabilités de transition. Le tableau permettant d'estimer les éléments de la matrice de transition est le suivant :

Tableau 5 : Effectifs de transition sur deux périodes

Effectifs ( $n_{ij}$ )		Etat au temps $t + 1$				TOTAL
		VA	VG	VL	VA	
Etat au temps $t$	VA	$n_{11}$	$n_{12}$	$n_{13}$	$n_{14}$	$n_{1.}$
	VG	$n_{21}$	$n_{22}$	$n_{23}$	$n_{24}$	$n_{2.}$
	VL	$n_{31}$	$n_{32}$	$n_{33}$	$n_{34}$	$n_{3.}$
	NV	$n_{41}$	$n_{42}$	$n_{43}$	$n_{44}$	$n_{4.}$
TOTAL		$n_{.1}$	$n_{.2}$	$n_{.3}$	$n_{.4}$	$n$

En partant de ce tableau, il est possible de donner une interprétation concrète aux effectifs marginaux lignes et colonnes, ainsi :

- $n_{i.} = \sum_{j=1}^4 n_{ij}$  est le nombre d'individus qui sont dans l'état  $E_i$  à la date  $t$
- $n_{.j} = \sum_{i=1}^4 n_{ij}$  est le nombre d'individus qui sont dans l'état  $E_j$  à la date  $t + 1$

Le nombre d'individus total vérifie donc la relation  $n = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 n_{ij}$ . Ainsi, les éléments de la

matrice de transition sont obtenus par :

$$\forall (i, j) \in [1, 4]^2, p(i, j) = n_{ij}/n.$$

$$\text{Et on a bien } \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 p(i, j) = (1/n) \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 n_{ij} = 1$$

## Prise en compte de plusieurs périodes d'observations

Les calculs tels que décrits ci-avant ne sont valables que lorsque l'on considère deux périodes successives  $t$  et  $t + 1$ . Or, en pratique, la résilience s'étudie sur plusieurs périodes. De ce fait, les effectifs doivent prendre en compte cette réalité. Pour ce faire, considérons les notations suivantes :

- $\Lambda_t(\omega) \in E$  l'état de vulnérabilité de l'individu  $I_\omega \in \Omega_I$  au temps  $t \in [1, T]$
- $N_{ij}$  le nombre de cas  $(E_i, E_j)$  rencontrés avec  $E_i$  au temps  $t$  et  $E_j$  en  $t + 1$

Le tableau permettant d'estimer les éléments de la matrice de transition devient donc le suivant :

Tableau 6 : Effectifs de transition sur plus de deux périodes

Effectifs ( $N_{ij}$ )		Etat au temps $t + 1$				TOTAL
		VA	VG	VL	NV	
Etat au temps $t$	VA	$N_{11}$	$N_{12}$	$N_{13}$	$N_{14}$	$N_{1.}$
	VG	$N_{21}$	$N_{22}$	$N_{23}$	$N_{24}$	$N_{2.}$
	VL	$N_{31}$	$N_{32}$	$N_{33}$	$N_{34}$	$N_{3.}$
	NV	$N_{41}$	$N_{42}$	$N_{43}$	$N_{44}$	$N_{4.}$
TOTAL		$N_{.1}$	$N_{.2}$	$N_{.3}$	$N_{.4}$	$N$

Considérons la variable définie par :

$$\delta_t(\omega, i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } \Lambda_t(\omega) = E_i \text{ et } \Lambda_{t+1}(\omega) = E_j \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

Les effectifs des individus permettant d'estimer la matrice de transition sont donnés par la relation suivante :

$$N_{ij} = \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{\omega \in \Omega_I} \delta_t(\omega, i, j)$$

Par définition, l'effectif total n'est plus celle de la population mais tient compte de la longueur des périodes consécutives considérées, c'est à dire égal à  $n(T - 1)$ .

On a donc :

$$N = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 N_{ij} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{\omega \in \Omega_I} \delta_t(\omega, i, j) = n(T - 1)$$

Ainsi, les éléments de la matrice de transition sont obtenus par :

$$\forall (i, j) \in [1, 4]^2, p(i, j) = N_{ij}/N = N_{ij}/n(T - 1).$$

$$\text{Et on a bien } \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 p(i, j) = (1/N) \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 N_{ij} = 1$$

Cette procédure est plus générale et la considération de deux périodes n'est qu'un cas particulier. En notant  $\Phi(\xi_t|I_i)$  l'opération de détermination de l'état de vulnérabilité de l'individu  $I_i$  à partir de l'estimation de la résilience  $\xi_t$  au temps  $t$  (TSR), l'algorithme de calcul de la matrice caractérisant les transitions entre les états de vulnérabilité est le suivant :

---

**Algorithme 10 : Calcul de la matrice de transition entre les états de vulnérabilité**

---

1. Entrées :  $n, T, \Omega_I, (\xi_t)_{t \in [1, T]}$
  2.  $\Lambda = 0_{1:n, 1:T}$  // Tableaux des états de vulnérabilité (TSR)
  3. Pour ( $t \in [1, T]$ ) {
  4.     Pour ( $i \in [1, n]$ ) {
  5.         a) Calculer  $\Lambda_t(I_i) = \Phi(\xi_t|I_i)$
  6.         b)  $\Lambda[i, t] = \Lambda_t(I_i)$
  7.     }
  8.     }
  9.     }
  10.  $P = 0_{1:4, 1:4}$  // Matrice de transitions
  11. Pour ( $i \in [1, 4]$ ) {
  12.     Pour ( $j \in [1, 4]$ ) {
  13.         a)  $N_{ij} = 0$
  14.         b) Pour ( $\omega \in \Omega_I$ ) {
  15.             Pour ( $t \in [1, T - 1]$ ) {
  16.                  $N_{ij} = N_{ij} + \delta_t(\omega, i, j)$
  17.             }
  18.         }
  19.         c)  $P[i, j] = N_{ij}/n(T - 1)$
  20.     }
  21.     }
  22. }
  23. Sorties :  $\Lambda, P$
- 

## 5.2) LA PERCEPTION DE LA SOUFFRANCE ET ETATS DE VULNERABILITE

---

Dans l'étude des processus de résilience, un des aspects les plus importants est d'identifier un ensemble d'actions ou de politiques susceptibles d'accroître significativement la résilience des individus. Il s'agit de savoir, parmi un ensemble d'actions ou de politiques possibles, quelles sont celles qui sont susceptibles de produire un meilleur résultat.

Il peut s'agir aussi bien de choisir une action optimale qu'une combinaison d'actions. Pour se faire, isoler ces différentes actions sans prendre en compte leurs différentes interactions serait une erreur d'appréciation. En effet, une action peut bien avoir des avantages sur certains critères, mais impacter négativement certains autres. Il est donc important de définir un ensemble d'actions en prenant soin d'examiner leurs éventuelles interactions.

### 5.2.1) LES MODELES DE MARKOV CACHES

Les modèles de Markov cachés ou HMM (Hidden Markov Model) sont des automates probabilistes très utilisés sur des données séquentielles. C'est l'une des méthodes les plus utilisées en reconnaissance de la parole et dans la modélisation des séquences génomiques (ADN). Il s'agit d'une extension des chaînes de Markov. Un HMM est composé techniquement de deux chaînes de Markov interconnectées dont l'une est observée et l'autre cachée (inobservable directement). L'enjeu est de modéliser le processus caché en se basant sur le processus observable ([ANC10], [DRL10]). Il existe trois problèmes fondamentaux liés aux modèles de Markov cachés. Le premier est de retrouver la probabilité qu'une séquence d'observations ait été générée par un modèle de Markov caché donné. Les algorithmes qui permettent de calculer les probabilités correspondantes sont des algorithmes de programmation dynamique appelés Forward et Backward. Le second problème est de retrouver la séquence d'états cachés la plus probable pour une séquence d'observations donnée. On utilise l'algorithme de Viterbi pour résoudre ce problème. Le dernier problème concerne l'apprentissage des modèles de Markov cachés uniquement à partir des données. L'apprentissage consiste à déterminer les matrices de transition et le vecteur d'initialisation. La solution à ce problème est donnée par l'algorithme de Welch-Baum. La figure suivante donne un exemple de modèle de Markov caché :

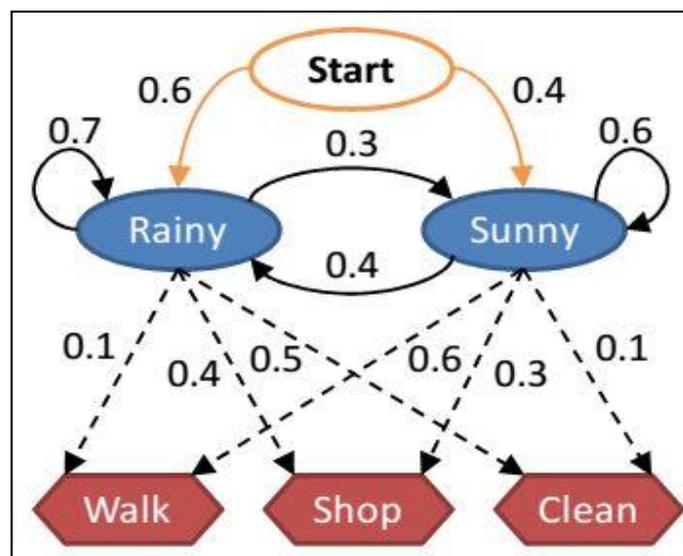


Figure 27 : Exemple de modèle de Markov caché<sup>6</sup>

<sup>6</sup> <http://shawnhymel.com/portfolio/hidden-markov-models-in-gpgpu-hmm-cuda>

Ce modèle de Markov caché modélise l'évolution des activités (Walk, Shop et Clean) sur la base des observations effectuées sur l'évolution du temps (Start, Rainy, Sunny). Il part du principe que l'activité menée dépend de l'état du temps. Cependant, seul l'état du temps peut être observé. De ce fait, le modèle se propose de prévoir la séquence des activités effectuées correspondant à une succession d'états d'évolution du temps.

### Modèle de Markov caché

Considérons deux chaînes de Markov  $(X_t)_{1 \leq t \leq T}$  et  $(Y_t)_{1 \leq t \leq T}$  définies comme suit :

- $(X_t)_{1 \leq t \leq T}$  un processus caché ayant un ensemble fini de  $N$  états  $E = \{E_1, \dots, E_N\}$
- $(Y_t)_{1 \leq t \leq T}$  un processus observable pouvant prendre  $M$  symboles  $V = \{V_1, \dots, V_M\}$
- $a(i, j) = \mathbb{P}(X_{t+1} = E_i | X_t = E_j)$  les probabilités de transition entre les différents états dans lesquels peut se trouver le processus caché
- $b_j(k) = \mathbb{P}(Y_t = V_k | X_t = E_j)$  les probabilités d'observation des symboles non cachés lorsque le processus caché est dans un état spécifique.
- $\pi_i = \mathbb{P}(X_0 = E_i)$  la probabilité que le processus caché soit initialement dans l'état  $E_i$ , c'est à dire débute dans cet état.

#### Définition 5.2.1.1 : Modèle de Markov caché

Un modèle de Markov caché est un triplet  $\Lambda = (A, B, \pi)$  dans lequel :

- $A = (a(i, j))_{1 \leq i, j \leq N}$  représente la matrice de transition entre les différents états du processus caché  $(X_t)_{1 \leq t \leq T}$
- $B = (b_j(k))_{(j, k) \in [1, N] \times [1, M]}$  représente la matrice d'observation des symboles de  $V$  lorsque le processus caché est dans l'état  $E_j$
- $\pi = (\pi_i)_{1 \leq i \leq N}$  représente le vecteur des probabilités initiales des différents états  $E_i$  du processus caché

Par définition, on a les propriétés suivantes :

- $\forall (i, j) \in [1, N]^2, a(i, j) \geq 0$  et  $\sum_{j=1}^N a(i, j) = 1$
- $\forall (j, k) \in [1, N] \times [1, M], b_j(k) \geq 0$  et  $\sum_{k=1}^M b_j(k) = 1$
- $\forall i \in [1, N], \pi_i \geq 0$  et  $\sum_{i=1}^N \pi_i = 1$

Exemple de HMM : Un HMM est totalement défini par la donnée du triplet  $\Lambda = (A, B, \pi)$ . Ainsi, considérons les trois matrices réelles suivantes :

$$A = \begin{pmatrix} 0,3 & 0,5 & 0,2 \\ 0 & 0,3 & 0,7 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0,5 & 0,5 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ et } \pi = \begin{pmatrix} 0,6 \\ 0,4 \\ 0 \end{pmatrix}$$

L'automate  $\Lambda = (A, B, \pi)$  à trois états  $E = \{1, 2, 3\}$  (cachés) permettant de générer un symbole de l'alphabet défini par  $V = \{a, b\}$  est un modèle de Markov caché.

### 5.2.2) L'UTILISATION DES AUTOMATES HMM

#### L'apprentissage des paramètres

Dans la plupart des applications réelles, la structure du HMM est inconnue. On ne dispose en général que d'un ensemble fini de  $K$  séquences  $\mathcal{O} = (\mathcal{O}_k)_{1 \leq k \leq K} = \{O_k^1, \dots, O_k^t, \dots, O_k^T\}_{1 \leq k \leq K}$  observées sur un horizon temporel  $T$  ; les éléments observés étant les symboles du processus observable, c'est à dire  $O_k^t \in V, \forall (k, t) \in [1, K] \times [1, T]$ . Le but de l'apprentissage est de fournir une estimation acceptable du HMM, c'est-à-dire une estimation de chaque paramètre du triplet  $\Lambda = (A, B, \pi)$  en se basant uniquement sur les séquences observées. En supposant que les séquences  $(\mathcal{O}_k)_{1 \leq k \leq K}$  sont indépendantes, la vraisemblance d'observation de cette séquence s'écrit :

$$\mathbb{P}(\mathcal{O}|\Lambda) = \prod_{k=1}^K \mathbb{P}(\mathcal{O}_k|\Lambda)$$

L'idée de l'estimation des paramètres est de trouver les paramètres  $A, B$  et  $\pi$  qui permettent de maximiser la vraisemblance. Pour ce faire, on se sert d'une technique de ré-estimation qui permet de raffiner les estimations de proche en proche selon la procédure suivante :

- 1) On choisit un ensemble initial  $\Lambda_0$  de paramètres
- 2) On calcule  $\Lambda_1$  à partir de  $\Lambda_0$ , puis  $\Lambda_2$  à partir de  $\Lambda_1$ , etc. jusqu'à convergence

A chaque itération  $p$ , disposant de l'estimation  $\Lambda_p$  de  $\Lambda$ , on cherche à calculer une amélioration  $\Lambda_{p+1}$  de telle sorte que  $\mathbb{P}(\mathcal{O}|\Lambda_{p+1}) \geq \mathbb{P}(\mathcal{O}|\Lambda_p)$  grâce au principe de l'algorithme EM. En pratique, on se sert de l'algorithme de Baum-Welch. En effet, Baum a proposé des formules de ré-estimations permettant d'atteindre les objectifs d'estimation fixés. Pour ce faire, considérons les notations suivantes :

- $\xi_t^k(i, j) = \mathbb{P}(\{X_t = E_i, X_{t+1} = E_j\} | O^k, \Lambda)$  la probabilité que, étant donné une séquence  $O^k$  de longueur  $T$  et un HMM  $\Lambda$ , le symbole  $N_{i,j}^k$  soit observé quand le processus caché est dans l'état  $E_i$ , et que le symbole  $O_{t+1}^k$  soit observé quand le processus caché est dans l'état  $E_j$ .
- $\gamma_t^k(i) = \mathbb{P}(\{X_t = E_i\} | O^k, \Lambda)$  la probabilité que, étant donné une séquence  $O^k$  de longueur  $T$  et un HMM  $\Lambda$ , le symbole  $O_t^k$  soit observé quand le processus caché est dans l'état  $E_i$
- $\alpha_t^k(i) = \mathbb{P}(\{O_k^1 \dots O_k^t, X_t = E_i\} | \Lambda)$  la probabilité d'observation du début de la séquence  $O_k$  tandis que le processus caché se retrouve dans l'état  $E_i$  à l'instant  $t$  (forward)

- $\beta_t^k(i) = \mathbb{P}(\{O_k^t \dots O_k^T, X_t = E_i\} | \Lambda)$  la probabilité d'observation de la fin de la séquence  $O_k$  tandis que le processus caché se retrouve dans l'état  $E_i$  à l'instant  $t$  (backward)

Les fonctions forward et backward sont estimés en utilisant l'algorithme forward et l'algorithme backward respectivement. L'intérêt de ces deux fonctions réside dans le fait qu'elles simplifient considérablement les calculs. En effet, on a les relations suivantes :

- $\mathbb{P}(O | \Lambda) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \alpha_t^k(i) \beta_t^k(i)$
- $\xi_t^k(i, j) = \frac{\alpha_t^k(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}^k) \beta_t^k(j)}{\mathbb{P}(O^k | \Lambda)}$
- $\gamma_t^k(i) = \sum_{j=1}^N \xi_t^k(i, j) \frac{\alpha_t^k(i) \beta_t^k(i)}{\mathbb{P}(O^k | \Lambda)}$

En notant  $|E|$  le cardinal de l'ensemble  $E$ , Baum-Weich a réussi à établir que l'estimation EM des paramètres du HMM revient à considérer l'estimateur  $\bar{\Lambda} = (\bar{A}, \bar{B}, \bar{\pi})$  défini par :

- $\bar{\pi}_i = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \gamma_1^k(i)$
- $\bar{a}(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{|O^k|-1} \xi_t^k(i, j)}{\sum_{k=1}^N \sum_{t=1}^{|O^k|-1} \gamma_t^k(i)}$
- $\bar{b}_j(l) = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{\{t=1 | O_t^k = V_l\}}^{|O^k|-1} \gamma_t^k(j)}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{|O^k|-1} \gamma_t^k(j)}$

Les formules établies par Baum sont calculées à l'aide de l'algorithme de Baum-Welch décrit dans le tableau suivant :

---

#### Algorithme 11 : Algorithme de Baum-Welch

---

1. Fixer des valeurs initiales  $(A_0, B_0, \pi_0)$  pour le triplet  $(A, B, \pi)$
  2. Définir le HMM initial  $\Lambda_0 = (A_0, B_0, \pi_0)$
  3.  $k = 0$
  4. Tant que (la convergence n'est pas réalisée) faire :
  5.     Considérer le HMM  $\Lambda_k$
  6.     Pour ce modèle  $\Lambda_k$  :
  7.         Calculer les  $\xi(i, j), \forall (i, j) \in [1, n]^2$
  8.         Calculer les  $\gamma_t(i), \forall (i, t) \in [1, n] \times [1, T - 1]$
  9.         Calculer  $\bar{A}, \bar{B}, \bar{\pi}$  à l'aide des formules de ré-estimation
  10.        Prendre comme HMM  $\Lambda_{k+1} = (\bar{A}, \bar{B}, \bar{\pi})$
  - 11.
  12.      $k = k + 1$
  13. Fin tant que
  14. Sortie :  $\Lambda_{k+1} = (\bar{A}, \bar{B}, \bar{\pi})$
-

## Le calcul des probabilités d'observation des séquences

Etant donné un HMM  $\Lambda = (A, B, \pi)$  et une séquence  $O = \{O_1, \dots, O_t, \dots, O_T\}$  de longueur  $T$  ( $O_t \in V, \forall t \in [1, T]$ ), il est possible de calculer la probabilité que cette séquence soit émise par le HMM. En pratique, on utilise l'algorithme de forward-backward. Dans ce cas, la séquence étant unique, lorsque le processus est dans l'état  $E_i$ , les fonctions forward et backward sont données par  $\alpha_t(i) = \mathbb{P}(\{O_1 \dots O_t, X_t = E_i\} | \Lambda)$  et  $\beta_t(i) = \mathbb{P}(\{O_t \dots O_T, X_t = E_i\} | \Lambda)$ . Par conséquent, la probabilité que cette séquence soit émise par le HMM est donnée par la relation:

$$\mathbb{P}(O | \Lambda) = \sum_{i=1}^N \alpha_t^k(i) \beta_t^k(i)$$

Les algorithmes forward et backward sont les suivants :

---

### Algorithme 12 : Calcul de la fonction forward

---

1. Entrées :  $\Lambda = (A, B, \pi), O = \{O_1, \dots, O_t, \dots, O_T\}$
  2. Pour  $(i \in [1, n]) \{ \alpha_1(i) = \pi_i b_i(O_1) \}$
  3.  $t = 1$
  4. Tant que  $(t < T)$  faire :
  5.      $j = 1$
  6.     Tant que  $(j \leq n)$  faire :
  7.          $\alpha_{t+1}(j) = [\sum_{i=1}^n a_t(i) a_{ij}] b_j(O_{t+1})$
  8.          $j = j + 1$
  9.     Fin Tant que
  10.      $t = t + 1$
  11. Fin Tant que
  12. Sortie:  $\mathbb{P}(O | \Lambda) = \sum_{i=1}^n \alpha_T(i)$
- 

---

### Algorithme 13 : Calcul de la fonction backward

---

1. Entrées :  $\Lambda = (A, B, \pi), O = \{O_1, \dots, O_t, \dots, O_T\}$
  2. Pour  $(i \in [1, n]) \{ \beta_T(i) = 1 \}$
  3.  $t = T - 1$
  4. Tant que  $(t \geq 1)$  faire :
  5.      $i = 1$
  6.     Tant que  $(i \leq n)$  faire :
  7.          $\beta_t(i) = \sum_{j=1}^n a_{ij} b_j(O_{t+1}) \beta_{t+1}(j)$
  8.          $i = i + 1$
  9.     Fin Tant que
  10.      $t = t - 1$
  11. Fin Tant que
  12. Sortie:  $\mathbb{P}(O | \Lambda) = \sum_{i=1}^n \beta_1(i)$
-

## La recherche du chemin optimal

Un des aspects les plus séduisants des modèles de Markov cachés est leur capacité à identifier la meilleure séquence d'états cachés ayant engendrée une séquence de symboles observés. Ainsi, étant donné un HMM  $\Lambda = (A, B, \pi)$  et une séquence  $O = \{O_1, \dots, O_t, \dots, O_T\}$  de longueur  $T$  ( $O_t \in V, \forall t \in [1, T]$ ), il est possible de calculer le meilleur chemin d'états cachés du HMM correspondant à cette observation. Techniquement, il s'agit de trouver la meilleure suite d'états  $Q^* = Q_1 \dots Q_t \dots Q_T$  de longueur  $T$  ( $Q_t \in E, \forall t \in [1, T]$ ) qui maximise la quantité  $\mathbb{P}(Q, O | \Lambda)$ . Pour ce faire, on définit la variable intermédiaire suivante :

$$\delta_t(i) = \underset{Q_1, \dots, Q_{t-1}}{\text{Max}} \mathbb{P}(Q_1, \dots, \{Q_t = s_i\}, O_1, \dots, O_t, \dots, O_T | \Lambda)$$

Cette variable vérifie la relation de récurrence suivante :

$$\delta_{t+1}(j) = [\underset{i}{\text{Max}} \delta_t(i) a_{ij}] b_j(O_{t+1})$$

Dans les modèles de Markov cachés, la recherche du chemin optimal est un problème d'optimisation qui se résout grâce à l'algorithme de Viterbi. Cet algorithme, basé sur le calcul des quantités  $\delta_t(i)$ , est le suivant :

---

### Algorithme 14 : Algorithme de Viterbi

---

1. Entrées :  $\Lambda = (A, B, \pi), O = \{O_1, \dots, O_t, \dots, O_T\}$
  2. Pour ( $i \in [1, n]$ ) {
  3.      $\delta_1(i) = \pi_i b_i(O_1)$
  4.      $\psi_1(i) = 0$
  5. }
  6. }  
 $t = 2$
  7. Tant que ( $t \leq T - 1$ ) faire :
  8.      $j = 1$
  9.     Tant que ( $j \leq n$ ) faire :
  10.          $\delta_t(j) = \underset{1 \leq i \leq n}{\text{Max}} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}] b_j(O_t)$
  11.          $\psi_t(j) = \underset{1 \leq i \leq n}{\text{ArgMax}} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}]$
  12.          $j = j + 1$
  13.     Fin Tant que
  14.      $t = t + 1$
  15. Fin Tant que
  16.  $P^* = \underset{1 \leq i \leq n}{\text{Max}} [\delta_T(i)]$
  17.  $Q_T^* = \underset{1 \leq i \leq n}{\text{ArgMax}} [\delta_T(i)]$
  18.  $t = T - 1$
  19. Tant que ( $t \geq 1$ ) faire :
  20.      $Q_t^* = \psi_{t+1}(Q_{t+1}^*)$
  21.      $t = t - 1$
  22. Fin Tant que
  23. Sortie :  $Q^* = Q_1 \dots Q_t \dots Q_T$
-

### 5.2.3) LES MODELES DYNAMIQUES PERCEPTUELS

L'étude de la résilience est intimement liée à la manière dont les individus s'arrangent pour faire face à la souffrance. D'une manière générale, l'opinion que l'individu a de sa propre situation de souffrance peut conditionner son attitude face à cette souffrance. En effet, de nombreux travaux sur la résilience mettent en exergue le fait que l'auto-perception joue un grand rôle dans les processus de résilience. Il est donc important de considérer la perception que les individus ont de leur propre niveau de souffrance en leur posant directement la question à chaque collecte de données. Du point de vue de la Résiliométrie, la principale utilisation de l'auto-perception du niveau de souffrance est de pouvoir développer un modèle permettant de prédire, de manière fiable, l'état de vulnérabilité à partir de ces opinions. Techniquement, on se sert des modèles de Markov cachés afin de prendre en compte l'aspect dynamique des capacités de rebond. Il s'agit donc de prévoir une séquence d'états de vulnérabilité sur la base d'une séquence (observée) d'auto-perception. Pour ce faire, considérons les notations suivantes :

- $E = \{VA, VG, VL, NV\}$  l'ensemble des quatre états de vulnérabilité calculables
- $D = \{faible, moyen, fort\}$  l'appréciation des individus de leur niveau de souffrance
- $(\psi_t)_{1 \leq t \leq T}$  le processus caché ayant  $E$  pour ensemble d'états
- $(V_t)_{1 \leq t \leq T}$  le processus observé ayant  $D$  pour ensemble de symboles
- $\psi_{it} \in E$  l'état de vulnérabilité de l'individu  $I_i$  au temps  $t$
- $V_{it} \in D$  l'appréciation que l'individu  $I_i$  a de son niveau de souffrance au temps  $t$

La dynamique perceptuelle correspondant à la prévision des séquences d'états de vulnérabilité des individus sur la base des séquences d'appréciation de leur propre niveau de souffrance. La structure temporelle des modèles dynamiques (MDP) perceptuels est la suivante :

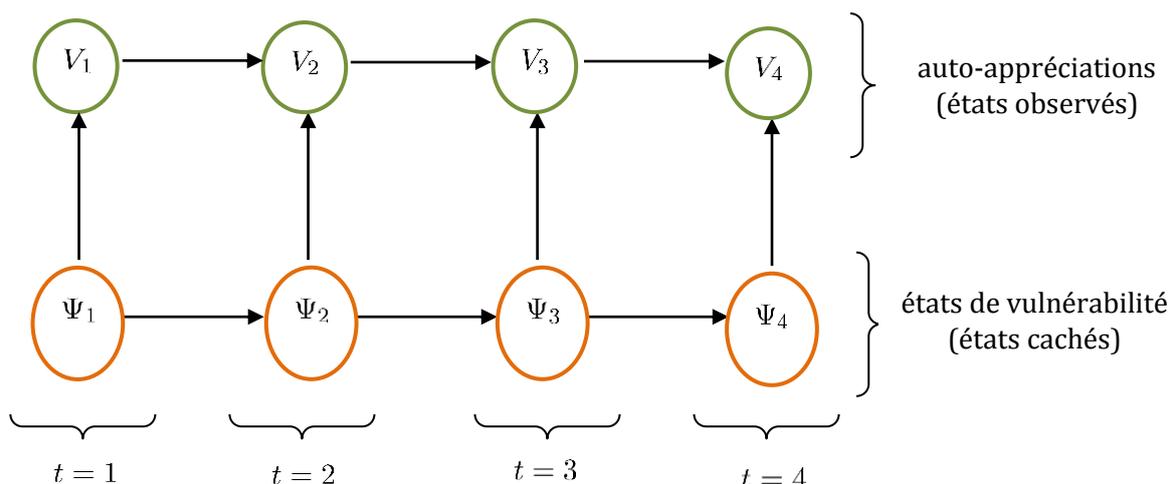


Figure 28 : Exemple de structure temporelle d'un modèle dynamique perceptuel

## La matrice de transition dans les MDP ( $A$ )

La structure temporelle des modèles de dynamiques perceptuels représente le processus inter temporel de génération des séquences d'états de vulnérabilité (états cachés) à partir des suites de perceptions d'états de souffrance (états observables). Elle exhibe donc la structure externe finale du modèle. Cependant, les mécanismes internes restent cachés. En réalité, cette structure externe est engendrée, de façon interne, par l'automate suivant :

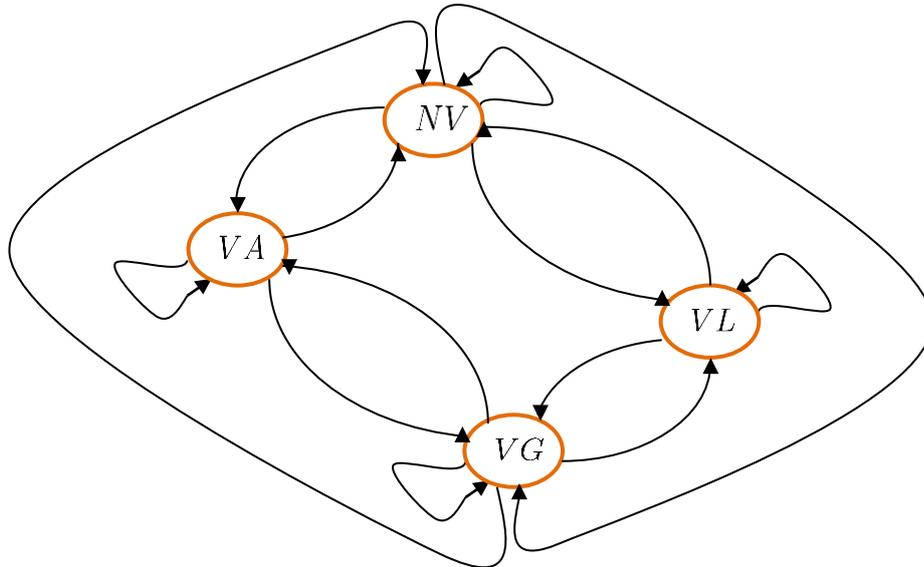


Figure 29 : Automate interne d'un modèle dynamique perceptuel

Cet automate est une chaîne de Markov et permet de comprendre le processus interne de génération des séquences d'états cachés (les états de vulnérabilité). Elle gouverne le processus de transition entre les différents états de vulnérabilité et est caractérisée par la matrice de transition suivante :

$$A = (a(i, j))_{1 \leq i, j \leq 4} \text{ avec } a(i, j) = \mathbb{P}(\psi_{t+1} = E_i | \psi_t = E_j)$$

Dans la pratique, on adopte une disposition de la matrice sous la forme d'un tableau plus lisible. Cette matrice prend la forme suivante :

Tableau 7 : Matrice de transition entre les états de vulnérabilité

Probabilités $a(i, j)$		Etat caché au temps $t + 1$				TOTAL
		VA	VG	VL	NV	
Etat caché au temps $t$	VA	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	1
	VG	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	$a_{24}$	1
	VL	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$	$a_{34}$	1
	NV	$a_{41}$	$a_{42}$	$a_{43}$	$a_{44}$	1

## La matrice de génération de symboles dans les MDP ( $B$ )

Les états cachés (nœuds de l'automate) n'étant pas observés, ils sont eux-mêmes modélisés par une seconde chaîne de Markov. Ainsi, au niveau de chaque nœud, chaque état caché est obtenu à partir de l'automate suivant :

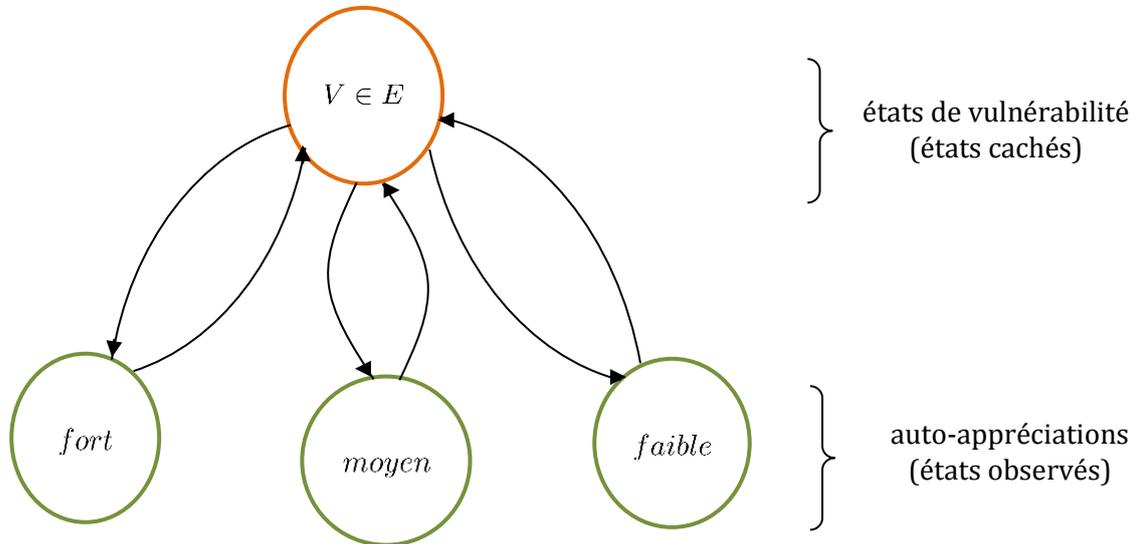


Figure 30 : Relations entre états observés et états cachés dans les MDP

Cet automate est une chaîne de Markov et permet de comprendre le processus interne de génération des symboles d'états observés par les états cachés (états de vulnérabilité). Il gouverne donc les relations entre les états observés et les états cachés et est caractérisé par la matrice d'observation des symboles suivante :

$$B = (b_j(k))_{(j,k) \in [1,4] \times [1,3]} \text{ avec } b_j(k) = \mathbb{P}(V_t = D_k | \psi_t = E_j)$$

Dans la pratique, on adopte une disposition de la matrice sous la forme d'un tableau plus lisible. Cette matrice prend la forme suivante :

Tableau 8 : Matrice de relations entre auto-perceptions et états de vulnérabilité

Probabilités $b_j(k)$		Etats observés ( $D_k \in D$ )			TOTAL
		Faible	Moyen	Fort	
Etats cachés ( $E_j \in E$ )	VA	$b_1(1)$	$b_1(2)$	$b_1(3)$	1
	VG	$b_2(1)$	$b_2(2)$	$b_2(3)$	1
	VL	$b_3(1)$	$b_3(2)$	$b_3(3)$	1
	NV	$b_4(1)$	$b_4(2)$	$b_4(3)$	1

## La matrice des états initiaux ( $\pi$ )

La spécification complète d'un HMM nécessite, la connaissance des probabilités que le processus caché qui gouverne les états de vulnérabilité démarre dans chacun des états. Ces probabilités sont décrites par la matrice des états initiaux suivante :

$$\pi = (\pi_i)_{1 \leq i \leq 4} \text{ avec } \pi_i = \mathbb{P}(\psi_0 = E_i)$$

Dans la pratique, on adopte une disposition de la matrice sous la forme d'un tableau plus lisible. Cette matrice prend la forme suivante :

Tableau 9 : Matrice des états initiaux de vulnérabilité

Probabilités $\pi_i$	Etats cachés $E_i \in E$				TOTAL
	VA	VG	VL	NV	
TOTAL	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$	1

## Aspect algorithmique des modèles dynamiques perceptuels

Les modèles dynamiques perceptuels ne sont rien d'autres que des modèles de Markov cachés  $\Lambda = (A, B, \pi)$  particuliers dans lesquels les états cachés sont les états de vulnérabilité et les états observés sont les symboles décrivant la perception que les individus ont de leur propre situation de souffrance. L'ensemble du modèle est donc estimé, dans un premier temps, à partir des données collectées sur les individus grâce à l'algorithme de Baum-Welch. Puis, dans un second temps, le modèle estimé est exploité pour la prévision des séquences d'états de vulnérabilité les plus probables sous-jacents à des séquences d'auto-appréciations données. Cette deuxième partie est effectuée en utilisant l'algorithme de Viterbi. Ainsi, la phase d'estimation fournit la structure du modèle, c'est-à-dire les éléments caractérisant la dynamique de transition entre les états de vulnérabilité; et la phase de prévision fournit un moyen de simuler des suites d'états de vulnérabilité les plus probables en réponse à des suites d'auto-perceptions données correspondant à des évolutions de situations de souffrance dans le temps. Considérons les notations suivantes :

- $n$  le nombre d'individus utilisés pour la collecte de données
- $\Omega_T$  l'ensemble des individus avec les informations collectées sur ceux-ci
- $T$  l'horizon temporel considéré
- $\xi_t$  l'estimation de la résilience au temps  $t \in [1, T]$
- $\Phi(\xi_t | I_i)$  l'opération de détermination de l'état de vulnérabilité de l'individu  $I_i$  à partir de  $\xi_t$  (TSR)
- $\mathcal{B}(\Gamma, \Omega_T)$  l'opération d'application de l'algorithme de Baum-Welch à partir des états  $\Gamma$  et des données de  $\Omega_T$

Sur la base des notations définies, l'algorithme d'estimation des modèles dynamiques perceptuels est le suivant :

---

Algorithme 15 : Calcul d'estimation des modèles dynamiques perceptuels

---

1. Entrées :  $n, T, \Omega_I, (\xi_t)_{t \in [1, T]}$
  2.  $\Gamma = 0_{1:n, 1:T}$  // Tableaux des états de vulnérabilité
  3. Pour ( $t \in [1, T]$ ) {
  4.     Pour ( $i \in [1, n]$ ) {
  5.          $\Gamma[i, t] = \Phi(\xi_t | I_i)$
  6.     }
  7. }
  8. }
  9.  $\Lambda(A, B, \pi) = \mathcal{B}(\Gamma, \Omega_I)$  // Estimation du modèle (algorithme de Baum-Welch)
  10. Sorties :  $\Gamma, \Lambda$
- 

Une fois le modèle dynamique perceptuel  $\Lambda = \Lambda(A, B, \pi)$  estimé, en considérant la séquence  $V(1 : \tau) = V_1 \dots V_\tau$ ,  $\tau \in [1, T]$  de  $\tau$  symboles d'auto-perception, et en votant  $\mathcal{V}(\cdot)$  l'opération d'estimation par l'algorithme de Viterbi, la séquence d'états de vulnérabilité la plus à même de générer la séquence de symbole  $V(1 : \tau)$  est donnée par l'algorithme suivant :

---

Algorithme 16 : Préviation des séquences d'états de résilience

---

1. Entrées :  $\Lambda, V(1 : \tau)$
  2. Calcul :  $\psi(1 : \tau) = \mathcal{V}(V(1, \tau), \Lambda)$  // Application de l'algorithme de Viterbi
  3. Sortie :  $\psi(1 : \tau)$  // Séquence de  $\tau$  états de vulnérabilité
- 

### 5.3) LES RESEAUX BAYESIENS

Les modèles graphiques probabilistes (MGP) constituent un formalisme puissant permettant de représenter graphiquement un ensemble de lois de probabilités conditionnelles. Ils sont adaptés à la gestion de processus complexes et sont d'une utilisation extrêmement flexible. Dans la littérature, les MGP comprennent deux grandes approches. La première approche, les champs de Markov aléatoires, utilise des graphes non orientés. Quant à la seconde approche, les réseaux bayésiens (RB), elle a été développée par Judea Pearl ([JUD99], [JUD91], [JUD09]) et utilisent des graphes orientés. Les champs de Markov aléatoires sont en général utilisés pour la modélisation des relations spatiales comme dans les images et les systèmes géographiques. Les réseaux bayésiens, par contre, sont utilisés dans presque tous les domaines, notamment en Informatique, en Robotique, dans les Sciences Sociales, en Industrie, etc. Du point de vue théorique, les réseaux bayésiens constituent une méthode généralisant de nombreux paradigmes de modélisation dont les modèles de Markov cachés (MMC), les filtres de Kalman, les réseaux de neurones artificiels (RNA), etc.

L'excellent livre de Patrick Naïm, Phillippes Leray et al. ([PAT07]) fournit des détails sur les aspects théoriques et pratiques des réseaux bayésiens. La figure suivante donne une vue synthétique de l'ensemble des modèles graphiques probabilistes les plus connus et les plus utilisés dans les applications pratiques :

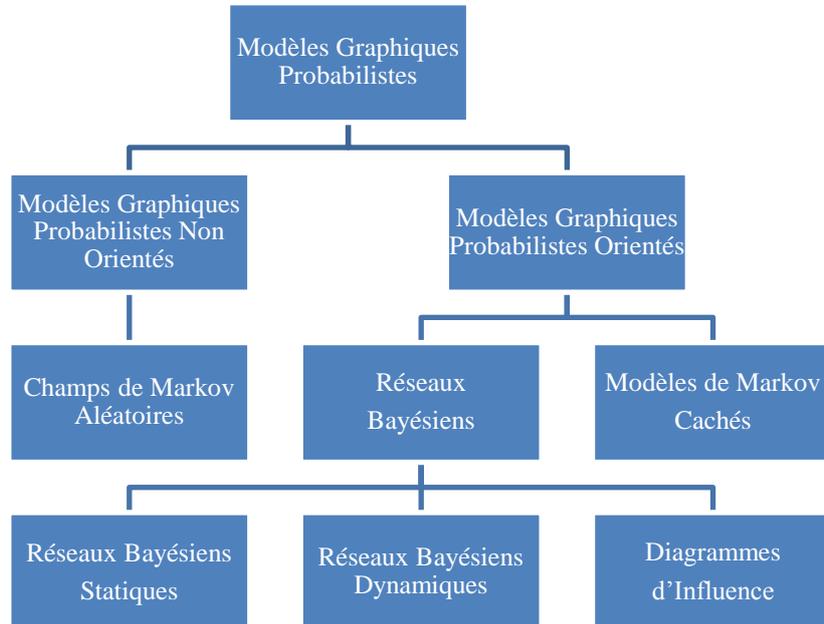


Figure 31 : Catégories de modèles graphiques probabilistes

### 5.3.1) LE FORMALISME DES RESEAUX BAYESIENS

Considérons la figure suivante qui décrit le diagnostic d'une panne dans un ordinateur :

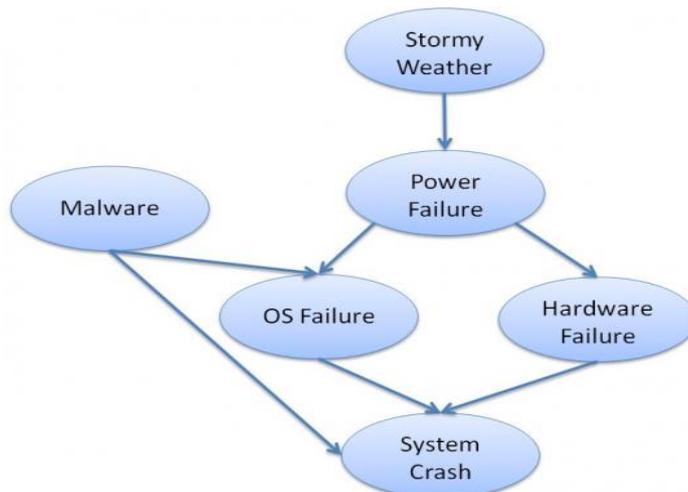


Figure 32 : Exemple de graphe décrivant un processus<sup>7</sup>

Ce graphe est une manière très intuitive de modéliser le processus de diagnostic d'une panne dans un système informatique. Il traduit le fait que, pendant les tempêtes (Stormy Weather),

<sup>7</sup> <http://blogs.cisco.com/security/understanding-security-through-probability>

les coups de foudre peuvent créer des courts-circuits au niveau des lignes électriques pour provoquer une panne électrique (Power Failure). Cet incident électrique peut à son tour provoquer un dysfonctionnement du système d'exploitation (OS Failure) et peut aussi, lorsque la puissance est très grande, entraîner une panne du matériel informatique (Hardware Failure). La panne du matériel peut à son tour entraîner un plantage du système (System Crash). Mais une panne du système peut également se produire sans temps orageux à travers un virus (Malware) qui est aussi susceptible d'infecter le Système d'exploitation (OS Failure). De plus, une défaillance du système d'exploitation peut directement provoquer une panne du système informatique. Ce graphe n'est rien d'autre qu'un réseau bayésien. Les réseaux bayésiens ont pour fondement le théorème de Bayes.

## Théorème de Bayes

Les réseaux bayésiens sont basés sur le théorème de Bayes. Pour mieux comprendre le théorème de Bayes et ses implications, posons :

- ✓  $X_i$  une variable aléatoire quelconque décrivant un phénomène
- ✓  $K_i$  le nombre de modalités de la variable aléatoire  $X_i$
- ✓  $x_{i,s}$  la  $s^{eme}$  modalité de la variable aléatoire  $X_i$
- ✓  $N$  le nombre total de variables aléatoires décrivant le phénomène

Selon la théorie des probabilités, si l'on considère la  $k^{eme}$  modalité  $x_{jk}$  d'une variable aléatoire  $X_j$ , la probabilité d'observation de cette modalité peut être calculée en considérant toute les modalités  $x_{i,s}$  d'une variable aléatoire  $X_i$  quelconque selon la règle suivante :

$$\forall s \in [1, K_i], \mathbb{P}(X_j = x_{jk}) = \sum_{s=1}^{K_i} \mathbb{P}(X_j = x_{jk}, X_i = x_{i,s})$$

En considérant les règles des probabilités conditionnelles, la probabilité à postériori de  $X_i$  connaissant  $X_j$  est donnée par :

$$\mathbb{P}(X_j = x_{jk} | X_i = x_{i,s}) = \frac{\mathbb{P}(X_i = x_{i,s}, X_j = x_{jk})}{\mathbb{P}(X_i = x_{i,s})}$$

$$\Rightarrow \mathbb{P}(X_i = x_{i,s}, X_j = x_{jk}) = \mathbb{P}(X_j = x_{jk} | X_i = x_{i,s})\mathbb{P}(X_i = x_{i,s})$$

Avec ces deux résultats précédents, on peut en déduire la probabilité a priori d'avoir  $X_j$  conditionnellement à  $X_i$ . En effet :

$$\mathbb{P}(X_i = x_{i,s} | X_j = x_{jk}) = \frac{\mathbb{P}(X_i = x_{i,s}, X_j = x_{jk})}{\mathbb{P}(X_j = x_{jk})}$$

$$= \frac{\mathbb{P}(X_j = x_{jk} | X_i = x_{i,s})\mathbb{P}(X_i = x_{i,s})}{\sum_{s=1}^{K_i} \mathbb{P}(X_j = x_{jk}, X_i = x_{i,s})}$$

$$\Rightarrow \mathbb{P}(X_i = x_{i,s} | X_j = x_{jk}) \propto \mathbb{P}(X_j = x_{jk} | X_i = x_{i,s})\mathbb{P}(X_i = x_{i,s})$$

Cette formule traduit le fait que, si l'on connaît la probabilité à priori de  $X_i$  et celle d'avoir  $X_j$  conditionnellement à  $X_i$ , l'on peut en déduire la probabilité à postériori de  $X_i$

connaissant  $X_j$ . Elle constitue la base de l'inférence bayésienne utilisée comme fondement dans les réseaux bayésiens. Cette règle permet une révision des croyances en un phénomène selon les nouvelles informations que nous recevons sur ce phénomène.

## Réseaux Bayésiens

Encore appelés systèmes experts probabilistes, les réseaux bayésiens sont des outils de représentation des connaissances sur un système et de raisonnement automatique sur ces connaissances. Ils ont été introduits par Judea Pearl dans les années 1980 et se sont révélés de puissants outils très pratiques pour la représentation de connaissances incertaines et le raisonnement à partir d'informations incomplètes. Les réseaux bayésiens sont des outils de simulation qui permettent d'observer le comportement d'un système complexe dans des contextes et des conditions qui ne sont pas nécessairement accessibles à l'expérimentation. Sur le plan conceptuel, les réseaux bayésiens sont des modèles graphiques combinant la théorie des graphes et la théorie des probabilités. Techniquement, si l'on a  $\mathcal{P}(X)$  l'ensemble des nœuds parents associés au nœud  $X$  d'un réseau bayésien, la définition formelle des réseaux bayésiens est la suivante :

### **Définition 5.3.1.1 : Réseau Bayésien**

Un réseau bayésien est un couple  $(G, \Theta)$  avec :

- $G$  un graphe orienté sans cycle
- $\Theta$  une distribution de probabilité définie sur les variables du graphe
- A chaque nœud de  $G$  est associée une variable aléatoire et une seule
- Soit  $\{X_1, \dots, X_N\}$  l'ensemble des variables aléatoires (nœuds du graphe). Le graphe sans cycle obéit à la propriété suivante :

$$\Theta = \mathbb{P}(X_1, \dots, X_K) = \prod_{i=1}^K \mathbb{P}(X_i | \mathcal{P}(X_i))$$

Un réseau bayésien est complètement décrit lorsque l'on dispose de deux éléments essentiels. Tout d'abord, une structuration graphique des relations entre les variables aléatoires du modèle sous la forme d'un graphe de causalité. Ensuite en chacun des nœuds du graphe, une distribution de probabilités conditionnelles des modalités de la variable aléatoire du nœud considéré connaissant les valeurs prises par ses nœuds parents. La figure suivante, extraite d'un tutoriel de Phillippe Leray présenté lors de la 8<sup>ème</sup> rencontre scientifique dédiée à l'Extraction de Connaissances à Partir des Données, présente un exemple de réseau bayésien avec sa structure graphique et les tables de probabilités associées à chacun des nœuds (les variables aléatoires considérées) :

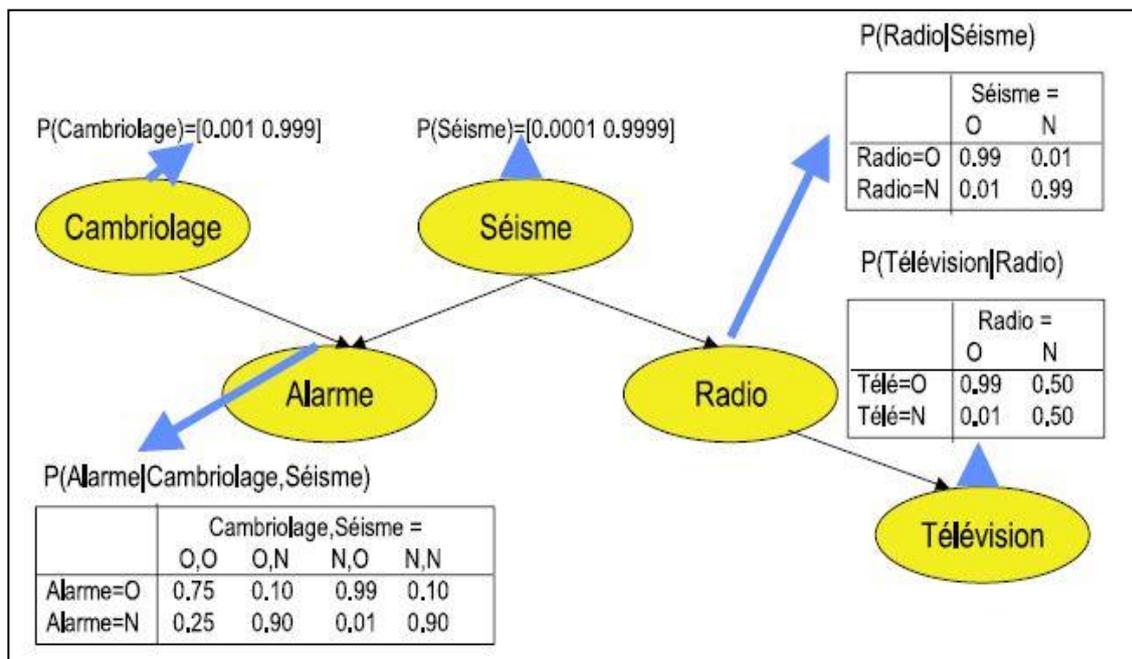


Figure 33 : Exemple de tables de probabilités dans un réseau bayésien<sup>8</sup>

Ce réseau bayésien modélise le processus de déclenchement d’une alarme de sécurité dans un environnement souvent soumis à des séismes. Comme le montre la figure le réseau bayésien est un graphe orienté dans lequel les nœuds représentent les variables et les arcs les relations de dépendance. Chaque nœud est doté d’une table de probabilités conditionnelles qui est une modélisation des croyances en la survenue des différentes possibilités.

### Graphe et circulation de l’information

Les réseaux bayésiens sont des modèles très séduisants par leur représentation graphique des relations entre les variables aléatoires. De manière intuitive, l’influence d’une variable  $X$  sur une variable  $Y$  peut être traduite par une relation de cause à effet allant de  $X$  vers  $Y$ . Une telle représentation graphique est donnée par la figure suivante :



Figure 34 : Exemple de représentation causale

Cependant, une utilisation adéquate de ces modèles nécessite une bonne compréhension de la sémantique pratique de l’orientation des arcs. A ce propos, deux mises en garde méritent d’être faites :

<sup>8</sup> [http://www.egc.asso.fr/sdoc-101-egc08\\_tutoriel\\_reseaux\\_bayesien.pdf](http://www.egc.asso.fr/sdoc-101-egc08_tutoriel_reseaux_bayesien.pdf)

- **Interprétation causale :** le sens des flèches ne peut pas s'interpréter nécessairement comme une relation directe de cause à effet. Cette orientation signifie simplement que la connaissance que nous avons de  $X$  détermine celle que l'on a de  $Y$ . Dans certaines situations, elle peut traduire une simple influence. Dans ce cas, cette orientation signifie que si nous connaissons  $X$  avec certitude, notre opinion sur  $Y$  sera modifiée. Toutefois, dans d'autres situations, il peut s'agir d'une causalité dans le sens stricte. Dans ce cas, l'arc orienté signifie que si l'on connaît la valeur de  $X$ , on peut en déduire celle de  $Y$  avec certitude.
- **Circulation de l'information :** l'orientation des arcs, bien que traduisant une causalité dont le sens pratique dépend des deux variables aléatoires reliées, ne doit en aucun cas être considérée comme une indication de la direction dans laquelle doit circuler les flux d'information. En effet, l'information circule très bien de  $Y$  vers  $X$  tout comme elle circule de  $X$  vers  $Y$ , donc dans les deux sens. Il s'agit d'un point fondamental dans le raisonnement à base de réseaux bayésiens.

Pour bien comprendre le sens de circulation de l'information, considérons la relation causale suivante :



Figure 35 : Exemple de relation causale

Cette relation causale traduit le fait que la survenance de la pluie a un impact sur l'état du jardin. Par conséquent, si la pluie est tombée, l'on est certain que le jardin est mouillé (sens normal de la flèche). Cependant, il est aussi vrai que si le jardin est sec, alors nous sommes presque certains que la pluie n'est pas tombée (sens contraire à l'orientation de la flèche). Ainsi, bien que la représentation causale soit orientée, l'information peut circuler dans les deux sens.

### Blocage de l'information et D-séparation

La circulation de l'information dans les deux sens du graphe causal d'un réseau bayésien permet de calculer l'effet d'une modification de n'importe quel nœud sur l'ensemble des autres nœuds de ce réseau bayésien. Mais cette circulation d'informations peut ne pas être possible dans certaines situations. De façon intuitive, on peut considérer de telles situations comme des blocages de l'information. Dans les réseaux bayésiens, la connaissance des situations dans lesquelles l'information est bloquée peut permettre des économies énormes de calculs en évitant de mettre à jour la connaissance que l'on a de certains nœuds suite à une modification d'un nœud bien précis. La figure suivante donne les types de connections qui peuvent s'établir entre trois nœuds d'un réseau bayésien :

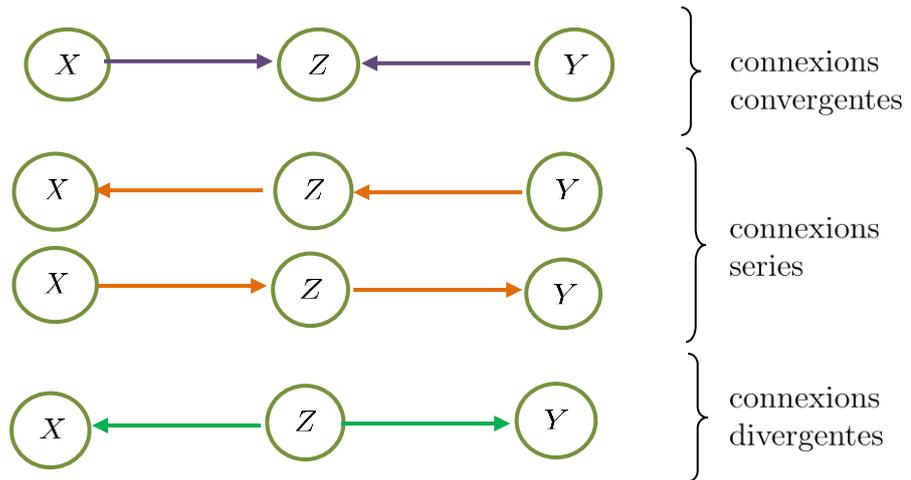


Figure 36 : Types de connexions entre trois nœuds

**Remarques :** à partir des types de connexions, il est aisé de vérifier que, dans une connexion convergente, l'information ne peut circuler de  $X$  vers  $Y$  que si la valeur de  $Z$  est connue. Alors que dans les connexions séries et les connexions divergentes, l'information ne peut circuler de  $X$  vers  $Y$  que si la valeur de  $Z$  est inconnue. Ces remarques donnent une idée intuitive de la notion de d-séparation.

**Définition 5.3.1.2 (intuitive) de la D-séparation :**

On dit que  $X$  est D-séparé de  $Y$  par  $Z$  si la connaissance de la valeur de  $Z$  bloque la circulation de l'information de  $X$  vers  $Y$ .

**Définition 5.3.1.3 (formelle) de la D-séparation:**

On dit que  $X$  est D-séparé de  $Y$  par  $Z$  si, pour tout chemin entre  $X$  et  $Y$ , l'une au moins des deux conditions suivantes est vérifiée :

- Le chemin converge en un nœud  $W \neq Z$  et  $W$  n'est pas une cause directe de  $Z$
- Le chemin passe par  $Z$  et est soit divergent, soit en série au nœud  $Z$

**Généralisation :** Cette caractérisation de la D-séparation se généralise dans le cas où  $Z$  représente un ensemble de nœuds.

## 5.3.2) LA MISE EN ŒUVRE DES RESEAUX BAYESIENS

### Factorisation des probabilités jointes

Pour utiliser le théorème de Bayes dans les réseaux bayésiens notons :

- $K_i$  le nombre de possibilités (modalités) de la variable aléatoire  $X_i$
- $\mathcal{P}(X_i)$  l'ensemble des variables  $X_j$  constitué des nœuds parents de  $X_i$

Tout réseau bayésien obéit à la condition de Markov, c'est-à-dire que, dans un réseau bayésien, tout nœud est conditionnellement indépendant de ses descendants, connaissant ses parents. Par conséquent, la loi des probabilités jointes de  $K$  variables  $X_i$  quelconques peut se factoriser grâce au théorème suivant :

$$\mathbb{P}(X_1, \dots, X_K) = \prod_{i=1}^K \mathbb{P}(X_i | \mathcal{P}(X_i))$$

La technique de factorisation des probabilités jointes  $\mathbb{P}(X_1, \dots, X_K)$  constitue le mécanisme fondamental de calcul utilisé dans les réseaux bayésiens. A chaque variable aléatoire (nœud du graphe) est associée une distribution de probabilités. En pratique, il s'agit d'une table décrivant les probabilités d'observation de chaque modalité de la variable connaissant les valeurs prises par les nœuds parents. C'est donc à partir de cette distribution de probabilités que l'on simule la loi jointe correspondante lorsqu'on modifie des états de certains nœuds du graphe. Les réseaux bayésiens disposent de nombreux algorithmes pour apprendre aussi bien les paramètres (estimer les probabilités) que la structure du réseau sur la base des données. Toutefois, un réseau bayésien peut aussi être construit exclusivement par le recours à un ou plusieurs experts du domaine modélisé. Cependant, il est aussi possible de combiner, dans une même modélisation, les connaissances expertes et les données, même incomplètes. C'est cette flexibilité alliant les aspects qualitatifs et quantitatifs qui en font un outil privilégié dans de nombreux domaines.

### Inférence dans les réseaux bayésiens

L'inférence dans les réseaux bayésiens est effectuée grâce à la règle du chainage des probabilités conditionnelles suivante :

$$\forall K \in [2, N], \mathbb{P}(X_1, \dots, X_K) = \mathbb{P}(X_1) \prod_{i=2}^K \mathbb{P}(X_i | X_{i-1}, \dots, X_1)$$

Cette formule permet une mise à jour interactive des probabilités conditionnelles de n'importe quel nœud du réseau bayésien une fois des valeurs de nœuds sont fixées. C'est donc à la technique de factorisation que les réseaux bayésiens doivent leur capacité de simulation et leur utilisation à des fins de raisonnement automatique.

### Preuve de la règle du chainage

La règle du chainage est une propriété centrale et fondamentale dans les réseaux bayésiens. Elle peut être prouvée mathématiquement en ayant recours à un raisonnement par récurrence. En effet :

$$\forall X_i, X_j, \text{ on a : } \mathbb{P}(X_i, X_j) = \mathbb{P}(X_i | X_j) \mathbb{P}(X_j) = \mathbb{P}(X_j | X_i) \mathbb{P}(X_i)$$

$$\begin{aligned} \text{Pour } K = 2, \text{ on a : } \mathbb{P}(X_1, X_2) &= \mathbb{P}(X_2|X_1)\mathbb{P}(X_1) \\ &= \mathbb{P}(X_1) \prod_{i=2}^2 \mathbb{P}(X_i|X_{i-1}, \dots, X_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pour } K = 3, \text{ on a : } \mathbb{P}(X_1, X_2, X_3) &= \mathbb{P}(X_3|X_2, X_1)\mathbb{P}(X_2, X_1) \\ &= \mathbb{P}(X_3|X_2, X_1)\mathbb{P}(X_2|X_1)\mathbb{P}(X_1) \\ &= \mathbb{P}(X_1) \prod_{i=2}^3 \mathbb{P}(X_i|X_{i-1}, \dots, X_1) \end{aligned}$$

$$\text{Admettons que } \forall K \in [2, N], \mathbb{P}(X_1, \dots, X_K) = \mathbb{P}(X_1) \prod_{i=2}^K \mathbb{P}(X_i|X_{i-1}, \dots, X_1)$$

$$\begin{aligned} \text{On a : } \mathbb{P}(X_1, \dots, X_{K+1}) &= \mathbb{P}(\{X_1, \dots, X_K\}, X_{K+1}) \\ &= \mathbb{P}(X_{K+1}|X_K, \dots, X_1)\mathbb{P}(X_1, \dots, X_K) \\ &= \mathbb{P}(X_{K+1}|X_K, \dots, X_1)\mathbb{P}(X_1) \prod_{i=2}^2 \mathbb{P}(X_i|X_{i-1}, \dots, X_1) \\ &= \mathbb{P}(X_1, \dots, X_{K+1}) = \mathbb{P}(X_1) \prod_{i=2}^{K+1} \mathbb{P}(X_i|X_{i-1}, \dots, X_1) \\ &= \prod_{i=1}^{K+1} \mathbb{P}(X_i | X_{i-1}, \dots, X_1) \end{aligned}$$

$$\text{Par conséquent, on a : } \forall K \in [2, N], \mathbb{P}(X_1, \dots, X_K) = \mathbb{P}(X_1) \prod_{i=2}^K \mathbb{P}(X_i|X_{i-1}, \dots, X_1)$$

## Apprentissage des paramètres

L'apprentissage des paramètres des réseaux bayésiens à partir des données consiste à estimer le paramètre inconnu  $\Theta$  qui est l'ensemble des probabilités conditionnelles nécessaires aux différentes tables de probabilités des nœuds en se servant des données  $\mathcal{D}$  disponibles. Pour comprendre le principe de l'apprentissage des paramètres, dans le cas des nœuds comportant des variables aléatoires discrètes, notons :

- $x_{ij}$  la  $j^{\text{eme}}$  modalité de la variable  $X_i$
- $K_i$  le nombre de modalités de la variable aléatoire  $X_i$  (un nœud du réseau bayésien)
- $x_{ik}^{\mathcal{P}}$  la  $k^{\text{eme}}$  configuration issue du croisement des modalités des parents de  $X_i$
- $R_i$  le nombre de configurations issues du croisement des modalités des parents de  $X_i$
- $N_{i,j,k}$  le nombre de fois que l'on rencontre la configuration  $\{X_i = x_{ij} | \mathcal{P}(X_i) = x_{ik}^{\mathcal{P}}\}$
- $\mathcal{X} = (X_1, \dots, X_K)$  l'ensemble des  $K$  variables des nœuds du réseau bayésien
- $x(\omega) = (x_1(\omega), \dots, x_K(\omega))$  les valeurs de l'individu  $\omega$  pour les variables de  $\mathcal{X}$
- $\mathcal{D} = (x(\omega))_{1 \leq \omega \leq N}$ , la base de données sur l'ensemble des  $N$  individus

En considérant les modalités prises par l'individu  $\omega$  de la base de données (un n-uplet), la probabilité d'observation des modalités de cet individu est donnée par :

$$\begin{aligned}\mathbb{P}(\mathcal{X} = x(\omega)|\Theta) &= \mathbb{P}(X_1 = x_1(\omega), \dots, X_K = x_K(\omega) | \Theta) \\ &= \prod_{i=1}^K \mathbb{P}(X_i = x_{ij}(\omega) | \mathcal{P}(X_k) = x_{ik}^{\mathcal{P}}(\omega), \Theta) \\ &= \prod_{i=1}^K \Theta_{i,j(\omega),k(\omega)}\end{aligned}$$

En considérant tous les individus de la base de données, la vraisemblance d'observation de l'échantillon complet est donnée par :

$$\begin{aligned}L(\Theta, \mathcal{D}) &= \mathbb{P}(\mathcal{D}|\Theta) = \prod_{\omega=1}^N \mathbb{P}(\mathcal{X} = x(\omega)|\Theta) \\ &= \prod_{i=1}^K \prod_{\omega=1}^N \Theta_{i,j(\omega),k(\omega)} \\ &= \prod_{i=1}^K \prod_{j=1}^{K_i} \prod_{k=1}^{R_i} \Theta_{i,j,k}^{N_{i,j,k}}\end{aligned}$$

Si l'on considère ce dernier résultat, la fonction de log-vraisemblance peut s'écrire :

$$\mathcal{L}(\Theta, \mathcal{D}) = \log(L(\Theta, \mathcal{D})) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{K_i} \sum_{k=1}^{R_i} N_{i,j,k} \log(\Theta_{i,j,k})$$

Avec  $\sum_{k=1}^{R_i} \Theta_{i,j,k} = 1$

La maximisation de la log-vraisemblance permet d'obtenir l'estimateur du maximum de vraisemblance suivant :

$$\hat{\Theta}_{i,j,k}^{MV} = \hat{\mathbb{P}}(X_i = x_{ij} | \mathcal{P}(X_i) = x_{ik}^{\mathcal{P}}) = \frac{N_{i,j,k}}{\sum_{k=1}^{R_i} N_{i,j,k}}$$

### Apprentissage de la structure

Lorsque des données sont disponibles, il est aussi possible d'apprendre la structure du réseau bayésien la plus adéquate aux données. Pour ce faire, notons:

- $\mathcal{X} = (X_1, \dots, X_K)$  l'ensemble des  $K$  nœuds du réseau bayésien
- $\mathcal{G}$  le graphe complet non orienté reliant tous les nœuds
- $\text{Adj}(\mathcal{G}, X_i)$  l'ensemble des nœuds adjacents à  $X_i$  dans  $\mathcal{G}$
- $\text{Adj}(\mathcal{G}, X_{\{i \setminus j\}})$  l'ensemble des nœuds adjacents  $X_i$ , sauf  $X_j$  dans  $\mathcal{G}$
- $X_i - X_j$  le fait qu'il existe une arrête entre  $X_i$  et  $X_j$
- $X_i \rightarrow X_j$  le fait qu'il existe un arc orienté de  $X_i$  vers  $X_j$

- $X_i \rightsquigarrow X_j$  le fait qu'il existe un chemin dirigé allant de  $X_i$  vers  $X_j$
- $X_i \tilde{X}_j$  le fait que  $X_i$  et  $X_j$  soient adjacents à  $X_i - X_j, X_i \rightarrow X_j$  ou  $X_j \rightarrow X_i$
- $(X_i \perp X_j) | S$  le fait que  $X_i$  soit indépendant de  $X_j$  sachant  $S$
- $\mathfrak{G}^\perp(X_i, X_j)$  l'ensemble des nœuds  $S \in \mathcal{X}$  tels que  $(X_i \perp X_j) | S$

Un algorithme capable d'apprendre automatiquement la structure d'un réseau bayésien à partir des données est le suivant :

---

Algorithme 17 : Algorithme PC d'apprentissage de structure

---

1. Construction d'un graphe non orienté à partir des données :
  2.  $i \leftarrow 0$
  3. Répéter
  4. Recherche des indépendances conditionnelles d'ordre  $i$
  5.  $\forall \{X_i, X_j\} \in \mathcal{X}^2$  tels que  $X_i - X_j$  et  $Card(\text{Adj}(\mathcal{G}, X_{\{i \setminus j\}})) \geq i$
  6.  $\forall S \subset \text{Adj}(\mathcal{G}, X_{\{i \setminus j\}})$  tel que  $Card(S) = i$
  7. si  $(X_i \perp X_j) | S$  alors
  8.     ✓ Suppression des arrêtes  $X_i - X_j$  dans  $\mathcal{G}$
  9.     ✓  $\mathfrak{G}^\perp(X_i, X_j) \leftarrow \mathfrak{G}^\perp(X_i, X_j) \cup S$
  10.    ✓  $\mathfrak{G}^\perp(X_j, X_i) \leftarrow \mathfrak{G}^\perp(X_j, X_i) \cup S$
  11.  $i \leftarrow i + 1$
  12. Jusqu'à  $Card(\text{Adj}(\mathcal{G}, X_{\{i \setminus j\}})) \leq i, \forall \{X_i, X_j\} \in \mathcal{X}^2,$
  13. // Recherche des V-structures :
  14.  $\forall \{X_i, X_j, X_k\} \in \mathcal{X}^3$  tels que  $\neg X_i \tilde{X}_j$  et  $X_i - X_k - X_j,$
  15. si  $X_k \notin \mathfrak{G}^\perp(X_j, X_i)$  alors rajouter  $X_i \rightarrow X_k \leftarrow X_j$  (V-structure)
  16. // Ajout récursive des orientations  $\rightarrow$  sur les arcs :
  17. Répéter  $\forall \{X_i, X_j\} \in \mathcal{X}^2,$
  18. si  $X_i - X_j$  et  $X_i \rightsquigarrow X_j$  alors rajouter  $X_i \rightarrow X_j$
  19. si  $\neg X_i \tilde{X}_j, \forall X_k$  tel que  $X_i \rightarrow X_k$  et  $X_k - X_j$  alors  $X_i \rightarrow X_j$
  20. si  $\neg X_i \tilde{X}_j, \forall X_k$  tel que  $X_i \rightarrow X_k$  et  $X_k - X_j$  alors  $X_i \rightarrow X_j$
  21. Jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible d'orienter les arrêtes
- 

## Les solutions logicielles pour réseaux bayésiens

Les réseaux bayésiens disposent de nombreuses méthodes d'apprentissage de paramètres et un nombre aussi important d'algorithmes d'apprentissage des structures à partir des données. Il existe des techniques capables d'estimer les paramètres en présence de données incomplètes avec prise en compte de variables aléatoires continues. Certains algorithmes identifient les structures en exploitant les propriétés graphiques des probabilités conditionnelles. D'autres par contre utilisent un processus basé sur l'optimisation d'un score permettant d'évaluer l'adéquation d'un graphe orienté acyclique aux données considérées. Du fait de l'importance des réseaux bayésiens, de nombreux logiciels ont été développés pour leur implémentation et leur utilisation dont quelques-uns sont libres (open source).

L'essentiel de l'usage des réseaux bayésiens consiste, une fois les paramètres estimés, à simuler les conséquences d'une modification de certains nœuds sur l'ensemble des autres nœuds à travers des mises à jours automatiques des distributions de probabilités de l'ensemble des nœuds du réseau bayésien. Le logiciel open source le plus complet fournissant un interface graphique conviviale est le logiciel GeNIes comme le montre la figure suivante :

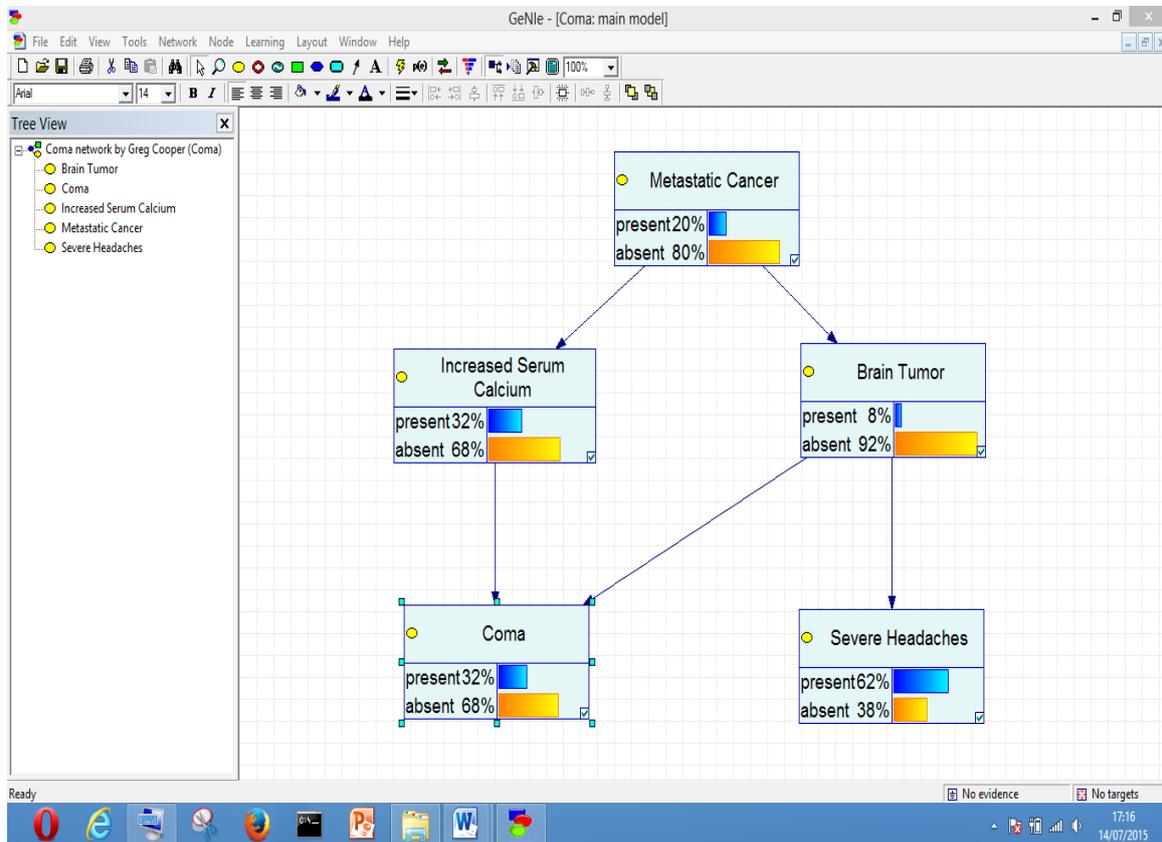


Figure 37 : Exemple de réseau bayésien avec GeNIes

Le logiciel GeNIes comporte de nombreux algorithmes d'apprentissage, aussi bien des paramètres que des structures, à partir des données. Il peut facilement être utilisé par des non spécialistes en modélisation, comme les psychologues, les économistes, les sociologues, les environnementalistes, etc. Les éditeurs du logiciel GeNIes ont développé un composant logiciel nommé SMILE qui permet de développer directement un réseau bayésien par voie logiciel. Cet API existe pour les langages C, Java et Python. Cependant, certains langages de calculs scientifiques, notamment R, disposent de bibliothèques dédiées aux réseaux bayésiens. Les packages R les plus connus sont les packages « **bnlearn** » et « **deal** ».

---

## 5.4) L'ANALYSE DES ACTIONS DE RESILIENCE

---

Dans l'étude des processus de résilience, un des aspects les plus importants est d'identifier un ensemble d'actions ou de politiques susceptibles d'accroître significativement la résilience des individus. Il s'agit de savoir, parmi un ensemble d'actions ou de politiques possibles, quelles sont celles qui sont susceptibles de produire un meilleur résultat. Il peut être question du choix d'une unique action optimale, ou d'une combinaison d'actions. Pour ce faire, une des solutions les plus simples et les plus efficaces consiste à modéliser la structure d'interactions entre ces différentes actions et leurs conséquences et à s'en servir pour simuler l'effet des résultats des actions les unes sur les autres. Il s'agit d'une formalisation de connaissances qualitatives permettant d'effectuer des raisonnements automatiques. Dans l'analyse des processus de résilience, il est légitime de s'interroger sur les actions qui seraient optimales pour accroître la résilience des individus. Dans ce contexte, la technologie des réseaux bayésiens constitue un outil idéal pour la modélisation du dispositif d'actions de résilience dans l'optique de simuler la meilleure pratique ou la combinaison de pratiques possibles, en ayant une idée de leurs impacts sur la résilience des individus. Cette technologie présente l'avantage de modéliser la connaissance experte que l'on a du problème et de s'en servir pour répondre à de nombreuses questions par un processus de simulation informatique correspondant à ce qu'il est convenu d'appeler un raisonnement automatique en Intelligence Artificielle. En Résiliométrie, les réseaux bayésiens sont utilisés pour le développement des modèles (de variables) d'actions. Les modèles d'actions modélisent essentiellement les relations d'interactions entre les variables d'actions (ou politiques). Les modèles d'actions ne sont rien d'autres que des réseaux bayésiens. Par conséquent, ils ne sont entièrement définis que si l'on précise le graphe de dépendance entre les variables nécessaires et les tables de probabilités associées à ces variables. Ainsi, considérons les notations suivantes :

- $n$  le nombre d'individus utilisés pour la collecte de données
- $K$  le nombre d'actions
- $\Omega_A$  l'ensemble des  $K$  actions considérées
- $F_A \subset \Omega_A$  l'ensemble des actions qui ne sont impactées par aucune autre action
- $a_k \in \Omega_A$  la  $k^{eme}$  action
- $T$  l'horizon temporel
- $A_k^t(i)$  l'impact de l'action  $a_k$  au temps  $t$  sur l'individu  $I_i \in \Omega_I$
- $A_k^t = (A_k^t(i))_{i \in [1, n]}$  la variable d'impact de l'action  $a_k$  au temps  $t$
- $E_A = \{aucun, faible, moyen, important, fort\}$  l'ensemble des modalités des  $A_k^t$
- $\mathcal{P}_t(A)$  les nœuds parents du nœud  $A$  au temps  $t$
- $\mathbb{P}(A)$  la distribution de probabilités associée au nœud  $A$

En Résiliométrie, il existe essentiellement deux types de modèles d'actions selon que celles-ci sont appréciées en un instant donné ou sur plusieurs périodes, à savoir les modèles d'actions statiques (MAS) et les modèles d'actions dynamiques (MAD).

### 5.4.1) LES MODELES D' ACTIONS STATIQUES

D'une façon générale, les modèles d'actions sont des modèles permettant d'évaluer les actions les plus efficaces parmi celles qui ont été menées ou pour détecter les actions les plus susceptibles d'accroître efficacement la résilience des individus. La structure du réseau bayésien correspondant est donnée par les relations de causes à effets pouvant exister entre les différentes actions. En effet, certaines actions peuvent avoir des influences sur d'autres. L'objet du graphe de dépendance consiste à spécifier, sur la base d'une connaissance experte du domaine d'étude, les relations d'interactions entre les différentes actions.

Les modèles de variables d'actions statiques sont caractérisés par le fait que les actions étudiées sont supposées indépendantes d'une période à une autre. Dans ce cas, la modélisation et l'étude des actions est effectuée pour chaque période  $t = \tau$  donnée. Un exemple de graphe de modèles d'actions statiques est donné par la figure suivante :

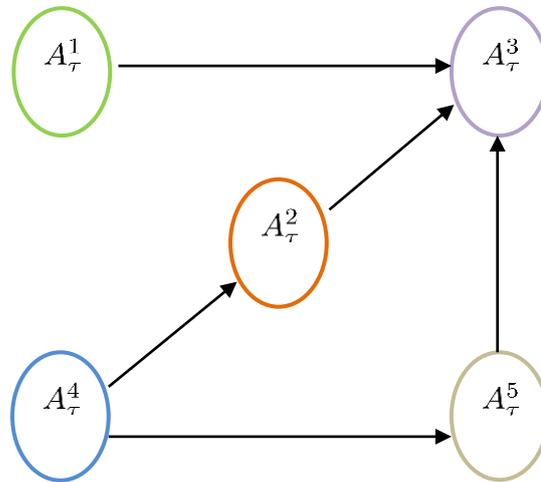


Figure 38 : Exemple de graphe d'un modèle d'actions statiques

Du point de vue de la modélisation par les réseaux bayésiens, une telle structure nécessite la définition des probabilités suivantes :

$$\mathbb{P}(A_k^\tau), \forall a_k \in F_A$$
$$\mathbb{P}(A_k^\tau | \mathcal{P}_\tau(A_k^\tau)), \forall a_k \in \Omega_A \setminus F_A$$

Dans le cadre de la résilience, une action peut avoir un effet futur, et l'action à mener doit prendre en compte les actions passées. Dans une telle situation, la recherche des actions optimales doit se faire uniquement dans un cadre de modélisation dynamique des actions et de leurs effets sur la résilience des individus. Le but des modèles d'actions dynamiques est de permettre la prise en compte des aspects dynamiques dans la modélisation des relations entre les actions entreprises ou à entreprendre.

### 5.4.2) LES MODELES D' ACTIONS DYNAMIQUES

Les modèles d'actions dynamiques sont caractérisés par le fait que chaque action d'une période donnée est supposée être impactée par son historique immédiat, et la structure d'interactions entre les actions est conservée d'une période à une autre. Les modèles d'actions ont pour rôle de présenter l'importance des probabilités associées à chaque type d'appréciation (aucun, faible, moyen, important, fort) pour chaque variable d'action  $A_k^t$ . Un exemple de graphe de modèle d'actions dynamiques est donné par la figure suivante :

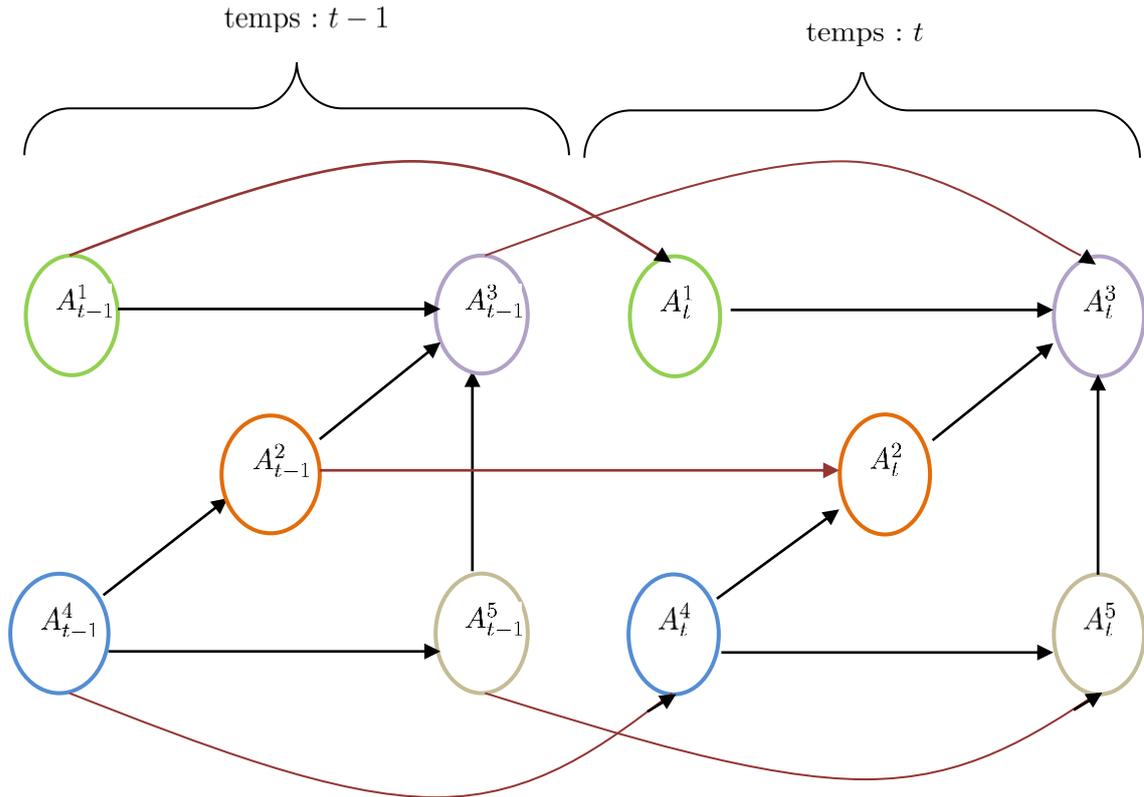


Figure 39 : Exemple de graphe d'un modèle d'actions dynamiques

Du point de vue de la modélisation par les réseaux bayésiens, une telle structure nécessite la définition des probabilités suivantes :

À  $t = 1$  :

$$\mathbb{P}(A_k^1), \forall a_k \in F_A$$

$$\mathbb{P}(A_k^1 | \mathcal{P}_1(A_k^1)), \forall a_k \in \Omega_A \setminus F_A$$

$\forall t \geq 2$  :

$$\mathbb{P}(A_k^t | A_k^{t-1}), \forall a_k \in F_A$$

$$\mathbb{P}(A_k^t | \mathcal{P}_t(A_k^t) \cup A_k^{t-1}), \forall a_k \in \Omega_A \setminus F_A$$

## L'algorithme des modèles d'actions

Considérons les notations suivantes :

- $\mathcal{D}_I$  l'ensemble des individus et de leurs appréciations  $A_k^t$  des actions
- $\mathcal{G}_A$  le graphe spécifiant les relations entre les actions  $A_k^t$
- $\mathcal{R}_B(\mathcal{G}|D)$  l'estimation du réseau bayésien de graphe  $\mathcal{G}$  à partir des données  $\mathcal{D}$

Sur la base des notations définies, l'algorithme des modèles d'actions est le suivant :

---

### Algorithme 18 : Modèles d'actions

---

1. Entrées :  $\mathcal{G}_A, \mathcal{D}_I$
  2.  $\Gamma = 0_{1:T,1:K}$
  3.  $\mathcal{M} = \mathcal{R}_B(\mathcal{G}_A|\mathcal{D}_I)$
  4. Pour ( $t \in [1, T]$ ) {
  5.     for ( $k \in [1, K]$ ) {
  6.         a) Récupérer la distribution de probabilité  $\hat{p}_{kt}$  associé à  $A_k^t$  à partir de  $\mathcal{M}$
  7.         b)  $\Gamma[t, k] = \hat{p}_{kt}$
  8.         c) Construire le diagramme en bandes  $\Delta_i^t$  avec  $\hat{p}_{kt}$
  9.     }
  10. }  
 11. }  
 12. Sorties :  $\Gamma, \{\Delta_k^t, \forall (k, t) \in [1, K] \times [1, T]\}$
- 

L'algorithme des modèles d'actions est utilisable aussi bien pour les modèles d'actions statiques que pour les modèles d'actions dynamiques. Le cas statique consiste à prendre  $[1, T] = \{\tau\}$  c'est-à-dire  $T = \tau = 1$ . En pratique, il est conseillé de reproduire ces architectures de façon graphique avec un logiciel de réseaux bayésiens comme le montre la figure suivante développée avec le logiciel GeNIes :

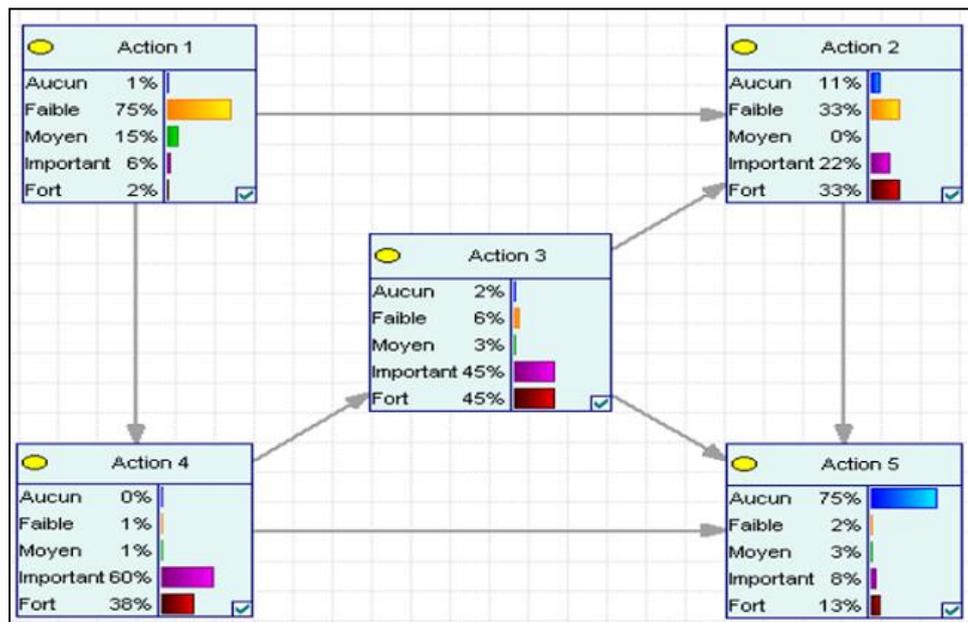


Figure 40 : Exemple de modèle d'actions statiques

---

## CHAPITRE 6 : L'ANALYSE DE LA DYNAMIQUE D'EVOLUTION DES INDIVIDUS

---

L'un des enjeux de l'analyse de la résilience est de pouvoir effectuer des analyses individuelles afin de mettre en exergue des spécificités propres à chaque individu. En modélisation, on parle de modèles centrés-individus par opposition aux modèles centrés-variables. Cette thèse utilise essentiellement deux types de modèles centrés-individus. Le premier concerne l'usage du modèle des courbes de croissance à variables latentes pour l'analyse de l'espoir que les individus ont de devenir résilients. En effet, on sait que les états de vulnérabilité permettent d'établir le profil des individus qui ont l'aptitude à la résilience. Cependant, il est évident que l'aptitude à la résilience est, dans une certaine mesure, tributaire de l'espoir que les individus ont à devenir résilients. Il n'y a rien à attendre d'un individu qui se résigne et ne trouve plus de raison (ou ne voit plus la nécessité) de se battre pour l'évolution de sa situation de souffrance. Aussi longtemps qu'un individu perd l'espoir de devenir résilient, il inhibe l'évolution de son propre processus de résilience. Il est donc primordial de pouvoir, à tout instant, déterminer l'espoir que les individus ont de sortir de leur situation de souffrance afin de pouvoir mener efficacement les actions appropriées. Quant à la seconde modélisation centrée-individu, elle concerne l'utilisation des systèmes multi-agents pour simuler la dynamique d'évolution des états de vulnérabilité des individus.

---

### 6.1) LE CALCUL DES TRAJECTOIRES D'ESPOIR A LA RESILIENCE

---

Lorsqu'un choc traumatique se présente, des actions individuelles ou collectives sont menées pour accroître la résilience des individus souffrants. Avec le temps, parmi ceux qui ne sont pas résilients, certains espèrent encore l'être alors que d'autres perdent tout espoir de le devenir. Les individus qui ont l'espoir de parvenir à la résilience ont une tendance à l'action afin d'atténuer leurs souffrances et devenir résilients. Contrairement à eux, ceux qui ont perdu tout espoir ont plutôt une tendance à la résignation. L'espoir à la résilience est donc un état d'esprit (état psychologique latent) fondamental. De sa connaissance dépend l'efficacité des actions menées. Un individu n'ayant pas d'espoir à la résilience restera insensible à toute politique pour accroître la résilience des individus. Il faut d'abord activer cet espoir en lui avant toute tentative pour accroître sa résilience suite au choc traumatique considéré. Les individus ayant gardé l'espoir à la résilience n'ont pas besoin de sensibilisation particulière avant de mener les actions d'accroissement de la résilience à leur endroit. En effet, ils sont naturellement prédisposés à s'approprier les politiques et actions pour accroître leur résilience comme des opportunités. L'objet de cette partie est de fournir une approche permettant d'identifier les tendances individuelles d'espoir à la résilience.

### 6.1.1) LES COURBES DE CROISSANCE A VARIABLES LATENTES

Les courbes de croissance à variables latentes ou latent growth curve modeling (LGCM) est une technique statistique utilisée pour estimer la croissance de données longitudinales sur une période de temps ([HAC06], [JAC05], [PRE08], [PRI06], [SON14], [TON08]). Elle est largement utilisée dans les sciences du comportement et les sciences sociales. Dans les LCGM, l'évolution d'un individu est modélisée comme une fonction d'un processus de croissance sous-jacent. La technique peut être utilisée pour étudier les changements systématiques, la croissance et la variabilité interindividuelle. La figure suivante présente la structure de base d'un modèle de courbe de croissance latente :

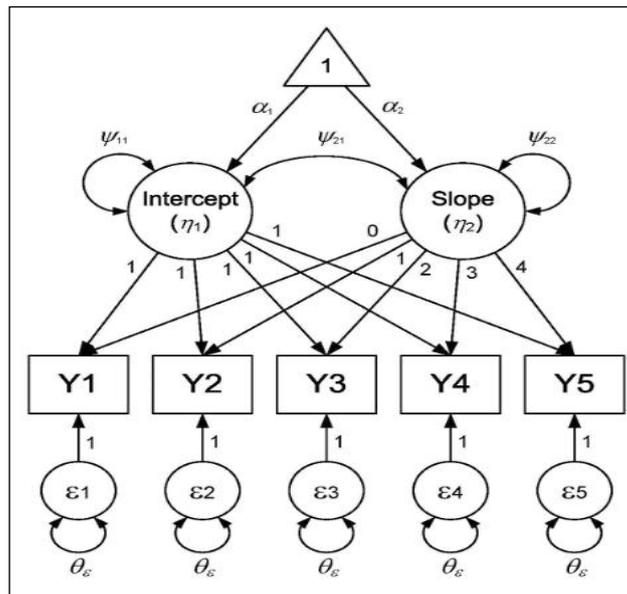


Figure 41 : Structure type de base d'un modèle de courbe de croissance latente<sup>9</sup>

Cette structure type de base est une représentation graphique du système d'équations suivantes (hors relations de covariances) :

$$\begin{cases} Y_{ti} = \lambda_{1t}\eta_{1i} + \lambda_{2t}\eta_{2i} + \varepsilon_{ti} \\ \eta_{1i} = \alpha_1 + \zeta_{1i} \\ \eta_{2i} = \alpha_2 + \zeta_{2i} \end{cases}$$

Ainsi, dans les modèles LGCM, les paramètres des courbes de croissance sont modélisés comme des variables latentes. Cet exemple montre la modélisation d'une évolution linéaire de la croissance de la variable d'intérêt  $Y = (Y_t)_{1 \leq t \leq T}$  avec  $T = 5$ . Les paramètres sont donc l'ordonnée à l'origine (intercept) et la pente (slope) de chaque droite représentant la tendance de cette croissance. On peut étudier la vitesse de cette croissance en utilisant un modèle quadratique. Dans ce cas, un troisième paramètre (coefficient quadratique) est ajouté au modèle.

<sup>9</sup> [http://www.corwin.com/upm-data/23140\\_Chapter\\_1.pdf](http://www.corwin.com/upm-data/23140_Chapter_1.pdf)

## Modélisation de la dynamique d'évolution

Toute la subtilité des modèles de courbes de croissance à variables latentes consiste à comprendre le mécanisme d'intégration de la dynamique temporelle dans le modèle. Cela passe par des variables manifestes construites selon le principe de construction des suites numériques suivantes (indexées par le temps) :

- $(\lambda_{1t})_{1 \leq t \leq T}$  tel que  $\forall t \in [1, T]$ ,  $\lambda_{1t} = 1$  pour l'intercept
- $(\lambda_{2t})_{1 \leq t \leq T}$  tel que  $\forall t \in [1, T]$ ,  $\lambda_{2t} = t - 1$  pour la pente

En cas de modélisation par une courbe quadratique, on utilise une suite  $(\lambda_{3t})_{1 \leq t \leq T}$  telle que  $\forall t \in [1, T]$ ,  $\lambda_{3t} = (1 - t)^2$ . Ainsi, les valeurs des coefficients sont construits en utilisant  $\lambda_{1t} = \{1, 1, 1, 1, \dots, 1\}$ ,  $\lambda_{2t} = \{0, 1, 2, 3, \dots, T - 1\}$  et  $\lambda_{3t} = \{0, 1, 4, 9, \dots, (T - 1)^2\}$ .

## Les modèles résiliométriques de croissance

Dans l'approche résiliométrique, les LGCM sont adaptés au contexte du PLSPM par le développement de modèles dits de croissance douce (Soft growth modeling). Ces modèles ne sont rien d'autres qu'une approche PLSPM de la modélisation en courbes de croissance à variables latentes classique et constituent une contribution de la thèse au domaine des courbes de croissance. Les modèles de croissance douce peuvent aussi être appelés des modèles PLSGM (Partial Least Square Growth Models). La notion de « croissance » est empruntée aux courbes de croissance et le qualificatif « douce » vient du fait que l'approche PLSPM est qualifié de modélisation douce (soft modeling). Il existe deux types de modèles PLSGM selon que l'on veuille étudier le sens de la croissance (modèle linéaire) ou la vitesse de cette croissance (modèle quadratique). Considérons les notations suivantes :

- ✓  $T$  l'horizon temporel de collecte des données
- ✓  $n$  le nombre de panelistes utilisés
- ✓  $\xi_t$  l'estimation de la résilience au temps  $t$  (modèle statique)
- ✓  $\psi_t$  l'estimation de l'espoir à la résilience au temps  $t$
- ✓  $1_n$  le vecteur de longueur  $n$  constitué uniquement de 1
- ✓  $\alpha$  l'ordonnée à l'origine de la courbe d'espoir à la résilience
- ✓  $\beta$  la pente de la courbe d'espoir à la résilience
- ✓  $\gamma$  le coefficient quadratique de la courbe d'espoir à la résilience
- ✓  $\omega_t^v$  le coefficient de la régression de  $v$  sur une fonction linéaire de  $\xi_t$
- ✓  $\delta_n$  le terme d'erreur de la régression de  $v$  sur une fonction linéaire de  $\xi_t$
- ✓  $\mu$  le coefficient de la régression de  $\eta$  sur  $1_n$
- ✓  $\nu$  le terme d'erreur de la régression de  $\eta$  sur  $1_n$
- ✓  $\pi_v$  le coefficient de la régression de  $\eta$  sur  $v$
- ✓  $\zeta$  le terme d'erreur de la régression de  $\eta$  sur  $v$

## 6.1.2) LES MODELES DE CROISSANCE DOUCE LINEAIRE

Les modèles de croissance douce linéaire permettent d'apprécier le sens de la croissance latente en postulant à une relation de croissance linéaire de la variable latente modélisée. Dans le cadre de la résilience, cela revient à considérer que l'espoir que les individus ont de devenir résilients évolue selon une progression linéaire avec le temps. La structure graphique de ces modèles est donnée par la figure suivante :

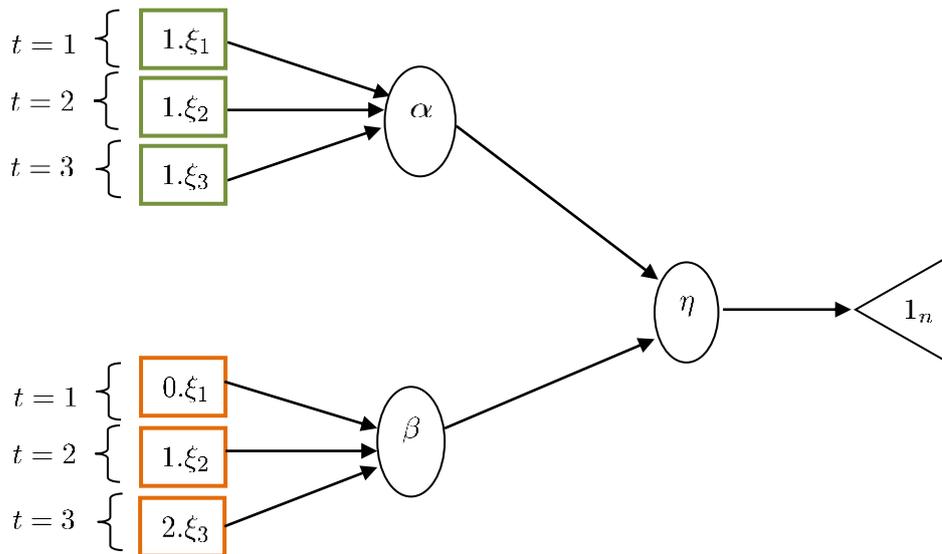


Figure 42 : Exemple de modèle de croissance douce linéaire

Les modèles LGCM, d'une façon générale, partent du principe qu'il existe des différences individuelles dans la vitesse et la direction du changement. En d'autres termes, la dynamique d'espoir à la résilience est propre à chaque individu. Le facteur « intercept »  $\alpha$  (ordonnée à l'origine) représente le niveau initial d'espoir à la résilience (lorsque la variable de temps est égale à zéro). Quant au facteur « slope »  $\beta$  (pente), il représente le taux de croissance de l'espoir à la résilience.

Les modèles de croissance douce linéaire comportent deux variables latentes essentielles ( $\alpha$  et  $\beta$ ) qui sont les paramètres d'évolution de l'espoir à la résilience. Ce type de modèle correspond au système suivant formé par les  $2(T + 1)$  équations :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \alpha = \sum_{t=1}^T \omega_t^\alpha \xi_t + \delta_\alpha & \text{(il y a } T \text{ equations)} \\ \beta = \sum_{t=1}^T \omega_t^\beta (t-1)\xi_t + \delta_\beta & \text{(il y a } T \text{ equations)} \\ \eta = \mu 1_n + \nu & \text{(il y a 1 equation)} \\ \eta = \pi_\alpha \alpha + \pi_\beta \beta + \zeta & \text{(il y a 1 equation)} \end{array} \right.$$

## Graphiques et algorithme des croissances linéaires

Les modèles de croissance douce linéaire postulent à une relation de croissance linéaire de l'espoir à la résilience. Ainsi, la dynamique de l'espoir à la résilience est donnée par la relation :

$$\psi_t = \alpha + \beta t$$

Partant de cette équation, si l'on note  $\psi_{it}$ ,  $\alpha_i$  et  $\beta_i$  les valeurs de  $\psi_t$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  respectivement pour l'individu  $i \in [1, n]$ , la dynamique de l'espoir à la résilience propre à cet individu est donnée par la relation :

$$\forall (i, t) \in [1, n] \times [1, T], \psi_{it} = \alpha_i + \beta_i t$$

Cette relation est le socle de la modélisation en courbe de croissance douce linéaire car elle détermine les trajectoires des espoirs individuels à la résilience. Il est important de comprendre que l'espoir à la résilience étant impossible à estimer directement, il n'est pas utilisé de façon directe pour la modélisation. L'astuce des modèles de courbes de croissance à variables latentes est de considérer l'espoir à la résilience comme une variable latente dont les paramètres d'évolution sont aisément estimables en tant que variables latentes elles-mêmes, ce qui permet de reconstituer indirectement la dynamique d'évolution de celui-ci. C'est ce principe qui fait des LGCM, une classe de modèles d'équations structurelles particulière. Dans les modèles de croissance douce linéaire, l'espoir à la résilience d'un individu ne peut revêtir que deux formes essentielles. Ces deux types de courbes possibles sont donnés par la figure suivante :

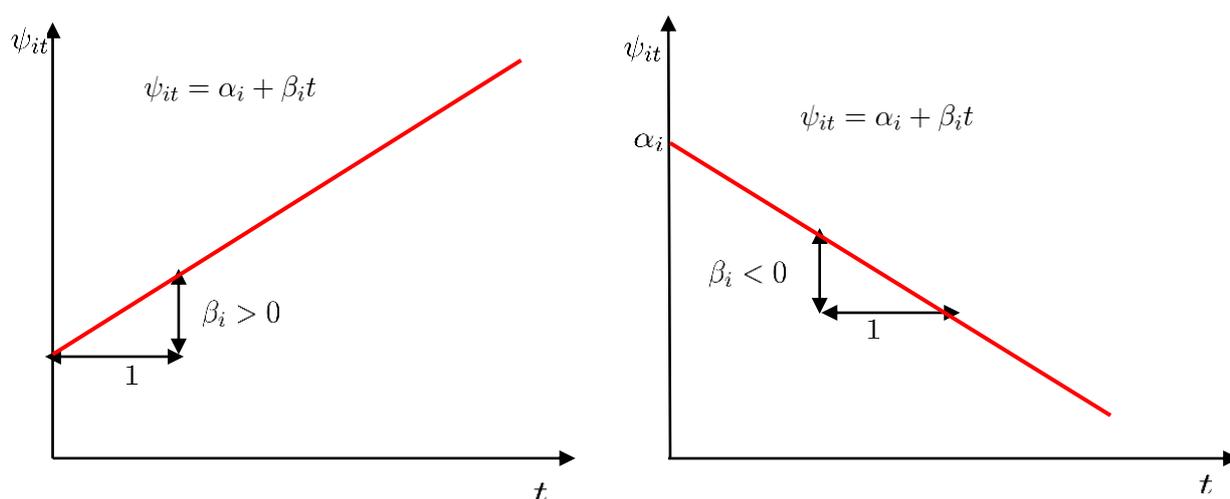


Figure 43 : Principales formes de courbes de croissance linéaire

La forme de gauche traduit un espoir, c'est-à-dire une croissance progressive de l'espoir à la résilience avec le temps ; alors que la forme de droite correspond à un désespoir, c'est à dire une décroissance progressive de l'espoir de devenir résilient dans le temps.

Le paramètre  $\alpha$  correspond au niveau initial d'espoir à la résilience. Plus la valeur de celui-ci est grande, plus l'individu correspondant possède initialement un grand espoir de devenir résilient. Quant au paramètre  $\beta$ , il représente la direction de la perte ou du regain d'espoir à la résilience. Si cette pente est positive alors l'individu espère devenir résilient. Si cette pente est négative alors l'individu désespère à devenir résilient. Sous l'hypothèse d'une évolution linéaire, il existe théoriquement une troisième forme possible d'évolution d'espoir à la résilience qui correspond à un espoir constant dans le temps. La figure suivante présente l'allure des courbes de ce type d'évolution :

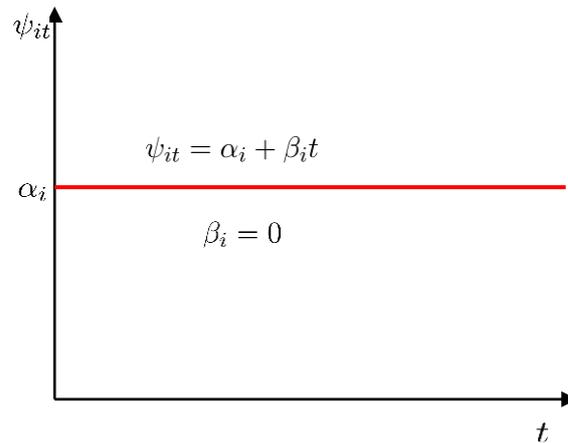


Figure 44 : Formes de courbes de croissance à évolution constante

Les individus qui gardent toujours le même espoir à la résilience méritent une attention particulière. En effet, ce phénomène peut traduire soit quelqu'un qui persiste à rester dans son désespoir, ou quelqu'un qui n'est pas réellement affecté par le choc ou qui s'y est adapté assez rapidement. Ces catégories d'individus ne sont pas affectées par les actions visant à accroître la résilience des individus. L'algorithme de calcul des trajectoires linéaires individuelles d'espoir à la résilience est le suivant :

---

Algorithme 19 : Calcul des courbes linéaires d'espoir à la résilience

---

1. Entrée :  $n, T, (\xi_t)_{t \in [1, T]}$
  2.  $\Omega_I$  // Ensemble des individus avec les informations collectées sur eux
  3.  $\mathcal{M}$  // La spécification du modèle PLSGM linéaire
  4.  $\mathcal{R}(\alpha, \beta) = plspm(\Omega_I, \mathcal{M})$  // Estimation PLSGM du modèle spécifié (calcul de  $\alpha, \beta$ )
  5. Pour ( $i \in \Omega_I$ ) {
  6.     f) Récupérer  $\alpha_i$  // Valeur de  $\alpha$  pour le  $i^{eme}$  individu
  7.     g) Récupérer  $\beta_i$  // Valeur de  $\beta$  pour le  $i^{eme}$  individu
  8.     h)  $\psi_i = 0_{1:T}$  // Vecteur des valeurs d'espoir à la résilience du  $i^{eme}$  individu
  9.     i) Pour ( $t \in [1, T]$ ) {
  10.         i) Calculer  $\psi_{it} = \alpha_i + \beta_i t$
  11.         ii)  $\psi_i[t] = \psi_{it}$
  12.     }
  13.     j) Tracer la droite  $\Delta_i$  d'équation  $\psi(t) = \alpha_i + \beta_i t$
  14. }
  15. }
  16. }
  17. Sortie :  $\psi_i, \Delta_i$
-

### 6.1.3) LES MODELES DE CROISSANCE DOUCE QUADRATIQUE

Les modèles de croissance douce quadratique postulent à une relation de croissance quadratique de la variable latente modélisée. Ce type de modèle sert uniquement à apprécier la vitesse avec laquelle la croissance latente s'effectue. Dans le cadre de la résilience, cela revient à considérer que la vitesse de l'espoir que les individus ont de devenir résilients suit une progression quadratique avec le temps. La structure graphique de ces modèles est donnée par la figure suivante :

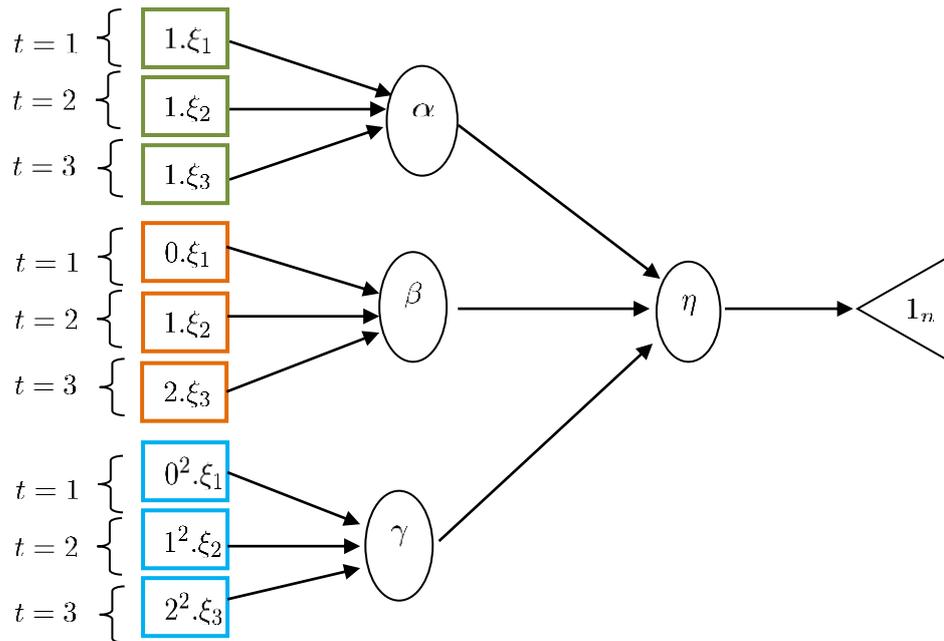


Figure 45 : Exemple de modèle de croissance douce quadratique

Dans les modèles de croissance douce quadratique, en plus des facteurs « intercept »  $\alpha$  et « slot »  $\beta$ , il existe un facteur « quadratique »  $\gamma$  qui représente la vitesse à laquelle s'effectue l'évolution de l'espoir à la résilience. Les modèles de croissance douce quadratique comportent donc trois variables latentes essentielles ( $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ ) qui sont les paramètres d'évolution de l'espoir à la résilience. Ce type de modèle correspond au système suivant formé par les  $3T + 2$  équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \sum_{t=1}^T \omega_t^\alpha \xi_t + \delta_\alpha \quad (\text{il y a } T \text{ equations}) \\ \beta = \sum_{t=1}^T \omega_t^\beta (t-1) \xi_t + \delta_\beta \quad (\text{il y a } T \text{ equations}) \\ \gamma = \sum_{t=1}^T \omega_t^\gamma (t-1)^2 \xi_t + \delta_\gamma \quad (\text{il y a } T \text{ equations}) \\ \eta = \mu 1_n + \nu \quad (\text{il y a } 1 \text{ equation}) \\ \eta = \pi_\alpha \alpha + \pi_\beta \beta + \pi_\gamma \gamma + \zeta \quad (\text{il y a } 1 \text{ equation}) \end{array} \right.$$

## Graphiques et algorithmes des croissances quadratiques

Les modèles de croissance douce quadratique postulent à une relation de croissance quadratique de l'espoir à la résilience. Ainsi, la vitesse d'évolution de l'espoir à la résilience est donnée par la relation :

$$\psi_t = \alpha + \beta t + \gamma t^2$$

Partant de cette équation, si l'on note  $\psi_{it}$ ,  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  et  $\gamma_i$  les valeurs de  $\psi_t$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  respectivement pour l'individu  $i \in [1, n]$ , la vitesse d'évolution de l'espoir à la résilience propre à cet individu est donnée par la relation :

$$\forall (i, t) \in [1, n] \times [1, T], \psi_{it} = \alpha_i + \beta_i t + \gamma_i t^2$$

Dans les modèles de croissance douce quadratique, la vitesse de l'espoir à la résilience d'un individu peut revêtir quatre formes à direction unique (croissance unidirectionnelle). Ces quatre types de courbes possibles sont donnés par la figure suivante :

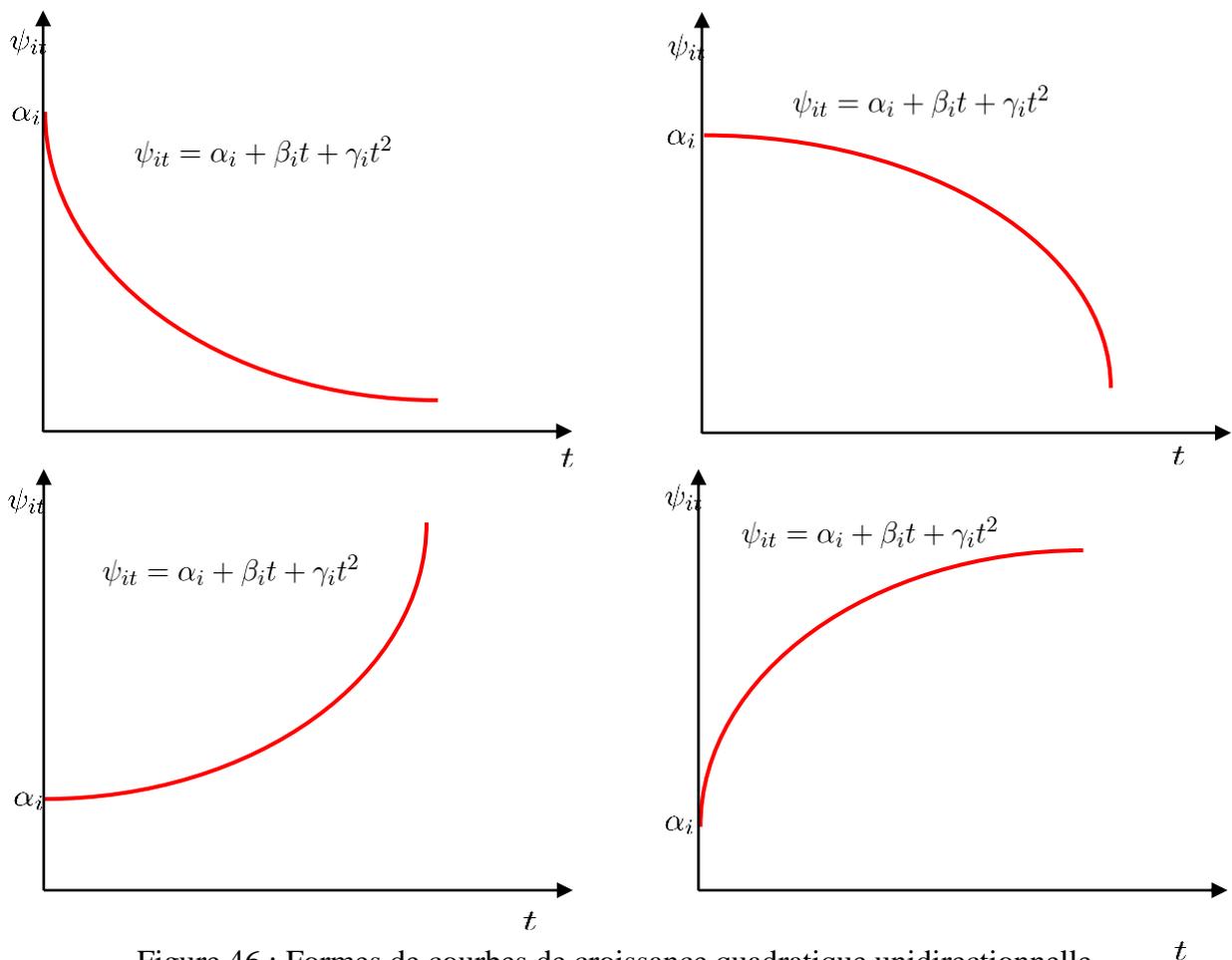


Figure 46 : Formes de courbes de croissance quadratique unidirectionnelle

Les deux formes du haut de la figure (haut droit et haut gauche) traduisent une perte progressive de la vitesse d'espoir à la résilience avec le temps, alors que les deux formes du bas de la figure (bas gauche et bas droit) correspondent à des individus dont la vitesse d'espoir à la résilience augmente progressivement avec le temps. Contrairement aux formes linéaires, le paramètre  $\alpha$  correspond au niveau initial de la vitesse d'espoir à la résilience. Plus la valeur de celui-ci est grande, plus l'individu correspondant possède une grande vitesse initiale d'espoir à la résilience. Quant au paramètre  $\beta$ , il représente le taux de croissance de la vitesse initiale d'espoir à la résilience. Plus cette pente est élevée, plus l'évolution de l'espoir à la résilience se fait plus rapidement chez l'individu considéré. Quant au paramètre quadratique  $\gamma$ , il donne le sens de la vitesse d'évolution de l'espoir à la résilience.

Sous l'hypothèse d'une évolution quadratique, il existe théoriquement deux autres formes possibles d'évolution de la vitesse d'espoir à la résilience qui correspondent à des changements de vitesse relatif à l'espoir à la résilience à partir d'une période donnée. La figure suivante présente l'allure de ces deux types de courbes d'évolution :

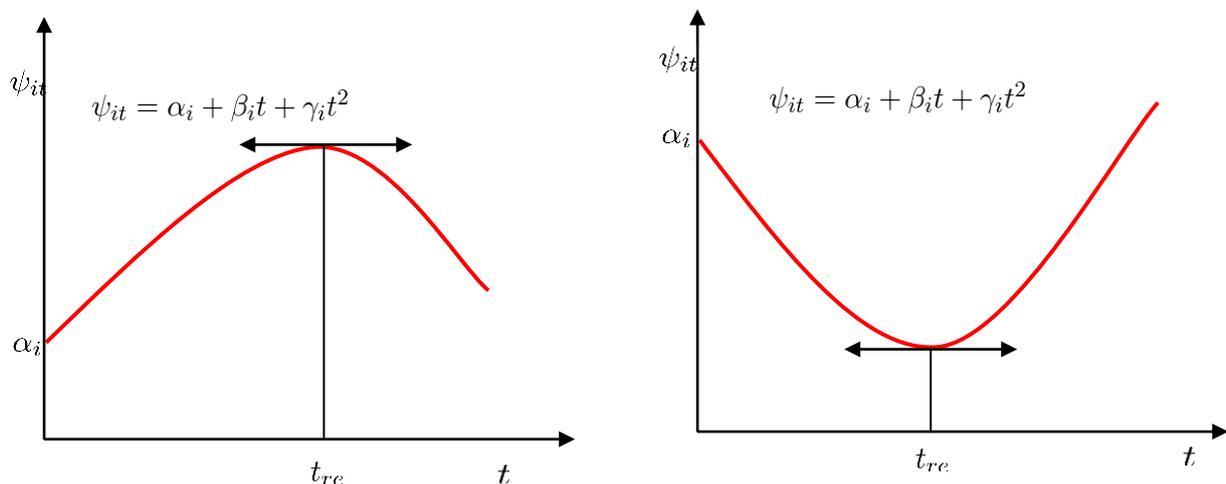


Figure 47 : Formes de courbes de croissances quadratiques bidirectionnelles

Les évolutions quadratiques bidirectionnelles de la vitesse d'espoir à la résilience sont caractérisées par l'existence d'un temps de rupture de direction ( $t_{re}$ ). Le produit du temps de rupture par l'unité temporelle donne la durée d'accélération ou de décélération de l'espoir à la résilience ( $d_{er}$ ). Cette durée peut traduire deux réalités : soit une accélération (cas d'une croissance jusqu'à  $t_{re}$ ), soit une décélération (cas d'une décroissance jusqu'à  $t_{re}$ ). Lorsque l'espoir à la résilience est croissant, une accélération traduit une augmentation rapide de l'espoir avec le temps et une décélération traduit un ralentissement de l'espoir avec le temps. Lorsque l'espoir à la résilience est décroissant, une accélération traduit une augmentation rapide du désespoir avec le temps et une décélération traduit un ralentissement du désespoir avec le temps.

L'algorithme de calcul des trajectoires quadratiques individuelles d'espoir à la résilience est le suivant :

---

Algorithme 20 : Calcul des courbes quadratiques d'espoir à la résilience

---

1. Entrée :  $n, T, (\xi_t)_{t \in [1, T]}$
  2.  $\Omega_I$  // Ensemble des individus avec les informations collectées sur eux
  3.  $\mathcal{M}$  // La spécification du modèle PLSGM quadratique
  4.  $\mathcal{R}(\alpha, \beta, \gamma) = plspm(\Omega_I, \mathcal{M})$  // Estimation PLSPM du modèle spécifié (calcul de  $\alpha, \beta, \gamma$ )
  5. Pour ( $i \in \Omega_I$ ) {
  6.     a) Récupérer  $\alpha_i$  // Valeur de  $\alpha$  pour le  $i^{eme}$  individu
  7.     b) Récupérer  $\beta_i$  // Valeur de  $\beta$  pour le  $i^{eme}$  individu
  8.     c) Récupérer  $\gamma_i$  // Valeur de  $\gamma$  pour le  $i^{eme}$  individu
  9.     d)  $\psi_i = 0_{1:T}$  // Vecteur des valeurs d'espoir à la résilience du  $i^{eme}$  individu
  10.     e) Pour ( $t \in [1, T]$ ) {
  11.         i) Calculer  $\psi_{it} = \alpha_i + \beta_i t + \gamma_i t^2$
  12.         ii)  $\psi_i[t] = \psi_{it}$
  13.     }
  14.     f) Tracer la courbe  $\mathcal{C}_i$  d'équation  $\psi(t) = \alpha_i + \beta_i t + \gamma_i t^2$
  15. }  
 16. }  
 17. Sortie :  $\psi_i, \mathcal{C}_i$
- 

Du point de vue de l'implémentation concrète de l'algorithme de calcul de l'espoir à la résilience, il est bon de savoir que le recours à l'algorithme PLSPM rend inapproprié l'usage des variables constantes. Dans le cas des variables nulles, il faut carrément les supprimer du modèle et de sa spécification. L'enjeu reste la variable manifeste de la dimension quadratique qui ne comporte que la valeur un (1) pour tous les individus. En effet, si cette variable est utilisée comme telle, l'algorithme PLSPM produira une erreur. Pour corriger ce problème, il faudrait perturber cette variable en l'additionnant avec une variable aléatoire uniforme négligable. Il est souhaitable d'utiliser une variable aléatoire uniforme sur l'intervalle  $[-0.01, 0.01]$  d'espérance mathématique nulle.

---

## 6.2) LES SYSTEMES MULTI-AGENTS

---

La notion d'agent est un concept utilisé dans beaucoup de domaines comme la sociologie, la biologie, la psychologie cognitive, la psychologie sociale, l'informatique, etc. Il n'existe pas de définition consensuelle d'un agent. On peut considérer, d'après Russell, un agent comme une entité qui perçoit son environnement et agit sur celui-ci. Du point de vue de la modélisation, un agent est un système informatique, situé dans un environnement, et qui agit d'une façon autonome pour atteindre les objectifs (buts) pour lesquels il a été conçu ([DRO96], [FAB04]). La notion d'agent en informatique est utilisée dans une optique de Génie Logiciel pour développer des programmes manipulant des agents. Le concept d'agent peut être comparé au concept d'objet dans la programmation orientée objet, ou au concept de prototype dans la programmation orientée prototype. Mais il existe de très grandes différences entre un agent et un objet ou un prototype. En effet, selon Ferber, un agent est une entité autonome, réelle (robots, machines, humains, forêts, animaux, etc.) ou abstraite (composants logiciels, idées, etc.) capable d'agir sur elle-même et sur son environnement ; et qui, dans un univers multi-agents (plusieurs agents), peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et de ses interactions avec les autres agents ([GIL95], [JAQ95]). Dans le domaine des sciences sociales, les systèmes multi-agents (SMA) sont utilisés pour simuler l'évolution d'une population d'agents afin de mieux comprendre la dynamique de plusieurs phénomènes dont la propagation de maladies dans une population, l'identification de comportements émergents d'une colonie de fourmis, l'identification du mécanisme de propagation de feux de brousse, etc ([SAM09], [SHI00]). La typologie de l'usage des systèmes multi-agents est donnée par la figure suivante :

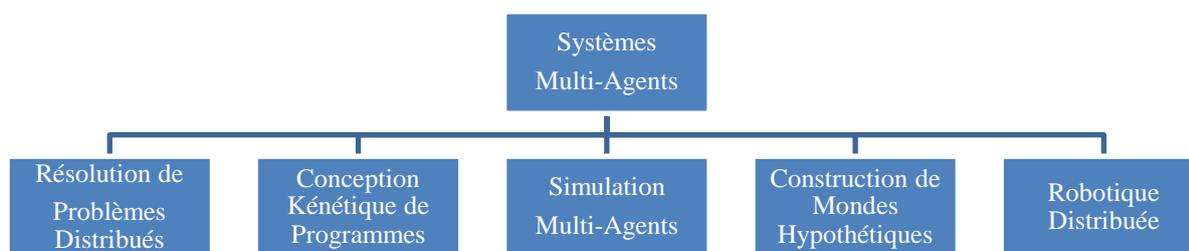


Figure 48 : Les types d'utilisation des systèmes multi-agents

### 6.2.1) LA SIMULATION MULTI-AGENTS

Quel qu'en soit l'usage, les SMA possèdent une base théorique commune. Dans le contexte de la modélisation des processus de résilience sociale, seule la simulation multi-agent est utilisée. Il s'agit du développement de SMA permettant de simuler l'évolution d'une société d'agents et d'en étudier les propriétés, éventuellement émergentes.

## Généralités sur la simulation multi-agents

Encore appelé modèle micro-analytique par Collins et Jefferson ou simulation centrée-individu, la simulation multi-agents est une forme de modélisation permettant de représenter directement les individus, leurs comportements et leurs interactions dans le modèle. Elle prend appui sur deux grands principes. Le premier concerne l'idée selon laquelle il est possible de représenter, sous la forme d'un programme informatique, le comportement des individus qui agissent sur un environnement donné. Le second principe suppose qu'il est possible de représenter un phénomène comme le résultat des interactions d'un ensemble d'individus dont l'évolution de l'effectif résulte des comportements (coopération, lutte, reproduction, etc.) entre les différents individus, chacun disposant de ses propres éléments opératoires (ressources, stratégies, etc.). La simulation multi-agents possède l'avantage d'intégrer à la fois des paramètres quantitatifs (grandeurs numériques) et des paramètres qualitatifs (comportements, stratégies). Il est possible d'y intégrer à la fois des variables quantitatives, des équations mathématiques (relations linéaires, équations différentielles, etc.), et des règles symboliques.

Il faut bien comprendre que les différentes représentations se situent au niveau micro, c'est-à-dire au niveau de l'individu, au sens statistique du terme. Les individus (agents) interagissent non seulement entre eux, mais aussi avec l'environnement. Le développement d'un système de simulation multi-agents revient à la construction informatique d'un « micro-monde artificiel » sur un ordinateur dont il est possible de contrôler toutes les caractéristiques et de reproduire des séries d'expérimentations comme s'il s'agissait de situations de laboratoire. Ferber ([JAQ95]) compare les systèmes de simulation multi-agents aux maquettes de format réduit utilisées en aéronautique ou en construction navale. Pour lui, la seule différence entre un système de simulation multi-agent et une maquette de construction aéronautique ou navale réside dans le fait que le modèle multi-agents est exprimé sous la forme d'une entité informatique (un programme) alors que le modèle de l'aéronef ou du bateau est exprimé dans une structure physique (une maquette).

En pratique, une fois développé, un système multi-agents est utilisé de façon interactive par l'utilisateur. Celui-ci change les paramètres du modèle (conditions environnementales) afin d'observer leurs effets sur la dynamique du système. Ainsi, l'on est capable d'observer directement le déplacement des individus et les modifications de leurs comportements. Par conséquent, ces simulations sont utilisées pour tester de nombreuses hypothèses dans des conditions qu'il peut être impossible d'obtenir dans la réalité, soit par principe éthique, soit du fait de la nature même du phénomène. Enfin, dans ce type de modèle, des comportements globaux inattendus peuvent émerger des interactions complexes entre individus. Il est donc possible d'obtenir des comportements au niveau macro uniquement à partir des règles d'interactions qui gouvernent les individus au niveau micro.

## La notion d'agent

**Définition 6.2.1.1 :** *Un agent est une entité physique (entité réelle) ou abstraite (entité virtuelle) plongée dans un environnement sur lequel elle est capable d'agir. Il dispose d'une capacité de perception et de représentation partielle de l'environnement et peut communiquer avec d'autres agents. Un agent possède un ensemble de tendances (objectifs, fonction de satisfaction, etc.) et peut agir d'une façon autonome afin d'atteindre ses objectifs.*

De par sa définition, un agent est donc une entité réelle ou abstraite caractérisée par son autonomie dans la prise de décision, ses connaissances sur lui-même et sur les autres agents, et sa capacité à agir sur l'environnement dans lequel il évolue. La structure d'un agent peut être représentée par la figure suivante :

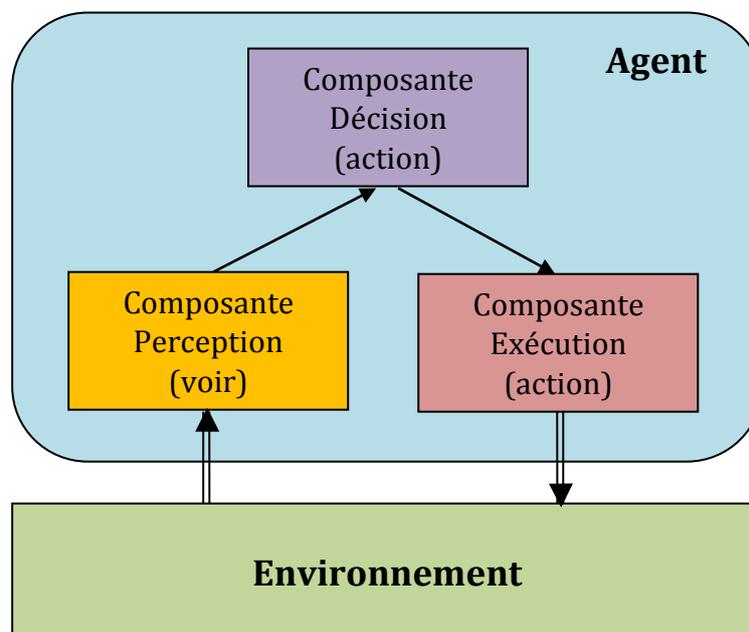


Figure 49 : Structure d'un agent

Dans la littérature, il existe deux (2) types d'agents, à savoir les agents cognitifs et les agents réactifs. Les agents cognitifs disposent d'une représentation explicite de leur environnement et d'une mémoire leur permettant de tenir compte du passé. Les agents cognitifs sont très complexes à mettre en œuvre et seul un petit nombre peut être utilisé. Quant aux agents réactifs, ils n'ont ni une connaissance explicite de leur environnement, ni une mémoire de leur histoire. Ce type d'agents pose des actions en réponse à des stimuli de l'environnement. Il est plus aisé d'utiliser un très grand nombre d'agents réactifs dans la modélisation d'une réalité. Cependant, la frontière entre la nature cognitive et réactive des agents n'est pas très nette dans de nombreuses situations. Dans de nombreuses applications réelles, on peut trouver des agents jouant des rôles à la fois cognitifs et réactifs (agents hybrides). Pour des questions d'efficacité, il faudrait mieux s'affranchir d'une telle distinction en se concentrant sur la représentation des agents et leurs interactions selon les réalités de l'environnement modélisé.

## Les systèmes multi-agents

**Définition 6.2.1.2 :** *On appelle système multi-agents (ou SMA), un sextuple  $\mathfrak{S} = (\mathcal{E}, \mathcal{A}, \mathcal{O}, \mathcal{R}, \mathcal{P}, \mathcal{L})$  désignant un système composé de :*

- 1) *Un espace vectoriel  $\mathcal{E}$  muni d'une métrique. Cet espace représente l'environnement (en général le plan réel muni de la distance euclidienne).*
- 2) *Un ensemble  $\mathcal{A}$  représentant l'ensemble des agents. Les agents sont les entités actives du système.*
- 3) *Un ensemble  $\mathcal{O}$  représentant l'ensemble des objets de l'environnement. Les objets sont les entités passifs du système et peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents. Leur position peut être déterminée à chaque instant.*
- 4) *Un ensemble  $\mathcal{R}$  représentant l'ensemble des relations qu'entretiennent les agents entre eux ou les objets entre eux.*
- 5) *Un ensemble  $\mathcal{P}$  représentant les différentes opérations permettant aux agents de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler les objets.*
- 6) *Un ensemble  $\mathcal{L}$  désignant l'ensemble des lois de l'univers modélisé. Il s'agit des règles d'application des opérations et la réaction de l'environnement suite à ces tentatives de modification.*

Un système multi-agents peut donc être considéré comme un système distribué composé d'un ensemble d'agents situés dans un certain environnement. Ces agents interagissent entre eux selon un système de communication spécifique. Le mode de communication entre les agents est donc fondamental dans la mise en œuvre des SMA. Le mode de communication est aussi lié à la manière dont les agents perçoivent leur environnement et interagissent avec celui-ci. D'une manière générale, dans un SMA, chaque agent a une vue partielle de l'environnement. Il ne perçoit l'environnement que de manière locale. De ce fait, il n'y a aucun contrôle global dans un système multi-agents, mais des comportements individuels localisés sur des parties de l'environnement.

Du point de vue théorique, la communication est un domaine extrêmement vaste et les nombreuses théories y afférents se sont développées dans plusieurs domaines comme la sociologie, la psychologie, etc. La communication désigne l'ensemble de processus physiques et psychologiques par lequel s'effectue l'opération de mise en relation d'un émetteur avec un ou plusieurs récepteurs, dans l'intention d'atteindre certains objectifs. Il s'agit d'une forme particulière d'action ayant pour objectif, non pas de transformer l'environnement, mais plutôt de modifier les schémas de représentations mentales des agents récepteurs (buts, croyances, etc.). Elle peut revêtir plusieurs formes (ordre, information, etc.). Dans le contexte des SMA, comme le souligne si bien J. Ferber, la communication n'est pas une simple question d'entrée-sortie classique dans les systèmes informatiques, il faut plutôt la modéliser comme un acte pouvant influencer sur l'état des autres agents de l'environnement.

## L'organisation des SMA

Il existe deux (2) types principaux de systèmes multi-agents, à savoir les SMA à contrôle centralisé et les SMA à contrôle distribué. Dans un SMA à contrôle centralisé, les agents ne communiquent pas directement. Ils perçoivent l'environnement à travers un espace commun et global de partage d'informations qui leur sert de réserve de stimulus et dont l'évolution leur permet d'agir et de modifier leur comportement. La communication est donc indirecte et implicite, elle se fait par partage d'informations. L'architecture d'un tel SMA est donnée par la figure suivante :

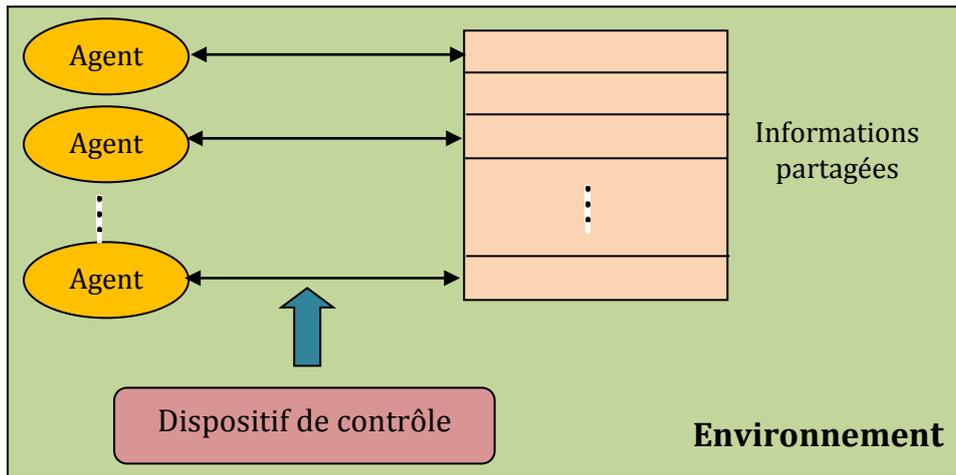


Figure 50 : Exemple de communication par partage d'informations

Contrairement aux SMA à contrôle centralisé, dans les SMA à contrôle distribué, les agents communiquent directement entre eux grâce à des messages qu'ils s'envoient les uns aux autres de manière explicite. L'agent récepteur d'un message peut modifier son comportement ou pas en toute autonomie selon ses propres buts, le niveau de ses ressources et conformément à sa propre stratégie. Un exemple d'architecture d'un SMA à contrôle distribué est donné par la figure suivante :

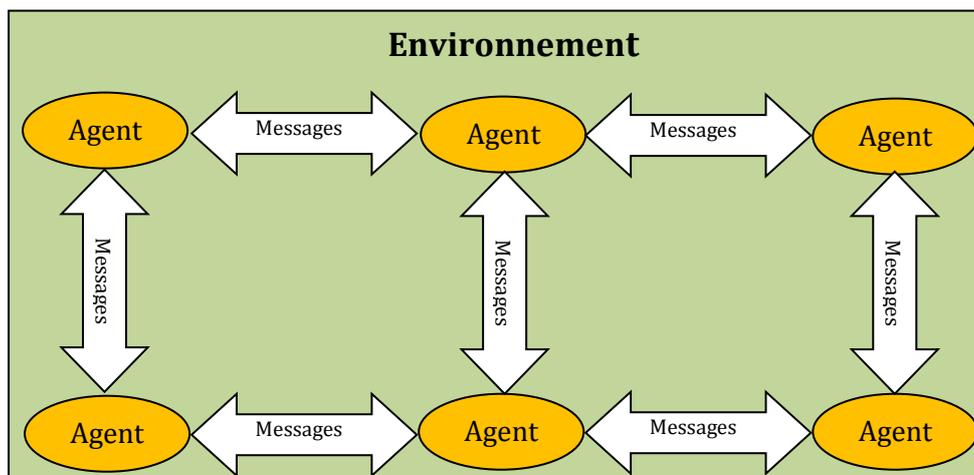


Figure 51 : Exemple de communication par envoi de messages

## 6.2.2) LA SOLUTION TECHNOLOGIQUE NETLOGO

### Implémentation d'un SMA

Un SMA est avant tout un modèle informatique basé sur la description des agents, des interactions entre ces agents et l'environnement dans lequel ils évoluent. Il s'agit donc de programmer, au sens informatique du terme, cette description à l'aide d'un outil approprié. A cet effet, plusieurs solutions existent dans de nombreux langages de programmations (Scala, Java, Small Talk, C, etc.). Malheureusement, ces langages sont relativement complexes à utiliser et nécessitent une solide base en programmation. Cependant, il existe des langages plus simples dont le langage Logo développé pour apprendre la programmation aux enfants de façon ludique. Une version plus puissante de ce langage (NetLogo) a été développée et adaptée au développement des SMA. En réalité, NetLogo est à la fois un langage de programmation et un logiciel dédié au développement de modèles de simulation multi-agents. Il s'agit d'une des solutions les plus simples qui existe dans ce domaine, mais qui reste extrêmement puissante pour des applications industrielles. Dans le cadre de la simulation des processus de résilience sociale, NetLogo est la plateforme et le langage idéal. Hormis son apprentissage relativement simple par rapport aux autres outils existants, les deux modes de communications peuvent être implémentés et même combinés dans le modèle de simulation développé. Le modèle est développé sur la plateforme qui sert aussi à l'exploitation du modèle par l'utilisateur final. La figure suivante présente l'environnement de simulation de NetLogo (onglet « Interface ») avec un exemple de modèle simulant la dynamique de propagation du VIH-SIDA au sein d'une population d'individus (les agents) :

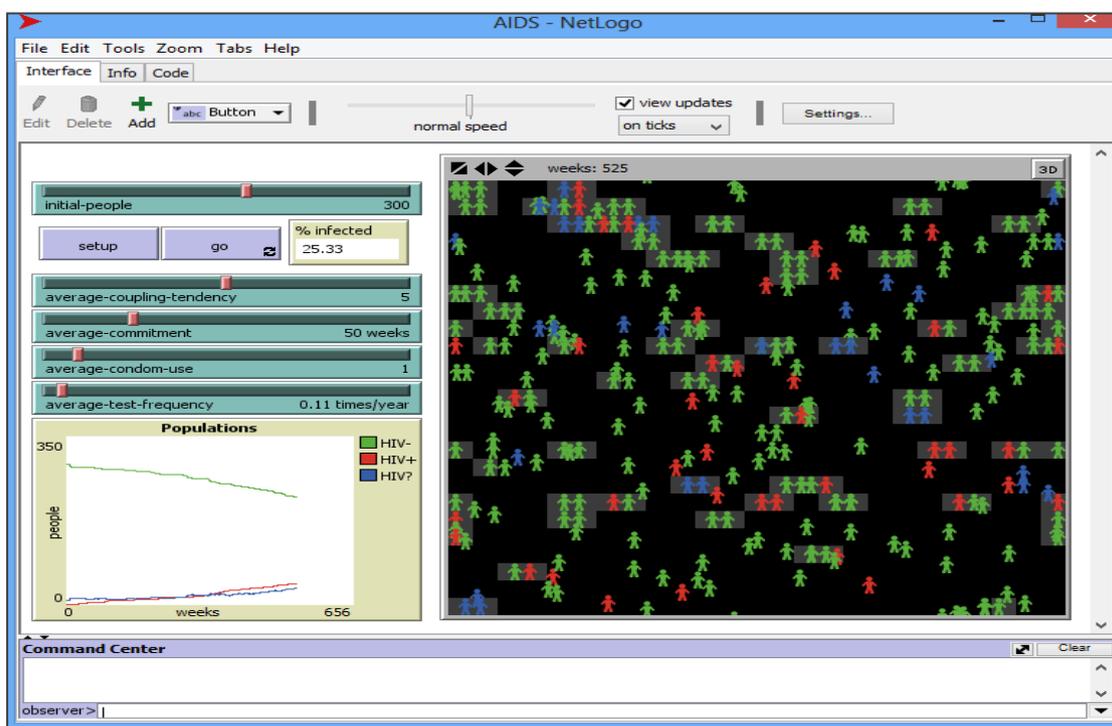


Figure 52 : Exemple d'un SMA dans NetLogo

Dans l'environnement NetLogo, l'onglet « Code » fournit l'interface de codage permettant de programmer le modèle en utilisant le langage NetLogo. La figure suivante présente une partie du code du modèle de simulation de la propagation du VIH-SIDA ci-avant présenté :

```

to setup-globals
  set infection-chance 50    ;; if you have unprotected sex with an infected partner,
                           ;; you have a 50% chance of being infected
  set symptoms-show 200.0  ;; symptoms show up 200 weeks after infection
  set slider-check-1 average-commitment
  set slider-check-2 average-coupling-tendency
  set slider-check-3 average-condom-use
  set slider-check-4 average-test-frequency
end

;; Create carrying-capacity number of people half are righty and half are lefty
;; and some are sick. Also assigns colors to people with the ASSIGN-COLORS routine.
|
to setup-people
  crt initial-people
  [ setxy random-ycor random-ycor
    set known? false
    set coupled? false
    set partner nobody
    set partner nobody
    ifelse random 2 = 0
      [ set shape "person righty" ]
      [ set shape "person lefty" ]
    ;; 2.5% of the people start out infected, but they don't know it
    set infected? (who < initial-people * 0.025)
    if infected?
      [ set infection-length random-float symptoms-show ]
    assign-commitment
    assign-coupling-tendency
    assign-condom-use
    assign-test-frequency
    assign-color ]
end

```

Figure 53 : Exemple de code NetLogo

Une fois la description spécifiée et programmée, l'essentiel de l'usage des SMA consiste à simuler le comportement des agents dans l'environnement en faisant varier les paramètres ajustables du modèle. Un tel modèle computationnel dans le contexte de la résilience, est sans aucun doute, un outil idéal pour la simulation de la dynamique d'évolution des états de résilience des individus dans le temps.

### 6.3) LES MODELES DE DYNAMIQUE INDIVIDUELLE

Les modèles de dynamique individuelle sont des modèles de simulation multi-agents. Il s'agit donc de programmes informatiques basés sur une description des règles régissant l'évolution des individus suite aux valeurs prises par les différentes variables d'actions. Ces modèles sont des modèles de simulation du comportement d'un ensemble d'agents dans un environnement donné. Dans le cadre de la modélisation de la résilience, il s'agit de préciser à quoi correspond un agent, les relations qu'entretiennent ces agents ainsi que les variables permettant aux agents de percevoir et d'agir sur leur environnement.

Dans le contexte des politiques de résilience, les actions elles-mêmes constituent des variables, ainsi que certains paramètres nécessaires. Les modèles de dynamique individuelle sont donc composés de paramètres et de relations.

### 6.3.1) LES PARAMETRES DE DYNAMIQUE INDIVIDUELLE

#### **Les agents**

Ce sont essentiellement les individus ayant subi le choc traumatique considéré. Une proportion de ces individus est résiliente et une autre ne l'est pas. L'enjeu du modèle est de pouvoir visualiser interactivement l'évolution des états de vulnérabilité représentant les capacités de rebond des individus dans le temps. Le taux initial d'individus dans chaque état de vulnérabilité est donc un paramètre important des modèles de dynamique individuelle.

#### **L'environnement**

L'environnement est l'espace physique dans lequel évoluent les individus. Il s'agit ici d'un système de coordonnées géométriques définissant un espace vectoriel. Dans cet espace, la position de n'importe quel individu est parfaitement connue à partir de ses coordonnées.

#### **Les actions**

La dynamique des individus est étudiée afin de vérifier l'efficacité des actions retenues sur la croissance de la résilience des individus. C'est justement la possibilité de modifier des modalités des actions qui est à la base de la simulation afin d'en identifier celles qui sont optimales au sens de l'accroissement de la capacité de rebond des individus. Ainsi, les différentes actions sont des paramètres des modèles de dynamique individuelle

#### **Les variables de simulation**

Certaines variables sont nécessaires pour effectuer des simulations. Elles permettent d'initialiser le modèle et de modifier l'état initial de l'environnement. Dans les modèles de dynamique individuelle, la taille de la population initiale, les taux initiaux d'individus se trouvant dans chaque état de vulnérabilité sont des variables de simulations essentielles.

#### **Les atouts individuels**

Dans les modèles de dynamique individuelle, il est possible de prendre en compte les atouts individuels. Pour ce faire, il suffit de définir des variables correspondant à chaque caractéristique individuelle à prendre en compte (âge, situation matrimoniale, salaire, etc.). Les atouts individuels comprennent bien certaines caractéristiques de groupes dans lesquels se trouvent ces individus.

### 6.3.2) LES RELATIONS DE DYNAMIQUE INDIVIDUELLE

#### La dynamique de rebond

Dans les modèles de dynamique individuelle, les conditions de passage des individus d'un état de vulnérabilité à un autre doivent être explicitement définies. Cette définition peut comprendre des équations mathématiques, des règles logiques, etc. Cependant, l'attribution d'un état de rebond à un agent doit être clairement programmée et le changement d'état correspondant doit être appliqué en temps réel sur l'individu dans son évolution dans l'environnement.

#### Les stratégies individuelles

La prise en compte des stratégies individuelles consiste à définir les règles qui gouvernent la prise en compte des variables d'atouts individuels dans la modification des autres variables décrivant la dynamique des individus.

La figure suivante présente le prototype d'un exemple de modèle de dynamique individuelle développé avec NetLogo. Pour des raisons de simplification, on admettra que les individus résilients sont ceux qui ont un degré de rebond supérieur à 50% et les autres sont considérés comme non résilients :

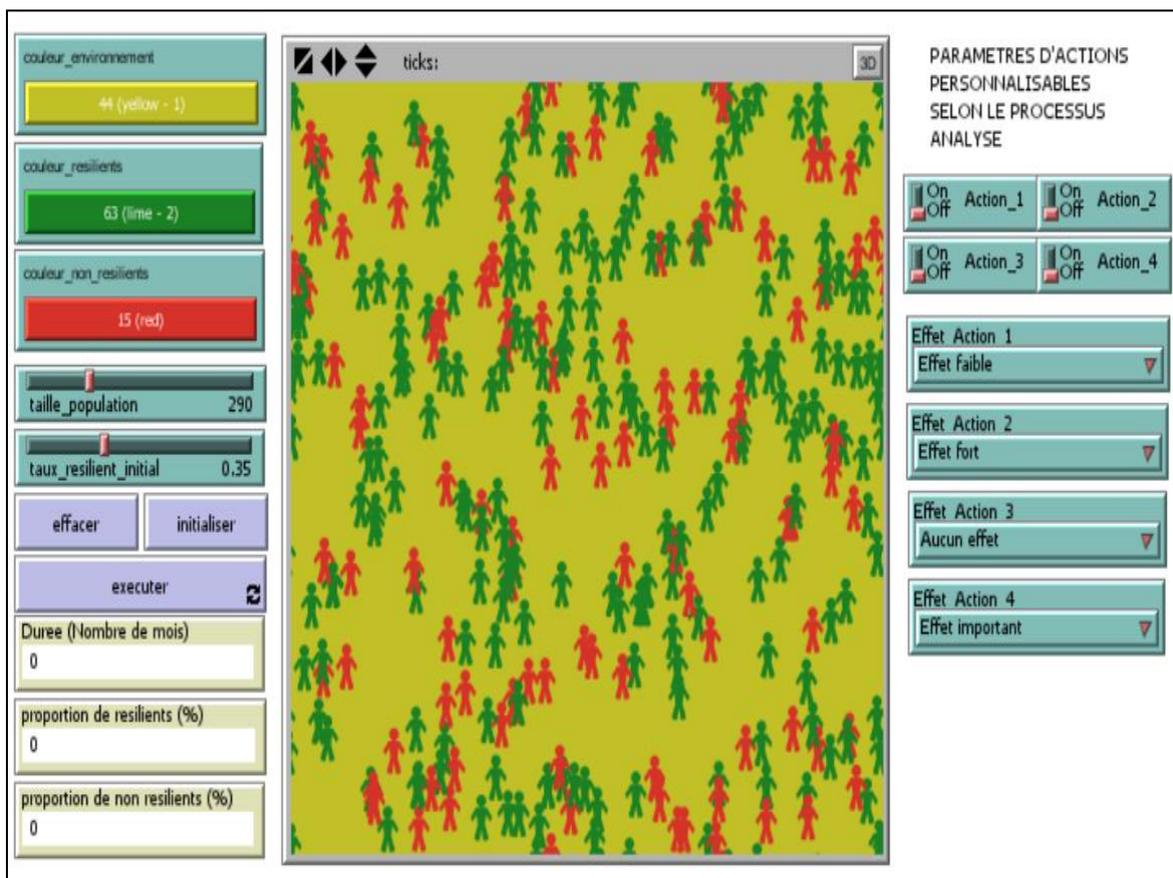


Figure 54 : Exemple de modèle de dynamique individuelle

---

**PARTIE IV : L'APPLICATION  
PRATIQUE DE LA PROPOSITION  
D'UNE RÉSILIOMÉTRIE**

---

---

# CHAPITRE 7 : LA PRATIQUE DE LA MODELISATION RESILIOMETRIQUE

---

L'objectif final de la Résiliométrie est de rendre opérationnel le concept de résilience en utilisant une approche computationnelle de modélisation. L'intérêt des théories et modèles résiliométriques réside dans leur application sur des cas pratiques. Il subsiste cependant une question de taille, à savoir, comment utiliser concrètement la Résiliométrie sur des cas réels et concrets. Cela passe par la clarification de la méthodologie à adopter pour une étude des processus de résilience par l'approche résiliométrique. L'objet de ce chapitre est de présenter toute la méthodologie nécessaire pour une application de la Résiliométrie ainsi qu'une application de quelques méthodes résiliométriques sur des données réelles issues du cas pratique de l'étude du processus de résilience face à la crise ivoirienne dans la ville de Bouaké.

---

## 7.1) LE PROTOCOLE DE COLLECTE DE DONNEES EN RESILIOMETRIE

---

Le processus de collecte de données est le point d'entrée de l'application des techniques de la Résiliométrie. Si les données ne sont pas collectées comme l'exigent les algorithmes, les méthodes seront inutilisables. Pour collecter des données sur les processus de résilience, trois éléments doivent guider la conception à savoir le type d'étude, les individus et les variables. Dans les analyses de base, il existe trois types d'études résiliométriques :

- Etude du choc
- Etude des processus de résilience
- Etude des actions

L'étude du choc consiste à rechercher les principales causes du choc traumatique considéré et éventuellement les effets. Les études des processus de résilience, elles, consistent à mesurer la résilience et ses dimensions, étudier les capacités de rebond des individus, identifier d'autres états cognitifs latents chez les individus, déterminer les profils des individus se trouvant dans les différents état de vulnérabilité, étudier les relations entre les dimensions de la résilience, déterminer les trajectoires d'espoir à la résilience des individus et prévoir l'état de résilience des individus à partir de la perception qu'ils ont de leur propre situation de souffrance. Quant aux études des actions, elles visent essentiellement à analyser le niveau d'efficacité des actions déjà menées ou à découvrir les plus susceptibles d'avoir un impact positif significatif sur la croissance de la résilience des individus.

### 7.1.2) INDIVIDUS ET DYNAMIQUE

Les individus utilisables dans la collecte de données sur la résilience sont ceux ayant subi le choc traumatique considéré. En théorie, tout individu traumatisé peut être une source d'information acceptable. Cependant, la nécessité d'analyser la dynamique de la résilience impose, dans l'idéal, un suivi régulier des mêmes individus initialement utilisés pour la collecte de données dans le temps. Les études de la résilience exigent donc un panel d'individus sur lesquels les mêmes informations sont collectées de temps en temps.

Il est donc important, pour une question de fiabilité des informations et de faisabilité des études de résilience, de s'assurer de la disponibilité des individus pour une étude sur le long terme. Ainsi, la motivation des individus est un paramètre à prendre en compte dans toute étude de la résilience. Les données nécessaires pour une meilleure étude des processus de résilience sont donc essentiellement des données de panels (ou données longitudinales). Il s'agit de collecter les mêmes informations sur un nombre prédéfini d'individus sur plusieurs périodes.

Cependant, la plupart des modèles résiliométriques fournissent des versions statiques qui rendent possibles les études ponctuelles sur des individus utilisés une seule fois. Le seul problème réside dans l'impossibilité de prendre en compte les aspects dynamiques, lorsque les études ponctuelles sont répétées sur des individus différents à chaque fois.

#### **Caractérisation des individus**

Bien que les informations dynamiques soient collectées sur les différents individus traumatisés du panel, la mise en relief des spécificités des différents états ne peut se faire que par des caractéristiques structurelles propres à ces panélistes. Ainsi, les panélistes seront caractérisés par un certain nombre d'attributs relativement stables dans le temps, du moins constants sur un long terme. Ces informations concernent en général des caractéristiques socioculturelles comme le sexe, la région ou la zone d'habitation, le type d'habitat, la race ou l'ethnie, la date de naissance, la religion, etc. Ces caractéristiques sont en général qualitatives, même s'il n'est pas exclu de collecter des informations de nature numérique comme l'âge, la taille, etc.

La principale propriété de ces données structurelles est qu'elles ont une chance très faible de changer significativement tout au long de la période de suivi des panélistes. Ainsi, Dans le protocole de collecte de données, une matrice de caractérisation des panélistes doit être mise en place dès l'opération de constitution du panel. La constitution de cette matrice demande un questionnaire ou formulaire approprié et dédié uniquement à la collecte des informations structurelles sur les panélistes.

## 7.1.2) VARIABLES ET DIMENSIONS

La conception des variables dépend du type d'étude à mener. Certaines études nécessitent des variables latentes décrites par des variables manifestes. D'autres demandent des variables observables ne décrivant aucune variable latente.

### **Etudes des actions**

Dans les études des actions, les données collectées se réduisent uniquement à l'appréciation du niveau d'efficacité de chaque action par les différents individus. A chaque action est associée une variable. Dans ce type d'études, l'identification des variables nécessaires se réduit donc à l'identification des actions dont l'efficacité est à étudier. La collecte de données suit la structure décrite par le tableau suivant :

Tableau 10 : Variables des études des actions

Types de variables	Variables latentes	Variables manifestes
Actions entreprises ou à entreprendre	(pas de variables latentes)	L'appréciation de l'efficacité de la 1 <sup>e</sup> action
		L'appréciation de l'efficacité de la 2 <sup>e</sup> action
		Etc.

### **Etudes des chocs**

Dans les études des chocs, trois éléments doivent être considérés à savoir les causes du choc, les effets du choc et le choc lui-même. Chaque cause et chaque effet doivent être définis à un niveau de concept car il s'agit de variables latentes. De même, le choc lui-même est considéré comme une variable latente. Ainsi, les causes et les effets sont des concepts qui doivent être décrits par des variables numériques observables censées les caractériser. Quant au choc lui-même en tant que variable latente, il doit être décrit par un ensemble de variables numériques permettant d'apprécier l'intensité du choc. La collecte de données suit donc la structure décrite par le tableau suivant :

Tableau 11 : Variables des études des chocs

Types de variables	Variables latentes	Variables manifestes
Causes du choc	1 <sup>e</sup> cause	Les variables décrivant la 1 <sup>e</sup> cause
	2 <sup>e</sup> cause	Les variables décrivant la 2 <sup>e</sup> cause
	Etc.	Etc.
Effets du choc	1 <sup>e</sup> effet	Les variables décrivant le 1 <sup>e</sup> effet
	2 <sup>e</sup> effet	Les variables décrivant le 2 <sup>e</sup> effet
	Etc.	Etc
Intensité du Choc	Choc	Les variables décrivant l'intensité du choc

## Etudes des processus de résilience

Dans les études des processus de résilience, presque toutes les variables collectées sont des variables quantifiées numériquement décrivant des dimensions. La notion de dimension de résilience est fondamentale et doit guider la conception des variables. Chaque dimension prise en compte est donc décrite par un certain nombre de variables manifestes. Il est très important, d'associer à chaque variable manifeste décrivant une dimension, la limite minimale à partir de laquelle l'individu « enquêté » considère qu'il y a un problème relativement à la caractéristique décrite par cette variable. En plus de ces variables, l'auto-appréciation de leur situation de souffrance doit être collectée sur les individus. Cette variable qualitative est essentielle pour pouvoir effectuer une prévision de la résilience effective des individus. La collecte de données suit donc la structure décrite par le tableau suivant :

Tableau 12 : Variables des études des processus de résilience

Types de variables	Variables latentes	Variables manifestes
Dimension de la résilience	1 <sup>e</sup> dimension	Les variables décrivant la 1 <sup>e</sup> dimension
		Les limites des variables de la 1 <sup>e</sup> dimension
	2 <sup>e</sup> dimension	Les variables décrivant la 2 <sup>e</sup> dimension
		Les limites des variables de la 2 <sup>e</sup> dimension
	Etc.	Etc.
Situation de souffrance	(pas de variable latente)	Auto-perception de la situation de souffrance

La définition des dimensions à prendre en compte dépend des particularités de l'étude et du domaine d'application de la Résiliométrie. En ce qui concerne le domaine des sciences sociales, en partant des travaux réalisés par de nombreux auteurs, un travail synthétique sur les dimensions de la résilience a été effectué dans le cadre de cette thèse. Ce travail a permis de retenir dix dimensions jugées fondamentales dans les processus de résilience sociale.

### 7.1.3) LES DIMENSIONS DE LA RESILIENCE SOCIALE

L'analyse de la résilience, du moins par l'approche résiliométrique, reste tributaire aux dimensions retenues. Même s'il n'est pas possible de figer les dimensions pour tous les domaines dans lesquelles le concept de résilience est applicable, il est possible, pour un domaine bien spécifique, d'en fournir une orientation, voire un standard. C'est dans ce contexte que, sur la base de nombreuses études et travaux de recherches, les auteurs Coulibaly Tiekoura, Achiépo Odilon et al ([COU15]) ont proposé dix dimensions de la résilience sociale. Ces dimensions se veulent universelles sans que les indicateurs utilisés pour les caractériser soient figés car ceux-ci dépendent en grande partie de l'objectif et des contraintes de l'étude.

Les dimensions retenues résultent d'une synthèse de celles proposées par plusieurs auteurs et organismes. Plus précisément, ces dimensions sont issues des travaux de Boris Cyrulnick, de Berkes, Colding et Folke, de Hollnagel et al., de Woods (2006), de Westrum (2006), de Wolin (1995), de Manciaux (1999), de Vanistendael et Lecomte (2000), de l'USAID (2011), de Connor et Davidson (2003), de Lyons (1991), de Clausen (1993), de Werner (2001), de Werner et Smith (1992), de Rutter (1985), de Jean-Michel Reinert (2013), de Achiépo Odilon (2014) et de Kouadio Odounfa Alice (2015). En plus de ces auteurs, les dimensions prises en compte incluent celles utilisées dans l'élaboration d'outils de mesure de la résilience comme la « résilience scale for adults » (RSA) proposée par Odin Hjemdal, Oddgeir Friborg, Monica Martinussen et H. Rosenvingeen (2001), et la « Connor Davidson Resilience Scale » (CD-RISC) issue des travaux de Kathryn Connor et Jonathan Davidson (2003). Le choix de ces dimensions est effectué selon trois critères essentiels. Tout d'abord, la fréquence de la dimension (ou ses synonymes) dans les différents travaux. Ensuite, le degré de corrélation de la dimension avec la notion de résilience et la crédibilité de la source de publication. Enfin, l'importance que la dimension proposée accorde aux aspects personnels et environnementaux de la résilience. Suite à ce travail, les dix dimensions essentielles de la résilience sociale sont les suivantes :

- 1) Le sens de la cohérence
- 2) La prise de conscience
- 3) Le sens de l'humour
- 4) Le sentiment de non culpabilité
- 5) L'attitude pro-sociale
- 6) L'habileté à résoudre des problèmes
- 7) La perception d'efficacité
- 8) L'adaptation au milieu
- 9) Le sentiment de contrôle interne
- 10) La spiritualité

### **Le sens de cohérence**

C'est un caractère qui peut aider un individu à prévenir une déstructuration et une rupture en cas de situation très stressante. Ce sentiment suggère un recul, une objectivation et une analyse de la situation adverse. Les personnes qui ont un sens de cohérence élevé peuvent s'avérer moins facile à atteindre sur le plan du comportement et de l'émotivité par les stressseurs qu'elles subissent. De plus, le sens de la cohérence détermine la capacité à maîtriser les incohérences et les événements de la vie.

### **La prise de conscience**

C'est la capacité à identifier les problèmes, leurs sources et à chercher des solutions tout en étant à l'écoute des autres. La prise de conscience caractérise les individus sur lesquels une action efficace peut être menée et connaître un succès. Les individus n'ayant pas pris conscience de leur situation de souffrance ne peuvent devenir résilients.

### **Le sens de l'humour**

Cette capacité est, selon Freud, la plus élevée de toutes. Elle est très étudiée dans les recherches sur la résilience. On en trouve dans les travaux de B. Cyrulnik, de Stefan Vanistendael et de Jacques Lecomte. Gisèle Tessier définit l'humour comme « un état d'esprit qui permet de surmonter les contrariétés et les chagrins en les tournant en dérision. Ainsi sont mis à distance, par le sourire, les affects trop pénibles; l'humour est donc une ressource pour nous sortir des épreuves ».

### **Le sentiment de non culpabilité**

La culpabilité est un sentiment qui se manifeste souvent par de l'angoisse et/ou une dépression fréquente. On la définit comme une émotion relative à un individu ou à un groupe social et qui repose sur le sentiment, qu'il soit justifié ou non, que l'on porte une responsabilité personnelle dans un événement fâcheux. Ainsi, pour beaucoup de chercheurs, avoir un sentiment de non culpabilité, contribue fortement à la résilience de l'individu.

### **L'attitude pro-sociale**

Les attitudes pro-sociales permettent à un individu, lorsque le besoin se fait sentir, d'avoir recours à des ressources et à un soutien social tel qu'un tuteur. Tous les auteurs préoccupés par le concept de la résilience en viennent à mentionner les relations avec autrui et l'importance, pour l'individu, d'avoir des attitudes pro-sociales et des aptitudes relationnelles lui permettant d'établir des contacts avec les autres.

### **L'habileté à résoudre les problèmes**

Cette caractéristique correspond à l'aptitude à chercher des solutions aux problèmes qui se posent, à trouver des ressources. Elle est un gage de l'action pour les individus, étant entendu que l'habileté à résoudre les problèmes est une caractéristique fondamentale de la résilience.

### **La perception d'efficacité personnelle**

Cette dimension concerne les croyances des personnes en leurs capacités à réaliser leurs ambitions. Il n'y a rien à attendre des individus qui projettent une image négative d'eux-mêmes car la perception que l'on a de soi détermine notre disposition mentale à la résilience.

### **L'adaptabilité aux milieux**

Le milieu de vie ou de travail peut influencer positivement ou négativement l'individu. La capacité d'adaptation à ce milieu est donc une caractéristique importante permettant à l'individu d'activer son processus de résilience quel que soit le milieu dans lequel il se trouve.

### **Le sentiment de contrôle interne**

Ce sentiment incite l'individu à croire qu'il a personnellement le contrôle sur une situation. Il permet à une personne d'être active dans la résolution d'un problème étant donné sa conviction de pouvoir modifier une situation.

## La spiritualité

Certains spécialistes des sciences humaines avancent que la spiritualité est un facteur qui contribue hautement à la résilience. Elle est l'un des facteurs qui donne du sens à la vie. Elle se réfère au sens, au but et aux valeurs de la vie humaine. Les croyances spirituelles peuvent conduire à la résilience lorsque les actions sociales sont inefficaces.

---

## 7.2) LES ELEMENTS D'ANALYSE RESILIOMETRIQUE

---

### Les solutions d'analyse résiliométrique de base

La plupart des modèles et théories résiliométriques sont implémentés à l'aide du langage R ([JON09], [RCO13], [RIH96]) sous la forme de fonctions. Le tableau suivant donne les principales solutions analytiques de base de la Résiliométrie :

Tableau 13 : Solutions analytiques de base de la Résiliométrie

N	Fonctions R développées	Objectifs de l'analyse	Types de données	
			Instantanées	Panels
1	<b>rkmeasure()</b>	Mesure de la résilience et de ses dimensions	×	×
		Identification des états de vulnérabilité des individus	×	×
		Détermination du profil des individus des différents états de vulnérabilité	×	×
		Calcul des paramètres d'espoir à la résilience		×
		Calcul des paramètres de dynamique d'évolution des états de vulnérabilité		×
2	<b>rklatent()</b>	Classification des individus selon leurs états cognitifs latents	×	×
		Détermination des profils des individus se trouvant dans les différents états cognitifs latents	×	×
3	<b>rkespoir()</b>	Calcul des trajectoires des espoirs que les individus ont de devenir résilients		×
4	<b>rkdimension()</b>	Identification des interactions entre les dimensions	×	×
5	<b>rkchoc()</b>	Analyse de la significativité des causes et des effets du choc	×	

Les algorithmes ont été développés à l'aide du langage R. Les solutions analytiques de base de la Résiliométrie disposent de versions utilisables sur des données en coupes instantannées (collectées en une seule fois) et de versions utilisables sur des données de panels (collectées plusieurs fois sur les mêmes individus). Les analyses sur données de panels possèdent l'avantage de prendre en compte l'aspect dynamique de la résilience. La fonction de base est la fonction **rkmeasure** dont les résultats sont exploités par la plupart des autres fonctions. En pratique, l'usage de ces fonctions nécessite que l'utilisateur soit initié au logiciel R. Une telle initiation doit être prévue dans la vulgarisation de la Résiliométrie.

Outre les méthodes disponibles sous forme de fonctions R, deux types de modèles nécessitent une interaction avancée avec l'utilisateur. En effet, leur usage nécessite que l'utilisateur modifie interactivement certains paramètres et observe leurs effets. Pour ce faire, il est plus judicieux de se référer à des outils logiciels fournissant de telles fonctionnalités. Les modèles qui sont proposés dans ce cadre sont des prototypes devant être adaptés par l'utilisateur en fonction de la réalité modélisée. Le tableau suivant donne les solutions analytiques de la Résiliométrie nécessitant l'usage d'un logiciel spécialisé :

Tableau 14 : Solutions analytiques prototypes de la Résiliométrie

N	Objectifs de l'analyse	Prototypes de modèles développés	Outils logiciels	Types de données	
				Statiques	Panels
1	Analyse de l'efficacité des actions entreprises ou à envisager	Modèles de variables d'action	GeNIes	×	×
2	Simulation de l'évolution des états de résilience des individus selon les combinaisons d'actions	Modèles dynamiques individuelles	NetLogo		×

L'utilisation des prototypes de modèles nécessite que l'utilisateur se familiarise avec les plateformes logicielles correspondantes. Dans la vulgarisation de la Résiliométrie, la prise en main de ces outils doit être envisagée pour une plus grande efficacité.

### Présentation des données utilisées

Dans le cadre de cette thèse, les données utilisées sont issues de l'observatoire de la résilience dans la ville de Bouaké (Côte d'Ivoire). En effet, la Côte d'Ivoire a connu une longue période de crise militaro-politique, allant de 2002 à 2012. Cette crise a déstructuré tous les secteurs de l'activité économique et a engendré de nombreuses fractures sociales. Les régions les plus touchées sont le centre et l'ouest du pays. C'est ainsi que, dans le cadre des activités de l'UMI Résilience, la ville de Bouaké a été choisie pour mener des enquêtes relatives à la résilience de la population ([KOU14b]). Ces enquêtes sont effectuées avec quatre questionnaires destinés respectivement aux ménages, aux jeunes, aux adultes et aux personnes âgées.

Dans cette thèse, seules des données relatives aux adultes sont exploitées car ces études et les questionnaires sont élaborés en dehors du cadre de la Résiliométrie. Il est donc évident que la structure des questionnaires et la nature des données collectées ne cadrent pas complètement avec les exigences de la Résiliométrie. Certaines données nécessaires comme les bornes de résilience n'existent pas ; d'autres, comme les informations structurelles sur les panélistes ne sont pas collectées de façon explicite et directe. En plus de cela, la stratification des questionnaires ne permet pas d'utiliser les tranches d'âges (jeunes, adultes, personnes âgées) pour caractériser les différents états, étant donné que chaque catégorie d'individus est étudiée isolément. Ainsi, dans le cadre de l'application des méthodes résiliométriques, l'usage des données relatives à l'observatoire de la résilience à Bouaké est donc limité aux analyses possibles avec les données disponibles. Par conséquent, pour les besoins de présentation des résultats des méthodes non utilisables sur les données disponibles, des données simulées seront utilisées. Ces données pourront être aléatoirement générées ou composées à partir des données disponibles. Dans ces situations, les résultats n'ont aucune prétention de refléter une quelconque réalité. Il s'agit uniquement d'illustrer les méthodes résiliométriques développées.

Les données utilisées pour l'analyse de la résilience des populations adultes de Bouaké suite à la crise ivoirienne sont constituées de 22 variables issues des enquêtes de l'observatoire de la résilience de Bouaké et collectées sur 117 adultes. La résilience est étudiée en prenant en compte cinq (5) des dix dimensions énumérées relatives à la résilience sociale. La répartition de ces variables en dimensions est donnée par le tableau suivant :

Tableau 15 : Dimensions de la résilience et indicateurs retenus

DIMENSIONS	INDICATEURS	NUMERO
Sens de l'humour (SDH)	Sens de l'humour (senshum)	6.3
	Créativité (creativite)	6.12
Attitude pro-sociale (APS)	Communication (communic)	6.1
	Sociabilité (sociabilite)	6.2
	Altruiste (altruiste)	6.8
	Réseaux relationnels (relation)	6.9
Habilité à résoudre des problèmes (HRP)	Capacité à planifier (planific)	6.13
	Aptitude à chercher les solutions (solution)	6.15
	Degré d'autonomie (autonome)	6.18
Sentiment de contrôle interne (SCI)	Estime de soi (estime)	6.4
	Confiance en soi (confiance)	6.5
	Foi en son propre avenir (favenir)	6.6
Spiritualité (SPI)	Optimisme (optimisme)	6.11
	Persévérance (persever)	6.14
	Attachement à la religion (religion)	6.25

En plus des variables de description des dimensions, d'autres sont utilisées pour jouer des rôles bien précis. Le tableau suivant donne ces variables et les rôles qui leur sont assignés :

Tableau 16 : Variables retenues pour des rôles particuliers

ROLES	VARIABLES	NUMERO
Caractéristiques structurelles (variables descriptives)	Quartier (quartier)	0.3
	Exercez-vous une activité quelconque ? (activité)	1.1
	Etes-vous marié ? (mariage)	2.8
	Avez-vous été victime de violences liées à la crise ? (violence)	4.1
Variables d'intensités du choc	Situation politique actuelle (politique)	8.1
	Situation économique actuelle (économie)	8.2
Auto-perception de sa situation de souffrance	Perception des conditions de vie par rapport à l'année dernière (perception)	1.16

### Les limites des données réelles et données simulées

Les données réelles disponibles sont insuffisantes pour illustrer toutes les analyses résiliométriques possibles. En effet, ces données ne peuvent servir qu'à fournir une estimation de la résilience et de ses dimensions, et ce, dans un contexte purement statique. Il s'ensuit que, si elles sont utilisées comme telles, il est impossible d'identifier les états de résilience des individus et de calculer les profils d'évolution des états de vulnérabilité. En effet, aucune analyse dynamique ne peut être effectuée puisque ces données sont collectées en une seule fois. Pour palier ces problèmes, cette thèse aura recours à des données simulées à partir des données réelles disponibles par des procédures aléatoires, ce qui permettra de disposer des données de panels. Il est donc important de comprendre qu'en dehors des analyses statiques, tout ce qui a trait aux aspects dynamiques est essentiellement basée sur un tirage aléatoire des données censées représenter les observations des périodes suivantes. Les résultats issues des analyses dynamiques doivent être compris comme telles. Il y a donc une hypothèse relativement forte selon laquelle, les données que l'on aurait eues si on avait collecté trois fois les données sur les mêmes adultes de Bouaké suivraient un processus aléatoire tel que fournit par l'algorithme de génération aléatoire du panel proposé.

### Détermination des bornes de résilience

Une manière simple d'obtenir des bornes de résilience pour chaque caractéristique consiste à demander aux individus d'en fournir eux-mêmes. Cette pratique a l'inconvénient de conférer un caractère subjectif à ces bornes. Une autre approche consiste à générer aléatoirement les bornes de résilience dans le spectre des valeurs observées sur les individus. C'est cette option qui est utilisée dans cette thèse. Elle possède la caractéristique de n'être pas subjective. Cependant, le tirage aléatoire est critiquable car, d'un point de vue algorithmique, elles dépendent de l'ordre d'apparition des individus dans la base de données. L'idéal serait de développer des méthodes permettant de calculer les bornes de résilience individuelles sur la base de la distribution des caractéristiques étudiées. Cet aspect, non abordé dans cette thèse, pourrait faire l'objet de recherches futures.

### 7.3) LES ANALYSES RESILIOMETRIQUES SUR DONNEES STATIQUES

Les analyses statiques prennent appui sur les données extraites de l'enquête de Bouaké. Un extrait de cette base de données est donné par la figure suivante :

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	quartier	activite	mariage	violence	communic	sociabilite	senshum	estime	confiance	favenir	altruiste	relation
2	4	1	0	0	4	4	4	2	4	4	4	3
3	4	1	0	0	3	4	4	4	4	3	3	0
4	4	1	0	0	4	4	4	2	4	4	4	2
5	4	0	0	0	4	4	4	2	4	4	4	2
6	2	1	1	0	5	5	2	4	4	5	3	4
7	4	0	1	0	4	5	2	4	4	4	3	4
8	3	1	0	0	4	4	3	4	4	4	3	4
9	4	1	1	1	3	3	2	3	3	3	4	3
10	2	1	1	0	5	5	5	5	5	5	5	5
11	2	1	1	1	5	5	4	5	5	5	3	3
12	5	0	0	1	3	3	4	4	4	4	3	2
13	5	1	1	0	5	5	4	4	5	5	3	0
14	5	1	1	1	4	4	3	4	4	5	4	4
15	5	0	0	0	2	3	3	4	4	4	4	3
16	5	1	0	0	4	4	3	3	4	4	4	3
17	4	1	1	0	2	2	2	3	4	4	3	2

Figure 55 : Extrait de la base de données d'observatoire de la résilience de Bouaké

Pour illustrer toutes les méthodes résiliométriques, les analyses statiques seront effectuées en utilisant des données générées selon l'algorithme suivant :

Algorithme 21 : Prétraitement des données et génération des bornes de résilience avec R

```

1. library(xlsx)
2. base <- read.xlsx(file="dbadulte.xls", sheetIndex=1, header=TRUE)
3. base$quartier <- factor(paste("Q",base$quartier,sep=""))
4. base$activite <- factor(ifelse(base$activite==1,"Oui","Non"))
5. base$mariage <- factor(ifelse(base$mariage==1,"Marie","Seul"))
6. base$violence <- factor(ifelse(base$violence==1,"Oui","Non"))
7. base$perception <- factor(ifelse(base$perception==1,"Meilleur",
8.                             ifelse(base$perception==2,"Identique","Mauvaise")))
9. # Generation aleatoire des bornes individuelles pour les 15 capacites (var minifestes)
10. index.manif <- 5:19 # indexes des variables manifestes (dans base)
11. nbmanif <- length(index.manif)
12. set.seed(1000)
13. borne <- as.data.frame(matrix(sample(rep(seq(1,5,by=0.5),
14.                                     nrow(base)*nbmanif),nrow(base)*nbmanif),ncol=nbmanif))
15. names(borne) <- paste("b",names(base)[index.manif],sep=".")
16. # base finale
17. basef <- data.frame(base,borne)
18. # specification des indexes des types de variables dans la base.f
19. base.desc <- basef[,1:4] # variables de caracterisation
20. v.percep <- basef[,22] # variables d'auto-perceptions (qualitative)
21. mbase <- basef[,c(1:4,20:22)] # base des variables manifestes et leurs bornes
22. index.manif <- 1:15 # variables manifestes (numeriques)
23. index.borne <- 16:30 # variables de caracterisation

```

L'algorithme fournit des données pour la mise en œuvre des méthodes résiliométriques propres aux jeux de données collectés en un instant donné (coupes instantanées). On y trouve la base de données principale (**mbase**) composée non seulement des données sur les variables manifestes censées décrire les différentes dimensions de la résilience, mais aussi des bornes de résilience correspondantes aux caractéristiques (les variables manifestes) prises en compte. On y trouve aussi la base de données de description des individus (**base.desc**) constituée des informations structurelles permettant de les caractériser. Outre ces deux bases de données, les index des variables manifestes (**index.manif**) et ceux des bornes qui leur sont associées (**index.borne**) issus de la base de données principale doivent être précisés. Ces index doivent apparaître dans deux vecteurs de même longueur de telle sorte que les éléments de même indice correspondent à une variable manifeste et à sa borne respectivement.

### Implémentation avec R

Un exemple d'implémentation d'un modèle de mesure statique avec le langage R est donné par l'algorithme suivant :

---

Algorithme 22 : Mise en œuvre d'un modèle statique de mesure avec R

---

```

1. #####
2. ##### MESURE STATIQUE DE LA RESILIENCE #####
3. #####
4. source("rkmeasure.R")
5. # Spécification d'un modèle statique sans interactions
6. smodele <- "# modele de mesure
7.           SDH =~ senshum+creativite
8.           APS =~ communic+sociabilite+altruiste+relation
9.           HRP =~ planific+solution+autonome
10.          SCI =~ estime+confiance+favenir
11.          SPI =~ optimisme+persever+religion
12.          "
13. # Spécification d'un modele statique avec interactions
14. smodele <- "# modele de mesure
15.           SDH =~ senshum+creativite
16.           APS =~ communic+sociabilite+altruiste+relation
17.           HRP =~ planific+solution+autonome
18.           SCI =~ estime+confiance+favenir
19.           SPI =~ optimisme+persever+religion
20.           # interactions
21.           SPI~~APS+HRP
22.           SDH~~APS
23.           "
24. # Estimation d'un modele statique (avec ou sans interactions)
25. res.stat <- rkmeasure(smodele, mbase, index.manif, index.borne, base.desc, scale=FALSE,
26.                    igraphe=TRUE, ographe=FALSE, graphe.resilience=TRUE,
27.                    graphe.souffrance=TRUE, profil=TRUE, min.split=15)
28.
29.

```

---

L'objet « **res.stat** » contient l'estimation de la résilience (et de ses dimensions), les états de vulnérabilité de chaque individu, et plusieurs autres informations. La détermination des états de vulnérabilité est effectuée en appliquant la théorie stochastique de la résilience. Outre ces informations qui peuvent être exploitées ultérieurement, l'algorithme fournit des graphiques permettant d'avoir une appréciation rapide des grandes tendances.

### Mesure de la résilience

Les estimations de la résilience et de ses dimensions, fournies en sortie de l'algorithme sur la base des informations utilisées, sont données par le tableau suivant :

Tableau 17 : Estimations de la résilience et ses dimensions dans un cas statique

	SDH	APS	HRP	SCI	SPI	resilience
1	-0,5299756	-0,06629362	-0,368063	-0,8467757	-0,1789465	-0,4690995
2	0,03800162	-1,700939	-0,6723588	-0,4431522	-1,179163	-1,03327
3	-0,5299756	-0,4440255	-0,731537	-0,8467757	-1,550008	-0,9177702
4	-0,5299756	-0,4440255	-1,439436	-0,8467757	-1,739407	-1,136302
5	-0,9045592	0,6714168	0,09471883	0,3093361	0,01045162	0,1404717
6	-0,9045592	0,378725	-0,6131805	-0,06690802	0,4158606	-0,1724679
7	0,1346984	0,1026801	0,7835694	-0,06690802	0,0450148	0,2530704
8	-0,9045592	-0,6350303	-1,016784	-1,190422	-0,7737536	-1,088074
9	1,077259	1,466665	0,4983224	1,056606	0,3812974	1,152953
10	0,6059788	0,2936849	0,03554055	1,056606	-0,5843555	0,392868
11	0,6059788	-1,22152	0,09471883	-0,06690802	-1,808533	-0,5693656
12	0,6059788	-0,8395106	-0,6723588	0,6666724	1,192115	0,03872127
13	-0,4332788	0,3114382	1,187173	0,3093361	0,01045162	0,409315
14	-0,4332788	-0,9277221	-1,479566	-0,06690802	-0,1789465	-0,8323874
15	-0,4332788	-0,06629362	0,7835694	-0,4568419	0,0450148	-0,008785025

L'algorithme est aussi capable de fournir les graphiques du modèle externe et du modèle structurel correspondants au modèle de mesure de la résilience. Il est aussi capable de traiter aussi bien les modèles sans interactions que les modèles avec interactions. Toutes ces estimations sont effectuées au niveau individuel, qu'il s'agisse de la résilience ou de ses dimensions. En général, les modèles de mesure étant utilisés pour l'estimation de la résilience et ses dimensions, les représentations graphiques des modèles internes et externes n'ont pas un grand intérêt. En plus, en cas de nombreuses dimensions, ces graphiques peuvent devenir illisibles. Cependant, l'algorithme implémenté conserve ces possibilités pour des raisons techniques de vérification de bon fonctionnement des procédures implémentées.

### Calcul des degrés de rebond et des états de vulnérabilité

L'application de la théorie stochastique de la résilience permet d'obtenir le degré de rebond et l'état de vulnérabilité de chaque individu comme le montre le tableau suivant :

Tableau 18 : Estimation statique des degrés de rebond et des états de vulnérabilité

	paneliste	degre	vulnerabilite
1	1	60	legere
2	2	46.67	grave
3	3	46.67	grave
4	4	53.33	legere
5	5	73.33	legere
6	6	46.67	grave
7	7	80	legere
8	8	33.33	grave
9	9	93.33	legere
10	10	66.67	legere
11	11	46.67	grave
12	12	60	legere
13	13	60	legere
14	14	66.67	legere
15	15	40	grave

Comme dans le cas des modèles de mesure, le calcul des degrés de rebond et des états de vulnérabilité se font au niveau de chaque individu. L’algorithme fournit aussi un graphique de visualisation simple de l’importance des individus qui se trouvent dans chaque état de vulnérabilité comme le montre la figure suivante :

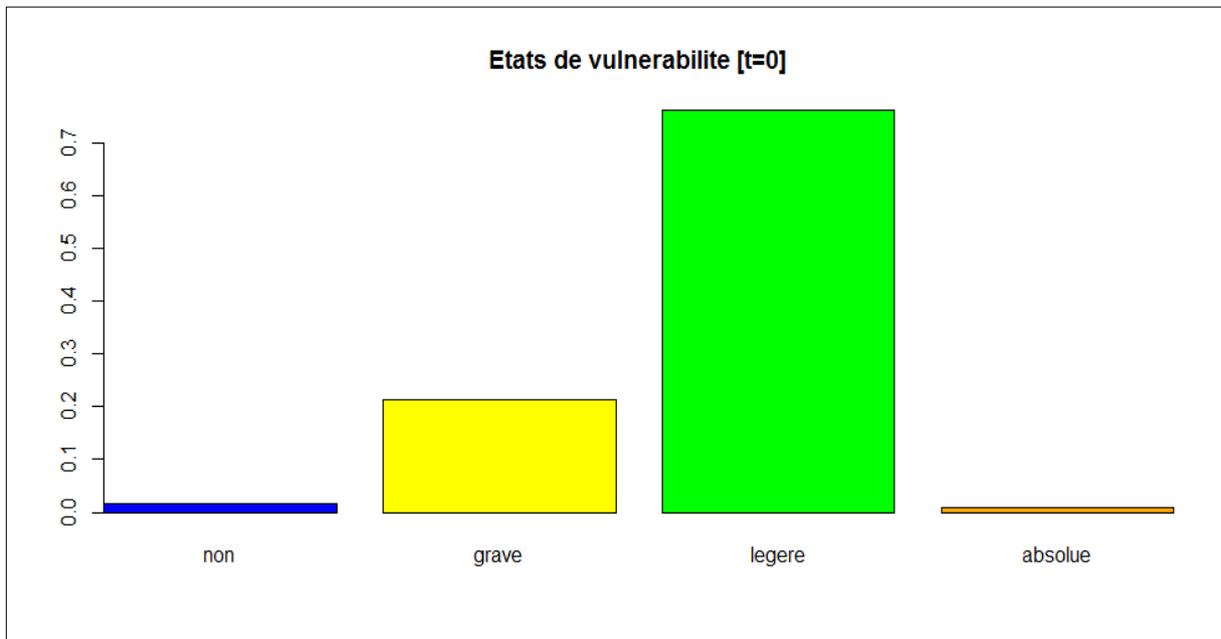


Figure 56 : Importance des états de vulnérabilité dans un cas statique

## Calcul du degré de perte de caractéristique

L'algorithme fournit aussi le degré de perte pour chaque caractéristique considérée. La figure suivante présente un tel résultat :

Tableau 19 : Estimation des degrés de perte de caractéristique

	caracteristique	degre
1	communic	36.75
2	sociabilite	35.04
3	senshum	40.17
4	estime	45.3
5	confiance	26.5
6	favenir	35.04
7	altruiste	29.91
8	relation	46.15
9	optimisme	28.21
10	creativite	45.3
11	planific	41.88
12	persever	27.35
13	solution	39.32
14	autonome	45.3
15	religion	26.5

Cette perte de caractéristique est synthétisée en ayant recours à un diagramme en bandes comme le montre la figure suivante :

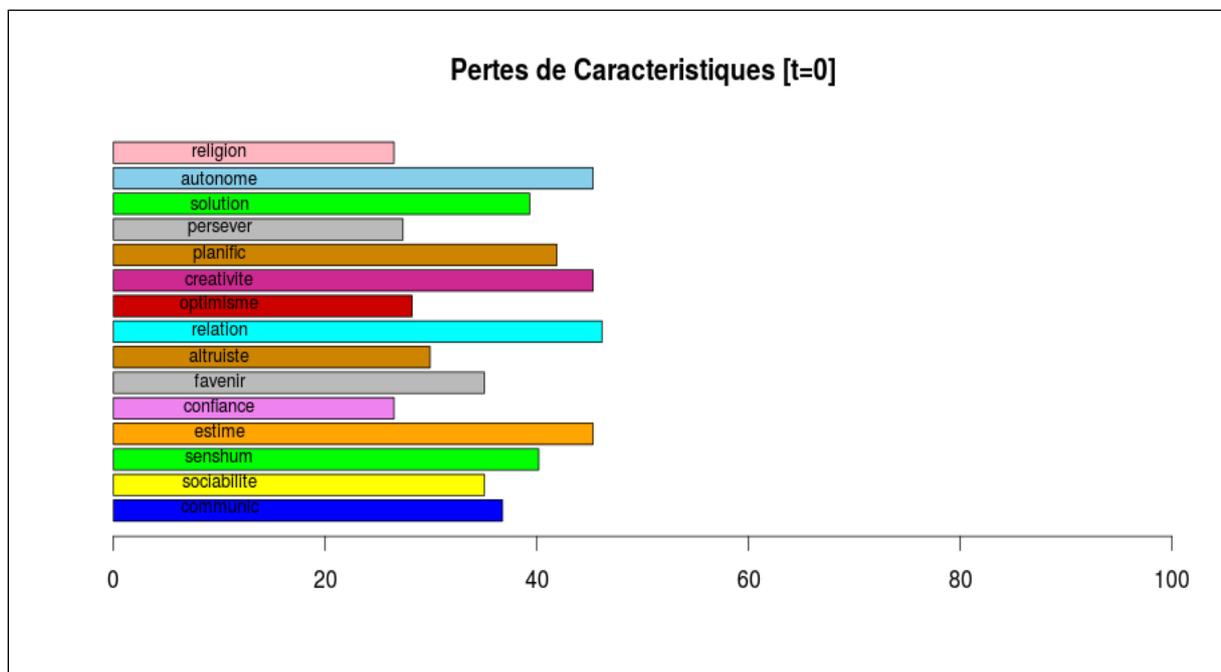


Figure 57 : Degrés de perte des caractéristiques dans le cas statique en pourcentage

Ce graphique montre que l'autonomie, la créativité, les relations et l'estime de soi sont les caractéristiques les plus altérées par le choc au sein de la population ; alors que l'attachement à la religion, la persévérance dans la vie, l'optimisme à avoir de meilleures conditions de vie et la confiance en son propre avenir sont les caractéristiques les moins altérés par le choc.

### Profil des états de vulnérabilité

La fonction **rkmeasure** est capable de fournir le profil des individus traumatisés qui sont dans chacun des états de vulnérabilité. Le graphique suivant est l'arbre de décision produit qui fournit les règles de description de chaque état :

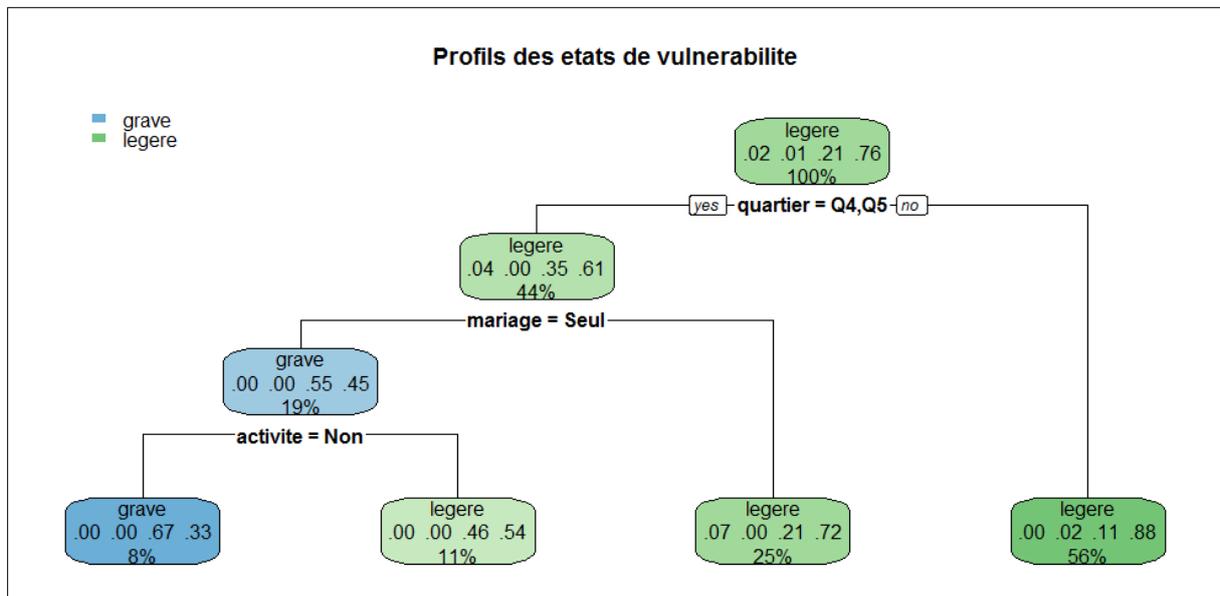


Figure 58 : Profils des états de vulnérabilité

Dans cet arbre de décision, les classes de vulnérabilité absolue et de non-vulnérabilité n'apparaissent pas. Cela signifie simplement que parmi les adultes de Bouaké ayant subi la crise, ils y a un nombre négligeable d'individus absolument vulnérables ou non vulnérables. Quant aux individus gravement vulnérables, ce sont ceux des quartiers Q4 et Q5 qui vivent seules (sans conjoint ou conjointe) et qui ne travaillent pas. La plupart des autres individus sont légèrement vulnérables.

### Etats psychologiques latents

Les états psychologiques latents sont par essence-même inobservables. Ils ne peuvent être connus qu'au travers des individus qui se trouvent dans ces états. D'un point de vue technique, le nombre d'états latents n'est pas connu a priori. Mais, en pratique, postuler à deux ou trois états voire quatre au maximum semble raisonnable, sans que cette indication ne soit dogmatique. L'algorithme suivant fournit l'implémentation des différentes théories sur les états psychologiques latents y compris le calcul des profils des ceux-ci :

---

Algorithme 23 : Typologie en états latents avec modèle statique

---

```

1. #####
2. ### ETATS PSYCHOLOGIQUES LATENTS : TYPOLOGIES ET PROFILS DES INDIVIDUS ###
3. #####
4. source("rklatent.R")
5. # etats psychologiques latents avec modele statique
6. selat= rklatent(res.stat, nbetat=2, graphe=TRUE, profil=TRUE, min.split=20)

```

---

L'implémentation de ce modèle étant incluse dans la fonction **rklatent** qui fournit la classe latente à laquelle appartient chaque individu. Cette fonction s'appuie sur le résultat de la fonction **rkmesure** afin de récupérer les différentes estimations (dimensions, états de résilience, etc) pour construire le modèle de typologie. Il y récupère aussi les données de description permettant d'établir les profils des différentes classes latentes. La figure suivante présente les classes latentes d'appartenance des individus utilisés :

```

[1] "G2" "G1" "G2" "G2" "G1" "G1" "G2" "G1" "G2" "G2" "G2" "G1" "G1" "G1" "G1" "G1" "G2" "G1" "G2" "G1"
[21] "G1" "G2" "G1" "G2" "G2" "G2" "G2" "G2" "G2" "G1" "G1" "G2" "G1" "G2" "G2" "G1" "G1" "G2" "G1" "G1"
[41] "G1" "G1" "G1" "G1" "G1" "G2" "G1" "G1" "G2" "G1" "G1" "G1" "G2" "G2" "G1" "G2" "G1" "G2" "G1" "G1"
[61] "G1" "G2" "G2" "G1" "G2" "G1" "G2" "G2" "G1" "G2" "G2" "G2" "G1" "G2" "G1" "G1" "G2" "G2" "G2" "G1"
[81] "G2" "G2" "G1" "G2" "G2" "G2" "G2" "G1" "G1" "G2" "G2" "G1" "G1" "G1" "G1" "G2" "G1" "G1" "G1" "G2"
[101] "G1" "G2" "G1" "G1" "G1" "G1" "G2" "G2" "G1" "G1" "G2" "G2" "G1" "G1" "G1" "G1" "G1"

```

Figure 59 : Classes latentes des individus dans un cas statique

La fonction fournit aussi un outil graphique permettant d'apprécier les probabilités d'avoir une résilience faible, forte ou élevée selon qu'on se trouve dans tel ou tel état psychologique latent. Ce graphique, basé sur les probabilités d'appartenance du modèle des classes latentes, et obtenues à partir des données simulées, est donné par la figure suivante :

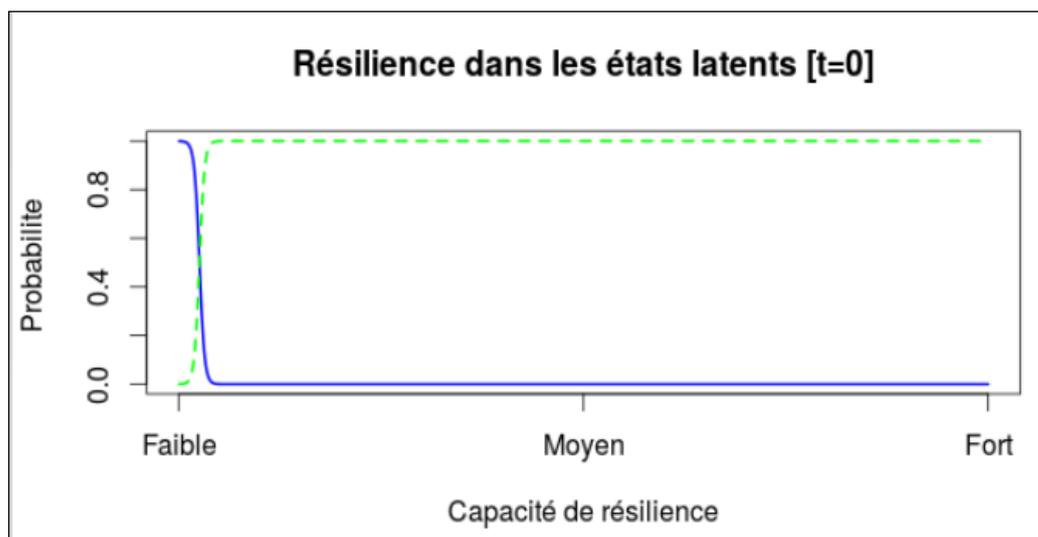


Figure 60 : Résilience dans les états latents pour un cas statique

Ce graphique met en exergue le fait que, les individus à faible propension à la résilience ont tendance à se retrouver dans l'état 2 (courbe en bleu) par rapport à l'état 1 (courbe en vert). Mais très vite, lorsque la propension à la résilience des individus s'accroît, ils passent de l'état 2 à l'état 1 et y restent même quand cette propension à la résilience est forte. L'état 1 est donc caractéristique des individus de faible propension de résilience et l'état 2 caractérise les individus qui ont une propension à la résilience moyenne ou forte.

Cependant, l'usage des probabilités et l'interprétation du passage d'une courbe à une autre peut être moins intuitif. En effet, cela nécessite une bonne compréhension du mode de fonctionnement des modèles de classes latentes et de l'exploitation que l'on peut faire des probabilités qui en sont issues. Pour faciliter les interprétations, il est possible, à l'image des états de vulnérabilité, d'établir les profils des individus qui sont dans chaque état cognitif latent grâce à un arbre de décision. Une telle solution est implémentée dans la fonction **rklatent**. La figure suivante présente le résultat des profils des individus se trouvant dans chacun des deux états traumatiques latents déterminés (version simplifiée de l'arbre de décision) :

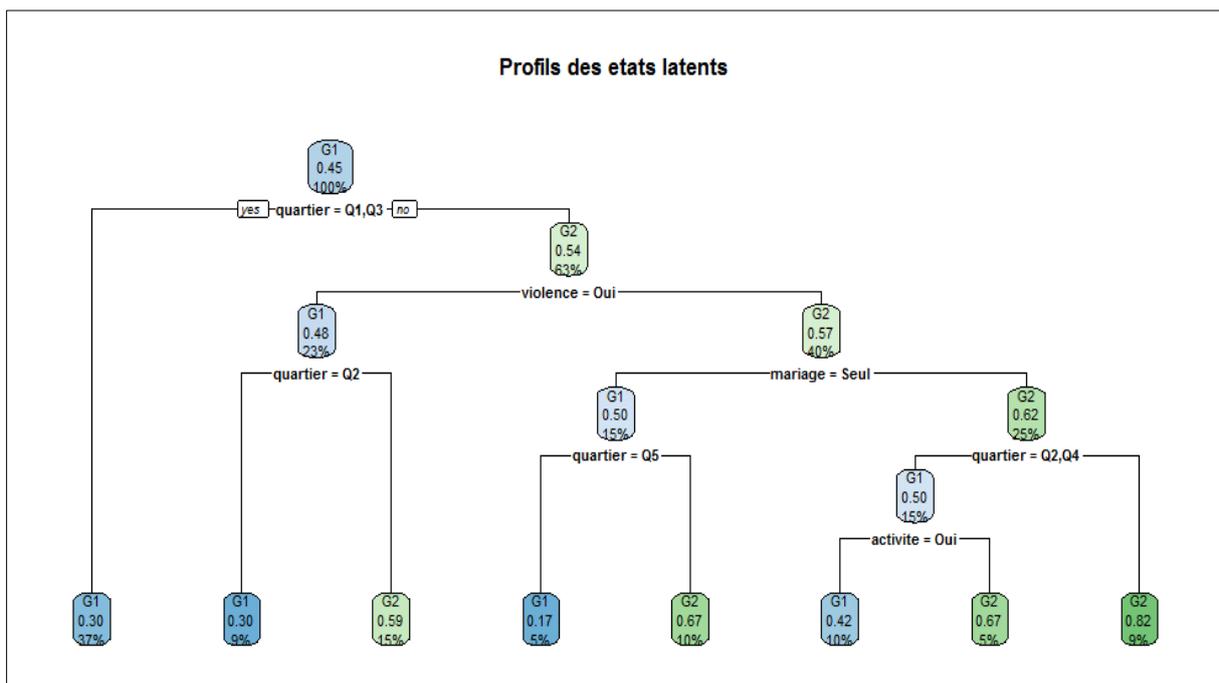


Figure 61 : Profils des états latents dans un cas statique

Cet arbre de décision montre que la plupart des individus qui se trouvent à l'état 1 (G1) sont ceux des quartiers Q1 et Q3, ceux du quartier Q2 qui ont subi des violences, ceux du quartier Q5 qui vivent seuls (sans conjoint) et ceux des quartiers Q2 et Q3 qui sont en activité. Les autres catégories d'individus sont dans l'état 2 (G2) en grande majorité. Bien que aisé à comprendre et à interpréter, la synthèse des règles issus des arbres de décision nécessite un effort pour en extraire l'essentiel et éviter les règles redondantes.

## Interaction entre les dimensions

Une des analyses résiliométriques consiste à calculer automatiquement les relations d'interactions qu'entretiennent les différentes dimensions de la résilience. Il ne s'agit pas ici de postuler à une relation a priori, mais d'apprendre la meilleure configuration possible au sens d'un critère dérivé de celui utilisé dans l'approche GSCA. La technique utilisée consiste à optimiser le critère en question en utilisant la méthode des algorithmes génétiques. Du fait de la particularité de ce type d'analyse, il est implémenté dans la fonction **rkdimension**. La mise en œuvre de cette analyse est donnée par l'algorithme suivant :

---

### Algorithme 24 : Interactions entre les dimensions pour cas statique

---

```
1. #####
2. ## IDENTIFICATION DES INTERACTIONS ENTRE LES DIMENSIONS : CAS STATIQUE ##
3. #####
4. source("rkdimension.R")
5. # Modele statique
6. dim.stat <- rkdimension(res.stat,plot.outer=TRUE,plot.inner=TRUE)
```

---

L'algorithme fournit directement le modèle structurel appris automatiquement, c'est-à-dire la structure d'interaction la plus adéquate au vue des données disponibles pour optimiser le critère global défini. En réalité, l'algorithme fournit un modèle PLS-PM complet. Il s'ensuit qu'il est aussi capable de fournir le modèle externe (modèle de mesure) associé. Cependant, le modèle de mesure est sans intérêt dans la mesure où il est spécifié a priori. Sur la base des données obtenues à partir de la simulation, le modèle appris automatiquement est donné par la figure suivante :

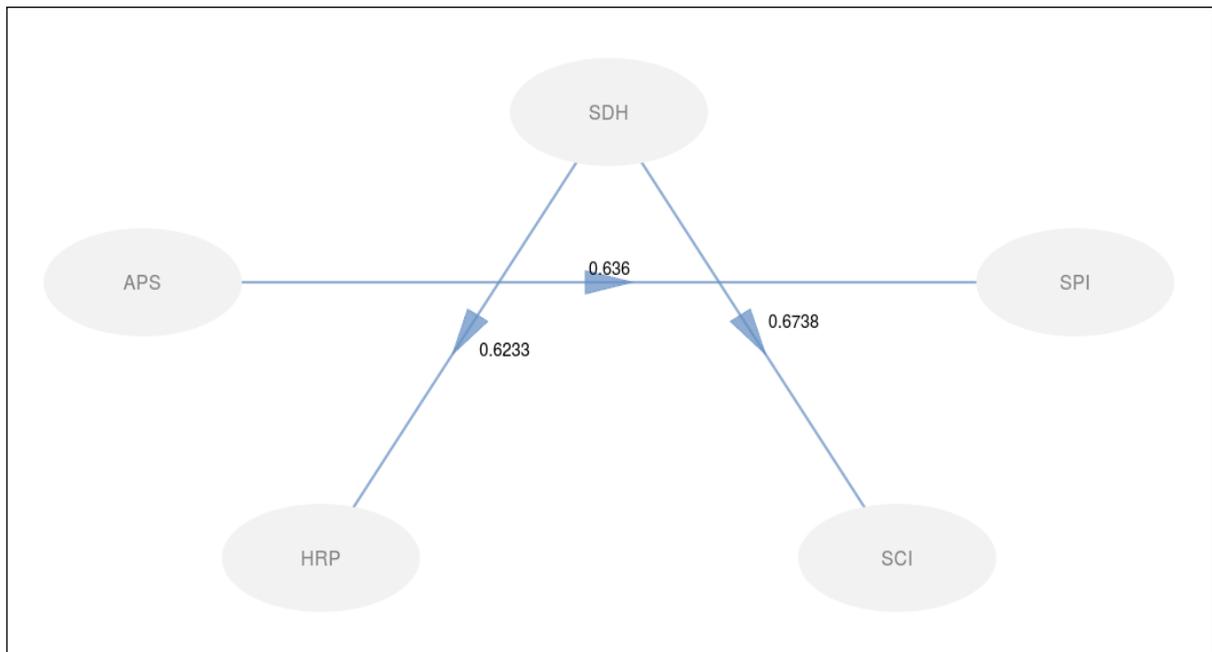


Figure 62 : Relations identifiées entre les dimensions dans un cas statique

### 7.2.4) L'ANALYSE RESILIOMETRIQUE DES CHOCS

L'analyse résiliométrique des chocs se limite essentiellement à la recherche des causes et éventuellement des effets significatifs des chocs considérés. La relation qui lie le choc à ses causes et ses effets est structurée sous la forme d'un modèle PLSPM, le choc étant mesuré par des indicateurs permettant d'apprécier son intensité. De plus, l'étude de la significativité des causes ou des effets est basée sur les tests de significativité des blocs latents. Ces tests sont des tests non paramétriques basés sur la méthode de bootstrap (B-test) ou sur le principe des tests des rangs (R-test). L'analyse des causes (et effets) des chocs nécessite des données qui leur sont propres. En toute rigueur, il s'agit d'un des trois types d'études résiliométriques. Pour illustrer l'analyse résiliométrique des causes et effets des chocs, les méthodes développées à cet effet ont été testées en utilisant des données simulées grâce à l'algorithme suivant :

---

#### Algorithme 25 : Génération de données simulées en R

---

```
1. # Bases et données pour modeles de choc
2. data(iris)
3. lind <- nrow(basef)
4. causedf1 <- iris[sample(1:nrow(iris),lind),-5]
5. causedf2 <- iris[sample(1:nrow(iris),lind),-5]
6. causedf3 <- iris[sample(1:nrow(iris),lind),-5]
7. causedf4 <- iris[sample(1:nrow(iris),lind),-c(4,5)]
8. base.cause <- data.frame(causedf1,causedf2,causedf3,causedf4)
9. lab.cause <- c("ch11","ch12","ch13","ch14",
10.             "ch21","ch22","ch23",
11.             "ch31","ch32","ch33","ch34","ch45",
12.             "ch41","ch42","ch43")
13. names(base.cause) <- lab.cause
14. rownames(base.cause) <- NULL
15. base.choc <- basef[,20:22]
16. names(base.choc) <- c("int1","int2")
17. rownames(base.choc) <- NULL
18. lab.effet <- c("eft11","eft12",
19.             "eft21","eft22","eft23","eft24",
20.             "eft31","eft32","eft33")
21. base.effet <- data.frame(basef1[,1:2],basef2[,1:4],basef3[,1:3])
22. names(base.effet) <- lab.effet
23. rownames(base.effet) <- NULL
```

---

Cet algorithme permet de générer des données pour quatres causes auxquelles des noms génériques ont été attribués (CAUSE1, CAUSE2, CAUSE3 et CAUSE4). Il a aussi généré trois effets portant aussi des noms génériques (EFFET1, EFFET2, EFFET3). Le choc en lui-même est considérée comme une variable latente portant pour nom générique le mot « CHOC ».

En pratique, les différentes causes et les différents effets sont des variables latentes décrites par un certain nombre d'indicateurs (variables manifestes). Ce sont les données sur ces indicateurs qui sont générées par l'algorithme. En plus de cela, selon le protocole résiliométrique, le choc est mesuré par un certain nombre d'indicateurs d'intensité. Les variables manifestes censées représenter des mesures d'intensités du choc sont aussi simulées (int1 et int2).

Pour les applications pratiques, la significativité des causes et des effets est testée en utilisant essentiellement le R-test de significativité des blocs latents. L'algorithme suivant permet la mise en œuvre de l'analyse des chocs à partir des données simulées :

---

Algorithme 26 : Mise en œuvre d'analyse des chocs avec R

---

```

1. #####
2. ##### SIGNIFICATIVITES DES CAUSES ET EFFETS DU CHOC #####
3. #####
4. source("rkchoc.R")
5. # Spécification des causes (causes liées)
6. modele.cause <- " # latents variables definitions
7.             CAUSE1 =~ ch11+ch12+ch13+ch14
8.             CAUSE2 =~ ch21+ch22+ch23
9.             CAUSE3 =~ ch31+ch32+ch33+ch34+ch35
10.            CAUSE4 =~ ch41+h42+ch43
11.            CAUSE3 ~~ CAUSE1+CAUSE4
12.            CAUSE1 ~~ CAUSE2+CAUSE4
13.            "
14. # Spécification des intensités du choc
15. modele.choc <- " # latents variables definitions
16.             chocInt =~ int1+int2
17.            "
18. # Spécification des effets (effets liés)
19. modele.effet <- " # latents variables definitions
20.             EFFET1 =~ eft11+eft12
21.             EFFET2 =~ eft21+eft22+eft23+eft24
22.             EFFET3 =~ eft31+eft32+eft33
23.             EFFET2 ~~ EFFET1+EFFET3
24.             EFFET3 ~~ EFFET1
25.            "
26. # Estimation de la significativité des causes et effets du choc
27. res.choc <- rkchoc(modele.cause,modele.choc,modele.effet,data=cdata,
28.                 null.cause=NULL,null.effet=NULL,boot.iter=50,
29.                 plot.outer=FALSE,plot.inner=FALSE,alpha=0.05)
30.

```

---

L'objet « res.choc » contient les résultats qui sont essentiellement les tableaux suivants :

Tableau 20 : Résultats de significativité des causes

	Causes	Stats	Pvalues	Types
1	CAUSE1	15	0,0625	Faible
2	CAUSE2	15	0,0625	Faible
3	CAUSE3	15	0,0625	Faible
4	CAUSE4	15	0,0625	Faible

Tableau 21 : Résultats de significativité des effets

	Effets	Stats	Pvalues	Types
1	EFFET1	6	0,8125	Negligeable
2	EFFET2	15	0,0625	Faible
3	EFFET3	12	0,3125	Negligeable

Si l'on s'en tient aux données simulées, toutes les causes considérées sont des causes de faibles importances. En ce qui concerne les effets, hormis l'effet 2 qui est de faible importance, les autres effets sont carrément négligeables. Le graphe des relations structurelles du modèle complet du choc (modèle PLSPM) est donné par la figure suivante :

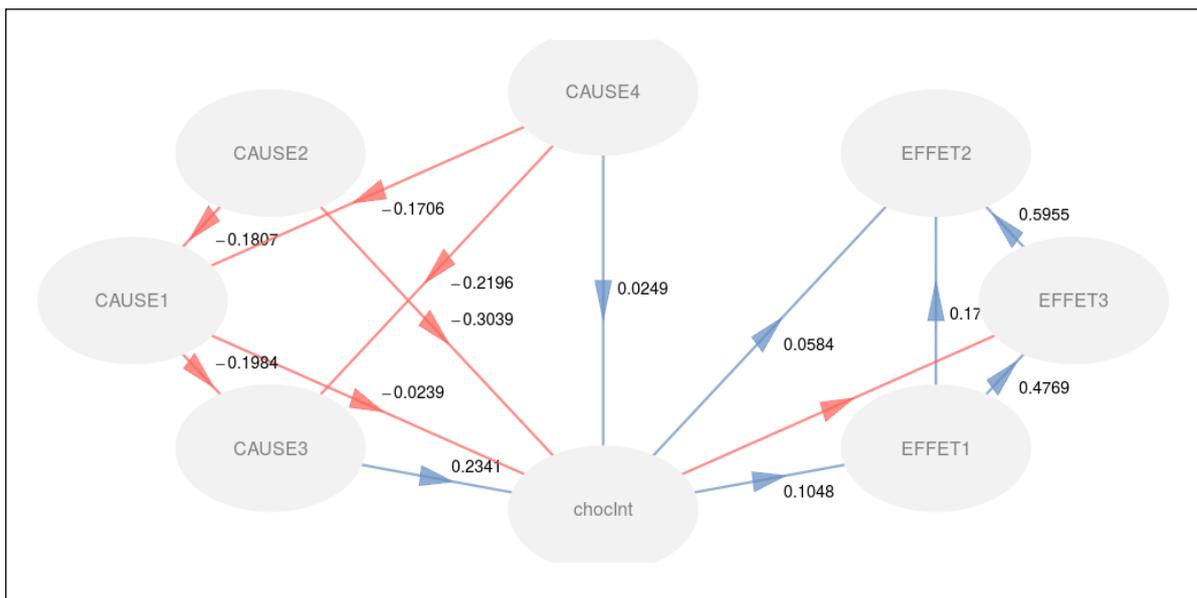


Figure 63 : Modèle structurel d'un modèle de choc

Comme le modèle structurel, l'algorithme est capable de fournir aussi le modèle externe correspondant à la structure du choc. Cependant, malgré que ces graphiques permettent d'apprécier le modèle sous-jacent aux analyses, ils n'ont pas d'intérêt pratique. En effet, les modèles étant utilisés dans les tests de significativités, seuls les tableaux donnant les significativités des causes et des effets sont importants.

---

---

## CHAPITRE 8 : LES ANALYSES

### RESILIOMETRIQUES SUR DONNEES DE PANELS

---

---

Les processus de résilience sont des processus essentiellement dynamiques. Bien qu'il soit possible d'apprécier la capacité de rebond, l'état de vulnérabilité et la propension à la résilience des individus en un instant donné, les spécificités individuelles et les particularités de l'environnement dans lequel ils évoluent rendent irréaliste l'hypothèse d'une résilience constante des individus sur le moyen et long terme. La prise en compte de la dynamique d'évolution de la situation des individus dans le temps s'impose. L'algorithme suivant présente le programme R permettant de constituer les données de panels nécessaires pour une analyse de la dynamique des capacités de rebond des adultes de Bouaké :

---

#### Algorithme 27 : Génération de données dynamiques en langage en R

---

```
1. # Bases et données pour modeles dynamiques
2. basef1 <- basef2 <- basef3 <- mbase
3. basef1[sample(1:nrow(basef1),10),index.manif] <- 1
4. basef1[sample(1:nrow(basef1),15),index.manif] <- 4
5. basef2[sample(1:nrow(basef2),10),index.manif] <- 5
6. basef2[sample(1:nrow(basef2),15),index.manif] <- 3
7. basef3[sample(1:nrow(basef3),10),index.manif] <- 2
8. basef3[sample(1:nrow(basef3),15),index.manif] <- 4
9. names(basef1) <- paste(names(mbase),1,sep="")
10. names(basef2) <- paste(names(mbase),2,sep="")
11. names(basef3) <- paste(names(mbase),3,sep="")
12. opinion1 <- opinion2 <- opinion3 <- v.percep
13. opinion1[sample(1:length(v.percep),10)] <- v.percep[10]
14. opinion1[sample(1:length(v.percep),15)] <- v.percep[40]
15. opinion2[sample(1:length(v.percep),10)] <- v.percep[50]
16. opinion2[sample(1:length(v.percep),15)] <- v.percep[30]
17. opinion3[sample(1:length(v.percep),10)] <- v.percep[20]
18. opinion3[sample(1:length(v.percep),15)] <- v.percep[40]
19. lbase <- list(basef1,basef2,basef3)
```

---

Cet algorithme fournit la liste constituée des bases de données principales des différentes périodes (**lbase**) dont chacune est composée des données sur les variables manifestes et les bornes de résilience correspondantes. On y trouve aussi la base de données des perceptions que les individus ont de leur propre situation de souffrance à chaque période de temps (**data.opinion**), les données de description (**base.desc**), les index correspondants aux variables manifestes (**index.manif**) et ceux correspondants aux bornes de résilience associées (**index.borne**), doivent être précisés. Comme dans le cas des analyses statiques, ces index doivent apparaître dans deux vecteurs de même longueurs de telle sorte que les éléments de même indice correspondent à une variable manifeste et à sa borne respectivement.

## Implémentation avec R

Un exemple d'implémentation d'un modèle de mesure dynamique avec R est donné par l'algorithme suivant :

---

Algorithme 28 : Mise en œuvre d'un modèle dynamique de mesure avec R

---

```
1. #####
2. ##### MESURE DYNAMIQUE DE LA RESILIENCE #####
3. #####
4. source("rkmesure.R")
5. # Spécification d'un modèle dynamique (sans interactions)
6. dmodele <- " # modèle de mesure date 1
7.     SDH1 =~ senshum1+creativite1
8.     APS1 =~ communic1+sociabilite1+altruiste1+relation1
9.     HRP1 =~ planific1+solution1+autonome1
10.    SCI1 =~ estime1+confiance1+favenir1
11.    SPI1 =~ optimisme1+persever1+religion1
12. # modèle de mesure date 2
13.    SDH2 =~ senshum2+creativite2
14.    APS2 =~ communic2+sociabilite2+altruiste2+relation2
15.    HRP2 =~ planific2+solution2+autonome2
16.    SCI2 =~ estime2+confiance2+favenir2
17.    SPI2 =~ optimisme2+persever2+religion2
18. # modèle de mesure date 3
19.    SDH3 =~ senshum3+creativite3
20.    APS3 =~ communic3+sociabilite3+altruiste3+relation3
21.    HRP3 =~ planific3+solution3+autonome3
22.    SCI3 =~ estime3+confiance3+favenir3
23.    SPI3 =~ optimisme3+persever3+religion3
24. # relations dynamiques (sans interactions)
25.    SDH3 ~~ SDH2
26.    SDH2 ~~ SDH1
27.    APS3 ~~ APS2
28.    APS2 ~~ APS1
29.    HRP3 ~~ HRP2
30.    HRP2 ~~ HRP1
31.    SCI3 ~~ SCI2
32.    SCI2 ~~ SCI1
33.    SPI3 ~~ SPI2
34.    SPI2 ~~ SPI1
35.
36. "
37.
38. # Spécification des variables latentes de la dernière date
39. VLast.T <- c("DSH3","APS3","HRP3","SCI3","SPI3")
40. # Estimation d'un modèle statique (avec ou sans interactions)
41. res.dyn <- rkmesure(dmodele,base,index.manif,index.borne,base.desc,data.opinion,
42.     scale=FALSE,mtype="dynamique",VLast.T, dims=TRUE,igraph=TRUE,
43.     ograph=FALSE, graphe.resilience=TRUE,graphe.souffrance=TRUE,
44.     graphe.hmm=TRUE, profil=TRUE, min.split=10, espoir=TRUE)
```

---

L'objet « **res.dyn** » contient toutes les informations nécessaires dont l'estimation de la résilience, les estimations des dimensions de la résilience pour chaque période de temps ainsi que les degrés de rebond, les degrés et états de vulnérabilité de à chaque individu.

## 8.1) LES ANALYSES DE BASE SUR DONNEES DE PANELS

La détermination des états de vulnérabilité passe par l'application de la théorie stochastique de la résilience période par période. Outre ces informations, l'algorithme fournit des graphiques permettant d'avoir une appréciation rapide des grandes tendances.

### Mesure de la résilience

Les estimations de la résilience et de ses dimensions fournies en sortie de l'algorithme sur la base des informations utilisées est donnée par le tableau suivant :

Tableau 22 : Estimation de la résilience et ses dimensions dans un cas dynamique

	SDH1	APS1	HRP1	SCI1	SP11	SDH2	APS2	HRP2	SCI2	SP12	SDH3	APS3	HRP3	SCI3	SP13	resilience
1	-0,29697	0,15003	-0,11524	-0,3754	0,13073	-0,48045	-0,02158	-0,31823	-0,58114	-0,0578	-0,40622	0,11996	-0,30584	-0,47656	0,08118	-0,20206
2	0,15961	-0,9093	-0,39372	-0,11258	-0,53868	0,0101	-1,25679	-0,66792	-0,33951	-0,93856	0,60264	0,31344	0,46844	0,08074	0,08118	0,3049
3	0,61518	0,33987	0,51406	0,19045	0,13073	-0,48045	-0,21186	-0,71266	-0,58114	-1,27948	-0,40622	-0,07352	-0,7302	-0,47656	-1,07533	-0,6164
4	-0,29697	-0,03981	-0,98216	-0,3754	-0,78134	-0,48045	-0,21186	-1,43113	-0,58114	-1,19727	-0,40622	-0,07352	-1,43676	-0,47656	-1,05195	-0,77325
5	-0,7246	0,6247	0,19472	0,49347	0,09762	1,5345	1,34964	1,50658	1,1039	1,16387	0,60264	0,31344	0,46844	0,08074	0,08118	0,3049
6	-0,7246	0,3585	-0,39841	0,19045	0,44888	-0,5332	-1,01224	-0,66792	-1,01691	-1,27948	-0,92444	0,28153	-0,52031	0,08074	0,50307	-0,03296
7	0,17307	0,11628	0,83339	0,19045	0,1731	-0,04265	-0,15216	0,74337	0,04349	0,00054	0,09132	-0,00738	0,75064	0,08074	0,21374	0,23112
8	-0,7246	-0,3584	-0,71305	-0,6957	-0,18742	-0,5332	-1,01224	-0,66792	-1,01691	-1,27948	-0,92444	-0,48464	-0,90745	-0,94762	-0,34072	-0,79015
9	1,05728	1,26174	0,50937	1,0766	0,3734	1,5345	1,34964	1,50658	1,1039	1,16387	1,11396	1,43232	0,57339	1,10911	0,34712	1,05902
10	0,61518	0,33987	0,51406	0,19045	0,13073	0,50065	0,32735	0,05055	1,1039	-0,53928	0,60264	0,40374	0,0813	1,10911	-0,36411	0,41266
11	-2,07786	-2,42573	-2,20927	-2,468	-2,70482	-0,5332	-1,01224	-0,66792	-1,01691	-1,27948	0,60264	-0,99893	0,18625	0,08074	-1,36386	-0,4333
12	0,61518	-0,13467	-0,39372	0,79367	1,07591	0,50065	-0,2435	-0,66792	0,79158	1,16387	0,60264	-0,1767	-0,62526	0,83046	1,23769	0,39509
13	-0,2825	0,33987	1,14804	0,49347	0,09762	-0,5332	0,1687	1,11215	0,4265	-0,14001	-0,41312	0,31344	1,13778	0,43494	0,05779	0,40417
14	-0,2825	-0,62461	-1,02302	0,19045	0,13073	-0,5332	-1,01224	-0,66792	-1,01691	-1,27948	0,60264	0,31344	0,46844	0,08074	0,08118	0,3049
15	-2,07786	-2,42573	-2,20927	-2,468	-2,70482	-0,5332	-0,02158	0,74337	-0,26882	0,00054	-0,41312	0,11996	0,75064	-0,19791	0,21374	0,13018
16	-0,7246	-1,28026	-0,11993	-0,09248	0,40651	-1,0765	-1,87231	-0,27349	-0,26882	0,28312	-0,92444	-1,60353	-0,20089	-0,19791	0,3705	-0,55835
17	0,15961	0,37363	-0,71305	0,19045	-0,61416	0,0101	0,29929	-0,99196	0,04349	-1,07911	0,60264	0,31344	0,46844	0,08074	0,08118	0,3049
18	0,15961	-1,01406	0,24026	0,19045	-0,2629	1,5345	1,34964	1,50658	1,1039	1,16387	-1,42887	-1,92434	-1,71896	-1,97599	-2,23184	-2,14121
19	1,51286	1,26174	1,42183	1,0766	1,07591	1,5345	1,34964	1,50658	1,1039	1,16387	0,60264	0,31344	0,46844	0,08074	0,08118	0,3049
20	0,17307	-1,09042	-0,44395	-0,09248	0,08836	-0,04265	-1,68203	-0,55279	-0,26882	-0,11615	0,09132	-1,41005	-0,37814	-0,19791	-0,05139	-0,4675
21	0,61518	0,33987	0,51406	0,19045	0,13073	-0,5332	-1,01224	-0,66792	-1,01691	-1,27948	-1,42887	-1,92434	-1,71896	-1,97599	-2,23184	-2,14121
22	1,07075	0,60608	0,4732	0,79367	0,40651	0,9912	0,51221	0,44498	0,79158	0,28312	1,10707	0,62912	0,50567	0,83046	0,3705	0,74115
23	-1,63575	-1,3415	-0,08376	0,19045	1,07591	-2,05761	-1,90037	-0,2544	0,04349	1,16387	-1,9333	-1,56649	-0,13317	0,08074	1,23769	-0,37038
24	-0,2825	-0,13467	-0,66751	-0,6957	-0,81445	-0,5332	-0,2435	-1,06235	-1,01691	-1,27948	-0,41312	-0,1767	-1,04962	-0,94762	-1,07533	-0,86744
25	0,62865	0,82968	0,4732	0,19045	0,75777	0,4479	0,83307	0,44498	0,04349	0,7646	-1,42887	-1,92434	-1,71896	-1,97599	-2,23184	-2,14121
26	0,15961	-0,11618	0,19941	-0,3955	0,05525	1,5345	1,34964	1,50658	1,1039	1,16387	0,60264	0,31344	0,46844	0,08074	0,08118	0,3049
27	0,17307	0,33987	-0,72242	-1,28165	-0,22053	-0,04265	0,1687	-0,90249	-1,71223	-0,53928	0,09132	0,31344	-0,69756	-1,58047	-0,36411	-0,54473
28	1,51286	1,0719	0,87424	1,0766	0,08836	1,5345	1,15936	0,71772	1,1039	-0,11615	1,61839	1,23884	0,71341	1,10911	-0,05139	0,9755

Contrairement aux modèles statiques de mesure, la représentation graphique d'un modèle dynamique de mesure est en général illisible. Cela est dû à la complexité de tels modèles. L'algorithme est aussi capable de fournir les graphiques du modèle externe et du modèle structurel correspondant au modèle de mesure. Cependant, ces graphiques sont en général illisibles du fait de la complexité des modèles dynamiques de mesure. D'ailleurs, ces modèles n'étant utilisés que pour leur capacité à produire des estimations acceptables de la résilience et de ses dimensions, ces représentations graphiques ne sont pas nécessaires.

### Calcul des degrés et des états de vulnérabilité

L'application de la théorie stochastique de la résilience, permet d'obtenir le type de résilience et le degré de vulnérabilité correspondant pour chaque individu. Dans le cas dynamique, ces états sont obtenus période par période. En effet, l'état de résilience d'un individu peut changer au cours du temps. Il n'est donc pas approprié de vouloir déterminer un état de résilience unique sur plusieurs périodes de temps. Par conséquent, le choix est fait, en Résiliométrie, de déterminer, pour un individu donné, un état de résilience par période (date = 1, date = 2 et date = 3). Le tableau suivant donne les états de résilience des individus sur les trois périodes pour lesquelles les données ont été simulées :

Tableau 23 : Estimations dynamique des degrés de rebond et états de vulnérabilité

	date	paneliste	degre	vulnerabilite
105	1	105	46.67	grave
106	1	106	53.33	legere
107	1	107	86.67	legere
108	1	108	0	absolue
109	1	109	66.67	legere
110	1	110	80	legere
111	1	111	80	legere
112	1	112	73.33	legere
113	1	113	66.67	legere
114	1	114	53.33	legere
115	1	115	73.33	legere
116	1	116	0	absolue
117	1	117	53.33	legere
118	2	1	60	legere
119	2	2	46.67	grave
120	2	3	46.67	grave
121	2	4	53.33	legere
122	2	5	93.33	legere
123	2	6	26.67	grave
124	2	7	80	legere
125	2	8	33.33	grave
126	2	9	93.33	legere
127	2	10	66.67	legere
128	2	11	40	grave
129	2	12	60	legere
130	2	13	60	legere

De façon similaire au cas statique, le calcul des degrés et des états de vulnérabilité se fait au niveau de chaque individu. L'algorithme effectue ces calculs pour tous les individus période par période. Il fournit aussi des graphiques de visualisation de l'importance des individus qui se trouvent dans chaque type d'états de vulnérabilité. Dans le cas des analyses dynamiques, ce graphique est construit pour chaque période. Les graphiques suivants permettent d'apprécier l'importance de chaque état de vulnérabilité pour chaque période :

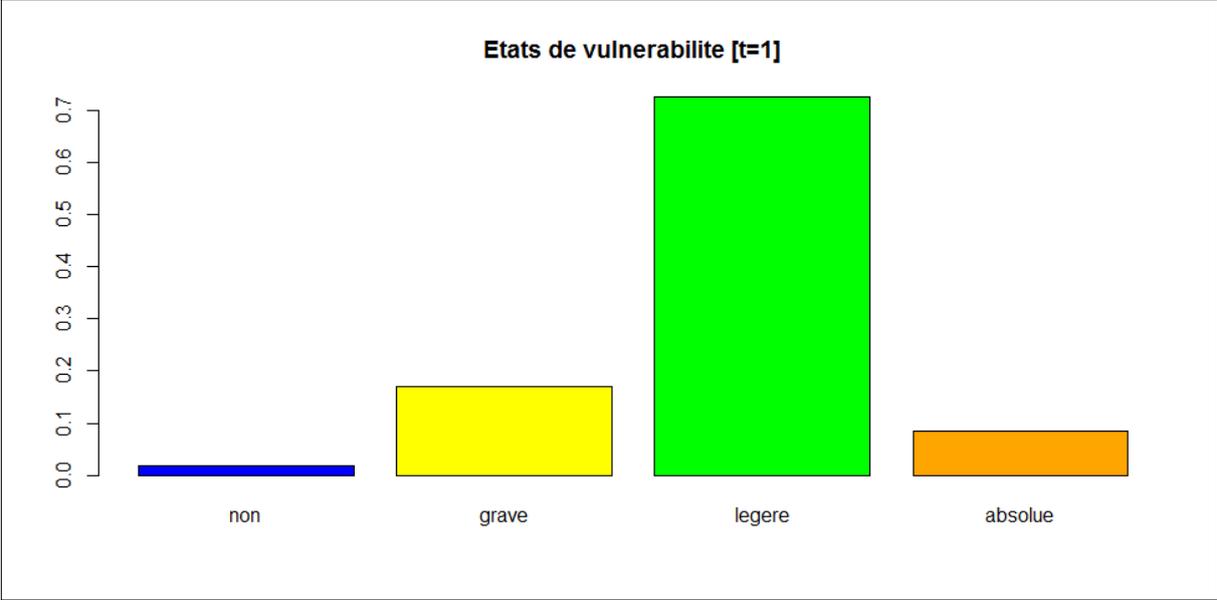


Figure 64 : Importance des états de vulnérabilité au temps  $t = 1$

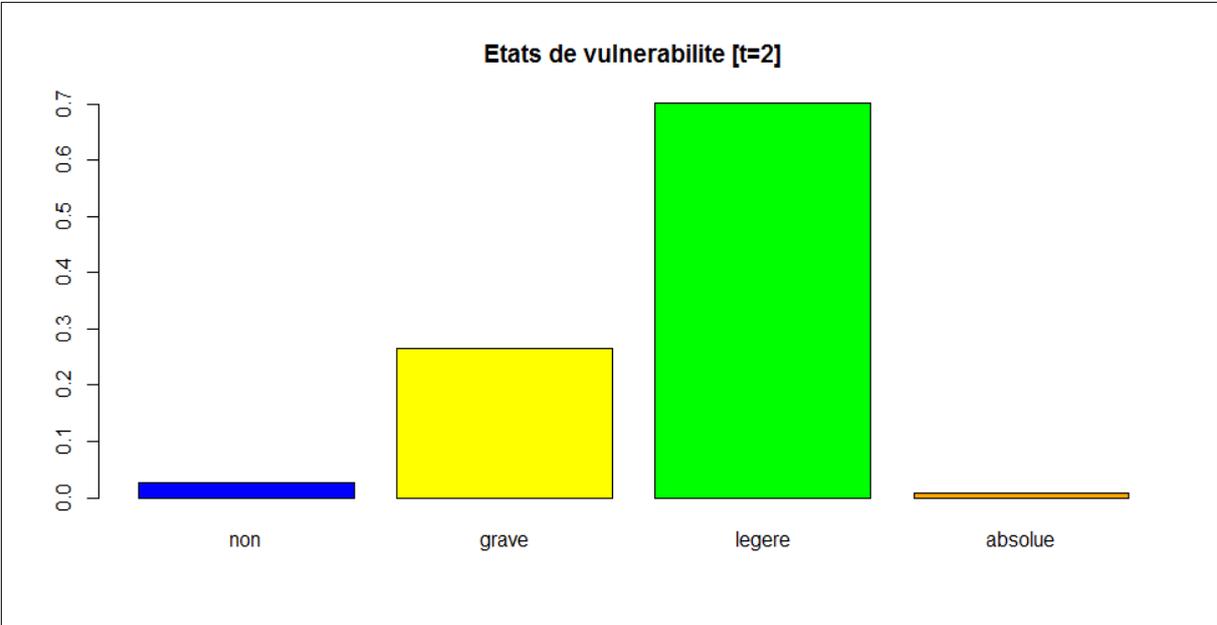


Figure 65 : Importance des états de vulnérabilité au temps  $t = 2$

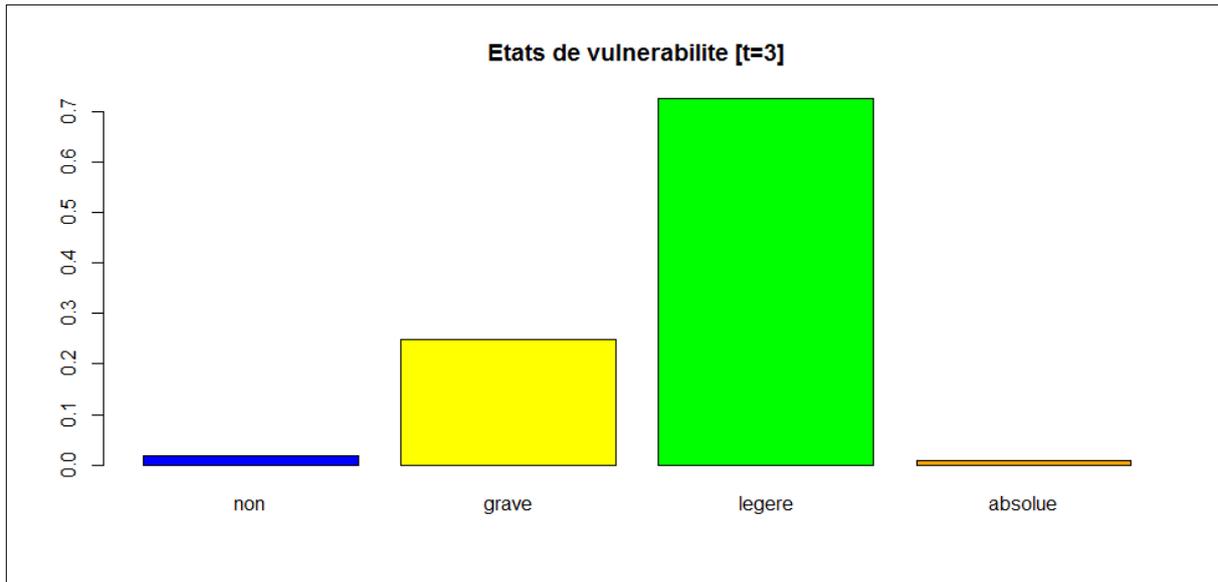


Figure 66 : Importance des types de résilience au temps  $t = 3$

Ces graphiques montrent que, quelque soit la période, la majorité des individus sont légèrement vulnérables. On observe aussi un phénomène de passage progressif de l'état de vulnérabilité absolue à l'état de vulnérabilité grave, donc une amélioration sensible de la vulnérabilité des individus absolument vulnérables avec le temps. Cependant, le nombre d'individus légèrement vulnérables et le nombre d'individus non vulnérables sont restés constants sur toutes les périodes.

### Calcul des degrés de pertes de caractéristiques

L'algorithme, dans le cas dynamique, calcul aussi les degrés de perte de caractéristique pour chacune des périodes de collecte de données comme le montre le tableau suivant :

Tableau 24 : Estimations des degrés de perte de caractéristiques dans un cas dynamique

	caracteristique	Prop_t.1	Prop_t.2	Prop_t.3
1	communic	40.17	34.19	38.46
2	sociabilite	40.17	32.48	38.46
3	senshum	47.01	36.75	41.88
4	estime	50.43	47.01	49.57
5	confiance	35.04	29.06	33.33
6	favenir	41.03	34.19	34.19
7	altruiste	33.33	35.04	33.33
8	relation	49.57	42.74	45.3
9	optimisme	31.62	29.06	33.33
10	creativite	42.74	45.3	45.3
11	planific	46.15	42.74	44.44
12	persever	31.62	33.33	30.77
13	solution	46.15	40.17	43.59
14	autonome	47.86	44.44	44.44
15	religion	34.19	31.62	29.91

De façon similaire au cas statique, l'algorithme de calcul synthétise ces indicateurs sous la forme de graphiques comme le montre les figures suivantes:

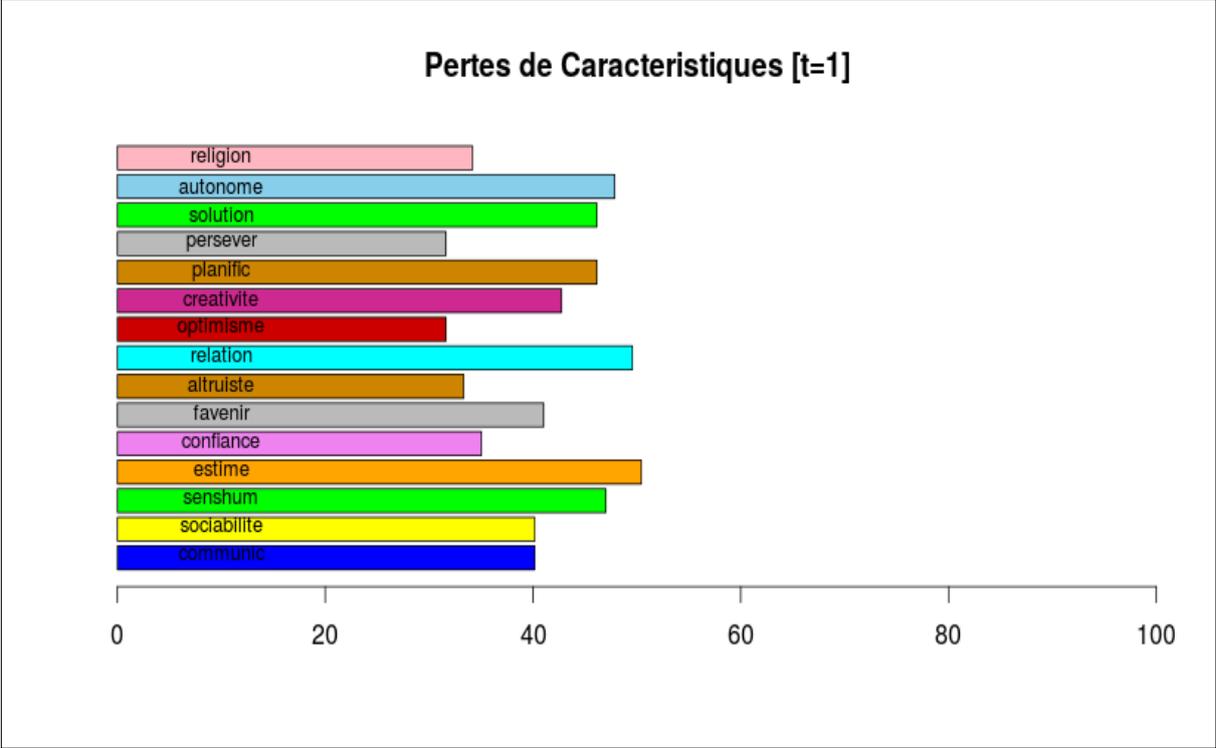


Figure 67 : Degrés de pertes de caractéristiques en pourcentage au temps  $t = 1$

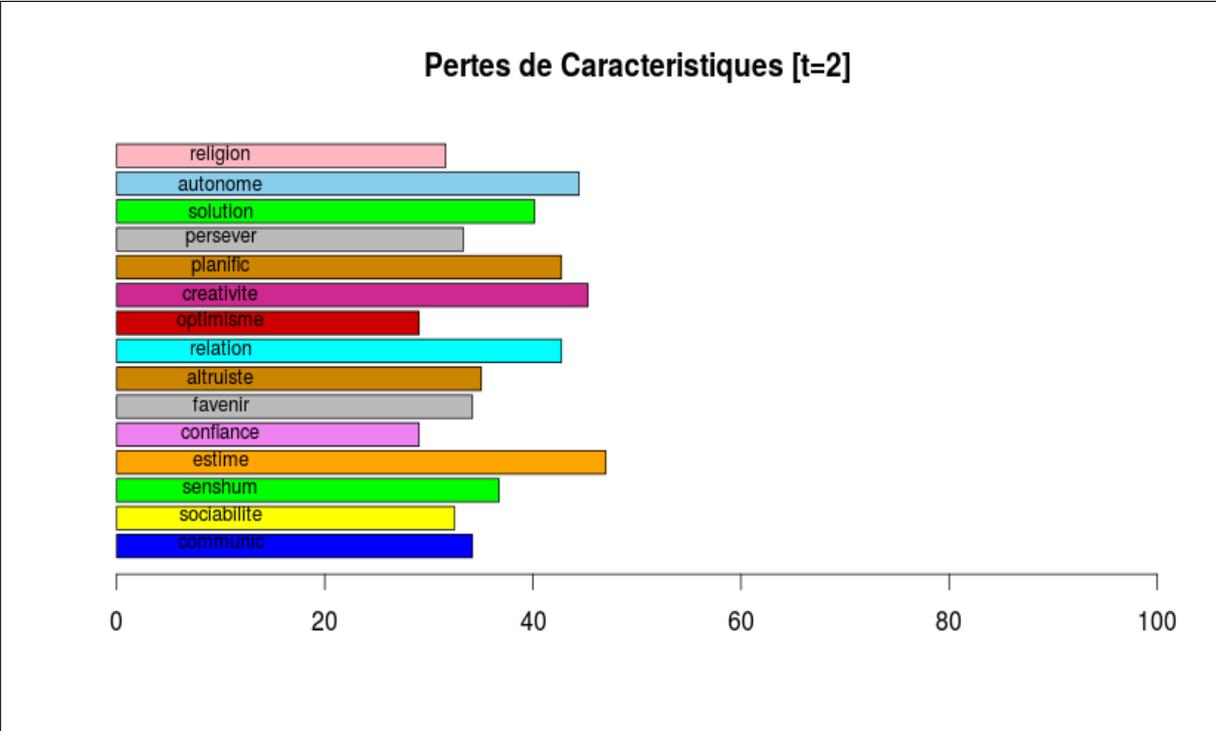


Figure 68 : Degrés de pertes de caractéristiques en pourcentage au temps  $t = 2$

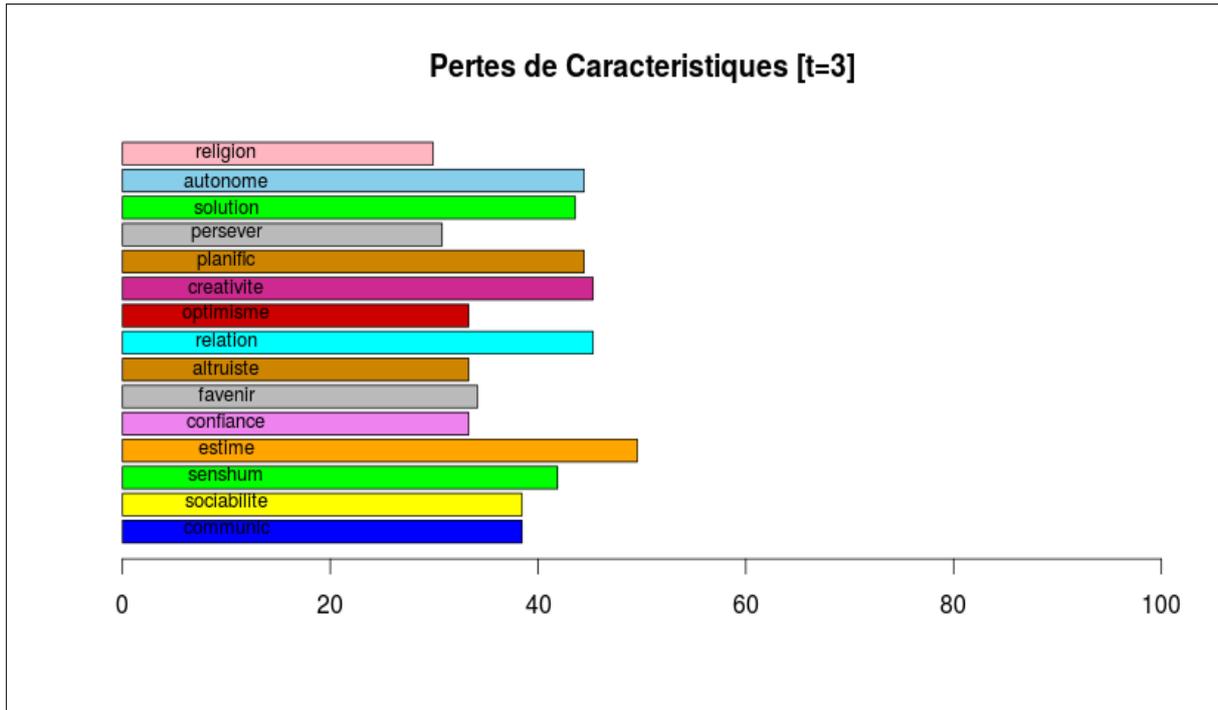


Figure 69 : Degrés de pertes de caractéristiques en pourcentage au temps  $t = 3$

L'interprétation de ces graphiques consiste à identifier les caractéristiques les plus touchés par le choc et celles qui le sont moins ; et-ce période par période.

### Profil des états de vulnérabilité

Tout comme dans le cas statique, la fonction **rkmesure** fournir les profils des individus traumatisés qui se trouvent dans chacun des états de vulnérabilité période par période. Celui correspondant à la première période est donné par la figure suivante :

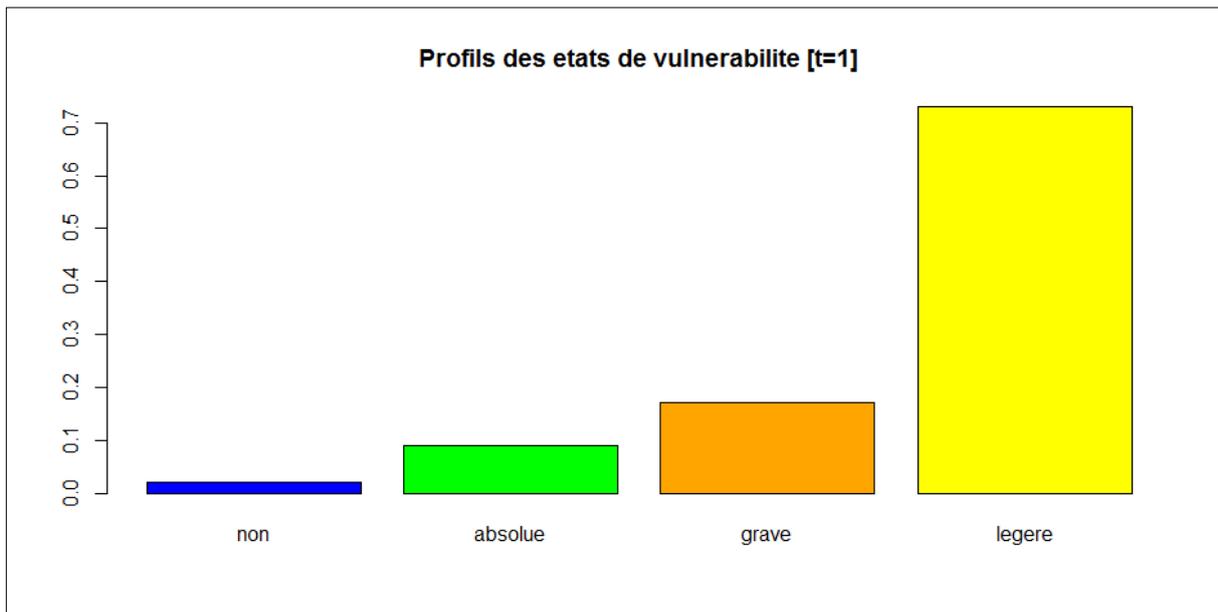


Figure 70 : Profils des états de vulnérabilité au temps  $t = 1$

Ce profil n'utilise pas les variables descriptives mais présente uniquement la distribution des individus pour chaque type de résilience. Une telle situation se produit lorsque les variables de caractérisation ne peuvent pas discriminer les différents états de vulnérabilité. Cela est toujours le cas à chaque fois que la très grande majorité de la population se trouve dans un état de vulnérabilité unique dominant et que peu d'individus sont dans les autres états de vulnérabilités. Cela est le cas ici car la grande majorité des adultes sont légèrement vulnérables. Dans le cas où les profils peuvent être élaborés correctement, des arbres de décision sont produits comme l'illustre les graphiques suivants :

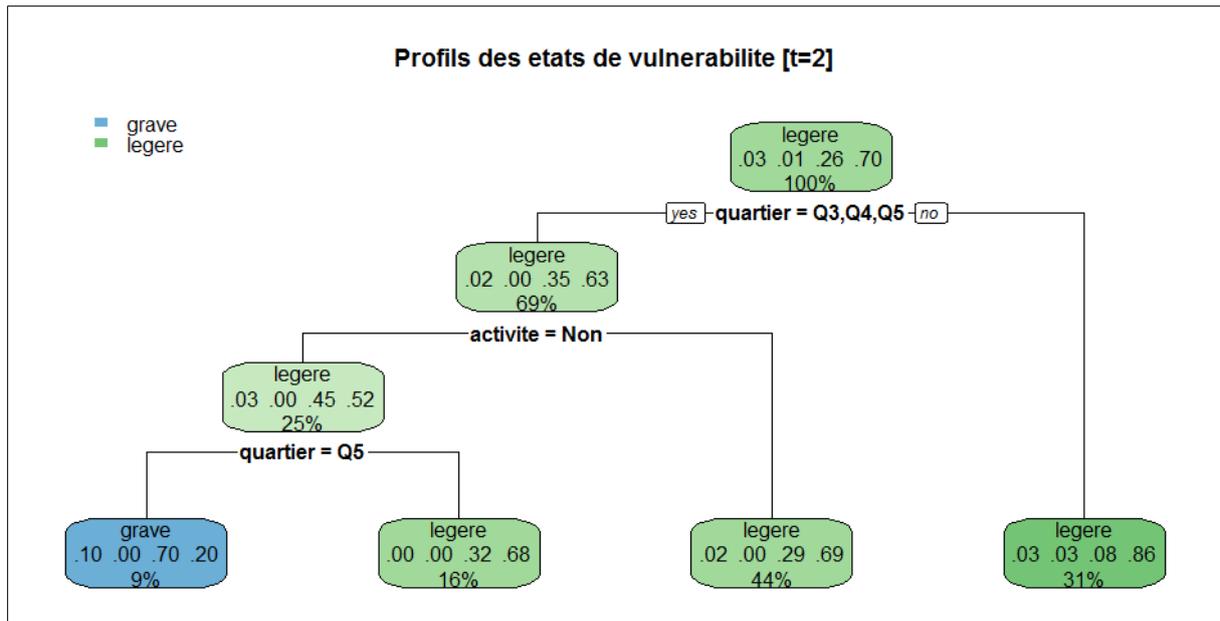


Figure 71 : Profils des états de vulnérabilité au temps  $t = 2$

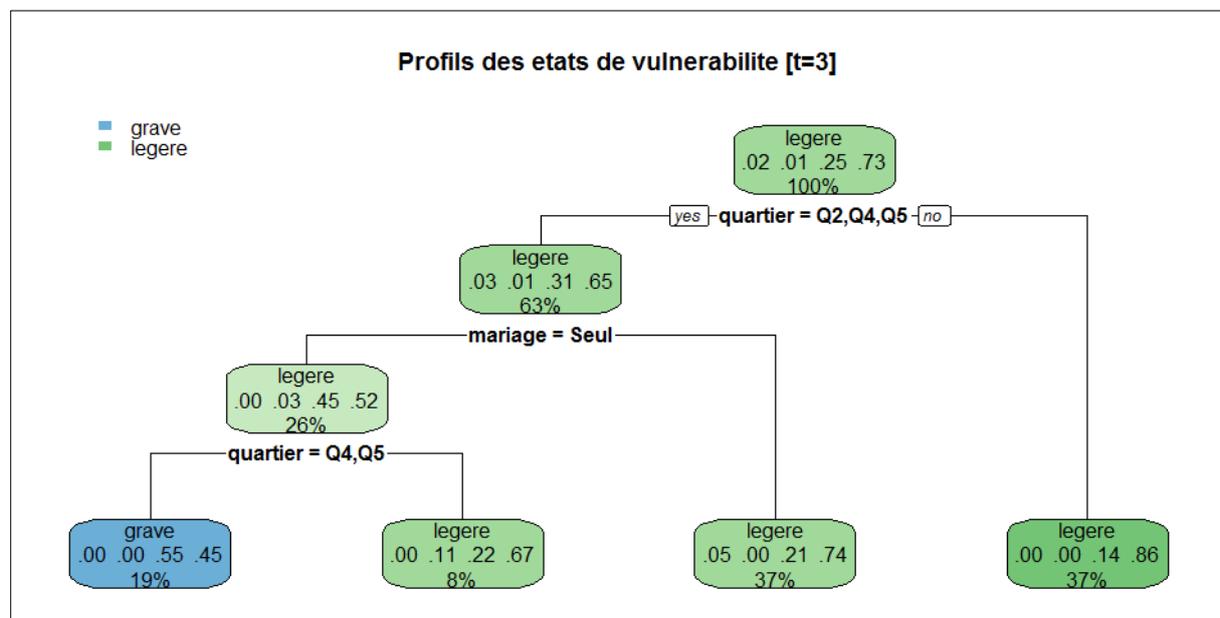


Figure 72 : Profils des états de vulnérabilité au temps  $t = 3$

Ces arbres de décision s'interprètent de manière similaire à ceux obtenus avec les données statiques. Cette interprétation se fait période par période.

### L'analyse des états psychologiques latents

Dans le cas dynamique, les typologies en états psychologiques latents sont effectuées période par période. L'algorithme suivant fournit une typologie en deux (2) états latents :

---

#### Algorithme 29 : Typologie en états latents avec modèle dynamique

---

```

1. #####
2. ### ETATS PSYCHOLOGIQUES LATENTS : TYPOLOGIES ET PROFILS DES INDIVIDUS ###
3. #####
4. source("rklatent.R")
5. # etats psychologiques latents avec modele statique
6. selat= rklatent(res.dyn, nbetat=3, graphe=TRUE, profil=TRUE, min.split=10)

```

---

Les résultats de cet algorithme sont identiques à ceux obtenus dans le cas statique, à la seule différence qu'ils sont produits période par période. Il produit donc aussi les évolutions des probabilités de résilience dans les différents états dont la difficulté d'interprétation justifie le fait que leur usage soit déconseillé, sauf pour des personnes maîtrisant bien le modèle des classes latentes.

En plus des courbes d'évolution des probabilités de résilience dans les différents états, l'algorithme calcule les profils des individus se trouvant dans les différents états psychologiques latents période par période comme le montrent les figures suivantes :

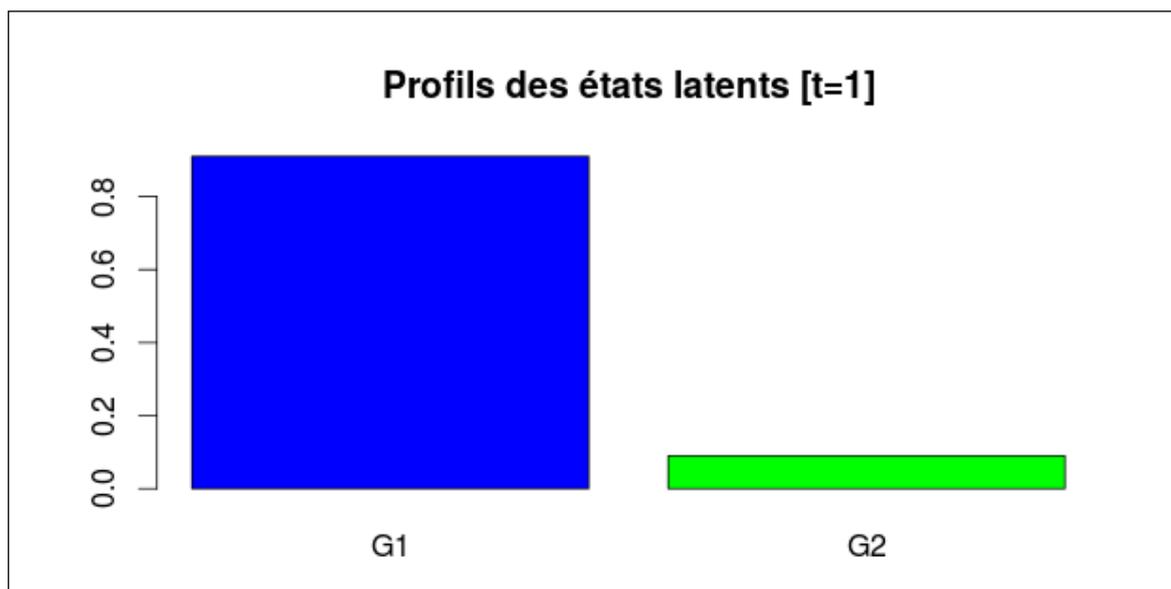


Figure 73 : Profils des états latents au temps  $t = 1$ .

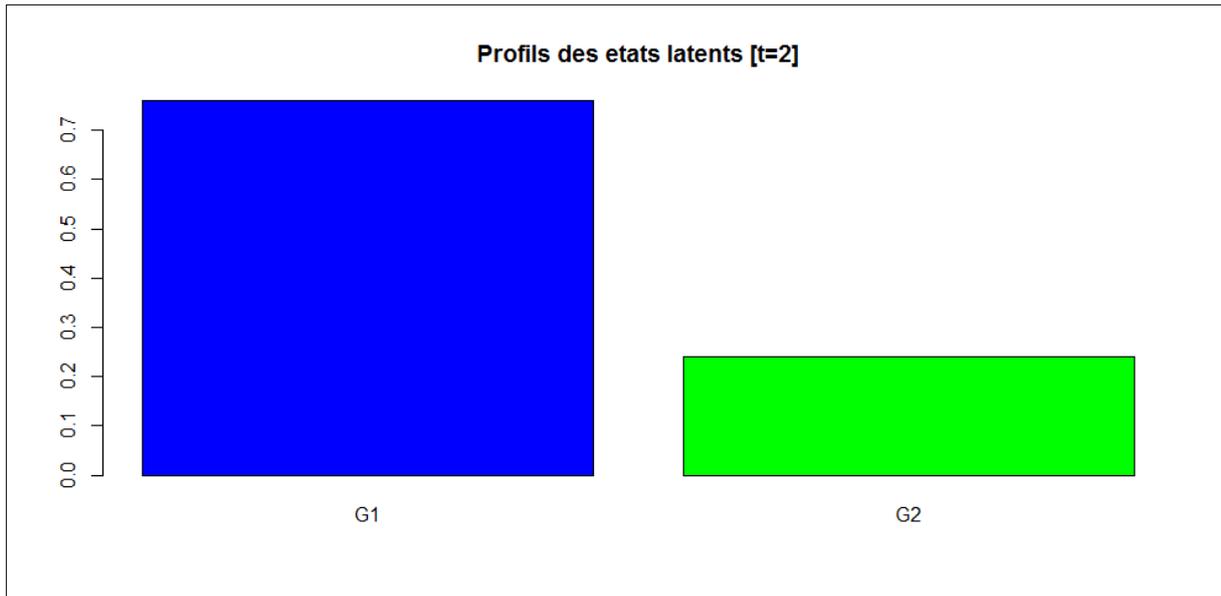


Figure 74 : Profils des états latents au temps  $t = 2$

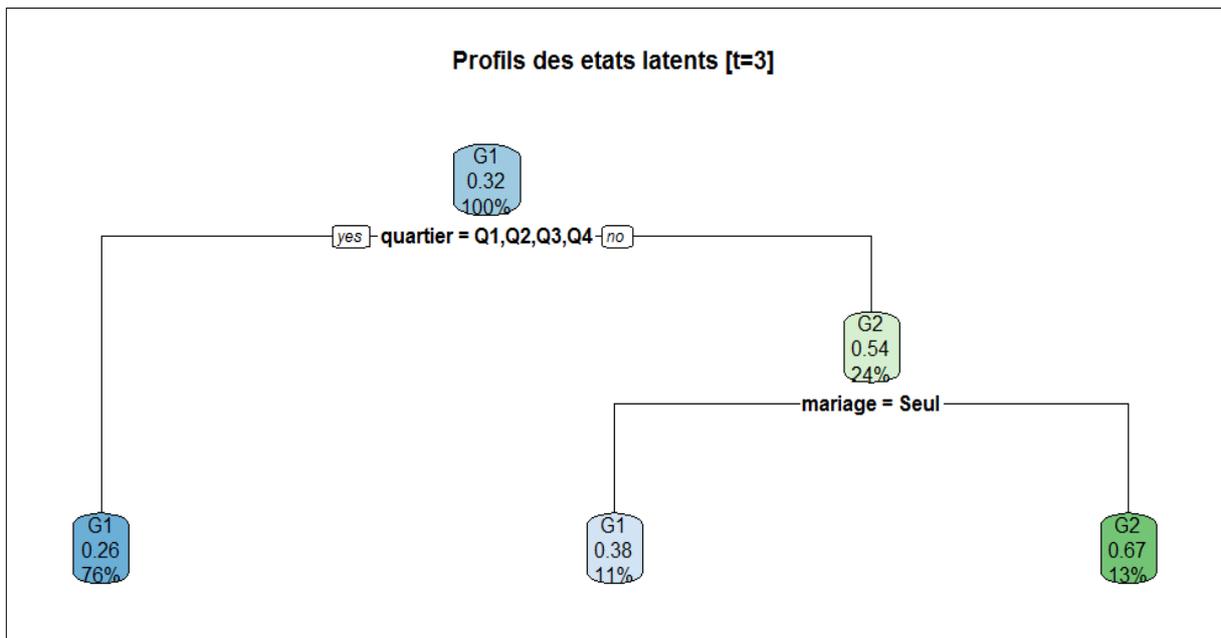


Figure 75 : Profils des états latents au temps  $t = 3$

Tout comme dans le cas statique, les évolutions des probabilités issues des modèles des classes latentes peuvent être difficiles à interpréter. C'est pourquoi, l'usage systématique des profils est conseillé. Il faudrait aussi remarquer la présence de profils sous forme de diagramme en bandes pour les deux premières périodes qui correspondent à une tendance à la population de se retrouver en très grande partie dans un état latent précis. Lorsque leur construction est possible, les arbres de décision décrivant les profils permettent de faciliter les interprétations. Les mécanismes d'interprétation sont les mêmes comme dans le cas statique.

## L'analyse des interactions entre les dimensions

La recherche automatique des structures d'interactions entre les dimensions a été abordée dans le cas statique. Avec les données dynamiques, il s'agit de déterminer les interactions entre les dimensions pour chaque période de temps donnée. La mise en œuvre de cette analyse est donnée par l'algorithme suivant :

---

### Algorithme 30 : Interactions entre les dimensions pour cas dynamique

---

```
1. #####
2. # IDENTIFICATION DES INTERACTIONS ENTRE LES DIMENSIONS : CAS DYNAMIQUE #
3. #####
4. source("rkdimension.R")
5. # Modele statique (pour chaque date donnee)
6. dim.dyn <- rkdimension(res.dyn, plot.outer=TRUE, plot.inner=TRUE, temps=2)
```

---

Les figures suivantes présentent les résultats de l'application de l'algorithme MGSL aux données simulées pour chacune des trois périodes de temps considérées :

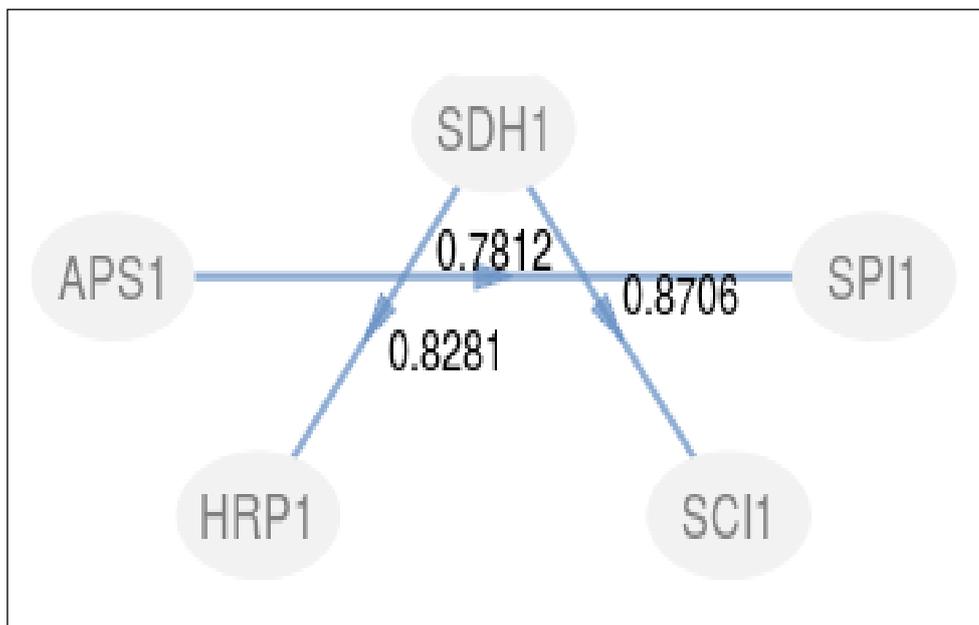


Figure 76 : Relations entre les dimensions au temps  $t = 1$ .

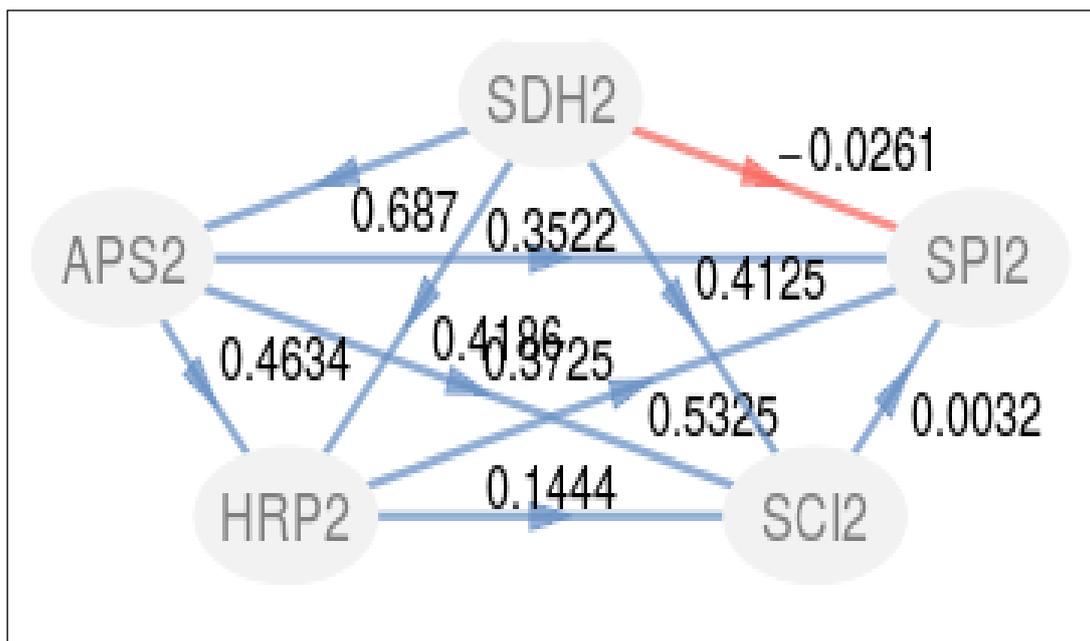


Figure 77 : Relations entre les dimensions au temps  $t = 2$



Figure 78 : Relations entre les dimensions au temps  $t = 3$

Ces graphiques montrent que, si l'on s'en tient aux données simulées, la structure d'interaction entre les cinq dimensions de la résilience étudiées change considérablement d'une période à une autre. En pratique, ceci est caractéristique d'une population soumise à de profonds bouleversements d'une période à une autre.

## 8.2) L'ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DES ETATS DE VULNERABILITE

### La caractérisation de la dynamique des états de vulnérabilité

La prise en compte de l'aspect dynamique de la résilience offre des possibilités d'analyse qui ne sont pas disponibles dans le cas statique. Les deux graphiques suivants présentent les évolutions des états de vulnérabilité et des propensions à la souffrance dans le temps :

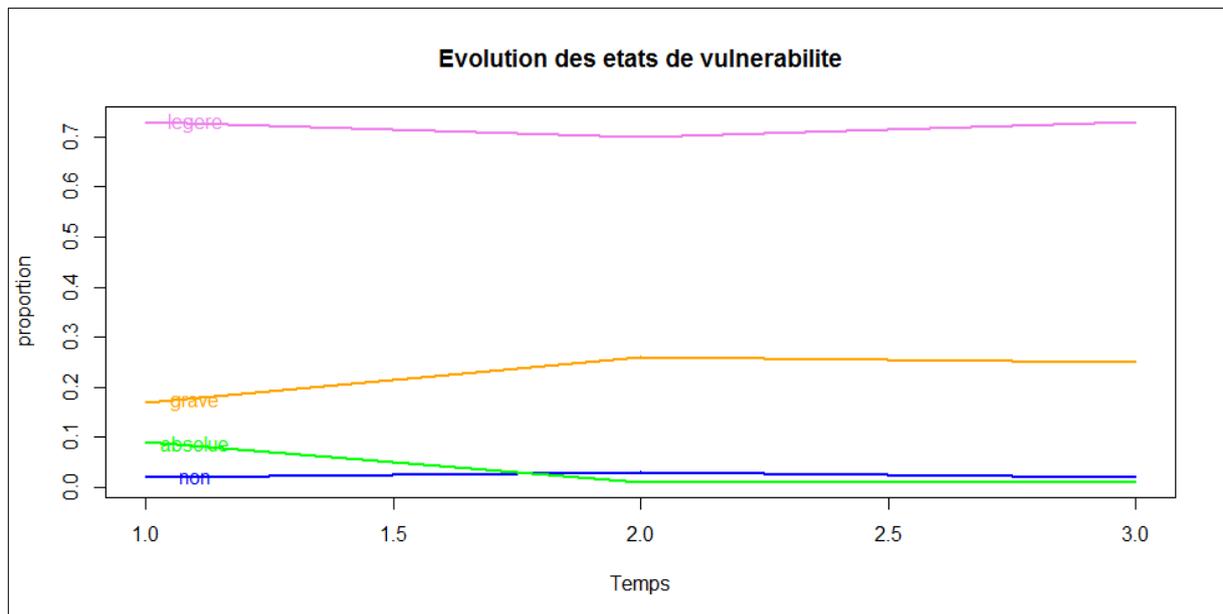


Figure 79 : Evolution des états de vulnérabilité dans le temps

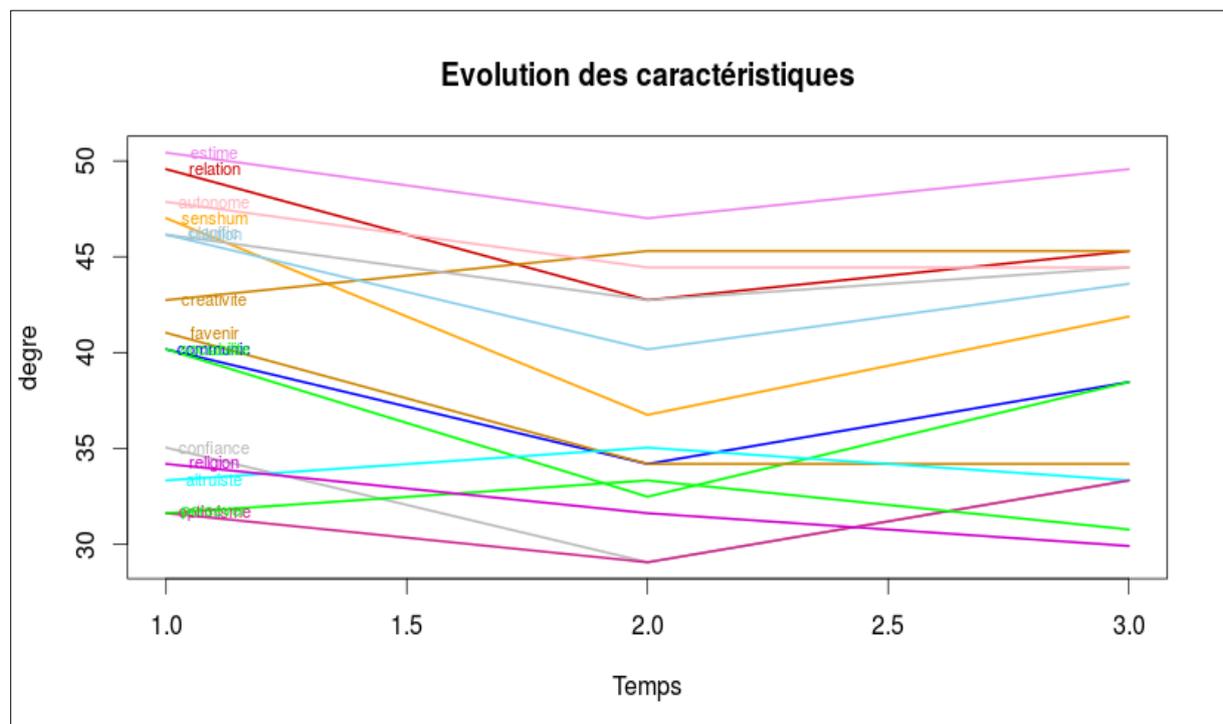


Figure 80 : Evolution des pertes de caractéristiques dans le temps

Au niveau des états de vulnérabilité, le graphique d'évolution permet d'apprécier l'évolution de la proportion d'individus qui se trouvent dans un état donné dans le temps. On peut y constater la quasi-constance de la proportion d'individus se trouvant dans les états de vulnérabilité grave et de vulnérabilité absolue. On retrouve aussi le fait que la proportion d'individus se trouvant dans l'état de vulnérabilité légère croît de la première période à la deuxième et celle des individus absolument vulnérables diminue de la première période à la deuxième. De la deuxième période à la troisième, les proportions d'individus dans les différents états de vulnérabilité restent relativement stables.

En ce qui concerne l'évolution des pertes de caractéristiques, le graphique permet d'apprécier la baisse, l'augmentation ou la constance du degré de perte lié à une caractéristique. Pour une caractéristique donnée, la baisse du degré de pertes d'une période à une autre traduit une amélioration de cette caractéristique au sein de la population entre ces deux périodes. Quant à la croissance du degré de perte d'une période à une autre, elle traduit une dégradation générale de cette caractéristique au sein de la population entre ces deux périodes. En plus de ces deux outils d'analyse dynamique, trois autres graphiques permettent de mieux apprécier la dynamique des capacités de rebond. La première concerne la chance que possède un individu quelconque de se retrouver dans un état de vulnérabilité juste après le choc. Le graphique suivant fournit la probabilité que les individus se retrouvent dans chacun des états juste après le choc :

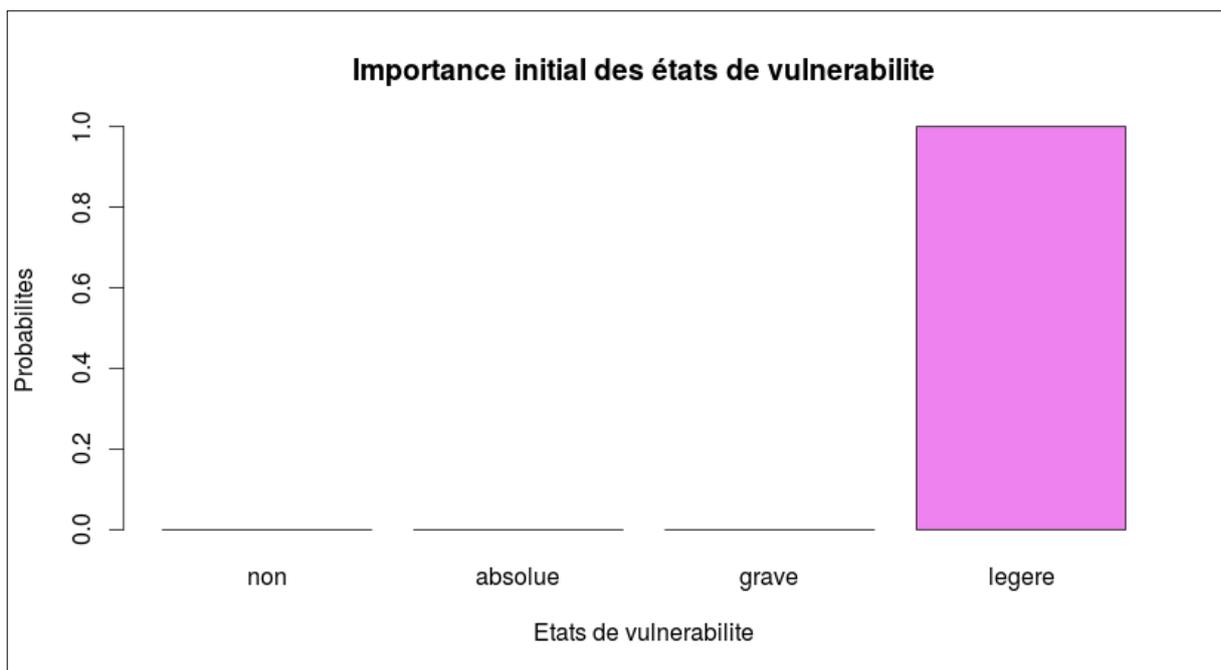


Figure 81 : Importance initiale des états de vulnérabilité

Ce graphique montre que, juste après la survenue du choc, la grande majorité des adultes de Bouaké sont légèrement vulnérables. Il est aussi possible d'apprécier les transitions entre les différents états de vulnérabilité, c'est-à-dire, la chance qu'à un individu de passer d'un état de vulnérabilité à un autre. Le graphique suivant présente les changements d'états :

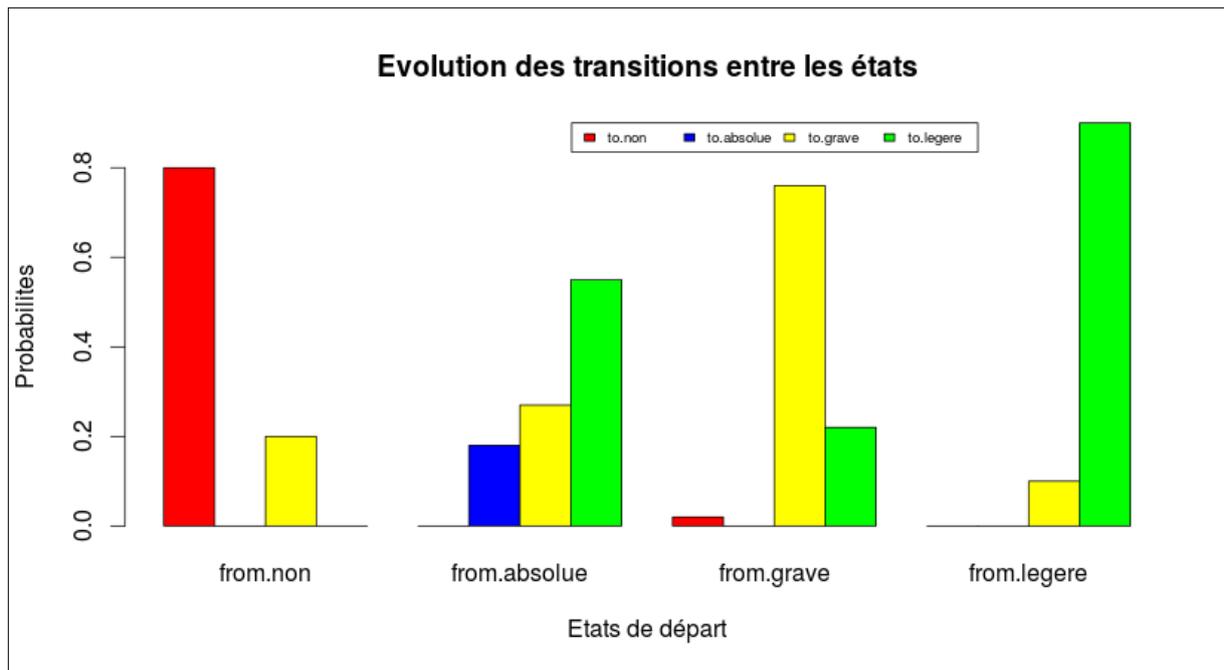


Figure 82 : Evolution des transitions entre états de vulnérabilité

Ce graphique montre que les individus absolument vulnérables ont une très faible chance de rester dans cet état. Ils ont beaucoup plus de chance de devenir légèrement vulnérables ou dans le pire des cas, ont un peu plus de chance de se trouver dans un état de vulnérabilité grave. Ceux qui sont gravement vulnérables, légèrement vulnérables ou non vulnérables ont plus de chance de rester dans leur même état avec le temps. Par conséquent, hormis l'état de vulnérabilité absolue, les autres états de vulnérabilité sont des états absorbants. C'est-à-dire qu'une fois qu'un adulte de Bouaké se retrouve dans l'un de ces états, il a de très forte chance d'y demeurer.

En pratique, il est impératif d'apporter de l'aide extérieure aux individus qui se trouvent dans des états absorbants non souhaitables comme l'état de vulnérabilité grave ; et dans une moindre mesure l'état de vulnérabilité légère. Chaque catégorie d'état (passager, absorbant, etc.) peut cacher de nombreuses réalités qu'il est important de chercher à comprendre par des échanges directs avec les individus. Par exemple, les états transitoires comme l'état de vulnérabilité absolue peuvent traduire une volonté des individus à refuser la souffrance trop grande dans laquelle ils se trouvent en adoptant des stratégies drastiques ou être l'effet d'un soutien extérieur significatif.

En plus des relations de transition entre les différents états, l'algorithme permet d'apprécier les relations existantes entre ces auto-perceptions et les états de vulnérabilité par le recours à la théorie stochastique de la résilience. Ces interrelations sont modélisées comme des matrices de générations d'états cachés à partir des états observés en utilisant un modèle de Markov caché. Le graphique suivant fournit la représentation graphique de ces interrelations :

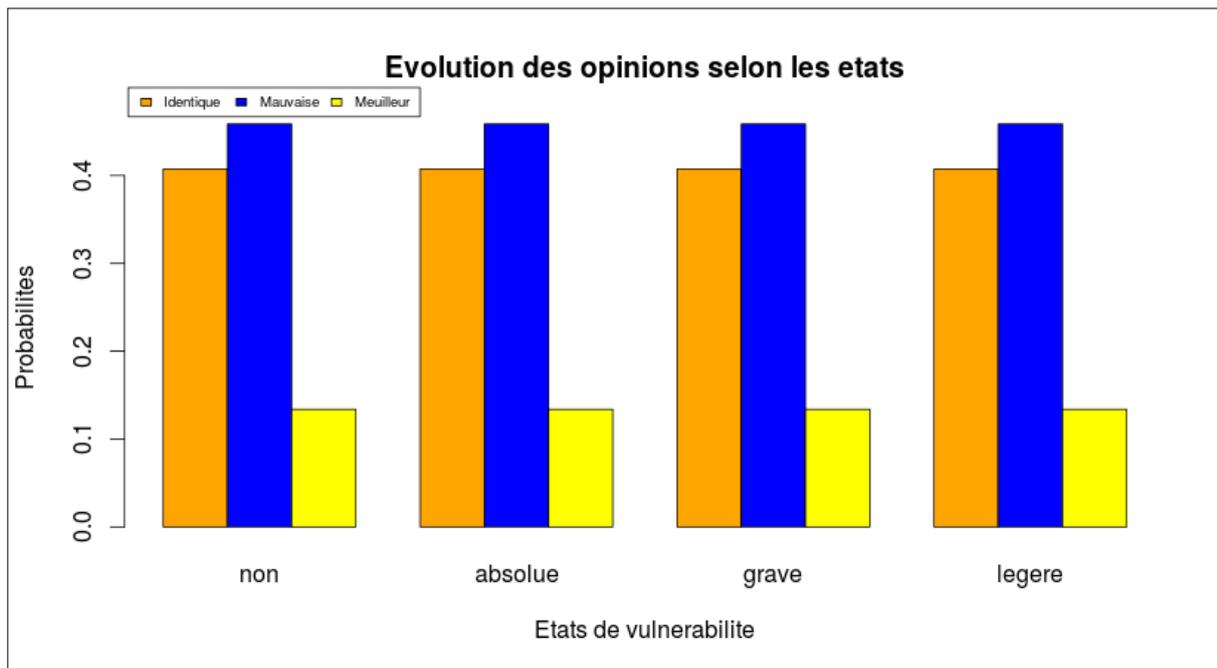


Figure 83 : Evolution des opinions selon les états de vulnérabilité

Il ressort de ces graphiques que, quelque soit l'état de vulnérabilité dans lequel se trouvent individus adultes de Bouaké, ils ont toujours tendance à croire que leur situation est soit mauvaise, soit inchangée. Une telle perception peut traduire soit un effet de mode social visant à véhiculer l'idée selon laquelle le choc est nécessairement dégradant, soit une situation qui n'a pas changé depuis la survenue du choc.

Cependant, il est important de souligner la nécessité d'investigation supplémentaire par échanges directs avec les concernés pour comprendre les comportements mis en exergue par les outils de la Résiliométrie.

### 8.3) L'ANALYSE DES ESPOIRS INDIVIDUELS A LA RESILIENCE

L'une des analyses propres aux données dynamiques est la possibilité d'apprécier l'espoir que les individus traumatisés ont de devenir résilient. La fonction **rkmeasure**, dans le cas dynamique, contient les estimations des modèles de croissance douce linéaires et quadratiques permettant d'étudier les espoirs individuels à la résilience.

Les modèles résiliométriques d'analyse de l'espoir à la résilience sont des versions PLSPM des modèles de courbes de croissances latentes. Les figures suivantes présentent les graphes des modèles externes et des modèles structurels dans le cas linéaire :

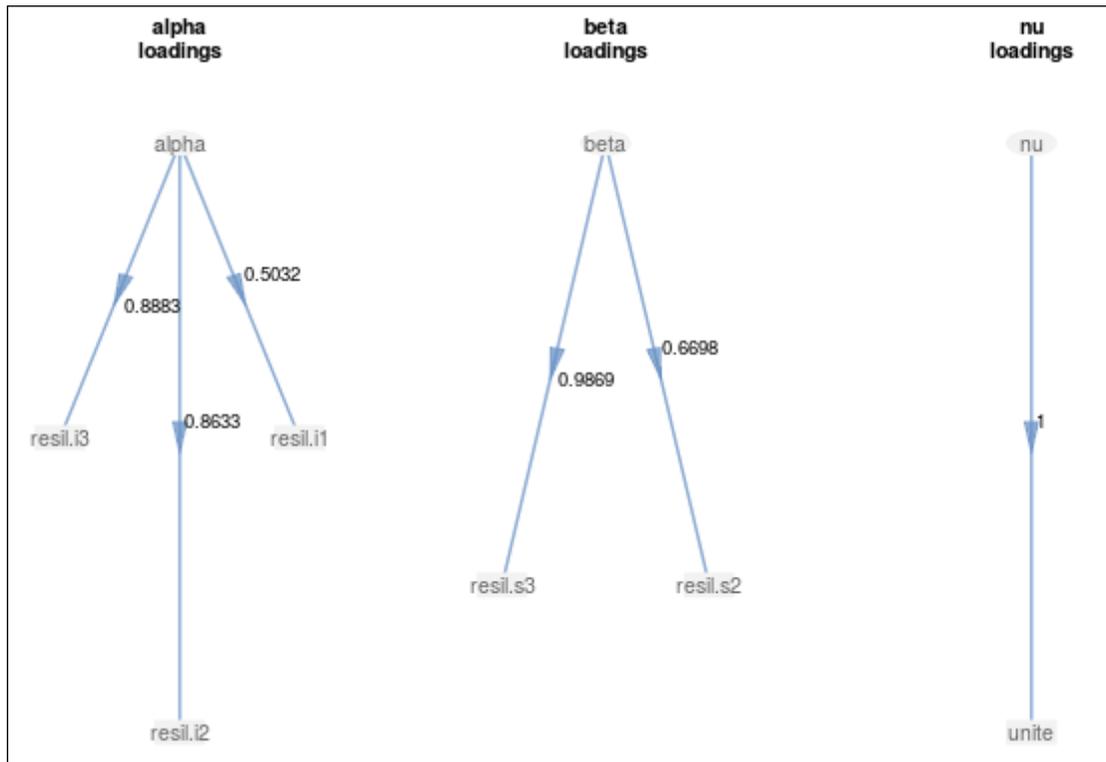


Figure 84 : Modèle externe estimé d'un modèle douce linéaire

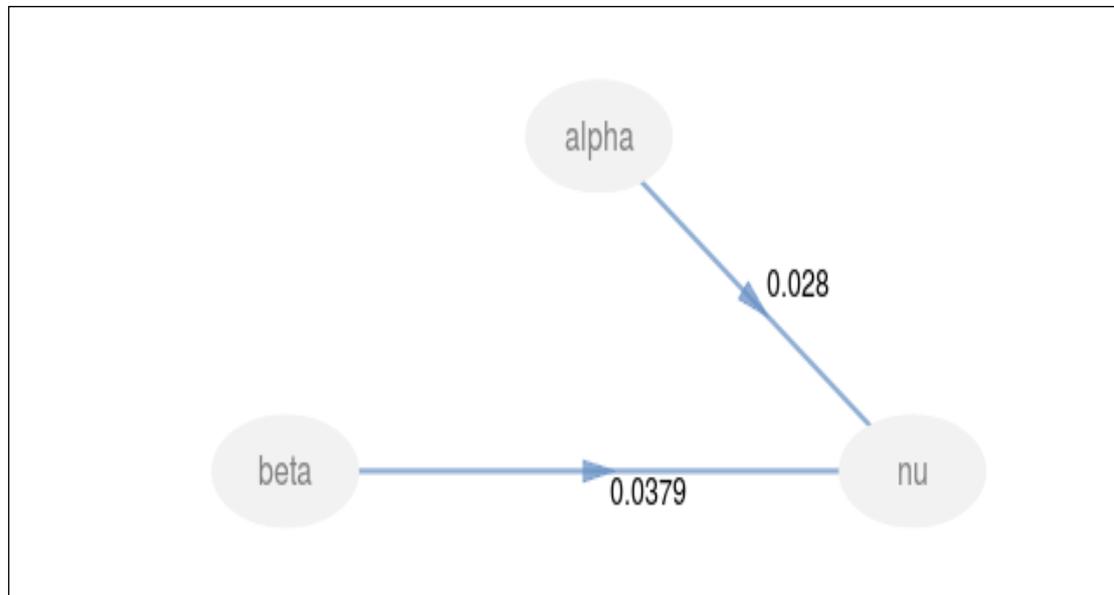


Figure 85 : Modèle structurel estimé d'un modèle douce linéaire

Comme le montrent ces figures, les modèles de croissance douce linéaires possèdent trois variables latentes qui caractérisent le sens d'évolution de l'espoir à la résilience. Il est bien

entendu que ces paramètres sont estimés au niveau individuel. Les graphiques suivants fournissent les graphes des modèles internes et externes dans le cas quadratique :

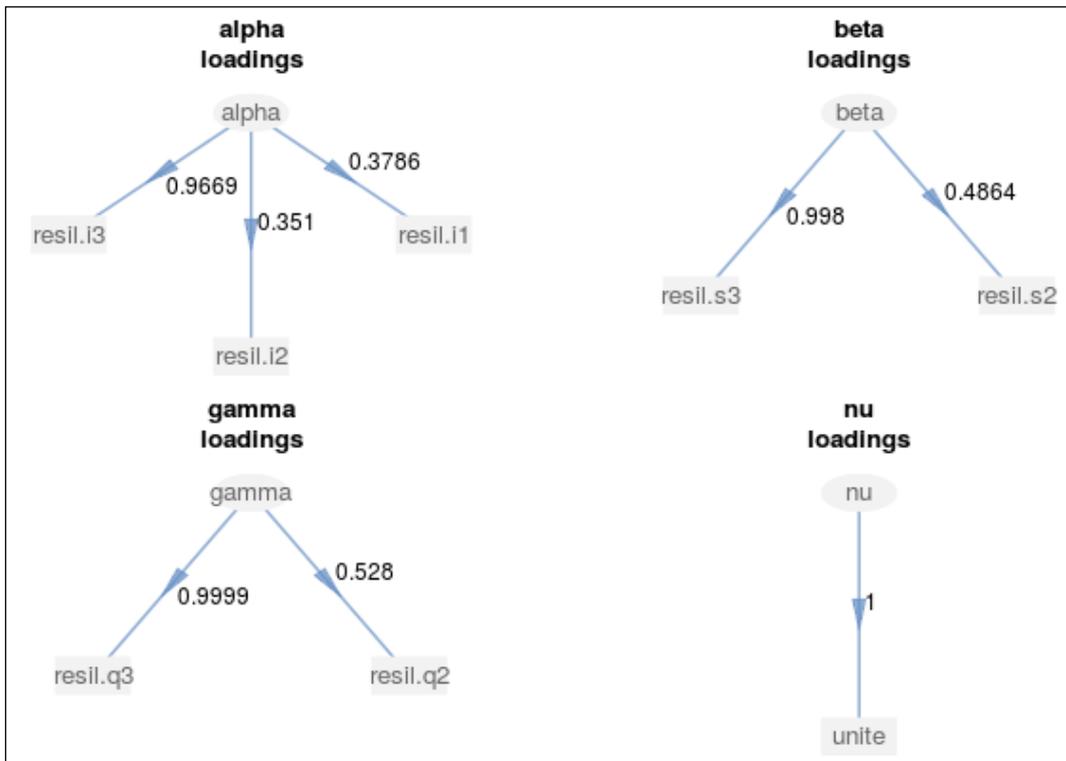


Figure 86 : Modèle externe estimé d'un modèle douce quadratique

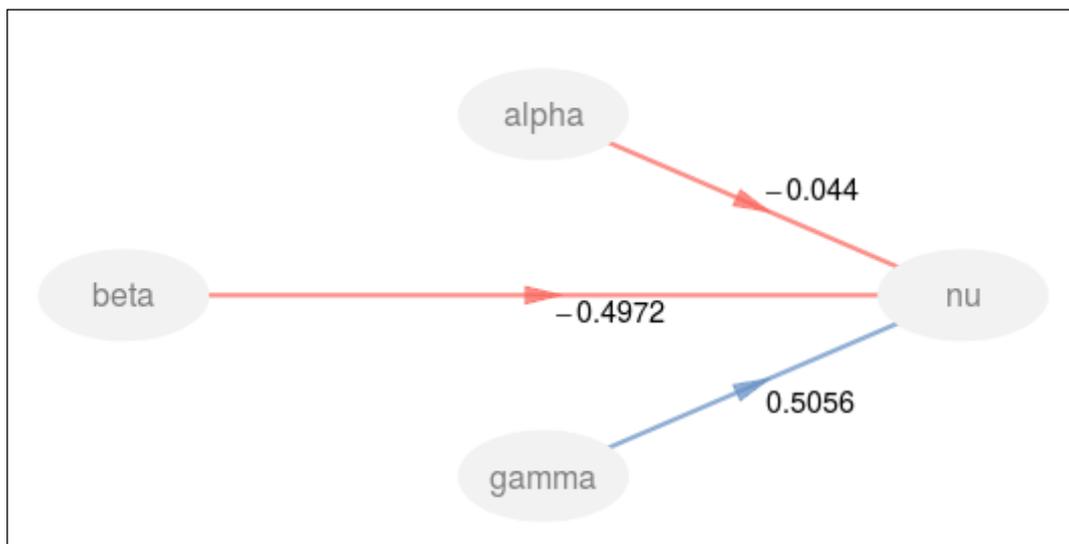


Figure 87 : Modèle structurel estimé d'un modèle douce quadratique

Comme le montre ces figures, les modèles de croissance douce linéaires possèdent quatre variables latentes qui caractérisent la vitesse d'évolution de l'espoir à la résilience. Tout

comme le cas linéaire, ces paramètres sont estimés au niveau individuel. Cependant, ces modèles ne sont que des étapes intermédiaires dans les algorithmes des modèles de croissance douce, qu'ils soient de type linéaire ou quadratique.

En réalité, seules les courbes d'évolutions individuelles sont importantes. Dans le contexte de l'analyse résiliométrique, les graphiques des modèles externes et structurels présentés ne sont pas nécessaires. L'algorithme suivant présente la détermination des courbes d'évolution pour les deux premiers individus de la population (les individus 1 et 2) :

---

Algorithme 31 : Mise en oeuvre des modèles d'espoir à la résilience avec R

---

```

1. #####
2. ##### ESPOIR A LA RESILIENCE DES INDIVIDUS #####
3. #####
4. source("rkespoir.R")
5. # courbes lineaires
6. rkespoir(res.dyn,1:2,type="lineaire")
7. # courbes quadratiques
8. rkespoir(res.dyn,1:2,type="quadratique")

```

---

Pour un individu donné, il y a une courbe linéaire qui décrit le sens d'évolution de l'espoir à la résilience (espoir ou désespoir) et une courbe quadratique qui décrit la vitesse à laquelle évolue son espoir à la résilience.

En pratique, quatre configurations possibles peuvent se présenter à savoir l'espoir à vitesse croissante, l'espoir à vitesse décroissante, le désespoir à vitesse croissante et le désespoir à vitesse décroissante. Le tableau suivant fournit une caractérisation des individus se trouvant dans chacune des quatre situations :

Tableau 25 : Catégories d'espoir à la résilience

		Sens d'espoir à la résilience (modèle linéaire)	
		Croissant (espoir)	Décroissant (désespoir)
Vitesse d'évolution de l'espoir à la résilience (modèle quadratique)	Croissant	Espoir qui s'intensifie d'une période à une autre dans le temps	Désespoir qui s'accroît d'une période à une autre dans le temps
	Décroissant	Espoir qui diminue d'une période à une autre dans le temps	Désespoir qui s'atténue d'une période à une autre dans le temps

Les figures suivantes présentent les courbes d'évolutions linéaires et quadratiques pour les deux premiers individus et permet d'illustrer deux comportements différents selon le sens et la vitesse de l'espoir à la résilience :

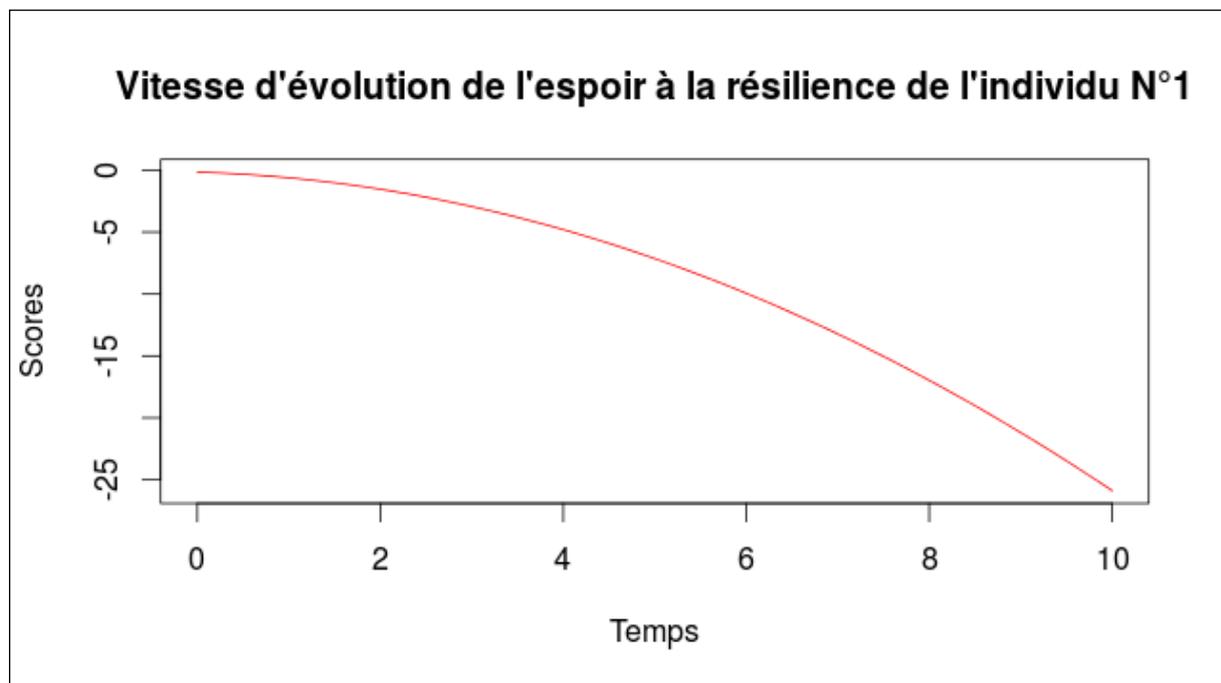
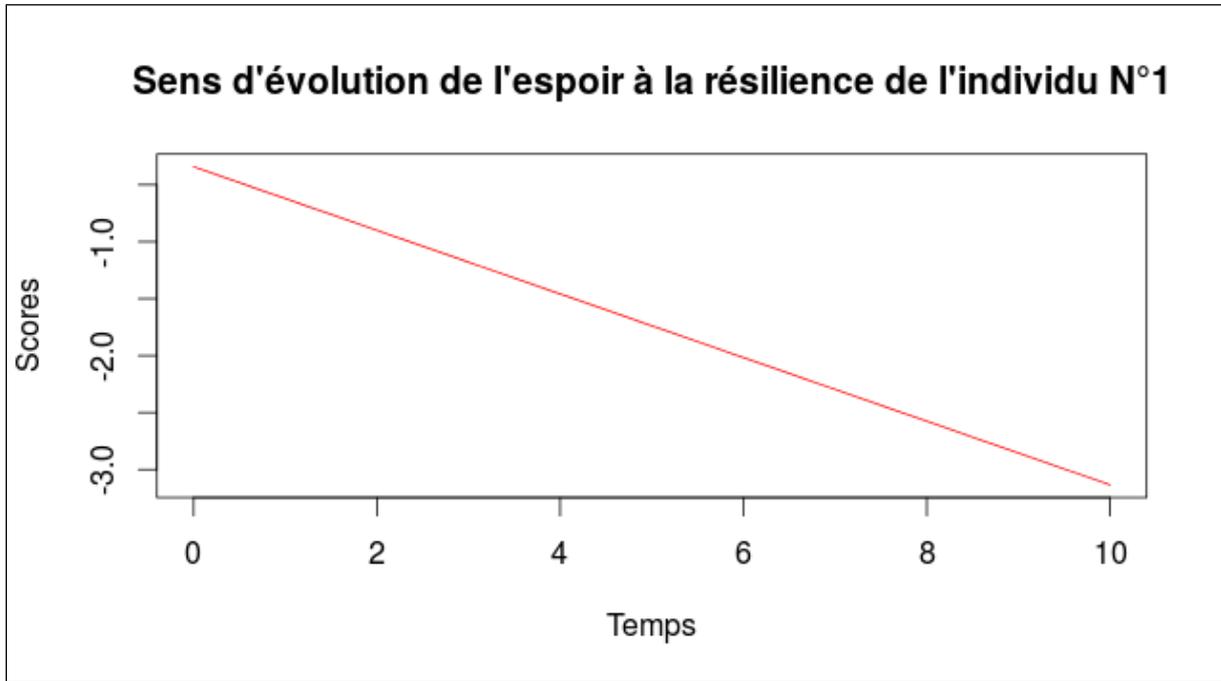


Figure 89 : Vitesse d'évolution de l'espoir à la résilience de l'individu 1

L'individu 1 est un individu caractérisé par un désespoir à la résilience qui s'atténue avec le temps.

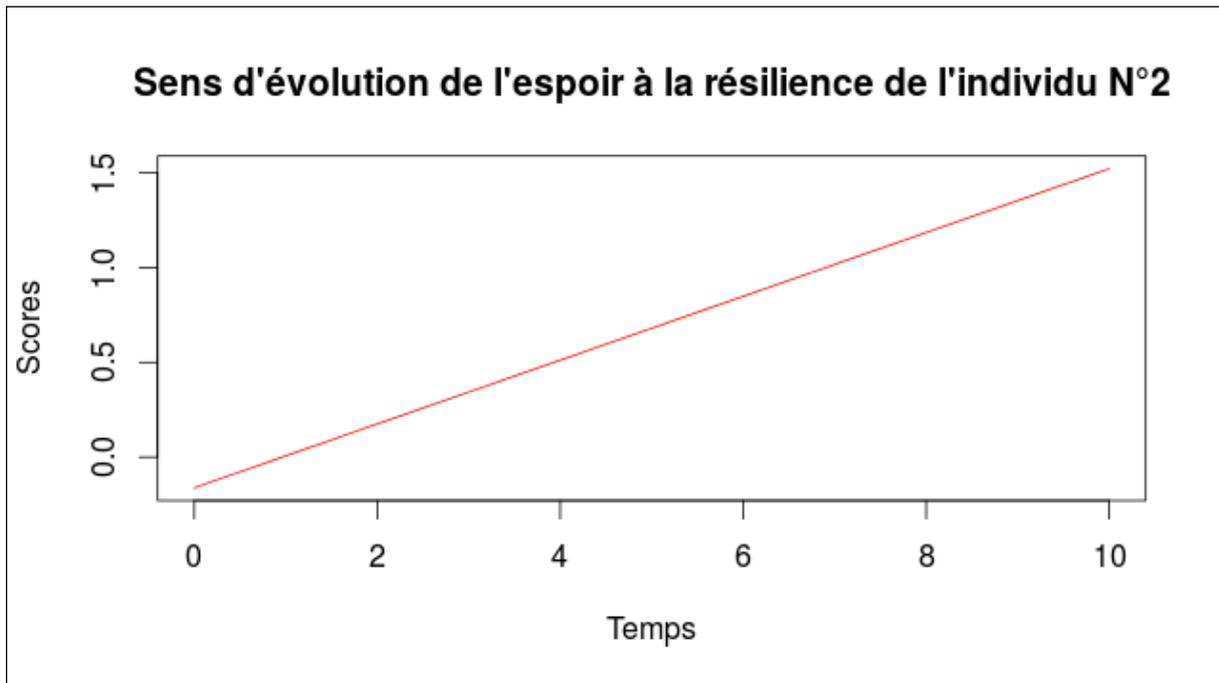


Figure 90 : Sens d'évolution de l'espoir à la résilience de l'individu 2

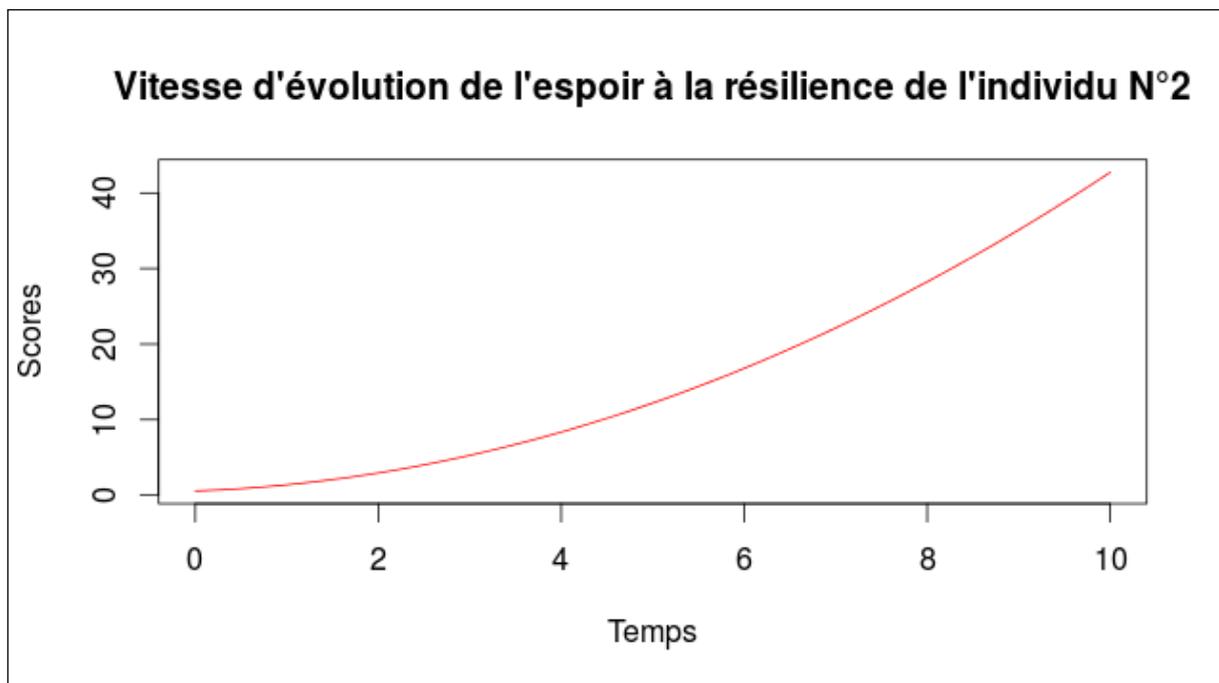


Figure 91 : Vitesse d'évolution de l'espoir à la résilience de l'individu 2

L'individu 2 est un individu caractérisé par un espoir à la résilience qui s'intensifie dans le temps.

---

## CONCLUSION GENERALE

---

La résilience est de plus en plus étudiée dans le monde entier et les tentatives d'opérationnalisation du concept sont nombreuses et diverses. Cette thèse de Doctorat se situe dans ce cadre avec pour objectif de proposer une discipline, baptisée « Résiliométrie », spécialisée dans la mesure, l'analyse et la modélisation des processus de résilience. Cette proposition devrait, à terme, fournir des outils et un langage universels qui seraient la référence, voire la norme en matière d'études des processus de résilience en général, et des processus de résilience sociale en particulier. D'un point de vue historique, le graphique suivant situe la proposition d'une Résiliométrie dans l'évolution des travaux sur la résilience depuis les recherches pionnières de Holling en 1973 :

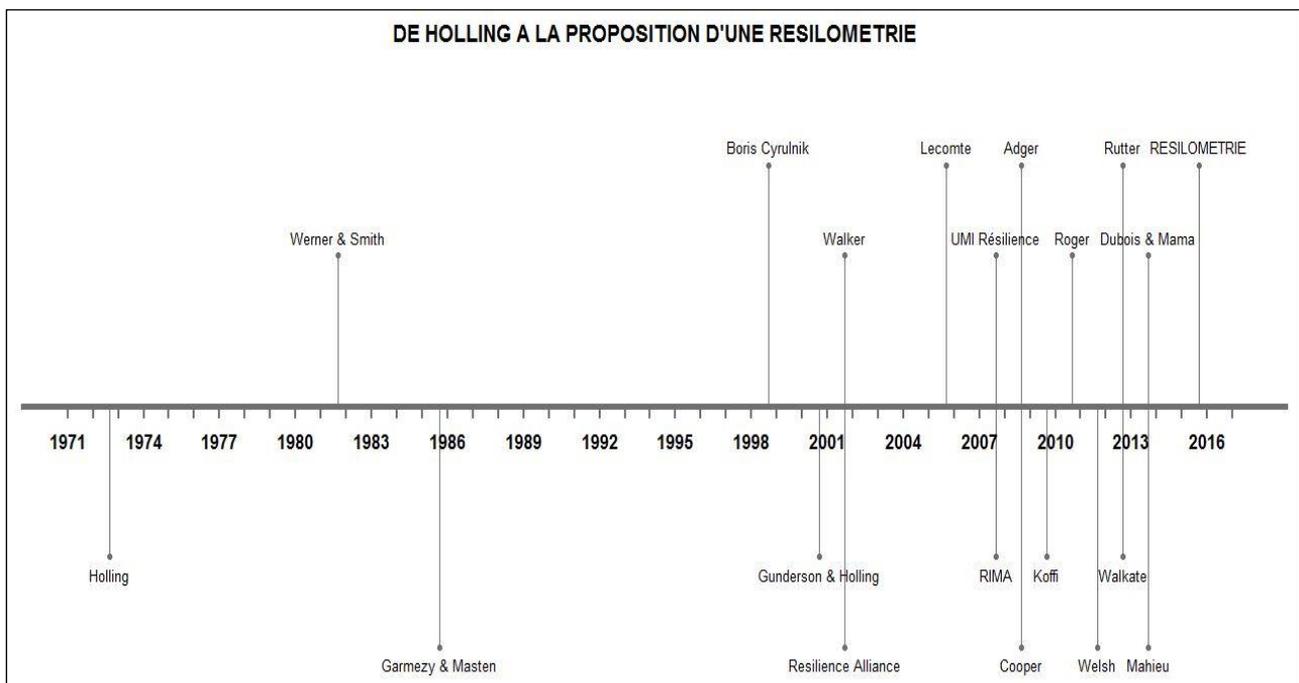


Figure 92 : Résilience de Holling à la proposition d'une Résiliométrie

La mise en place de cette proposition de Résiliométrie nécessitant des choix techniques, l'option choisie est d'utiliser une approche essentiellement computationnelle. L'orientation computationnelle de la Résiliométrie signifie que la complexité des méthodes et modèles développés exclut le recours à des solutions ayant nécessairement, du point de vue mathématique, des formes analytiques explicites. Ainsi, les formules mathématiques que l'on trouve dans les propositions de méthodes résiliométriques devraient avoir pour rôle de spécifier ou traduire la modélisation du phénomène étudié. Cependant, la complexité de telles relations demande en général le recours à l'ordinateur pour simuler la solution.

Un tel choix technique n'est pas fortuit. En effet, tout d'abord, les théories de la résilience sont nombreuses et ne font pas encore l'objet d'une réelle uniformisation universelle contrairement aux théories économiques par exemple. De ce fait, l'usage des modèles basés sur des théories en vue de les infirmer ou les confirmer, comme cela se fait en économétrie, n'est pas approprié. Ensuite, la spécificité de la résilience fait que l'étude des processus de résilience ne consiste pas à tester des comportements pré-spécifiés, mais plutôt à découvrir les attitudes cachés des individus qui gouvernent ces processus. Aussi, les concepts afférents à la résilience sont des concepts de haut niveau dont la mesure directe est problématique. Ces concepts étant en général inobservables, les techniques d'analyses des variables latentes semblent être les mieux indiquées. Enfin, la résilience est un concept étudié dans presque tous les domaines de connaissance. Il est donc plus que nécessaire que les outils analytiques n'exhibent pas la complexité technique sous-jacente ; d'où la nécessité d'automatiser les calculs complexes et de fournir des résultats uniquement sous des formes simples à comprendre et à interpréter. Ce sont donc ces différentes considérations qui ont militées en faveur du choix d'une approche computationnelle dans la proposition d'une Résiliométrie.

Compte tenu des choix techniques opérés, la proposition d'une Résiliométrie puise ses outils dans les approches computationnelles des mathématiques appliquées et de l'intelligence artificielle en les adaptant aux réalités propres aux processus de résilience. L'adoption et le développement de la proposition de Résiliométrie pourrait constituer une avancée considérable dans la recherche de moyens d'opérationnalisation du concept de résilience dans n'importe quel domaine en général, et dans le domaine des sciences sociales en particulier. Les recherches dans la perspective d'une proposition de Résiliométrie ont non seulement pour but de mettre en place un corpus cohérent d'outils de mesure, d'analyse et de simulations adaptées à la résilience, mais aussi de mettre en lumière les restrictions et ambiguïtés éventuels du discours général sur la résilience pouvant rendre son opérationnalisation difficile. L'approche utilisée est essentiellement mathématique et informatique, en proposant un vocabulaire plus « juste » ou plus adapté à un certain niveau de formalisme, au prix d'une restriction du sens de certains concepts.

Au final, les recherches en Résiliométrie devraient aboutir, avec les autres travaux de recherches mathématiques et informatiques sur la résilience, à la mise en place de ce qu'il convient d'appeler l'ingénierie de la résilience. L'ingénierie de la résilience est ici définie comme l'ensemble des outils mathématiques et informatiques destinées à la collecte, au stockage, à l'analyse et à la modélisation des données relatives aux processus de résilience. Cette thèse s'est limitée à poser les fondements de la Résiliométrie en proposant des approches d'opérationnalisation du concept de résilience. Ces approches incluent aussi bien l'analyse des causes des chocs, les processus de résilience, que les actions susceptibles d'accroître la résilience des individus. Au stade actuel, la Résiliométrie fournit des moyens techniques permettant d'atteindre les dix (10) objectifs suivants :

- 1) Mesurer la résilience et ses dimensions
- 2) Déterminer l'état de résilience des individus
- 3) Déterminer les profils des individus ayant l'aptitude à la résilience
- 4) Regrouper les individus selon la similitude de leurs états psychologiques
- 5) Connaître l'évolution de l'espoir que les individus ont de devenir résilients
- 6) Identifier les causes significatives des chocs traumatiques
- 7) Identifier les effets significatifs des chocs traumatiques
- 8) Découvrir les relations d'interaction entre les dimensions de la résilience
- 9) Comprendre le mécanisme de transition entre les états de résilience
- 10) Comprendre la relation entre l'appréciation que les individus ont de leur propre situation de souffrance et les états de résilience effectifs

L'intérêt de la Résiliométrie et sa survie dépend en grande partie des applications des méthodes développées sur de nombreux cas réels. Ces études permettront non seulement d'apprécier la portée pratique des outils proposés, mais en plus de les améliorer. Dans ce contexte, de nombreuses voies d'amélioration restent possibles, allant de la proposition de nouvelles variantes des modèles développées au développement de nouvelles approches permettant de prendre en compte de nouvelles questions de recherches sur la résilience ou des spécificités non prise en compte dans le cadre de cette thèse. De nombreuses pistes d'amélioration sont possibles parmi lesquels les dix perspectives suivantes ont été identifiées :

- 1) Le développement de méthodes de calcul des bornes de résilience.
- 2) Développement de modèles de détection de communautés résilientes dans les réseaux sociaux par l'usage de la théorie stochastique de la résilience.
- 3) Développement d'autres tests de significativité des blocs latents et comparaison des résultats des différents tests de significativité.
- 4) Etude de l'effet de la loi de probabilité de la variable aléatoire de perturbation de la variable unité dans les modèles de croissance douce sur la robustesse des résultats de ces modèles.
- 5) Application des techniques résiliométriques sur des cas réels en suivant tout le protocole de la Résiliométrie.
- 6) Développement de modèles résiliométriques de simulation multi-agents sur des problèmes concrets.
- 7) Optimisation des différentes implémentations en langage R des algorithmes de base de la Résiliométrie.
- 8) La recherche d'un schéma structurel standard et général de modélisation de la résilience ou, à défaut, de schémas standards pour des domaines d'applications clairement identifiés
- 9) L'adaptation de la caractérisation mathématique de la résilience par la théorie de viabilité au contexte des environnements résiliométriques.
- 10) La caractérisation mathématique de la résilience à partir des environnements résiliométriques en utilisant la logique floue.

---

---

# ANNEXES

---

---

---

## ANNEXE A : RAPPELS SUR LA THEORIE DE LA MESURE

---

La théorie de la mesure est une théorie mathématique basée sur la théorie des ensembles. Elle possède de nombreuses applications du fait de la flexibilité des concepts de base entraînant leurs extensions dans de nombreux domaines dont les probabilités. Pour une présentation très sommaire des concepts de base de cette théorie, considérons les notations suivantes :

- ✓  $\Omega$  un ensemble non vide quelconque
- ✓  $\mathcal{P}(\Omega)$  l'ensemble des parties de  $\Omega$
- ✓  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(\Omega)$  une partie de  $\Omega$

### Définition 1 : Tribu

*L'ensemble  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(\Omega)$  est une tribu (ou  $\sigma$ -algèbre) sur  $\Omega$  s'il est non vide, stable par passage au complémentaire et par union dénombrable; c'est-à-dire :*

- 1)  $\mathcal{A} \neq \emptyset$
- 2)  $\forall A \in \mathcal{A}, A^c \in \mathcal{A}$
- 3)  $\forall (A_i)_{i \in \mathbb{N}} | A_i \in \mathcal{A}, \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i \in \mathcal{A}$

La notion de tribu a pris de plus en plus d'importance dans de nombreux domaines des mathématiques. Elle constitue l'élément central de la théorie moderne de la mesure. Le mathématicien russe Kolmogorov-Smirnov a exploité cette notion de tribu pour construire une axiomatique à la base de la théorie moderne des probabilités. Cette axiomatique a l'avantage de fournir une interprétation concrète de la notion de tribu. C'est ainsi que, dans l'étude des processus stochastiques où l'ensemble  $\mathcal{A}$  est indexé par le temps,  $\forall t \in [1, T]$ , la tribu  $\mathcal{A}_t \in \mathcal{A}$  représente toutes les informations dont on dispose sur le processus aléatoire (le phénomène étudié) au temps  $t$ .

### Propriétés d'une tribu

La notion de tribu comporte un certain nombre de propriétés dont les plus élémentaires sont les suivantes :

- 1) Une tribu est stable par union finie (car stable par union dénombrable)
- 2)  $\Omega \in \mathcal{A}$ . En effet,  $\Omega = A \cup A^c, \forall A \in \mathcal{A}$
- 3)  $\emptyset \in \mathcal{A}$ . En effet,  $\emptyset = \Omega^c$
- 4)  $\forall (A_i)_{i \in \mathbb{N}} | A_i \in \mathcal{A}, \bigcap_{i=1}^{\infty} A_i \in \mathcal{A}$ . En effet,  $(\bigcap_{i=1}^{\infty} A_i)^c = \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i^c$

### Définition 2: tribu engendrée

Soit  $(\mathcal{A}_i)_{i \in I}$  un ensemble de tribus de  $\Omega$ . On appelle tribu engendrée par la famille de tribus  $(\mathcal{A}_i)_{i \in I}$ , la plus petite tribu contenant toutes les tribus  $(\mathcal{A}_i)_{i \in I}$ . Elle est notée  $\sigma(\mathcal{A}_i, i \in I)$ .

### Propriété des tribus engendrées

La tribu engendrée par la famille de tribus  $(\mathcal{A}_i)_{i \in I}$  est identique à la tribu engendrée par leur intersection. Mathématiquement, on a donc la relation suivante :

$$\sigma(\mathcal{A}_i, i \in I) = \sigma\left(\bigcap_{i \in I} \mathcal{A}_i\right)$$

### Définition 3 : Filtration

Soit  $(\mathcal{A}_n)_{n \geq 0}$  une suite de tribus de  $\Omega$ . On dit que  $(\mathcal{A}_n)_{n \geq 0}$  est une filtration si la suite de tribu est croissante au sens de l'inclusion, c'est-à-dire telle que  $\forall n \geq 0, \mathcal{A}_n \subset \mathcal{A}_{n+1}$ .

### Définition 4 : Espace mesurable

On appelle espace mesurable, un ensemble muni d'une tribu de parties de cet ensemble. Ainsi, si nous considérons un ensemble  $\Omega$  et une tribu  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(\Omega)$  de parties de  $\Omega$ , alors le couple  $(\Omega, \mathcal{A})$  est un espace mesurable.

Du fait de la définition même de la notion de tribu, il est important de comprendre qu'un ensemble peut donner lieu à une infinité d'espaces mesurables. Tout dépend de la tribu de parties de cet ensemble que l'on considère. L'espace mesurable n'est donc défini que si l'on précise clairement la tribu associée à l'ensemble considéré.

### Définition 5 : Mesure (positive)

Une mesure positive est une fonction qui associe des valeurs numériques positives à certains sous-ensembles d'un ensemble donné. Les mesures sont caractérisées par le fait que l'image de l'ensemble vide est zéro et aussi par le fait que l'image d'une réunion d'ensembles deux à deux disjoints est la somme des images de ces ensembles. Ainsi, si nous considérons l'espace mesurable  $(\Omega, \mathcal{A})$ , une mesure sur  $(\Omega, \mathcal{A})$  est une application  $\mu : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$  telle que :

- 1)  $\mu(\emptyset) = 0$
- 2)  $\mu\left(\bigcup_{k=1}^{\infty} A_k\right) = \sum_{k=1}^{\infty} \mu(A_k), \forall (A_k)_{k \in \mathbb{N}} \mid \{\forall (i \neq j), A_i \cap A_j = \emptyset\}$

La notion de mesure est une généralisation de la notion de longueur (sur la droite), d'aire (dans le plan) ou de volume (dans l'espace). Il reste toutefois possible d'étendre le concept à des quantités non nécessairement positives en attribuant des valeurs négatives à certains éléments de la tribu considérée.

### Définition 6 : Espace mesuré

On appelle espace mesuré, un espace mesurable muni d'une mesure sur cet espace. Ainsi, si nous considérons l'espace mesurable  $(\Omega, \mathcal{A})$  et une mesure  $\mu$  définie sur celui-ci alors le triplet  $(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$  est un espace mesuré.

Un espace mesurable peut donner lieu à une infinité d'espaces mesurés. Tout dépend de la mesure associée à cet espace. L'espace mesuré n'est donc défini que si l'on précise clairement la mesure associée à l'espace mesurable considéré.

---

## ANNEXE B : REFERENCES DES PUBLICATIONS DE LA THESE

---

- 1) Achiépo Odilon Yapo M., Mensah Edoete Patrice. « Resiliometrics: Principles of the Discipline and The Resilience Measure Models ». International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS), Vol. 14, No. 5, May 2016.  
[https://www.academia.edu/26211556/Resiliometrics\\_Principles\\_of\\_the\\_Discipline\\_and\\_The\\_Resilience\\_Measure\\_Models?auto=download](https://www.academia.edu/26211556/Resiliometrics_Principles_of_the_Discipline_and_The_Resilience_Measure_Models?auto=download)
- 2) Coulibaly Kpinna Tiekoura, Achiépo Odilon, Brou Konan Marcellin, Babri Michel, Aka Boko. « SimCT: A measure of semantic similarity adapted to hierarchies of concepts ». International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS), Vol. 14, No. 4, p. 37-44, April 2016.  
[https://www.academia.edu/25099624/SimCT\\_A\\_measure\\_of\\_semantic\\_similarity\\_adapted\\_to\\_hierarchies\\_of\\_concepts?auto=download](https://www.academia.edu/25099624/SimCT_A_measure_of_semantic_similarity_adapted_to_hierarchies_of_concepts?auto=download)
- 3) Achiépo Odilon Yapo M. (2015). « plspm.formula: Formula Based PLS Path Modeling ». R package version 1.0.1, Decembre 2015.  
<https://CRAN.R-project.org/package=plspm.formula>
- 4) Kouassi Bernard Saha, Odilon Yapo Achiépo, Konan Marcellin Brou, Souleyman Oumtanaga. « Storage and Bayesian modeling of data on the social resilience: Case of Orphans and Vulnerable Children (OVCs) in Côte d'Ivoire ». International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), Volume 12, Issue 4, July 2015.  
<http://ijcsi.org/papers/IJCSI-12-4-137-141.pdf>
- 5) Coulibaly Kpinna Tiekoura, Odilon Yapo M. Achiépo, Brou Konan Marcellin, Michel Babri. Resiliometrical modeling of interactions in social resilience dimensions ». International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), Volume 12, Issue 4, July 2015.  
<http://www.ijcsi.org/papers/IJCSI-12-4-149-155.pdf>
- 6) Odilon Yapo M. Achiépo, Behou Gérard N'Guessan, Konan Marcellin Brou. « Similarity Measure in the Case Based Reasoning Systems for Medical Diagnostics in Traditional Medicine ». International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), Volume 12, Issue 2, March 2015.  
<http://ijcsi.org/papers/IJCSI-12-2-239-244.pdf>
- 7) Behou Gérard N'Guessan, Konan Marcellin Brou, Odilon Yapo M. Achiépo, Michel Babri et Boko Aka. «Raisonnement médical : Application des Réseaux Bayésiens au diagnostic d'une maladie dans la médecine traditionnelle». Afrique Science, Vol.11, N°5, 2015.  
<http://www.afriquescience.info/document.php?id=5159>

---

## ANNEXE B : IMPLEMENTATION DES OUTILS DE BASE EN R

---

---

### Algorithme 32 : Spécification des variables à partir de formules en R

---

```
1. fraction.formula <- fonction(vecteur,indices){
2.   vecteur <- gsub(" ","",vecteur) ; Gauche= vector(length=0) ; Droite = list()
3.   if(grepl("~~",vecteur[indices[1]])) { signe="~~"} else { signe="=~"}
4.   for(k in indices){
5.     equ <- strsplit(vecteur[k], split=signe)[[1]]
6.     equ <- gsub(" ","",equ)
7.     Vgauche <- strsplit(equ[1], split=" ")[[1]]
8.     Vgauche <- gsub(" ","",Vgauche)
9.     Vgauche[Vgauche!=""]
10.    if(length(Vgauche)!=1) {stop('mauvaise de specification du modele')}
11.    Vdroite <- strsplit(equ[2], split="+ ")[[1]]
12.    Vdroite <- gsub(" ","",Vdroite)
13.    Vdroite[Vdroite!=""]
14.    if(length(Vdroite)<1) {stop('mauvaise de specification du modele')}
15.    Gauche <- c(Gauche,Vgauche) ; Droite <- c(Droite,list(Vdroite))
16.  }
17.  }
18.  return(list(Gauche,Droite))
19. }
```

---

---

### Algorithme 33 : Calcul des positions des manifestes en R

---

```
1. outer.list <- fonction(ovect.mu,res.def,res.inter,data) {
2.   varsm <- names(data) ; VLendo <- res.inter[[1]]
3.   ovect <- ovect.mu[[1]] ; mlist <- res.def[[2]]
4.   names(mlist) <- res.def[[1]] ; olist <- mlist[ovect]
5.   outer.l <- list()
6.   for(kf in names(olist)){
7.     fvars <- olist[[kf]]
8.     findex <- which(varsm %in% fvars)
9.     outer.l <- c(outer.l, list(findex))
10.  }
11.  }
12.  return(outer.l)
13. }
```

---

---

**Algorithme 34 : Ordre optimal des latentes de la matrice structurelle en R**

---

```
1. inner.order <- function(modele,res.def,res.inter){
2.  VLtot <- res.def[[1]] ; VM <- res.def[[2]] ; VLendo <- res.inter[[1]]
3.  x <- ifelse(VLtot %in% VLendo,1000,0)
4.  y <- ifelse(VLtot %in% VLendo,10,1)
5.  mu <- vector(length=0)
6.  for(k in 1:length(VLtot)){
7.    vark <- VLtot[k]
8.    if(vark %in% VLendo){
9.      indk <- which(res.inter[[1]] %in% vark)
10.     varsk <- res.inter[[2]][indk]
11.     fl <- function(s) s %in% varsk[[1]]; fl <- Vectorize(fl)
12.     v.k <- fl(VLtot)
13.     mu.k <- x[k]+sum(y[v.k])
14.   } else { mu.k <- x[k] }
15.   mu <- c(mu,mu.k)
16. }
17. names(mu) <- VLtot ; mu <- sort(mu) ; vl.ordre <- names(mu)
18. return(list(vl.ordre, mu))
19. }
20. }
```

---

---

**Algorithme 35 : Calcul de la matrice des relations structurelles en R**

---

```
1. inner.matrix <- function(ovect.mu,res.inter) {
2.  VLendo <- res.inter[[1]]
3.  ovect <- ovect.mu[[1]]
4.  nd <- length(ovect)
5.  M <- matrix(rep(0,nd^2),nrow=nd)
6.  for(i in 1:length(ovect)){
7.    for(j in 1:length(ovect)){
8.      if(i>j){
9.        VLi <- ovect[i]
10.       if(VLi %in% VLendo){
11.         VLj <- ovect[j]
12.         indi <- which(res.inter[[1]] %in% VLi)
13.         varsi <- res.inter[[2]][[indi]]
14.         if(VLj %in% varsi){
15.           M[i,j] <- 1
16.         } else {}
17.       } else {}
18.     } else {}
19.   } else {}
20. }
21. }
22. rownames(M) <- ovect
23. return(M)
24. }
```

---

---

Algorithme 36 : Calcul des paramètres d'un PLSPM à partir des formules en R

---

```
1. source("fraction.formula.R")
2. source("inner.order.R")
3. source("inner.matrix.R")
4. source("outer.list.R")
5. plsmp.params <- fonction(modele,data){
6.   coupe <- strsplit(modele, split = "\n")[[1]]
7.   coupe <- gsub(" ", "", coupe)
8.   ind.def <- grep("=~", coupe)
9.   ind.inter <- grep("~~", coupe)
10.  res.def <- fraction.formula(coupe, ind.def)
11.  res.inter <- fraction.formula(coupe, ind.inter)
12.  ovect.mu <- inner.order(modele, res.def, res.inter)
13.  M <- inner.matrix(ovect.mu, res.inter)
14.  outer.l <- outer.list(ovect.mu, res.def, res.inter, data)
15.  mode.v <- rep("A", length(res.def[[1]]))
16.  result <- list(inner.mat=M, outer.list=outer.l, mode.vect=mode.v)
17.  return(result)
18. }
19. }
```

---

---

Algorithme 37 : Estimation d'un PLSPM spécifié par des formules en R

---

```
1. require(plspm)
2. source("plsmp.params.R")
3. plsmp.rfit <- fonction(modele,data,plot.outer=TRUE,plot.inner=TRUE,scale=TRUE){
4.   params <- plsmp.params(modele,data)
5.   pathMatrix <- params[[1]]
6.   lvBlocs <- params[[2]]
7.   estModes <- params[[3]]
8.   result <- plsmp(data,pathMatrix,lvBlocs,estModes,scaled=scale,dataset=FALSE)
9.   if(plot.inner){
10.    innerplot(result)
11.  } else {}
12.  if(plot.outer){
13.    outerplot(result, what="loadings")
14.  } else{}
15.  return(result)
16. }
17. }
```

---

## ANNEXE C : QUELQUES RESULTATS DES SIMULATIONS

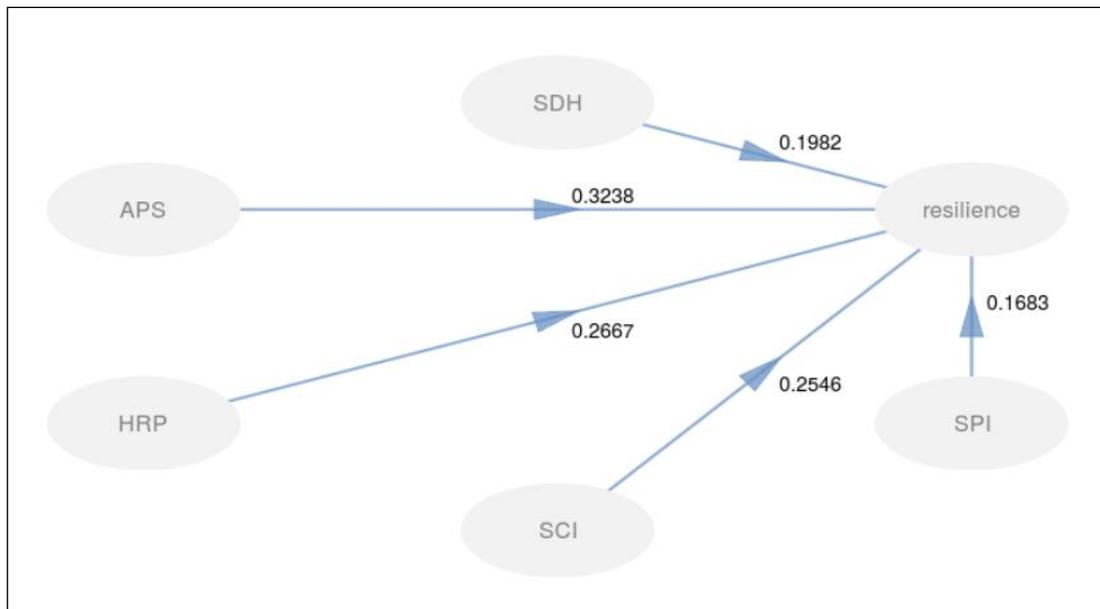


Figure 93 : Modèle structurel de mesure dans un cas statique

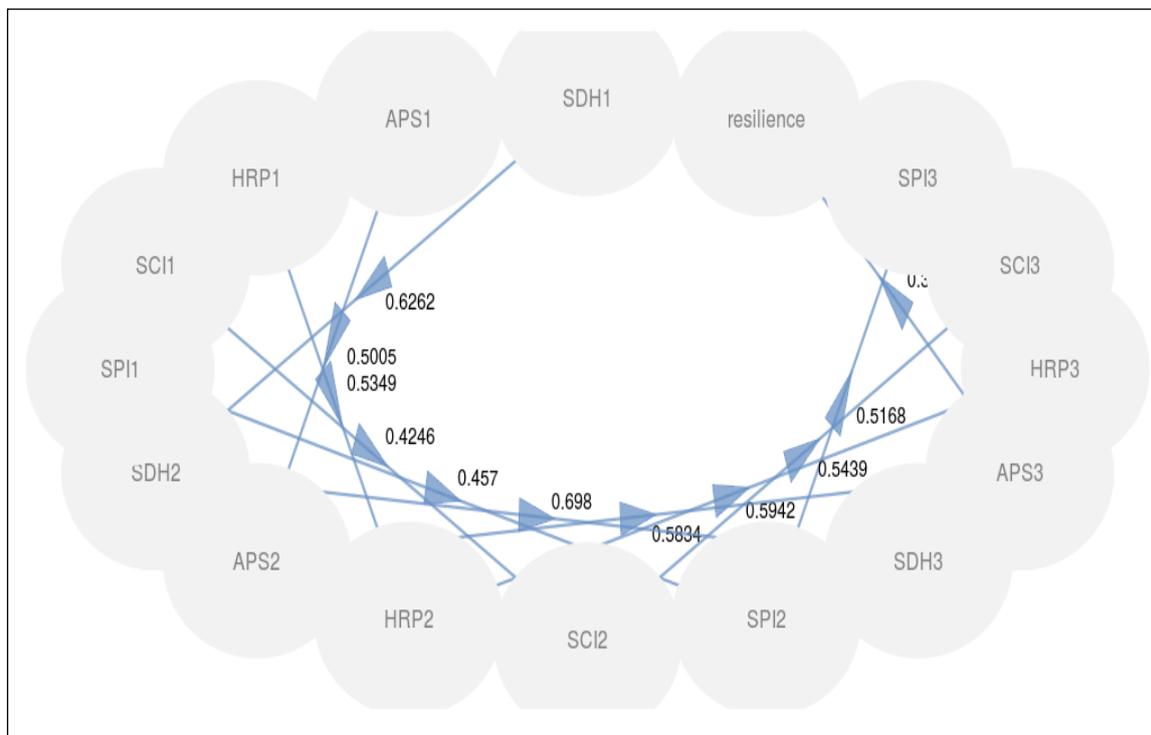


Figure 94 : Modèle structurel de mesure dans un cas dynamique



<b>SECTION 1 : ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL</b>			
	<b>Questions</b>	<b>Réponses</b>	<b>Sauts</b>
1.1.	Exercez-vous une activité quelconque ?	Oui.....1 Non.....0	SI1.1=0→1.5
1.16.	Quelle est la perception de votre condition de vie par rapport à l'année dernière ?	Meilleure.....1 Identique .....2 Mauvaise.....3	

<b>SECTION 2 : ENVIRONNEMENT FAMILIAL</b>			
	<b>Questions</b>	<b>Réponses</b>	<b>Sauts</b>
2.8.	Etes-vous marié(e) ?	Oui.....1 Non .....0	Si 2.8 =0

<b>SECTION 6 : FACTEURS INDIVIDUELS</b>			
<i>Sur une échelle de 5, attribuer une note au trait de caractère, rappeler l'échelle.</i>			
<b>N</b>	<b>Questions</b>	<b>Réponses</b>	<b>Sauts</b>
6.1	Communication	/___/	
6.2	Sociabilité	/___/	
6.3	Sens de l'humour	/___/	
6.4	Estime de soi	/___/	
6.5	Confiance en soi	/___/	
6.6	Foi en son propre avenir	/___/	
6.8	Altruiste	/___/	
6.9	Réseaux relationnels	/___/	
6.11	Optimisme	/___/	
6.12	Créativité	/___/	
6.13	Capacité à planifier	/___/	
6.14	Persévérance	/___/	
6.15	Aptitude à chercher les solutions	/___/	
6.18	Degré d'autonomie	/___/	
6.25	Aptitude à l'autodiscipline	/___/	

<b>SECTION 8 : LE CLIMAT POLITIQUE ET ECONOMIQUE DU PAYS</b>			
<i>Sur une échelle de 5, attribuer une note au trait de caractère, rappeler l'échelle.</i>			
<b>N</b>	<b>Questions</b>	<b>Réponses</b>	<b>Sauts</b>
8.1	Situation politique actuelle	/___/	
8.2	Situation économique actuelle	/___/	

---

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [ABU00] A. Bureau, J. P. Hughes, S. C. Shiboski. « An S-Plus implementation of hidden Markov models in continuous time ». *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 9:621–632, 2000.
- [AGI10] A. Giordana, L. Saitta, A. Cornuéjols. « Phase Transitions in Machine Learning ». Cambridge University Press, 2010.
- [ARA02] A. R. Ali, T. Richardson. « Markov equivalent classes for maximal ancestral graph ». In: *Proc. Of the 18<sup>th</sup> Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI)*, pages 1-9, 2002.
- [AAP13] Aapo Hyvarinen, Stephen M. Smith. « Pairwise Likelihood Ratios for Estimation of Non-Gaussian Structural Equation Models ». *Journal of Machine Learning Research* 14, 111-152, 2013.
- [ABD07] Abdel Kader Keita. « Conception Coopérative d’Ontologies Pré-Consensuelles : Application au domaine de l’Urbanisme ». Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.
- [ACH15a] Achiépo Odilon Yapó M. (2015). `plspm.formula`: Formula Based PLS Path Modeling. R package version 1.0.1. <https://CRAN.R-project.org/package=plspm.formula>, Decembre 2015.
- [ACH15b] Achiépo Odilon Yapó M. « Les bases de la Résiliométrie, une science de modélisation de la souffrance ». *Café de la Résilience*, Février 2015.
- [ACH14] Achiépo Odilon Yapó M. « Modélisation de la résilience, nécessité d’une approche computationnelle ». *Colloque Résilience en Action*, Décembre 2014.
- [ADG11] Adger, W. N., K. Brown, D. R. Nelson, F. Berkes, H. Eakin, C. Folke, K. Galvin, L. H. Gunderson, M. Goulden, K. O’Bien, J. Ruitenbeek, E. L. Tompkin. « Resilience implications of policy responses to climate change ». *Wires Climate Change*, 1, pp. 757-66, 2011.
- [AHM13] Ahmet Aycan. « L’enseignement du FLE aux enfants assisté par le multimedia ». *International Periodical for the Languages, Literature and History of Turkish*, Volume 8/10 Fall, p. 77-96, Ankara-Turkey, 2013.
- [AJZ80] Ajzen I., Fishbein M. « Understanding Attitudes and Predicting Social Behavior ». Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 98, 1980
- [ALE13] Alexandre D. E. « Resilience and disaster risk education: an etymological journey ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13:2707-16, 2013.

- [ALI12] Alice Hermann, Sébastien Ferré et Mireille Ducassé. « Aide à la création d'objets dans une base RDF(S) avec des règles de relaxation ». Journées francophones d'ingénierie des connaissances, 2012.
- [AMI02] Amiguet M. and J.-P. Müller. « Simulating the Dynamics of Social Networks ». Lecture Notes in Artificial Intelligence. Springer. To come as MABS '02 Proceedings, 2002.
- [ANI84] Anastassakos I., D'Aubigny G. « L'utilisation des tests de sphéricité pour la recherche des dimensions de l'espace latent en analyse factorielle classique et en analyse en composantes principales ». Revue Statist. Appl., 32, (2), p 45-57, 1984.
- [ANM03] Anaut, M. « La résilience: Surmonter les traumatismes ». Saint-Germain-du-Puy, Nathan, 2003.
- [ANC10] Antoine Cornuejols, Laurent Miclet. « Apprentissage Artificiel, Concept et Algorithme ». 2ème édition, Eyrolles, 2010.
- [ARD04] Ardilly P. « Echantillonnage et méthodes d'enquêtes ». Dunod, Paris, 2004.
- [ART82] Art D., Gnanadesikan R., Kettenring J. R. « Data based metrics for cluster analysis ». Utilitas Mathematica, 21 A, p 75-99, 1982.
- [ASM12] Asma Ben Abacha, Pierre Zweigenbaum. « Analyse et transformation des questions médicales en requêtes SPARQL ». CORIA 312, pp. 111–122, Bordeaux, 2012.
- [AUB97] Aubin J.-P. « Dynamic Economic Theory: a Viability Approach ». Springer-Verlag, 1997.
- [AUB91] Aubin J.-P. « Viability Theory ». Birkhäuser, 1991.
- [AUD07] Audrey Baneyx. « Construire une ontologie de la Pneumologie Aspects théoriques, modèles et expérimentations ». Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2007.
- [BEF82] B. Efron. « The Jackknife, the bootstrap and other resampling plans ». SIAM, 1982.
- [BMA01] B. M. Ayyub « Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks ». CRC Press, 2001.
- [BAH01] Bah Maadjou, Diallo Samba Ténin, Diallo Hawa, Dr Kéita Ansoumane, Dr. Camara Selly, Sagna Saténin. « stratégie national et plans d'action sur la diversité biologique ». Volume 2: plan d'actions pour la conservation de la diversité biologique et l'utilisation durable de ses ressources, GUINEE / PNUD / FEM Conakry, 2001.
- [BAL98] Ballet P., Rodin V., and J. Tisseau. « A multi-agent system to simulate in-vitro experimentation ». Proceedings of the 1998 IIIE Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI '98), July 10-15, Orlando (USA), 1998.

- [BAN86] Bandura « A. Social foundations of thought and action ». Prentice-Hall, Englewood Cliffs. p 23, p 391, 1986.
- [BAP06] Baptiste Autin. « Les Métaheuristiques en optimisation combinatoire ». Mémoire de probatoire en Informatique, CNAM, 2006.
- [BAR50] Bartlett M. S. « Tests of significance in factor analysis ». British J. Psych. (Stat. Section), 3, p 77-85, 1950.
- [BAD03] Bauer D. J., Curran P. J. « Overextraction of latent trajectory classes: Much ado about nothing? ». Reply to Rindskopf (2003), Muthén (2003), and Cudeck and Henly (2003). Psychological Methods, 8, 384–393, 2003.
- [BAH96] Baumgartner H., Homburg C. « Applications of structural equation modeling in marketing and consumer research: a review ». International Journal of Research in Marketing 13(2), 139–161. 59, 1996.
- [BAY00] Bayol M.P., De La Foye A., Tellier C., Tenenhaus M. « Use of PLS Path Modeling to Estimate the European Consumer Satisfaction Index (ECSI) Model ». Statistica Applicata-Italian Journal of Applied Statistics, vol. 12, n° 3, pp. 361-375, 2000.
- [BEH15] Behou Gerard N'Guessan, Konan Marcelin Brou, Odilon Yapo M. Achiépo, Boko Aka, « Raisonnement médical: Application des Réseaux Bayésiens au diagnostic d'une maladie dans la médecine traditionnelle ». Afrique Science, Vol. 11, N° 5 (2015), Septembre, 2015.
- [BEN01] Ben Hamida S. « Algorithmes évolutionnaires: prise en compte des contraintes et application réelles ». Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique, Paris, France, 2001.
- [BEL11] Benoît Lallau. « La résilience, moyen et fin d'un développement durable ? ». Éthique et économique, 8 (1), 2011.
- [BER09] Benoît Robert. « Résilience organisationnelle- Concepts et méthodologie d'évaluation ». Presses internationales Polytechnique, 2009.
- [BEJ82] Benzecri J.-P. « Histoire et préhistoire de l'analyse des données ». Dunod, Paris, 1982.
- [BEJ83] Benzecri J.-P., Lebeaux M.-O., Jambu M. « Aides à l'interprétation en classification automatique ». Les Cahiers d'Analyse des Données, 5, p 101-123, 1983.
- [BEP07] Berdin C., Prioul C. « Relation résilience – ténacité: Apports de la modélisation numérique ». Techniques de l'ingénieur, M4168, 1-18, 2007.
- [BEF03] Berkes, F., J. Colding, and C. Folke. « Navigating Social-ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change ». Cambridge University Press, Cambridge, UK. Ecology and Society 9(1), 2003.

- [BEB07] Bernabé Batchakui, Claude Tangha, Roger Nkambou, Georges Kouamou. « Environnement de collaboration basé sur le Grid Learning Services (GLS) pour les communautés de formation à centre d'intérêt commun ». 4th Annual Scientific Conference of the Research Network LORNET, UQAM, Montreal, Canada, 2007.
- [BEM12] Bernard Michallet. « Autour de la résilience », 4<sup>e</sup> Congrès Biennal du CQJDC, Mai 2012.
- [BLA03] Blair Wheaton. « Quand les méthodes font toute la différence ». *Sociologie et sociétés*, vol. 35, n° 1, p. 19-48, 2003.
- [BOL04] Bolck A, Croon M, Hagenaars J. « Estimating Latent Structure Models with Categorical Variables: One-Step Versus Three-Step Estimators ». *Political Analysis*, 12(1), 3–27, 2004.
- [BLO95] Bloemer M.M., Kasper H.D. « The complex relationship between consumer satisfaction and brand loyalty ». *Journal of Economic Psychology* 16, 311–329, 1995.
- [BOC89] Bock H. H. « Probabilistic aspects in cluster analysis ». In: *Conceptual and numerical analysis of data*. Opitz O. (ed.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989.
- [BOE92] Boeswillwald E. « L'expérience du CESP en matière de qualité des mesures d'audience ». In : *La qualité de l'information dans les enquêtes*, (ASU), Dunod, Paris, p 313-341, 1992.
- [BOK89] Boker S. M., McArdle J., & Neale M. « An algorithm for the hierarchical organization of path diagrams and calculation of components of expected covariance ». *Structural Equation Modeling*, 9(2), 174–194, 2002.
- [BKL02] Bollen, K. « Latent variables in psychology and the social sciences ». *Annual Review of Psychology* 53, 605–634, 2002.
- [BKL91] Bollen, K. A., Lennox, R. « Conventional wisdom on measurement: A structural equation perspective ». *Psychological Bulletin*, 110, 305–314, 1991.
- [BCY03] Boris Cyrulnik. « Le murmure des fantômes ». Odile Jacob, 2003.
- [BCY01a] Boris Cyrulnik « Manifeste pour la résilience ». *Spirale* 2/2001, n°18, p. 77-82, 2001.
- [BCY01b] Boris Cyrulnik. « Les vilains petits canards ». Odile Jacob, Paris, 2001.
- [BOW98] Bowen, J.T., Shoemaker, S. « The antecedents and consequences of customer loyalty ». *Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly* 39(1), 12–25, 1998.
- [BOZ04] Bozdogan H. « Intelligent Statistical Data Mining with Information Complexity and Genetic Algorithms ». In H Bozdogan (ed.), *Statistical Data Mining and Knowledge Discovery*, pp. 15–56. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2004.

- [BRE84] Breiman L, Friedman J., Olshen R., Stone C. « Classification and Regression Tree ». California, Wadsworth International, 1984.
- [BRI11] Brigit Obrist, Constanze Pfeiffer et Robert Henley. « La Résilience sociale multi-strates : une nouvelle approche de recherche pour l'adaptation au changement global ». NCCR North-South Dialogue, no. 33, 2011.
- [BLG58] C. Berge « Théorie des graphes et ses applications ». Dunod, 1958.
- [CBO02] C. Borgelt, R. Kruse. « Graphical Models – Methods for Data Analysis and Mining ». John Miley & Sons, Chichester, United Kingdom, 2002.
- [CHI05a] C. de la Higuera, F. Thollard, E. Vidal, F. Casacuberta, R. Carrasco. « Probabilistic finite-state machines – part i. ». IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005.
- [CHI05b] C. de la Higuera, F. Thollard, E. Vidal, F. Casacuberta, R. Carrasco. « Probabilistic finite-state machines – part ii. ». IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005.
- [CSH96] C. S. Holling. « Engineering Within Ecological Constraints ». The National Academy of Sciences, 1996.
- [CSH73] C. S. Holling. « Resilience and Stability of Ecological Systems ». Annual Review of Ecology and Systematics, Vol. 4, pp. 1-23, 1973.
- [CYO13] C. Yoo a and S. Oh. « Combining Structure Equation Model with Bayesian Networks for predicting with high accuracy of recommending surgery for better survival in Benign prostatic hyperplasia patients ». 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1–6, December 2013.
- [CAN10] Cantoni C., Lallau B. « La résilience des Turkana. Une communauté de pasteurs Kenyans à l'épreuve des incertitudes climatiques et politiques ». Développement Durable et Territoires, Septembre 2010.
- [CAR11] Caroline Catalan. « Approche méthodologique de l'évaluation de la résilience des systèmes essentiels du Québec ». Mémoire de Maîtrise, Université de Montréal, 2011.
- [CAJ77] Carroll J. D., Pruzansky S., Green P. F. « Estimation of the parameters of Lazarsfeld's Latent Class Model by application of canonical decomposition CANDECOMP to multi-way contingency tables ». AT & T Bell Laboratories, unpublished paper, 1977.
- [CAP01] Carpenter S., Walker B., Anderies J. M., Abel, N. « From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What ? ». Ecosystems, 4, 765-781, 2001.

- [CAS98] Castelfranchi C. « Emergence and Cognition. Towards a Synthetic paradigm of AI and Cognitive Science ». Proceedings of IBERAMIA '98, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1484, p 13-26, 1998.
- [CEL92] Celeux G., Govaert G. « A classification EM algorithm for clustering and two stochastic versions ». *Comput. Stat. and Data Analysis*. Vol. 14, 3, 315-332, 1992.
- [CEZ00] Cézard M., Gollac M. et Rougerie C. « L'ordinateur, outil de travail et bien culturel », *Actes de la recherche en sciences sociales*, 134, 22-28, 2000.
- [CHA00] Chauchat J.H., Rakotomalala R. « Sampling Strategy for Building Decision Trees from Very Large Databases Comprising Many Continuous Attributes ». In *Instance Selection and Construction for Data Mining*, Liu H. and Motoda H. Editors, Kluwer Academic Press, 171-188, 2000.
- [CHI05] Chin, W. « Bootstrap cross-validation indices for PLS path model assessment ». In: Aluja, T., Casanova, J., Esposito Vinzi, V., Morineau, A., Tenenhaus, M. (Eds.), *PLS and Related Methods*, proceedings of the PLS'05 International Symposium, Barcelona. SPAD, pp. 43–55, 2005.
- [CHI95] Chin, W. « Partial least squares is to LISREL as principal component analysis is to common factor analysis ». *Technology Studies* 2, 315–319, 1995.
- [CHI96] Chin W., Marcolin B.L., Newsted P.R. « A partial least squares latent variables modeling approach for measuring interaction effects: Results from a monte carlo simulation study and voice mail emotion/adoption study ». In: *Proceedings of the 17th Int. Conf. on Information Systems*, p 21–41, 1996.
- [CHR02] Chris Fraley, Adrian E. Raftery. « Model-based Clustering, Discriminant Analysis and Density Estimation ». *Journal of the American Statistical Association*, 97:611-631, 2002.
- [CHR12] Chris Fraley, Adrian E. Raftery, T. Brendan Murphy, Luca Scrucca. « mclust Version 4 for R: Normal Mixture Modeling for Model-Based Clustering, Classification, and Density Estimation ». Technical Report No. 597, Department of Statistics, University of Washington, 2012.
- [CHG12] Christine Genest. « La résilience des familles endeuillées par le suicide d'un adolescent : Émerger malgré la blessure indélébile ». Thèse de Doctorat, Université de Montréal, 2012.
- [CHW11] Christine W. Duarte, Yann C. Klimentidis, Jacqueline J. Harris, Michelle Cardel, José R. Fernández. « A Hybrid Bayesian Network/Structural Equation (BN/SEM) Modeling Approach for Detecting Physiological Networks for Obesity-related Genetic Variants ». *IEEE Int Conf Bioinformatics Biomed*. 696–702. DOI: 10.1109/BIBMW, 2011.
- [CHP10] Christophe Genolini « Petit traité de programmation orientés objet sous R, Programmation, construction de packages, bonnes pratiques ». De Boeck, 2010.

- [CLA93] Clausen J.A. « American Lives: looking back at the children of great Depression ». New York: The Free Press, 1993.
- [CON03] Connor, K.M., Davidson J.R.T. « Development of a new resilience scale: the Connor-Davidson Resilience Scale (CD-RISC) ». *Depression and anxiety*, 18, 7682, 2003.
- [COS10] Costin Apostol, Cristian Preda « Méthodes PLS pour l'analyse des données fonctionnelles ». *Rev. Roumaine Math Pures Appl.*, 55, 6, 431–445, 2010.
- [COX77] Cox D. R. « The role of significance tests ». *Scandinavian Journal of Statist*, 4, p 49-70, 1977.
- [COU15] Coulibaly Kpinna Tiekoura, Odilon Yapo M. Achiépo, Brou Konan Marcellin, Michel Babri. « Resiliometrical modeling of interactions in social resilience dimensions ». *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, Volume 12, Issue 4, July 2015.
- [DHE95] D. Heckerman, D. Geiger, and D. Chickering. « Learning Bayesian networks: The combination of knowledge and statistical data ». *Machine Learning*, 1995.
- [DPR09] D. Provitolo. « Vulnérabilité et résilience: géométrie variable des deux concepts ». *Séminaire résilience, ENS Paris, Novembre 2009*.
- [DRA10] D. Renaudie. « Méthodes d'apprentissage automatique pour la modélisation de l'élève en algèbre ». PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2010.
- [DAU07] Dauphiné A., Provitolo, D. « La résilience : un concept pour la gestion des risques ». *Annales de géographie*, 115-125, 2007.
- [DAV02a] David Chickering. « Learning equivalence classes of Bayesian network structures ». *Journal of Machine Learning Research*, 2: 445-498, February, 2002.
- [DAV02b] David Chickering, Christopher Meek. « Finding optimal Bayesian networks ». In Adnan Darwiche and Nir Friedman, editors, *Proceedings of the 18<sup>th</sup> Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-02)*, pages 94-102, S.F., Cal., Morgan Kaufmann Publisher, 2002.
- [DET01] De Tychev C. « Surmonter l'adversité : les fondements dynamiques de la résilience ». *Cahiers de psychologie clinique*, 16, 49-68, 2001.
- [DIA11] Diala Dhouib. « Aide multicritère au pilotage d'un processus basée sur le raisonnement à partir de cas ». *Engineering Sciences. Université Paris VIII Vincennes-Saint Denis*, 2011.
- [DIM06] Diamantopoulos A, Siguaw J. « Formative versus reflective indicators in organizational measure development ». *British Journal of Management*, 17(4):263–82, 2006.

- [DIM01] Diamantopoulos A., Winklhofer H. « Index Construction with Formative Indicators: An Alternative to Scale Development ». *Journal of Marketing Research*, 38(2), 269-277. 2001.
- [DON02] Donner-Banzhoff, N. et al. « Clinical findings in patients presenting with sore throat. A study on inter-observer reliability ». *Fam Pract*, 2002.
- [DRL10] Dr. Lin Himmelman. « HMM: HMM-Hidden Markov Models ». R package version 1.0, 2010.
- [DRE12] Drew A. Linzer, Jeffrey B. Lewis. « poLCA: An R Package for Polytomous Variable Latent Class Analysis ». *Journal of Statistical Software*, 42(10), 1-29, 2012.
- [DRO96] Drogoul A. « De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agent ». Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 1996.
- [EMJ08] Emmanuel Jakobowicz. « Contributions aux modèles d'équations structurelles à variables latentes ». Thèse de Doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris, 2008.
- [ERI14] Erich Neuwirth. « RColorBrewer: ColorBrewer Palettes ». R package version 1.1-2, 2014.
- [ESC83] Escoufier B., Pagès J. « Méthode pour l'analyse de plusieurs groupes de variables. Application à la caractérisation des vins rouges du Val de Loire ». *Revue Statist. Appl.*, 31, p 43-59, 1983.
- [FCO04] F. Corset. « Optimisation de la maintenance à partir de réseaux bayésiens et fiabilité dans un contexte doublement censuré ». Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, 2004.
- [FES97] F. Esposito, D. Malerba, G. Semeraro. « A comparative analysis of methods for pruning decision tree ». *IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(5): 476-493, 1997.
- [FAB04] Fabien Michel. « Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents ». Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 2004.
- [FER12] Fernandes V. « En quoi l'approche PLS est-elle une méthode a (re)-découvrir pour les chercheurs en management ». *Management*, 15(1) :101-123, 2012.
- [FIN92] Fine J. « Modèles graphiques d'associations ». In : ASU, (Droesbeke J.-J., Fichet B., Tassi P., ed.), *Modèles pour l'analyse des données multidimensionnelles*, Economica, Paris, 1992.

- [FIS10] Fisher R. E., Bassett G. W., Buehring W. A., Collins M. J., Eaton, L. K., et al. « Constructing a resilience index for the enhanced critical infrastructure protection program ». Argonne National Laboratory, 2010.
- [FOR92] Fornell, C. « A national customer satisfaction barometer : The swedish experience ». *Journal of Marketing* 56, 6–21, 1992.
- [FRA14] François Régis Mahieu « Souffrances et résiliences. Une analyse économique ». In *Fragilités et résilience, les nouvelles frontières de la mondialisation*, Editions Karthala, p. 63-78, 2014.
- [FRA13] François Bousquet, Christophe Le Page, Jean-Pierre Müller. « Modélisation et simulation multi-agent ». Actes des deuxièmes assises nationales du GdR, 2013.
- [FRO03] François O., Leray P. « Etude comparative d’algorithmes d’apprentissage de structure dans les réseaux bayésiens ». In : De Saint-Cyr, F.D. (Ed.), 6èmes Rencontres Nationales des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle. Presses Universitaires de Grenoble, p 167–180, 2003.
- [FRE13] Frederic Rousseaux. « Vers une simulation de l’évolution des structures urbaines a partir d’agents ». SIMTOOLS, des outils libres pour la conception et l’analyse de simulations spatialisées a base d’agents, Saint Mandé, France, 2013.
- [FRI15] Fridolin Wild. « lsa: Latent Semantic Analysis ». R package version 0.73.1, 2015.
- [FUR88] Furnas G. W., Deerwester S., Dumais S. T., Landauer T. K., Harshman R. A., Streeter L. A., Lochbaum K. E. « Information retrieval using a singular value decomposition model of latent semantic structure ». *Proceedings of the 14<sup>th</sup> Int. ACM Conf. on Res. And Dev.* In: *Information Retrieval*, p 465-480, 1988.
- [GAF34] Gaffiot F. « Dictionnaire latin-français ». Ed Hachette, p. 1719, Paris, 1934.
- [GAR86] Garnezy N., Masten A. S. « Stress, Competence, and Resilience : Common Frontiers for Therapist and Psychopathologist ». *Behavior Therapy*, 17, 500-521, 1986.
- [GDR08] G. Dreyfus, J.-M. Martinez, M. Samuelides, M. Gordon, F. Bradan, S. Thiria. « Apprentissage statistique ». Eyrolles, 2008.
- [GEL05] G. Elidan, N. Friedman. « Learning hidden variable networks: The information bottleneck approach ». *Journal of Machine Learning Research (JMLR)*, 6: 81-127, 2005.
- [GQU05] G. Quer, H. Meenakshisundaram, B. Tamma, B.S. Manoj, R. Rao, M. Zorzi. « Cognitive Network Inference through Bayesian Network Analysis ». *GLOBECOM 2010, IEEE Global Telecommunications Conference*. 1-6, 2010.

- [GAB12] Gabor Hullam, Gabriella Juhasz, Gyorgy Bagdy, Peter Antal. « Beyond Structural Equation Modeling: model properties and effect size from a Bayesian viewpoint. An example of complex Phenotype-genotype associations in depression ». *Neuropsychopharmacologia Hungarica*. XIV. évf. 4. szám, 2012.
- [GAP11] Gabriel Power, Lucie Deblois. « Une analyse par quantiles de la résilience chez les élèves issus de milieux défavorisés ». Social Sciences and Humanities Research Council of Canada, ACELF, 2011.
- [GAS15] Gaston Sanchez, Laura Trinchera, Giorgio Russolillo. « plsmp: Tools for Partial Least Squares Path Modeling (PLS-PM) ». R package version 0.4.7". 2015.
- [GER11] Géraldine Djament-Tran, Antoine Le Blanc, Serge Lhomme, Samuel Rufat, Magali Reghezza-Zitt. « Ce que la résilience n'est pas, ce qu'on veut lui faire dire ». Version française d'un article en anglais soumis à évaluation, <hal-00679293>, 2011.
- [GIL95] Gilbert N. « Emergence in social simulation ». In N. Gilbert and R. Conte, editors, *artificial societies: The computer simulation of social life*, p 144-156, UCL Press, 1995.
- [GRI11] Gilles Teneau. « La mesure des risques majeurs au croisement de la résilience des systèmes, écologique et psychologique ». Colloque de Recherche "Approches du Risque Opérationnel", ISTE, Paris, 2011.
- [GOD94] God P. « Permutation Test – A practical Guide to Resampling Method for Testing Hypotheses ». Spring Verlag, New York, 1994.
- [GRA01] Gras R., Kuntz P., Briand H. « Les fondements de l'analyse statistique implicite et quelques prolongement pour la fouille de données ». *Mathématiques et Sciences Humaines*, no 154-155, p 9-29, 2001.
- [GRV06] Gravel Pauline. « Sommes-nous égaux devant le bonheur ? ». *Le Devoir*, 2006.
- [GRM99a] Grimm V. « Ten years of individual-based modeling in ecology: what we have learned and what could we learn in the future? ». *Ecological modeling*, 115: 129-148, 1999.
- [GRM99b] Grimm V., T. Wyszomirski, et al. « Individual-based modeling and ecological theory: synthesis of a workshop ». *Ecological modeling*, 115: 275-282, 1999.
- [GUE88] Guégen A., Nakache J.-P. « Méthode de discrimination basée sur la construction d'un arbre de décision binaire ». *Revue de Statist. Appl.*, 36, (1), p 19-38, 1988.
- [GUN02] Gunderson L., Holling C. « Panarchy. Understanding transformation in human and natural systems ». Washington D.C, Island Press, 2002.
- [GUN13] Guénaél Devillet, Mathieu Jaspard, Juan Vazquez Parras, Gilles Condé, Pierre Renson, Evelyne Lord-Tarte. « Indicateurs de transition socio-écologique et de résilience territoriale dans la région de Liège ». International Conference of Territorial Intelligence, Besançon-Dijon, Mai 2013.

- [HAN04] Hanafi M. « Approche PLS : une hiérarchie des stratégies pour la détermination des variables latentes ». In : Actes des 36èmes journées de statistique de la SFDS – Montpellier, 2004.
- [HAC06] Hancock, G. R., Lawrence, F. R. « Using latent growth models to evaluate longitudinal change ». In G. R. Hancock & R. O. Mueller (Eds.), *Structural equation modeling: A second course* (pp. 171–196). Greenwood, CT: Information Age, 2006.
- [HAC07] Hancock, G. R., Mueller, R. O. « The reliability paradox in structural equation modeling fit indices ». Paper presented at the annual meeting of the American Educational Research Association, Chicago, April 2007.
- [HAC01] Hancock G. R., Mueller R. O. « Rethinking construct reliability within latent variable systems ». In R. Cudeck, S. du Toit, & D. Sörbom (Eds.), *Structural equation modeling: Present and future - A Festschrift in honor of Karl Jöreskog* (pp. 195–216). Lincolnwood, IL: Scientific Software International, Inc, 2001.
- [HAD94] Hardy A. « An examination of procedures for determining the number of the clusters in a data set ». In: *New Approaches in Classification and Data Analysis*, Diday E., at al. (ed.), Springer Verlag, Berlin, p 178-185, 1994.
- [HAS01] Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. « The elements of statistical learning - Data Mining, inference and prediction ». Springer, 2001.
- [HER10] Herrien, M.-C. « Stratégies de résilience et infrastructures essentielles », *Télescope*, vol. 16, n° 2, p. 154-171, 2010.
- [HES06] Hershberger S. L. « The problem of equivalent structural models ». In G. R. Hancock & R. O. Mueller (Eds.), *Structural equation modeling: A second course* (pp. 13–41). Greenwich, CT: Information Age Publishing, 2006.
- [HIL01] Hilderman R.-J., Hamilton H.-J. « Knowledge Discovery and Measures of Interestingness ». Kluwer Academic Publisher, 2001.
- [HJE01] Hjemdal, O., Friberg, O., Martinussen, M. et Rosenvinge, J.H. « Preliminary results from the development and validation of a Norwegian scale for measuring adult resilience ». *Journal of the norwegian psychology Association*, 38, 310-317, 2001.
- [HOL06] Hollnagel, E. Woods, D.D. and Leveson, N. « Resilience Engineering: Concepts and Precepts ». Aldershot, UK: Ashgate, 2006.
- [HOM85] Holmes S. « Outils informatiques pour l'évaluation de la pertinence d'un résultat en analyse des données ». Thèse de Doctorat, USTL, Montpellier, 1985.
- [HWA04] Hwang, H., Takane Y. « Generalized structured component analysis ». *Psychometrika*, 69, 1, 81-99, 2004.

[IDR15] Idrissa Oumar Kane, Jean-Paul Vanderlinder. « L'utilisation du concept polysémique de résilience : une analyse empirique en zone côtière », VertigO, la revue électronique en sciences de l'environnement, Hors-série 23, Novembre, 2015.

[IWI99] I. Witten, E. Frank. « Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques ». Morgan Kaufmann, 1999.

[ING15] Ingo Feinerer, Kurt Hornik. « tm: Text Mining Package ». R package version 0.6-2, 2015.

[ING08] Ingo Feinerer, Kurt Hornik, David Meyer. « Text Mining Infrastructure ». In R. Journal of Statistical Software 25(5): 1-54, 2008.

[JHA06] J. Han, M. Kamber. « Data Mining : Concepts and Techniques ». 2<sup>nd</sup> Edition, Morgan Kaufmann, 2006.

[JOL05] J. O'Laughlin. Policies for risk assessment in federal land and resource management decisions. Forest Ecology and management, 211(1-2) : 15-27, 2005.

[JAC05] Jackson K. M., Sher K. J. « Similarities and differences of longitudinal phenotypes across alternate indices of alcohol involvement: A methodologic comparison of trajectory approaches ». Psychology of Addictive Behaviors, 19, 339–351, 2005.

[JAQ95] Jacques Feber. « Les systèmes multi-agents: vers une intelligence collective ». InterEdition, 1995.

[JAK06] Jakobowicz E. « Méthodes pour la construction du modèle conceptuel en vue de l'application de l'approche PLS ». In : Journées de Statistique de la SFdS, Clamart, 2006.

[JEA02] Jean-Claude Dumoncel. « Philosophie des mathématiques ». Collection Philo, Ellipses, 2002.

[JLU14] Jean-Luc Dubois, Mama Ouattara « Vous avez dit « résilience » ? Eléments conceptuels et politiques publiques ». In Fragilités et résilience, les nouvelles frontières de la mondialisation, Editions Karthala, p. 35-51, 2014.

[JLU13a] Jean-Luc Dubois. « Mais de quelle résilience parle-t-on ? Ambiguïté des concepts et conséquences en termes de mesure » 2013.

[JLU13b] Jean-Luc Dubois. « De quelle "résilience" parle-t-on ? Cadre conceptuel, observation et mesure, politiques publiques ». Groupe de travail sur la résilience, MAE Paris, Octobre 2013.

[JBA14] Jean-Baptiste Denis, Marco Scutari. « Building, handling and using Bayesian networks with R and Bugs ». Méthodes et Logiciels, SfdS, Septembre 2014.

- [JMA14] Jean-Marc Châtaigner. « Fragilités et résilience, les nouvelles frontières de la mondialisation ». Editions Karthala. 2014.
- [JMI13] Jean-Michel Reinert. « Les outils de la résilience, une force, un appui pour tous ». Conférence-animation, Chavannes-Renens, Mars 2013.
- [JER04] Jeremy Cain. « Planning improvements in natural resources management – guidelines for using bayesian networks to support the planning of the management of development programmes in the water sector and beyond ». Center for Ecology and Hydrology, UK, 2004.
- [JIE97a] Jie Cheng, David Bell, Weiru Liu. « An algorithm for Bayesian network construction from data ». In: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Workshop on Artificial Intelligence and Statistics. AI & STAT'97, pages 83-90, 1997.
- [LIE97b] Jie Cheng, David Bell, Weiru Liu. « Learning belief networks from data: An information theory based approach ». In: Proceedings of the sixth ACM International Conference on Information and Knowledge Management CIKM, pages 325-331, 1997.
- [JOH03] Johann Dréo, Alain Pérowski, Patrick Siarry, Eric Taillard. « Métaheuristiques pour l'optimisation difficile ». Eyrolle, 2003.
- [JON09] Jones O, Maillardet R, Robinson A. « Introduction to Scientific Programming and Simulation Using R ». Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2009.
- [JOR00] Jöreskog K.G. « Latent Variable Scores and their uses ». Scientific Software International Inc, 2000.
- [JUD99] Judea Pearl. « Reasoning with cause and effect ». In proceedings of the international joint Conference on artificial Intelligence, Pages 1437- 1449, San Francisco, Morgan Kaufmann, 1999.
- [JUD91] Judea Pearl. « Probabilistic Reasoning in intelligent Systems: Networks of plausible Inference ». Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1988. Revised second printing, 1991.
- [JUD09] Judea Pearl. « Causality. Models, reasoning and inference ». 2<sup>nd</sup> Edition, Cambridge University Press, 2009.
- [JUL03] Juliette Mattioli, Konstantin Artiouchine. « Noyau de viabilité : une contrainte globale pour la modélisation de systèmes dynamiques ». JFPLC-03, 2003.
- [KAM07] Kamanzy C., Zhang X. Y., Deblois L., Deniger M. A. « L'influence du capital social sur la formation du capital humain chez les élèves résilients de milieux socioéconomiques défavorisés ». Revue des sciences de l'éducation, XXXIII(1), 127-147, 2007.

- [KEI97] Keitt T. « Stability and complexity on a lattice : coexistence of species in an individual-based food web model ». *Ecological modelling*, 102: 243-258, 1997.
- [KLI06] Kline R. B. « Formative measurement and feedback loops ». In G. R. Hancock & R. O. Mueller (Eds.), *Structural equation modeling: A second course* (pp. 43–68). Greenwich, CT: Information Age Publishing, 2006.
- [KOU14a] Kouadio-Odounfa « Courants de pensées "éthiques et résiliences économiques": cas de la Côte d'Ivoire ». *Les cafés de "Résiliences"*, juin 2014.
- [KOU14b] Kouadio-Odounfa et al, « Observatoire de la résilience à Bouaké, approche de mesure et quelques résultats ». 5ème Colloque Internationale résilience en action, Abidjan, Décembre 2014.
- [KOU14c] Kouadio-Odounfa Alice, Idrissa Ouattara. « Indicateurs de la résilience au niveau des ENV », 2014.
- [KOS15] Kouassi Bernard Saha, Odilon Yapo M. Achiépo, Konan Marcelin Brou, Souleyman Oumtanaga. « Storage and Bayesian modeling of data on the social resilience: Case of Orphans and Vulnerable Children (OVCs) in Côte d'Ivoire ». *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, Volume 12, Issue 4, July 2015.
- [KRE07] Kreuter F., Muthén B. « Longitudinal modeling of population heterogeneity: Methodological challenges to the analysis of empirically derived criminal trajectory profiles ». In G. R. Hancock & K. M. Samuelsen (Eds.), *Advances in Latent Variable Mixture Models*. Charlotte, NC: Information Age Publishing, 2007.
- [KRI03] Kristensen K., Eskildsen J.K., Juhl H.J., Ostergaard P. « PLS structural equation modeling for customer satisfaction: Methodological and application issues ». In: 13th Int. and 68th Annual American Meeting of the Psychometric Society, Cagliari, Sardinia, 2003.
- [LKA99] L. Kallel. « Convergence des algorithmes génétiques : aspects spatiaux et temporels ». Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique, France, 1999.
- [LMI08] L. Miclet, S. Bayouh, A. Delhay. « Analogical dissimilarity : Definition, algorithms and two experiments in machine learning ». *Journal of Artificial Intelligence Research.*, 32: 793-824, 2008.
- [LRA89] L. Rabiner. « A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition ». *Processings of the IEEE*, 37, No 2, 1989.
- [LAU14] Laurent Bouillaut. « Les Modèles Graphiques Probabilistes : de la modélisation de la dégradation à l'optimisation de la maintenance de systèmes complexes ». HDR Université de Paris Est, 2014.
- [LEB06] Lebart L., Morineau A., Piron M. « Statistique exploratoire multidimensionnelle, visualisation et inférence en fouille de données ». 2<sup>e</sup> édition, Dunod, 2006.

- [LEB03] Lebart L., Piron M., Steiner J.-F. « La sémiométrie ». Dunod, Paris, 2003.
- [LEC05] Lecomte Jacques. « Favoriser la résilience des personnes handicapées mentales ». *Reliance*, 2005/4 no 18, p. 15-20. DOI: 10.3917/reli.018.0015, 2005.
- [LEW79] Lewis C., Short C. « A Latin Dictionary ». Oxford Clarendon Press, Founded on the translation of Freud's Latin-Germany lexicon by Andrew's edition LLD, 1-2019 pp, 1879.
- [LEW90] Lewis C. « An Elementary Latin Dictionary ». New York, Cincinnati, and Chicago American Book Company, 1890.
- [LUC13] Luca Scrucca. « GA: A Package for Genetic Algorithms in R ». *Journal of Statistical Software*, Volume 53, Issue 4, April 2013.
- [LYO91] Lyons J. « Strategies for assessing the potential for positive adjustment following trauma ». *Journal of Traumatic Stress*, 4, 93–111, 1991.
- [MBE04] M. Bendou, P. Munteanu. « Nouvel algorithme d'apprentissage des classes d'équivalence des réseaux bayésiens ». In Michel Liquière et Marc Sebban, editor, *Sixième Conférence Apprentissage Cap'2004*, pages 129-141, Montpellier, France, Presse Universitaire de Grenoble, 2004.
- [MAH12] Mahieu François. « La résilience, une éthique de la souffrance, de la précaution à la protection ». 2012.
- [MAH11] Mahieu François. « Sigmund Freud, de l'économie à la résilience ». 2011.
- [MAR04] Marc R., Mukherjea S., Soffer A., Uramoto N., Brown E., Coden A., et al. « Text analytics for life science using the unstructured information management architecture ». *IBM System Journal* 43(3), 490-515, 2004.
- [MAC10] Marco Scutari. « Learning Bayesian Networks with the bnlearn R Package ». *Journal of Statistical Software*, Volume 35, Issue 3, July 2010.
- [MAJ09] Marjorie Maugendre. « Apport de l'approche PLS (Partial Least Squares) dans la compréhension des effets des facteurs motivationnels dans le sport sur la consommation de produits psychoactifs chez les adolescents ». *Fourth Statistical Days at the University of Luxembourg*, Juin 2009.
- [MAS94] Masten A. S. « Resilience in individual development: Successful adaptation despite risk and adversity ». In M. C. Wang et E. W. Gordon (dir.), *Educational Resilience in Inner-City America: Challenges and Prospects* (p. 3-25). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1994.
- [MAT93] Mathes H. « Global optimization criteria of the PLS-algorithm in recursive path models with latent variables ». In: Haagen, K., Bartholomew, D.J., Deistler, M. (Eds.), *Statistical Modeling and Latent Variables*. Elsevier Science Publishers, pp. 229–248, 1993.

- [MAK10] Matthias Kahm, Guido Hasenbrink, Hella Lichtenberg-Fraté, Jost Ludwig, Maik Kschischo « grofit: Fitting Biological Growth Curves with R ». *Journal of Statistical Software*, Volume 33, Issue 7, February 2010
- [MCA04] Mc Ardle J. J., Hamagami F., Jones K., Jolesz F., Kikinis R., et al. « Structural modeling of dynamic changes in memory and brain structure using longitudinal data from the normative aging study ». *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 59 (6), 294-304, 2004.
- [MCK05] Mc Kenzie S, Podsakoff P, Jarvis C. « The problem of measurement model misspecification in behavioural and organizational research and some recommended solutions ». *Journal of Applied Psychology*, 90(4), 710–30, 2005.
- [MES10] Mesnard Lionel. « Pour éviter tout malentendu sur Boris Cyrulnik ». 2010.
- [MES05] Mesnard Lionel. « Les limites d'un concept et l'intégrité d'un homme ». 2005.
- [MIC10] Michael Lawrence, Duncan Temple Lang. « RGtk2: A Graphical User Interface Toolkit for R ». *Journal of Statistical Software*, 37(8), 1-52, 2010.
- [MIL14] Milan Bouchet-Valat. « SnowballC: Snowball stemmers based on the C libstemmer UTF-8 library ». R package version 0.5.1, 2014.
- [MOR07] Morel G. « La sécurité et la résilience dans les activités peu sûres : exemple de la pêche maritime ». Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Sud, Lorient, 2007.
- [MOG10] Morgan Chopin, Pierre-Henri Wuillemin. « Optimisation de l'inférence dans les Réseaux Bayésiens Dynamiques ». ROADEF, Toulouse, 2010.
- [MUR02] Murat Deviren, Khalid Daoudi. « Apprentissage de structures de réseaux bayésiens dynamiques pour la reconnaissance de la parole ». XXIVèmes Journées d'Étude sur la Parole, Nancy, juin 2002.
- [NFR97] N. Friedman. « Learning belief networks in the presence of missing values and hidden variables ». In *Fourteenth Inter. Conf. On Machine Learning (ICML97)*, Nashville, Tennessee, 1997.
- [NAJ90] Najjar W., Gaudiot J.-L. « Network resilience: a measure of network fault tolerance ». *IEEE Transactions on Computers*, 39, 174-181, 1990.
- [NAT05a] Nations Unies. « Déclaration de Hyogo ». Kobe, Hyogo (Japon): Conférence mondiale sur la prévention des catastrophes, janvier 2005.
- [NAT05b] Nations Unies. « Cadre d'action de Hyogo pour 2005-2015: Pour des nations et des collectivités résilientes face aux catastrophes ». Kobe, Hyogo (Japon): Conférence mondiale sur la prévention des catastrophes, janvier 2005.

- [NET93] Nettles S. M. et Pleck J. H. « Risk, Resilience, and Development: The Multiple Ecologies of Black Adolescents ». Baltimore, MD: Center for Research on Effective Schooling for Disadvantaged Students, The Johns Hopkins University, 1993.
- [NGU15] N'Guessan Behou Gerard, Achiépo Odilon Yapo M. « Raisonement médical : application des Réseaux Bayésiens au diagnostic d'une maladie dans la médecine traditionnelle ». 10<sup>e</sup> Colloque sur la médecine traditionnelle, Juillet 2015, Abidjan.
- [ODI15a] Odilon Yapo M. Achiépo. « Portée industrielle de la Résiliométrie, une discipline de modélisation computationnelle des processus de résilience sociale ». Doctoriales EDP, Yamoussoukro, Mai 2015.
- [ODI15b] Odilon Yapo M. Achiépo. « Simulation Informatique des Processus Biologiques par Algorithmes Génétiques ». Doctoriales EDP, Yamoussoukro, Mai 2015.
- [ODI15c] Odilon Yapo M. Achiépo, Behou Gérard N'Guessan, Konan Marcelin Brou. « Similarity Measure in the Case Based Reasoning Systems for Medical Diagnostics in Traditional Medicine ». International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), Volume 12, Issue 2, March 2015.
- [OLI80] Oliver R. « A cognitive model of the antecedents and consequences of satisfaction decisions ». Journal of Marketing Research 17, 460–469, 1980.
- [PAT07] Patrick Naïm, Pierre-Henri Wuillemin, Philippe Leray, Olivier Pourret, Anna Becker. « Réseaux bayésiens ». 3<sup>ème</sup> édition, Eyrolle, 2007.
- [PHI06] Philippe Leray. « Réseaux Bayésiens : apprentissage et modélisation de systèmes complexes ». HDR, 2006.
- [PHI04] Philippe Leray, O. François. « Réseaux Bayésiens pour la classification – méthodologie et illustration dans le cadre du diagnostic médical ». Revue d'Intelligence Artificielle, 18/2004 : 169-193, 2004.
- [PRE08] Preacher, K. J., Wichman, A. L., MacCallum, R. C., Briggs, N. E. « Latent growth curve modeling ». London, UK: Sage, 2008.
- [PRI06] Prinzie, P., Onghena, P., Hellincks, W. « A cohort-sequential multivariate latent growth curve analysis of normative CBCL aggressive and delinquent problem behavior: Associations with harsh discipline and gender. » International Journal of Behavioral Development, 30-444–459, 2006.
- [RAN58] Rankine W. J. « A manual of applied mechanics ». London ang Glasgow, Richard Griffin & Company, 1858.
- [RBO93] R. Bouckaert. « Probabilistic network construction using the minimum description length principe ». Lecture Notes in Computer Science, 747: 41-48, 1993.

- [RCO13] R Core Team. « R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing ». Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org>, 2013.
- [RHI96] R. Ihaka and R. Gentleman. R: A language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5:299–314, 1996.
- [RLI80] R. L. Iman, J. M. Davenport. « Approximations of critical region of the friedman statistic ». *Communications in Statistics*, pages 571-595, 1980.
- [RAY62] Raymond Boudon. « Le modèle des classes latentes ». *Revue Française de Sociologie*, 3-3, pp. 258-289, 1962.
- [RIC02] Richardson, G. E. « The metatheory of resilience and resiliency ». *Journal of Clinical Psychology*, 58, 307-321, 2002.
- [RIK05] Ricco Rakotomalala. « Arbres de Décision ». *Revue MODULAD*, Numéro 33, 2005.
- [RIO03] Riolli L., Savicki V. « Information system organizational resilience ». *The International Journal of Management Science*, 31, 227-233, 2003.
- [ROB06] Robert Ch. « Le choix bayésien ». Springer, Paris, 2006.
- [ROG12] Rogers P. « Resilience revisited, an etymology and genealogy of a contested concept ». *Climate Futures, Working Paper Number*, 4, 1-29, 2012.
- [RON09] Robert Nisbet, John Elder, Gary Miner. « Handbook of Statistical Analysis & Data Mining, Applications ». Academic Press, Elsevier, 2009.
- [ROS14] Rose, A. « Defining and measuring economic resilience to disasters ». *Disaster Prevention and Management*, 13, 307-314, 2004.
- [ROL12] Rosseel Y. « lavaan: an R package for structural equation modeling ». *Journal of Statistical Software*, 48(2), 1-36, 2012.
- [ROU01] Rouchier J., F. Bousquet, et al. « A multi-agent model for transhumance in North Cameroon ». *Journal of Economic Dynamics and Control*, 25: 527-559, 2001.
- [RUT89] Rutter M. « Psychosocial resilience and protective mechanisms ». *American Journal of Orthopsychiatry*, 57(3), 316-331, 1987.
- [RUT85] Rutter M. « Resilience in the face of adversity: protective factors and resistance to psychiatric disorder ». *British Journal of Psychiatry* 147: 598-611, 1985.
- [SGA05] S. Gaultier-Gaillard, J.-P. Louisot. « Diagnostic des risques, identifier, analyser et cartographier les vulnérabilités ». Technical report, AFNOR, 2004.

- [SLE83] S. Levinson, R. Rabiner, M. Sondhi. « An introduction to the application of the theory of probabilistic functions of a Markov process to automatic speech recognition ». Bell system Technical Journal, 62: 1035-1074, 1983.
- [SRU10] S. Russell, P. Norvig. « Artificial Intelligence, a modern approach ». 3<sup>rd</sup> Edition, Prentice-Hall, 2010.
- [SAC14] Sacha Epskamp. « semPlot: Unified visualizations of Structural Equation Models ». University of Amsterdam, Psycho, 2014.
- [SAH03] Sanchez G. « PLS Path Modeling With R ». Trowchez Editions, Berkeley, 2003.
- [SAF06] Sanchez-Franco M.J. « Exploring the influence of gender on the web usage via partial least squares ». Behaviour & Information Technology 25(1), 19–36, 2006.
- [SAM09] Samuel Thiriot. « Vers une modélisation plus réaliste de la diffusion d’innovations à l’aide de la simulation multi-agents ». Thèse de Doctorat, université Pierre et Marie Curie, 2009.
- [SCU10] Scutari M. « Learning Bayesian Networks with the bnlearn R Package ». Journal of Statistical Software, 35(3):1–22, 2010.
- [SEN99] Sen A. K. « Un nouveau modèle économique. Développement, justice, liberté ». Paris : Editions Odile Jacob 2000, 1999.
- [SEV10] Severine Demeyer, Nicolas Fischer, Gilbert Saporta. « Approche bayésienne des modèles à équations structurelles ». 42<sup>e</sup> Journées de Statistique, 2010.
- [SHA92] Shaffer, J. P. « The role of models in non-experimental social science: Two debates ». Washington, DC: American Educational Research Association, 1992.
- [SHI00] Shin Y. « Interactions trophiques et dynamiques des populations dans les écosystèmes marins exploités. Approche par modélisation individus-centrée ». Thèse de Doctorat, Université Paris 7, 2000.
- [SHO11] Shohei Shimizu, Takanori Inazumi, Yasuhiro Sogawa, Aapo Hyvärinen, Yoshinobu Kawahara, Takashi Washio, Patrik O. Hoyer, Kenneth Bollen. « DirectLINGAM: A Direct Method for Learning a Linear Non-Gaussian Structural Equation Model ». Journal of Machine Learning Research 12 1225-1248, 2011.
- [SIL05] Silva R. « Automatic discovery of latent variable models ». Thèse de Doctorat, School of Computer Science - Carnegie Mellon University – Pittsburgh, 2005.
- [SOP05a] Sophie Martin. « La résilience : définition et évaluation dans le cadre de la théorie de la viabilité ». 7<sup>e</sup> Journée Complexité. Institut des Systèmes Complexes de Paris, 2005.
- [SOP05b] Sophie Martin. « La résilience dans les modèles de systèmes écologiques et sociaux ». Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2005.

- [SON14] Sonya K. Sterba. « Fitting Nonlinear Latent Growth Curve Models With Individually Varying Time Points ». *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 21: 630–647, 2014.
- [SOR14] Soren Hojsgaard. « Graphical Models and Bayesian Networks ». Tutorial at useR! 2014, Los Angeles, July 2014.
- [SPY14] Spyros Skarvelis-Kazakos. « Système de gestion de l'énergie pour les moteurs de cogeneration à base d'agents ». ECOTEC 21 (WP3.6), 2014.
- [SQU07] Squillacciotti S. « Prediction oriented classification in PLS path modeling ». In: Esposito Vinzi V., Chin W.W., Henseler J., Wang H. (Eds.), *Handbook of Partial Least Squares : Concepts, Methods and Applications in Marketing and related fields*. Springer, 2007.
- [STA05] Stan V., Saporta G. « Conjoint use of variables clustering and PLS structural equation modeling ». In: Aluja T., Casanova J., Esposito Vinzi V., Morineau A., Tenenhaus M. (Eds.), *PLS and Related Methods, proceedings of the PLS'05 International Symposium, Barcelona*. SPAD, p 133–140, 2005.
- [STE00] Stefan Vanistendael, Jacques Lecomte. « Le bonheur est toujours possible: construire la résilience ». Bayard, 2000.
- [STP15] Stephen Milborrow. « rpart.plot: Plot 'rpart' Models: An Enhanced Version of 'plot.rpart' ». R package version 1.5.3, 2015.
- [SUM12] Sumaman Pankham, Suchada Kornpetpanee. « Linking Bayesian Networks and Bayesian Approach for Structural Equation Modeling ». 2nd International Conference on Social Science and Humanity, IPEDR vol.31 IACSIT Press, Singapore, 2012.
- [SUS13] Susanne Gammelgaard Bottcher, Claus Dethlefsen. « deal: Learning Bayesian Networks with Mixed Variables ». R package version 1.2-37, 2013.
- [SUS03] Susanne G. Bottcher, Claus Dethlefsen. « Learning Bayesian Networks with R ». *Proceedings of the 3rd International Workshop on Distributed Statistical Computing, Vienna, Austria, March 2003*.
- [SYL05] Sylvie Despres, Sylvie Szulman. « Construction d'une ontologie du droit communautaire ». IC- 6<sup>e</sup> Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances, Nice, France. Presses universitaires de Grenoble, pp.85-96, May 2005.
- [TDA06] T. Dasu, S. Krishnan, S. Venkatasubramanian, K. Yi. « An information-theoretic approach to detecting changes in multi-dimensional data streams ». In *Processings of the 38<sup>th</sup> Symposium on the Interface of Statistics, Computing Science, and Applications (Interface '06)*, 2006.

- [TAN93] Tanaka, J. S. « Multifaceted conceptions of fit in structural equation models ». In K. A. Bollen & J. S. Long (Eds.), *testing structural equation models* (pp. 10-39). Newbury Park, CA: Sage, 1993.
- [TEN08] Tenenhaus M. « Component-based Structural Equation Modelling for small samples ». *Total Quality Management & Business Excellence*, 2008.
- [TEN07] Tenenhaus M. « A bridge between PLS path modeling and ULS-SEM ». In: *Proceedings of the International Symposium PLS'07*, Aas, Norvège, 2007.
- [TEN01] Tenenhaus M., Guinot C. « PLS Path modelling and multiple table analysis. Application to the cosmetic habits of women in Ile-de-France ». In *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 58(2): 247-259, October 2001.
- [TEN99] Tenenhaus M. « L'approche PLS ». *Revue de Statistique Appliquée* 47(2), 5-40, 1999.
- [TEN98] Tenenhaus M. « La regression PLS, théorie et pratique ». Technip, Paris, 1998.
- [TEN05a] Tenenhaus M., Esposito Vinzi V., Chatelin Y.-M., Lauro C. « PLS path modeling ». *Computational Statistics & Data Analysis*, 48, 159-205, 2005.
- [TEN05b] Tenenhaus M., Pagès J., Ambroisine L., Guinot C. « PLS methodology to study relationships between hedonic judgments and product characteristics ». *Food Quality and Preference*, 16, 315-325, 2005.
- [TER15] Terry Therneau, Beth Atkinson, Brian Ripley. « rpart: Recursive Partitioning and Regression Trees ». R package, 2015.
- [TES98] Tessier G., « Humour, apprentissages, résilience: de l'album à Internet ». Doc dactyl. BICE, Genève, 1998.
- [THE94] Théraulaz G. « Du super organisme à l'intelligence en essaim : modèles et représentations du fonctionnement des sociétés d'insectes ». In : E. Bonabeau and G. Théraulaz, éditeurs, *Intelligence collective*, pp. 29-109. Hermès, 1994.
- [THI11] Thibaud Raby, Frédéric Ravaut. « Utilisation d'ontologies dans une application médicale décisionnelle ». *Symposium Mobilité et Santé: Innovations, Usages, Perspectives* 2011.
- [TIE07] Tierney K., Bruneau M. « Conceptualizing and measuring resilience: a key to disaster loss reduction ». *Transportation Research News*, 2007.
- [TOM93] Tomassone R., Dervin C., Masson J.-P. « Biométrie, Modélisation de phénomènes biologiques ». Masson, Paris, 1993.

- [TON08] Tony Jung and K. A. S. Wickrama. « An Introduction to Latent Class Growth Analysis and Growth Mixture Modeling ». *Social and Personality Psychology Compass* 2/1: 302–317, 2008.
- [TRI10] Tricaud-Vialle S, Morineau A. « Amélioration des propriétés de mesure d'un questionnaire de satisfaction des patients hospitalisés : application d'un modèle de mesure à variable latente centrale ». 42<sup>e</sup> Journées de la Société Française de Statistique, Marseille, Mai 2010.
- [UFA96] U. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro, G. Smyth, R. Uthurasamy. « Advances in knowledge discovery and data mining. ». MIT Press, 1996.
- [VAP91] V. Vapnik, A. Chervonenkis. « The necessary and sufficient conditions for the consistency of the method of empirical risk minimization ». *Pattern Recognition and Image Analysis*, 1: 284-305, 1991.
- [VAN98] Van Dyke Parunak H., R. Savit, et al. « Agent based modelling vs equation based modelling: a case study and user's guide ». In J. Sichman, R. Conte and N. Gilbert, editors, *Multi agent systems and agent based simulation, Lecture Notes in Computer Science 1534*. Springer, 1998.
- [VER12] Veronique Delcroix. « Modèles graphiques probabilistes pour les problèmes récurrents d'ADMC ». Actes IAF, 2012.
- [VIV01] Vivien M. « Approches PLS linéaires et non-linéaires pour la modélisation de multi-tableaux : théorie et applications ». Thèse de Doctorat, Université Montpellier I, 2002.
- [WAL06] Walker B., J. M. Anderies, A. P. Kinzig, P. Ryan « Exploring resilience in social-ecological systems through comparative studies and theory development: introduction to the special issue ». *Ecology and society*, 11, 1, pp. 1-12, 2006.
- [WAL11] Walker J., Cooper M. « Genealogies of resilience from systems ecology to the political economy of crisis adaptation ». *Security Dialogue*, 14, 1-29, 2011.
- [WAK13] Walkate S., R. McGarry, G. Mythen « Searching for resilience: A conceptual excavation ». *Armed Forces & Society*, 00, pp. 1-20, 2013.
- [WEL13] Welsh M. « Resilience and responsibility: governing uncertainty in a complex world ». *The Geographical Journal*, 1-12, 2013.
- [WER01] Werner E. « Journeys from childhood to midlife: risk, resilience and recovery ». Ithaca, New York. Cornell University Press, 2001.
- [WER82] Werner E., Smith R. S. « Vulnerable but invincible: A longitudinal study of resilient children and youth ». New York, McGraw-Hill, 1982.
- [WER91] Werner E, et Smith R. « Overcoming odds: high risk children from birth to adult ». Ithaca, NY: Cornell University Press, 1992.

- [WEM92] Wermuth N., Cox D. R. « Graphical models for dependencies and associations ». In Computational Statistics (Dodge Y., Whittaker J., eds), 1, p 235-250, Physica Verlag, Heidelberg, 1992.
- [WES95] West, S. G., Finch, J. F., Curran, P. J. « Structural equation models with nonnormal variables ». In R. H. Hoyle (Ed.), Structural equation modeling: Concepts, issues, and applications (pp. 56–75). Thousand Oaks, CA: Sage, 1995.
- [WEF93] Westfall P. H., Young S. S. « Resampling Based Multiple Testing: Examples and Methods for p-value Adjustment ». Wiley, New York, 1993.
- [WET06] Westrum, R. « A typology of resilience situations ». In Resilience Engineering: Concepts and Precepts (Hollnagel, E. Woods, D.D. and Leveson, N., Éd) Ashgate, 2006.
- [WHI90] Whittaker J. « Graphical Models in Applied Multivariate Statistics ». Wiley, Chichester, 1990.
- [WIL99] Wilensky, U. « NetLogo: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo> ». Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, 1999.
- [WIM11] Williams G. J. « Data Mining with Rattle and R: The Art of Excavating Data for Knowledge Discovery ». Use R! Springer, 2011.
- [WIM02] Willms J. D. « The prevalence of vulnerable children ». In J. D. Willms (dir.), Vulnerable Children: Findings from Canada's National Longitudinal Survey of Children and Youth (p. 45-69). Edmonton: The University of Alberta Press, 2002.
- [WOL95] Wolin, S., Wolin S.J. « Resilience Among Youth Growing Up in Substance Abusing Families ». Pediatric Clinics of North America, 42 :( 2) 415-429, 1995.
- [YVE12] Yves Rosseel. « lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling ». Journal of Statistical Software, Volume 48, Issue 2, May 2012.
- [ZHA08] Zhang X. Y., Deblois L., Kamanzi C., Deniger M A. « A theory of success for disadvantaged children: Re-conceptualisation of social capital in the light of resilience ». Alberta Journal of Educational Research, 54(1), 97-112, 2008.
- [ZIG00] Zighed D. A., Rakotomalala R. « Graphes d'induction, apprentissage et Data Mining ». Hermès, Paris, 2000.