



HAL
open science

Caractériser la vulnérabilité énergétique d'un territoire par analogie à la dynamique des systèmes. Analyse comparée des îles du Sud-Ouest de l'Océan Indien

Laurencia Randriafero Rajonandrianina

► To cite this version:

Laurencia Randriafero Rajonandrianina. Caractériser la vulnérabilité énergétique d'un territoire par analogie à la dynamique des systèmes. Analyse comparée des îles du Sud-Ouest de l'Océan Indien. Géographie. Université de la Réunion, 2023. Français. NNT : 2023LARE0046 . tel-04555998

HAL Id: tel-04555998

<https://theses.hal.science/tel-04555998>

Submitted on 23 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION

École Doctorale Sciences, Technologies et Santé

Laboratoire PIMENT

(Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'environnement et le bâtiment)

THÈSE

Pour obtenir le titre de

Docteur de l'Université de la Réunion

Spécialités : Physique Énergétique, Urbanisme

par Laurencia Randriafeno Rajonandrianina

Soutenue publiquement le **07 Décembre 2023**

**Caractériser la vulnérabilité énergétique d'un territoire
par analogie à la dynamique des systèmes. Analyse
comparée des îles du sud-ouest de l'Océan Indien**

Membres du Jury :

Alexandra SCHAFFAR

Hery Tiana RAKOTONDRAMIARANA

Jean Lalaina RAKOTOMALALA

Fiona BÉNARD

Vincent FONTAINE

Bienvenue RAHELIARILALAO

Professeure

Professeur

Professeur

Professeure

Maître de Conférences

Professeure

Université de Toulon (Rapporteur)

Université d'Antananarivo (Rapporteur)

Institut Supérieur de Tananarive (Directeur)

Université de La Réunion (Co-directrice)

Université de La Réunion (Examineur)

École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (Président du Jury / Examineur)



Engagement de non plagiat

Je soussigné(e), N° carte d'étudiant :

déclare être conscient(e) que le plagiat est un acte délictueux passible de sanctions disciplinaires. Aussi, dans le respect de la propriété intellectuelle et du droit d'auteur, je m'engage à systématiquement citer mes sources, quelle qu'en soit la forme (textes, images, audiovisuel, internet), dans le cadre de la rédaction de tout travail universitaire, sachant que l'établissement est susceptible de soumettre mon texte à un logiciel anti-plagiat.

Fait le

Signature



Extrait du Règlement intérieur de l'Université de La Réunion
(validé par le Conseil d'Administration en date du 11 décembre 2014)

Article 9 - Protection de la propriété intellectuelle – Faux et usage de faux, contrefaçon, plagiat

L'utilisation des ressources informatiques de l'Université implique le respect de ses droits de propriété intellectuelle ainsi que ceux de ses partenaires et plus généralement, de tous tiers titulaires de tels droits.

En conséquence, chaque utilisateur doit :

- Utiliser les logiciels dans les conditions des licences souscrites ;
- Ne pas reproduire, copier, diffuser, modifier ou utiliser les logiciels, bases de données, pages Web, textes, images, photographies ou autres créations protégées par le droit d'auteur ou un droit privatif, sans avoir obtenu préalablement l'autorisation des titulaires de ces droits.

La contrefaçon et le faux

Conformément aux dispositions du code de la propriété intellectuelle, toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle d'une œuvre de l'esprit faite sans le consentement de son auteur est illicite et constitue un délit pénal.

L'article 441-1 du code pénal dispose : « Constitue un faux toute altération frauduleuse de la vérité, de nature à causer un préjudice et accomplie par quelque moyen que ce soit, dans un écrit ou tout autre support d'expression de la pensée qui a pour objet ou qui peut avoir pour effet d'établir la preuve d'un droit ou d'un fait ayant des conséquences juridiques ».

L'article L335-3 du code de la propriété intellectuelle précise que : « Est également un délit de contrefaçon toute reproduction, représentation ou diffusion, par quelque moyen que ce soit, d'une œuvre de l'esprit en violation des droits de l'auteur, tels qu'ils sont définis et réglementés par la loi. Est également un délit de contrefaçon la violation de l'un des droits de l'auteur d'un logiciel (...) ».

Le plagiat est constitué par la copie, totale ou partielle d'un travail réalisé par autrui, lorsque la source empruntée n'est pas citée, quel que soit le moyen utilisé. Le plagiat constitue une violation du droit d'auteur (au sens des articles L 335-2 et L 335-3 du code de la propriété intellectuelle). Il peut être assimilé à un délit de contrefaçon. C'est aussi une faute disciplinaire, susceptible d'entraîner une sanction.

Les sources et les références utilisées dans le cadre de travaux (préparations, devoirs, mémoires, thèses, rapports de stage...) doivent être clairement citées. Des citations intégrales peuvent figurer dans les documents rendus, si elles sont assorties de leur référence (nom d'auteur, publication, date, éditeur...) et identifiées comme telles par des guillemets ou des italiques.

Les délits de contrefaçon, de plagiat et d'usage de faux peuvent donner lieu à une sanction disciplinaire indépendante de la mise en œuvre de poursuites pénales

Remerciements

Cette thèse a reçu le soutien financier de la Région Réunion et de l'Union Européenne - Fonds européen de développement régional (FEDER), dans le cadre du Programme Opérationnel de Coopération Territoriale et a été effectué au sein du Laboratoire PIMENT de l'Université de la Réunion.

En premier lieu, je souhaiterais adresser mes profonds remerciements à ma directrice de thèse, Mme Fiona Benard, pour m'avoir accordé sa confiance depuis mon stage de recherche en M2 dans le parcours EBENE jusqu'à cette thèse. Merci de ne pas avoir trouvé mes enfants comme un obstacle au bon déroulement de mon parcours. Merci pour ton exigence, ta patience et ta bienveillance tout au long de cette période.

Je remercie également M. Jean Lalaina Rakotomalala, mon directeur de thèse, qui a joué le rôle de garant de cette thèse ainsi que M. Vincent Fontaine d'être mon encadrant.

Je remercie tout particulièrement M. Hery Tiana Rakotondramiarana et Mme Alexandra Schaffar d'avoir accepté d'être mes rapporteurs. Je remercie Mme Bienvenue Rahelirilalao et M. Vincent Fontaine qui me font l'honneur de faire partie de mon jury.

Je remercie M. Jean Philippe Praene, doyen de l'UFR SHE pour les discussions enrichissantes et conseils précieux qu'il m'a donné. J'adresse aussi mes remerciements à M. Mathieu David, le directeur du Laboratoire PIMENT, pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe et pour sa contribution précieuse dans la simplification des procédures administratives grâce à sa réactivité immédiate envers nos demandes.

Je remercie vivement M. Gatina Jean-Claude qui s'est personnellement investi pour me soutenir dans cette thèse à travers les conseils et réflexions très instructifs et le rôle essentiel qu'il a tenu dans les démarches administratives facilitant mon regroupement familial.

Je souhaite exprimer une reconnaissance envers Faly, qui s'est toujours montré disponible pour m'assister dans la résolution des problèmes de code, de logiciel et de toutes les questions liées à l'informatique.

Je tiens à remercier l'équipe du département SBE comprenant les titulaires, les responsables pédagogiques et les chercheurs avec lesquels j'ai eu le privilège de collaborer en tant qu'ATER. Cette expérience a été extrêmement enrichissante pour moi.

J'adresse aussi mes remerciements à tous mes collègues et amis doctorants du laboratoire, qu'ils soient anciens ou récemment arrivés : Gregory, Jordy, Amarylis, Toky, Anne-Sophie, Nalitiana, Mirhado et Alexandre. Merci pour les moments de convivialité lors des petits déjeuners et déjeuners, ainsi que pour les échanges enrichissants et les plaisanteries qui ont égayé nos discussions.

Je remercie le club des mamans superwomen : Cathucia, Mirana, Domoina, Tanja et Vanessa. Je suis reconnaissante de pouvoir compter sur vous pour écouter mes plaintes liées à la fatigue et au rythme de vie exigeant que j'endure en jonglant entre mes deux filles et mon bébé thèse !

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers la diaspora Malgache dans son ensemble, ainsi qu'envers les membres de l'église FJKM de la Réunion, qui ont véritablement été une seconde famille pour moi. Même si je ne peux pas tous vous citer individuellement, je pense à Zo, Myrasoa, Haritiana, Harimisa, Dina, Mamy Gervais, Mamitiana et Andry. Votre soutien a été inestimable pour moi.

Mes pensées vont vers ma famille, que ce soit à Madagascar ou en France. À ma mère, qui a toujours été à mes côtés, me poussant constamment à repousser mes limites. À mes sœurs, dont les encouragements constants et le soutien indéfectible ont toujours été présents dans ma vie.

Je tiens à rendre hommage à ma grand-mère maternelle, qui avait toujours nourri le rêve d'avoir un de ses enfants docteur. C'est maintenant chose faite, car nous avons un docteur au sein de la famille. Bien que ce soit "un docteur des territoires", je crois que tu aurais été infiniment fière.

En dernier lieu, mes remerciements chaleureux sont destinés à Antsa. Merci d'avoir fait preuve de patience et de m'avoir soutenu de toutes les manières possibles. J'aimerais également exprimer ma gratitude envers Tsiaro et Anna. Merci, les filles, pour les sacrifices que vous avez consentis afin que je puisse travailler. On peut sortir maintenant, neny a fini son travail !

"Ce qui est écrit sans peine est lu sans plaisir"

Louis - Philippe Robidoux, Lueurs (1951)

A Antsa, Tsiaro et Anna

Acronymes

ACP	Analyse en Composantes Principales 47, 49, 51, 74, 89, 144–146, 148–150
ADER	Agence de Développement de l'Électrification Rurale 127
AESPI	Aggregated Energy Security Performance Indicator 37
AIE	Agence Internationale de l'Énergie 28
ALENA	Accord de Libre-Échange Nord-Américain 98
APEREC	Centre de recherche sur l'énergie pour l'Asie et le Pacifique 28
COI	Commission de l'Océan Indien 109
CONSHAB	Consommation d'énergie électrique par habitant 82, 84, 86, 180
COP	Conférences des Parties 3, 131
ETI	Energy Trilemma Index 38, 39, 179
FAD	Fonds africain de Développement 129
FEF	Facilité pour les États Fragiles 129
GDP	Gross Domestic Product 83, 88
GES	Gaz à Effet de Serre 3, 42, 74, 82, 84, 85, 89, 124, 125, 127, 131, 180
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat 109
IDH	Indice de Développement Humain 34, 42, 47–49, 51, 74, 82, 84, 85, 89, 99, 115, 180
IIASA	Institut International pour l'Analyse des Systèmes Appliqués 28
INDS	Initiative Nationale de Développement Social 129
JIRAMA	Ji-ro sy RA-no MA-lagasy 127
LTECV	Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte 124

MAE	Mean Absolute Error 79
MBE	Mean Bias Error 79
MSE	Mean Square Error 79
NPE	Nouvelle Politique de l'Énergie 127, 128
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques 37
OMH	Office Malgache des Hydrocarbure 127
ONU	Organisation des Nations unies 4
ORE	Office de Régulation de l'Électricité 127
PASEC	Energy Sector Support Project 129, 130
PEID	Petits États Insulaires en Développement 103, 109, 113
PIB	Produit Intérieur Brut 33, 34, 40–42, 47, 52, 74, 82–84, 88, 89, 92, 100, 111, 114, 121, 142, 180
PLU	Plan Local d'Urbanisme 125, 126, 181
PND	Plan National de Développement 127
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement 131
PPE	Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 124, 125, 127
RMSE	Root Mean Square Error 79
SAR	Schéma d'aménagement Régional 125
SCA2D	Stratégie de Croissance Accélérée et de Développement Durable 129
SCot	Schéma de Cohésion Territoriale 125
SIG	Système d'Information Géographique 153
SRCAE	Schéma Régional Climat Air Énergie 124
SRCP	Stratégie Nationale de Croissance et de Réduction de la Pauvreté 129
UE	Union Européenne 37, 95, 109, 126, 127, 131
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization 116
UNICEF	United Nations International Children's Emergency Fund 95
WEC	World Energy Council 38, 39
ZEE	Zone Économique Exclusive 110
ZNI	Zones Non Interconnectées 125

- NetLogo NetLogo est un environnement de modélisation programmable multi-agents. Il est utilisé par plusieurs centaines de milliers d'étudiants, d'enseignants et de chercheurs dans le monde entier. [154](#)
- R R est un langage de programmation et un logiciel libre destiné aux statistiques et à la science des données soutenu par la R Foundation for Statistical Computing. [77](#), [82](#), [83](#)

Table des matières

Remerciements	iii
Acronymes	vii
Glossaire	ix
Introduction générale	1
1 Comprendre la vulnérabilité énergétique d'un territoire	9
1.1 Introduction du chapitre	9
1.2 Vulnérabilité : un terme polysémique à définir	11
1.3 Énergie : de la quantité au système	22
1.4 Vulnérabilité énergétique	23
1.5 Conclusion de chapitre	29
2 Estimation et analyse de la vulnérabilité énergétique	33
2.1 Introduction du chapitre	33
2.2 Base théorique et revue des méthodologies de construction d'indicateur de vulnérabilité énergétique	35
2.3 Analyse multivariée et multidimensionnelle pour évaluer la vulnérabilité énergétique	42
2.4 Limites des méthodes de construction d'indicateurs de vulnérabilité énergétique	53
2.5 Conclusion du Chapitre	55
3 Approche dynamique de la vulnérabilité énergétique	57
3.1 Introduction du chapitre	58
3.2 La dynamique des systèmes par le portrait de phase	61
3.3 Mise en œuvre de l'approche dynamique pour mesurer la vulnérabilité énergétique	68
3.4 Conclusion du chapitre	103
4 Application dans l'analyse comparée de la vulnérabilité énergétique des îles du Sud Ouest de l'Océan Indien	107
4.1 Introduction du chapitre	108
4.2 Situation socio-économique des îles du sud-ouest de l'Océan Indien	110
4.3 Analyse de la vulnérabilité énergétique des îles de l'Océan indien	118
4.4 Implication politique	124
4.5 Conclusion du chapitre	132

Conclusion Générale	135
Table des annexes	139
A Exemples de travaux de définitions de vulnérabilité énergétique	141
B Base théorique de la méthode ACP	144
C La dynamique des systèmes en sciences sociales	151
Bibliographie	157

Introduction générale

L'humanité ne peut se permettre d'émettre dans l'atmosphère tout, ou ne serait-ce que la majeure partie du carbone fossile. Une telle action engendrerait un changement climatique sans précédent, résultant en une planète différente de celle sur laquelle la civilisation s'est développée.

James E. Hansen et al

Contexte énergétique mondial

Évolution de la consommation énergétique mondiale depuis la révolution industrielle jusqu'à ce jour

L'ère industrielle dans l'usage sans décompte de l'énergie. La révolution industrielle a marqué l'histoire de l'humanité. Cela s'est concrétisé par l'automatisation, la production en grande masse et la mécanisation, ce qui a changé les modes de vie, de productions, de consommations de l'homme et a permis le développement des pays [Porcheron \(2015\)](#). Depuis la révolution industrielle, le besoin énergétique mondial s'est développé par un usage excessif et incontrôlé des ressources énergétiques. Et en relation avec la technologie et découverte de la période, ce furent les ressources fossiles qui ont d'abord été le plus accaparées [Criqui \(2009\)](#). Les inventions et découvertes ont été multiples dans cette période, nous allons retracer quelques-unes qui ont eu une influence directe et immédiate avec l'utilisation des ressources fossiles. D'abord, il y a eu l'invention de la machine à vapeur double effet de James Watt en 1782. En 1800, la consommation énergétique mondiale a été évaluée à 200 millions de tonnes équivalent pétrole (200 millions de tep). Cela a continué par l'invention de la locomotive de Stephenson en 1814, incitant une exploitation encore plus massive du charbon [Lepanoy \(1985\)](#). En un siècle, la consommation mondiale en énergie a grimpé à un milliard de Tep (1 Gtep). La consommation a quintuplé en un siècle, quintuplant sa quantité. Le milieu du XX^e siècle a été ensuite marqué par l'invention du moteur à explosion en 1945 qui a accéléré encore plus l'utilisation de l'énergie à travers les automobiles et la consommation de masse [Favenec \(2009\)](#). En dépit des crises et des guerres qui se sont interposées comme obstacles, cela n'a pas empêché la consommation de croître. En 1945, la consommation atteint déjà, le double de ce qui a été en 1900 en atteignant les 2 Gtep. Cette date a été marquée par la fin de la 2^e guerre mondiale, suivie de la période des « trente glorieuses ». Pendant les Trente Glorieuses, la plupart des pays développés ont amorcé une croissance économique forte avec mode de vie axé sur le confort, en grande partie grâce à l'utilisation courante des voitures et des appareils électroménagers. Cette évolution a profondément changé la société pour en faire une culture centrée sur la consommation. L'énergie

est devenue un élément essentiel à la condition de vie humaine, et notamment à son confort [Neves and Leal \(2010\)](#). La consommation mondiale a suivi le rythme de la croissance de la population dont dépendait la demande d'énergie. La consommation a été multipliée par cinq sur la deuxième moitié du XX^e siècle pour atteindre 10 Gtep en 2000, dont les 80 % ont été encore dominés par les énergies fossiles malgré les crises qui se sont interposées entretemps (chocs pétroliers de 1973-1974 et 1979-1980) [Criqui \(2009\)](#). La consommation mondiale a été fortement corrélée par les grandes découvertes et aussi par la croissance démographique mondiale. Cette évolution est visible dans la figure 1. L'usage sans décompte et insouciant de l'énergie a marqué cette longue période d'industrialisation.

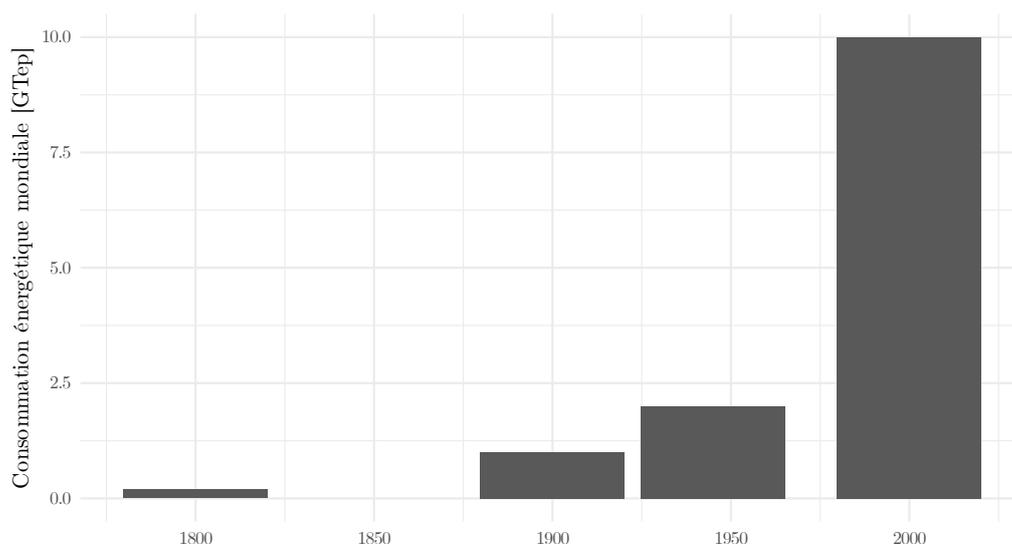


FIGURE 1 – Évolution de la consommation énergétique mondiale de 1800 à l'an 2000 en Gtep (Source : [BP \(2020\)](#))

Prise de conscience pour une deuxième forme de révolution industrielle. L'époque de l'industrialisation et l'acquisition de l'énergie représentaient un moteur de développement, mais aussi a conduit à creuser les écarts d'inégalités sociales : les pays du monde ont chacun leur rythme de développement et de croissance de richesses, de pouvoirs et d'influences vers les autres pays. Dans la quête de puissance et de pouvoir, l'énergie joue en effet un rôle fondamental. Les énergies fossiles sont ainsi devenues des matières premières de plus en plus « stratégiques » et des enjeux de sécurité internationale, surtout le pétrole, au point qu'on voit souvent la scène énergétique mondiale comme un théâtre « géopolitique » plus qu'un espace de transactions économiques [Noel \(1999\)](#). L'énergie est utilisée dans tous les secteurs de l'économie, qu'ils soient industriels, commerciaux, agricoles ou résidentiels. L'énergie joue un rôle dans la production des biens d'un pays, mais il constitue également un produit final de consommation pour le chauffage, le transport, les usages domestiques, etc. [Prasad et al. \(2014\)](#). Ce qui en fait un enjeu très important. Cependant, le monde commence à réaliser l'importante consommation qui ne cesse d'augmenter depuis ce long périple, même s'il reconnaît que l'utilisation de l'énergie ouvre la porte au développement [Carbonnier and Grinevald \(2011\)](#). Cela s'est manifesté à travers un grand nombre de conférences rassemblant les nations du monde, en particulier les

puissances majeures. Ces réunions avaient pour objectif de trouver des solutions et des remèdes aux problèmes environnementaux émergents, tels que l'élévation de la température de l'air et des océans, la fonte des glaciers, l'élévation du niveau de la mer, et bien d'autres défis. Le premier Sommet de la Terre s'est tenu en 1972 à Stockholm, qui pour la première fois a réuni de nombreux pays du monde aux questions écologiques mondiales. Le deuxième Sommet s'est tenu en 1992 à Rio de Janeiro, où le programme s'est concerté sur le défi de freiner le changement climatique en mettant en place des politiques de protection de la biodiversité et l'élimination des produits toxiques afin de stabiliser les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre [Rakotoson \(2019\)](#). Depuis 1995, six conférences ont été menées pour discuter du changement climatique, c'étaient les [COP \(Conférences des Parties\)](#) dirigées par les Nations Unies pour l'adoption des quotas d'émissions de Gaz à effet de Serre (GES) [Lipietz \(2001\)](#). Ces conférences ont abouti en 1997 au protocole de Kyoto qui engage les pays développés à réduire les émissions de GES de 5,2 % en moyenne pour l'année 2012. Le troisième Sommet de la Terre s'est tenu en 2002, c'était le « Sommet mondial sur le développement durable ». L'usage sans décompte des ressources non renouvelables que sont les énergies fossiles, représente une menace. Une estimation datant déjà de 2006 postulait qu'au rythme de consommation mondiale existant, les réserves exploitables ne correspondraient plus qu'à une quarantaine d'années de consommation pour le pétrole, à une soixantaine d'années pour le gaz naturel et à environ 230 ans pour le charbon [Lamy \(2006\)](#). Le modèle de développement énergivore qui a facilité l'explosion démographique, scientifique et technologique du XX^e siècle est limité par des dangers imminents qui touchent à la fois la santé économique, sociétale et environnementale du monde [Carbonnier and Grinevald \(2011\)](#). En effet, cela se traduit par la raréfaction progressive des ressources fossiles qui conduira à l'augmentation des coûts d'exploitation et donc des prix, l'augmentation des gaz à effet de serres et d'autres nuisances sur le plan environnemental, et enfin les inégalités socio-économiques entre les pays, la précarité énergétique, etc. [Mérenne-Schoumaker \(2013\)](#). Un changement dans le mode de consommation commence alors peu à peu à se mettre en place, et rajoute au bouquet énergétique que sont le charbon et le pétrole, d'autres ressources comme le nucléaire, qui a fait son entrée par exemple en 1951 aux États-Unis [Rousseau \(2015\)](#), aussi l'usage progressif des énergies renouvelables comme l'hydro, le solaire, l'éolienne, la géothermie, etc., ce qui fait que le mix énergétique mondial en 2019 est maintenant à 16 % d'énergie renouvelable, la consommation mondiale ayant atteint 14 Gtep [BP \(2020\)](#).

Transition énergétique : l'impératif d'une nouvelle ère. Face à une consommation fulgurante et inconsciente des énergies fossiles, l'ère du XXI^e siècle marque une rupture. Des faits scientifiques comme le réchauffement climatique, l'épuisement des ressources en énergies fossiles, l'augmentation des gaz à effet de serre et le pic pétrolier ont fait sonner l'alerte [Porcheron \(2015\)](#). En effet, la raréfaction des ressources va impliquer la hausse des prix des matières premières, l'augmentation des GES présente cinq grandes menaces pour la planète : la réduction de la biodiversité et des écosystèmes, la disponibilité en eau potable, l'occurrence des événements climatiques extrêmes, les inondations et l'érosion, et enfin, l'élévation du niveau des mers qui en particulier fait craindre l'immersion d'un grand nombre de villes portuaires à l'horizon 2070 [Notteboom and Vonck \(2009\)](#). Ces constats représentent des contraintes sur l'activité économique à long terme des territoires, mettant en jeu leur sécurité écologique et présentant un obstacle à la pérennité de la planète [Carré \(2013\)](#). Ainsi, le 20^e siècle a été celui de la prise de conscience planétaire, notamment des limites des capacités de la Terre. Le monde a vu naître la notion de développement durable, un concept que de nombreux pays, selon leurs moyens, ont

commencé à intégrer peu à peu [Multon et al. \(2004\)](#). Une initiative qui est le fruit de nombreuses concertations comme en 1987 avec le rapport Brundtland (Commission sur l’environnement et le développement de l’ONU) qui a défini le développement durable de la façon suivante : « Satisfaire les besoins actuels, sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs » afin de répondre aux besoins fondamentaux des humains : alimentation, santé, eau, énergie tout en préservant au mieux la planète, les sommets de Rio en 1992, de Kyoto en 1997 puis de Johannesburg en 2002 qui ont permis d’élaborer des règles de développement afin de renverser la tendance dangereuse contraignant l’avenir de la planète et de ses occupants. Les recours vont dans un sens qui permet l’élaboration de nouveaux modèles d’organisation dont les principes sont fondés sur des concepts permettant une indépendance par rapport au pétrole. Il s’agit de reconsidérer l’organisation et la gouvernance de la société pour améliorer, sur le long terme, l’efficacité énergétique des territoires. Cela passe nécessairement par une meilleure appropriation et optimisation des techniques et des technologies, de l’innovation apportée par de nouveaux modèles durables. Avec un changement des comportements, collectifs aussi bien qu’individuels, à travers l’emprunt de la voie de la transition énergétique [Porcheron \(2015\)](#). La transition énergétique est un enjeu planétaire, chaque pays essaie à leur façon de traduire cette volonté par des politiques énergétiques typiques de leur situation. Mais le point commun, telle qu’elle est entendue aujourd’hui, désigne le passage progressif du système énergétique basé sur la consommation de ressources énergétiques non renouvelables (fossile ou naturelle comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel, l’uranium, etc.) à un système énergétique fondé, en partie, sur l’utilisation d’énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, biomasse, géothermique, etc.), renforcé par des comportements énergétiques plus sobres et plus efficaces [Lejoux and Ortar \(2014\)](#) (de la production jusqu’à l’utilisation de l’énergie). Ainsi, toute la communauté internationale s’est fixée pour objectif de trouver un équilibre entre la croissance économique, la maîtrise des ressources, tant énergétique que de matières premières, la sécurité énergétique et la protection environnementale. En illustration, la figure 2 présente la politique de transition énergétique de l’Allemagne, le pays reconnu comme l’initiateur du concept [Mérenne-Schoumaker \(2013\)](#).

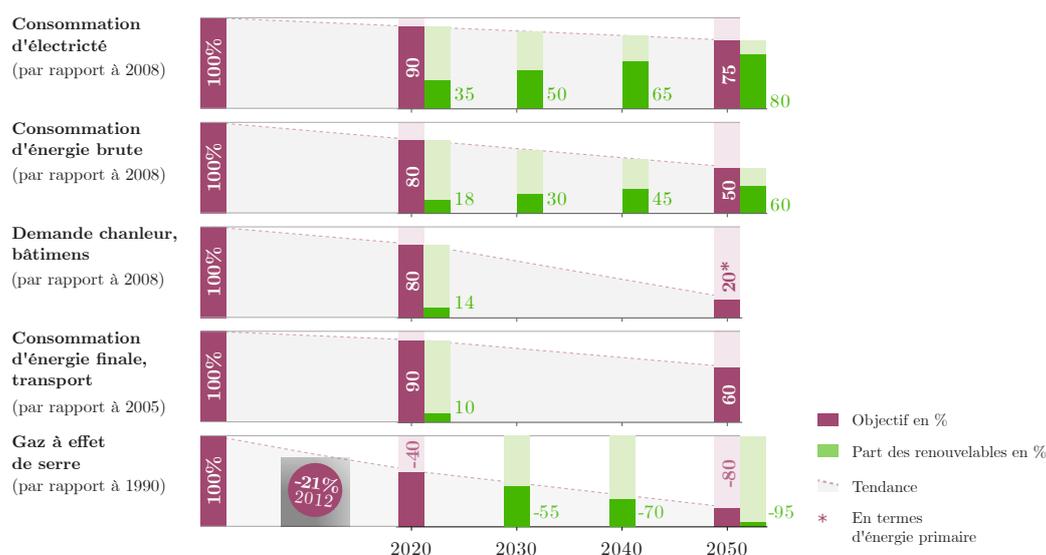


FIGURE 2 – Objectif énergétique de l’Allemagne (source [Mérenne-Schoumaker \(2013\)](#))

Enjeux et problématique de la thèse

La consommation énergétique représente une variable fondamentale à maîtriser dans la transition énergétique parce qu'elle augmente avec la population qui ne cesse aussi de croître. L'accroissement de la consommation entraîne une hausse de la demande en énergie, ce qui pousse à puiser davantage dans les ressources fossiles. Parallèlement, le développement d'une technologie adaptée pour répondre à ce besoin urgent devient également une préoccupation majeure. [Laville et al. \(2014\)](#). La transition énergétique a été initiée et fortement appuyée par les différentes institutions étatiques pour anticiper l'épuisement des ressources fossiles qui sont des ressources non renouvelables. Les différents pays du monde ont pour mission de réussir cette transition énergétique, mais face à cet enjeu majeur et son urgence, les pays se trouvent dans des situations d'inégalités. On observe en effet que les ressources fossiles sont inégalement réparties. La dotation en ressources n'est pas égale dans le monde, il y en a qui sont moins servies que d'autres. La figure 3 illustre cette inégale répartition. On peut y voir par exemple que le Moyen-Orient détient presque la moitié des réserves de pétrole mondiale. Il en est de même pour les autres ressources, comme le gaz ou le charbon. Ce fut la raison de nombreux conflits majeurs de par le monde, elle a généré et génèrent encore des tensions géopolitiques jusqu'à aujourd'hui. Un obstacle majeur dans la réalisation de cette transition énergétique.

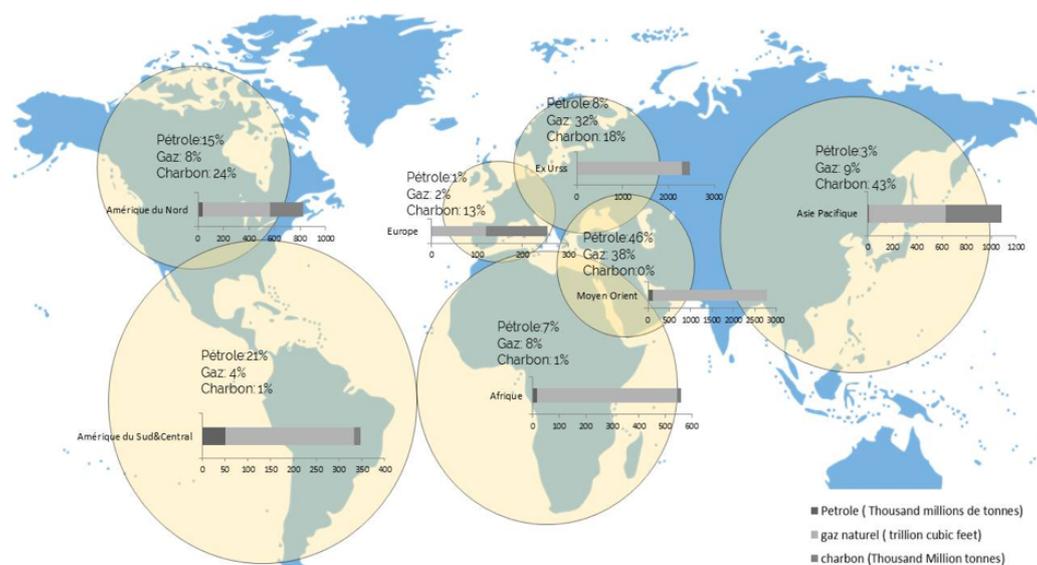


FIGURE 3 – Répartition des réserves mondiale en fossile (2019). Source [BP \(2020\)](#)

Si tels sont le cas des réserves d'énergies fossiles, les énergies renouvelables qui seront les alternatives aux énergies fossiles, bien que disponibles, ne départagent pas non plus les pays avec équité. En effet, si l'on se réfère à la production brute de l'énergie renouvelable dans le monde (figure 4) par exemple, ils existent des inégalités dans la mise en œuvre de l'exploitation de ces gisements. En raison de leur situation géographique, de leur formation géophysique et de leur accessibilité à ces énergies. Les pays situés près des tropiques seront avantagés dans l'installation de systèmes énergétiques à base des énergies renouvelables tels que les panneaux solaires pour le chauffage de l'eau par exemple, ou des panneaux photovoltaïques pour la production électrique, car ils bénéficient d'un gisement solaire assez important. Les moyens économiques

et niveaux technologiques dont le pays dispose ne donnent pas aussi les mêmes chances aux différents pays d'avoir le même accès à ces énergies renouvelables. Ces énergies sont plus diffuses, souvent intermittentes, leur transport nécessite des adaptations technologiques conséquentes. Ces systèmes ont besoin d'un financement plus onéreux dans leur installation et d'une technologie de pointe pour leur exploitation (maîtrise de leur caractère intermittent), les pays riches ou développés disposent de plus de moyens pour les mettre en œuvre dans ce précepte si on les compare aux pays en développement.

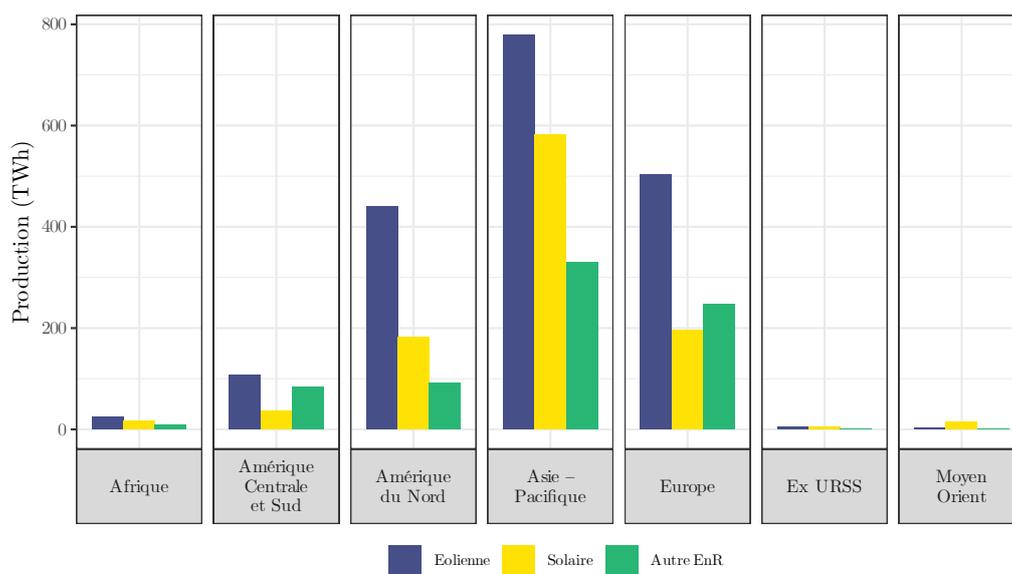


FIGURE 4 – Production mondiale d'énergie renouvelable. Source : BP (2020)

Des inégalités se créent aussi par rapport à la situation géographique des pays. Effectivement, les pays insulaires, en particulier ceux qui sont géographiquement isolés, éprouveront des difficultés accrues pour garantir leur approvisionnement énergétique, surtout si les îles dépendent de l'importation. Ils ne pourront avoir un accès à un réseau si on parle de connexion à un réseau de distribution d'énergie comme peuvent profiter les pays continentaux. La situation géographique d'un pays cause ainsi des formes d'inégalité face à leur accès à l'énergie et peuvent prendre part aux difficultés qui leur feront obstacles toujours dans la réussite de leur transition énergétique. Et enfin, ce qui n'est pas des moindres, l'inégalité socio-spatiale au regard de la question environnementale est aussi pointée du doigt. En effet, le niveau d'éducation et de formation peut par exemple causer des retards dans la mise en œuvre de la transition énergétique. Ces inégalités suscitent donc aujourd'hui de grand intérêt dans l'atteinte de la transition énergétique. Toutes ces inégalités font paraître donc que les pays n'ont pas les mêmes chances et opportunités dans cet objectif de transition. Il existe une forme de fragilité qui serait alors une vulnérabilité liée à l'énergie : une vulnérabilité énergétique. Comment peut-on définir cette vulnérabilité énergétique ? Quels sont les facteurs qui rendent un territoire dans cette situation de vulnérabilité énergétique ? Quelles données et variables sont requises pour définir la vulnérabilité énergétique ? Quelles modèles pourraient-on associer à la vulnérabilité énergétique ? Les territoires sont-ils dans une même situation de vulnérabilité énergétique ? tels sont les questionnements, à quoi devrait répondre cette thèse. Comprendre et définir cette vulnérabilité énergétique revêt une importance capitale. En effet, cela permettrait d'identifier les faiblesses d'un territoire qui

pourraient entraver sa réussite dans le processus de transition énergétique. Cette vulnérabilité est abordée dans la littérature, mais les définitions qui l'entourent restent floues. Un des enjeux qui pourraient émerger de cette définition est la nécessité de disposer d'indicateurs permettant de la mesurer. On peut se poser aussi la question : faut-il parler de vulnérabilité énergétique des territoires, de résilience ou de soutenabilité? Les trois notions s'entremêlent et semblent devoir être appréhendées conjointement. Tandis que la résilience semble être l'opposé positif de la vulnérabilité [Neiladger \(2000\)](#), elle est également perçue comme une des clés permettant le développement durable, une solution à la soutenabilité en somme [Barroca et al. \(2013a\)](#). Trois types de mesures sont envisagés dans la littérature [Dauphiné and Provitolo \(2007\)](#) : des mesures disciplinaires simples qui ne considèrent qu'un aspect unique de la résilience/vulnérabilité/soutenabilité, des mesures issues de la dynamique des systèmes qui associent au système plusieurs attracteurs, et des mesures via des indicateurs multidimensionnels qui compensent la difficulté d'obtenir un plan de phase. Trois types d'études mettent en œuvre ces mesures : des études menant à des comparaisons territoriales (par exemple dans les travaux de [Praene et al. \(2018\)](#), [Briguglio et al. \(2008\)](#), [Bénard \(2017\)](#)) ; des études permettant une évaluation générale de la menace, et des études ayant pour but d'améliorer la compréhension des facteurs qui déterminent la vulnérabilité afin d'identifier des mesures pour la réduire. Les trois types d'études se chevauchent parfois [Adger and Agnew \(2004\)](#). De manière générale, les études réalisées se basent sur des indicateurs multidimensionnels dans le but est d'opérer une comparaison des territoires via un classement voire une classification. Ces comparaisons et opérations de clustering/ranking permettent de situer le territoire au regard de la menace envisagée, de mettre en évidence des facteurs de vulnérabilités et d'envisager des mesures de réduction. Ces opérations, bien qu'instructives, souffrent néanmoins de deux faiblesses : premièrement, la vulnérabilité est un fait complexe inhérent aux caractéristiques profondes du territoire qui ne peut donc s'appréhender que de manière comparative ; deuxièmement, il est de plus en plus reconnu que la vulnérabilité est un fait dynamique [Adger and Agnew \(2004\)](#), [Campbell \(1999\)](#). La caractérisation de la vulnérabilité d'un territoire doit donc idéalement passer par des études cherchant à identifier les facteurs de vulnérabilité du territoire permettant de le positionner par rapport à la menace, reconnaissant la présence de plusieurs attracteurs. L'objectif principal de ce travail de thèse est de proposer une méthode de caractérisation de la vulnérabilité énergétique adaptable pour différents types de territoires et qui pourrait être donc également utilisée pour les territoires insulaires. L'intérêt méthodologique repose sur la définition des conditions initiales, c'est-à-dire des paramètres qui pourraient représenter et transcrire cette vulnérabilité énergétique, ainsi que l'évolution du système de territoire étudié dans le temps et aussi dans l'espace. Cet aspect dynamique introduit dans la caractérisation de la vulnérabilité énergétique constitue l'élément novateur du projet de thèse. Cette approche originale de la vulnérabilité énergétique considère alors que la vulnérabilité est non seulement multidimensionnelle, mais elle est surtout la caractérisation d'un système en constante évolution et interactions avec des éléments extérieurs. Cette approche devrait permettre de mieux comprendre la situation énergétique des territoires, au regard de leurs évolutions passées, et de leurs situations présentes et d'orienter les politiques énergétiques à appliquer dans le futur pour réussir la transition énergétique. Afin d'atteindre les objectifs de cette thèse, le travail va se répartir comme suivant :

- D'abord, l'introduction générale de la thèse est présentée pour assurer sa mise en contexte, la présentation des enjeux et des problématiques qu'elle tentera de résoudre.
- Nous aurons par la suite le premier chapitre de la thèse qui œuvre pour comprendre la vulnérabilité énergétique d'un territoire. Il établira pour cela un état de l'art de vulnéra-

bilité énergétique, mais aussi et surtout sur le concept de la vulnérabilité en soi, afin de mieux appréhender toutes les complexités liées à la notion. Le chapitre 1 constitue ainsi un préambule permettant de maîtriser la notion de vulnérabilité énergétique dans toutes ses formes et perceptions.

- Ensuite, on aura le chapitre 2 qui s'interroge sur les travaux qui ont été menés dès lors sur la caractérisation de la vulnérabilité énergétique. Il propose par la suite une caractérisation multidimensionnelle et multivarié de la vulnérabilité énergétique qui se fera par la construction d'un indicateur de vulnérabilité énergétique afin de faire l'analyse d'un ensemble de territoire donné.
- Le chapitre 3 proposera par la suite une approche systémique de la vulnérabilité énergétique en proposant une méthodologie issue de la dynamique des systèmes par le portrait de phase. Une méthode qui permettra d'identifier les caractéristiques des attracteurs de vulnérabilité énergétique.
- Le chapitre 4 se focalisera dans l'étude de la vulnérabilité énergétique des îles du sud-ouest de l'océan Indien dans le but d'enrichir les travaux portant sur ces îles par l'application des méthodes qui ont été construits dans les précédents chapitres, mais aussi et surtout afin d'accompagner ces îles dans la réussite de leur transition énergétique.
- Enfin, la dernière partie donnera la conclusion générale des travaux entrepris et donne les perspectives de recherche qui pourront être des continuités intéressantes pour la thèse.

CHAPITRE 1

Comprendre la vulnérabilité énergétique d'un territoire

L'énergie est le fil d'or qui relie le développement économique et social à la durabilité environnementale et permet au monde de prospérer. Le développement n'est pas possible sans énergie, et le développement durable n'est pas possible sans énergie durable.

Ban Ki-moon, ancien Secrétaire Général de l'ONU

Sommaire

1.1	Introduction du chapitre	9
1.2	Vulnérabilité : un terme polysémique à définir	11
1.2.1	Origine et évolution du concept de vulnérabilité	11
1.2.2	Les différents concepts et approches de la vulnérabilité	15
	Vulnérabilité physique ou biophysique	16
	Vulnérabilité sociale	18
	Vulnérabilité territoriale	19
	Résilience	20
1.3	Énergie : de la quantité au système	22
1.4	Vulnérabilité énergétique	23
	Essai de définition	23
	La dépendance énergétique	24
	La précarité ou pauvreté énergétique	25
	La sécurité énergétique	27
1.5	Conclusion de chapitre	29

1.1 Introduction du chapitre

Le développement d'une nation est très dépendant de son secteur énergétique [Prasad et al. \(2014\)](#). L'énergie contribue, à l'échelle de l'individu, à la satisfaction de ses besoins essentiels et à l'échelle du pays, à son développement (développement social, économique et environnemental), ainsi qu'à ses efforts de réduction de la pauvreté [Neves and Leal \(2010\)](#); [Martchamadol and Kumar \(2012b\)](#). Les systèmes énergétiques sont reconnus comme l'un des éléments clés déterminant le développement de la société : son bien-être, sa santé et sa qualité de vie [Klimenko](#)

et al. (2018). En effet, le secteur énergétique d'une économie interagit avec l'offre et la demande, le progrès technologique, le potentiel de marché d'une technologie et l'environnement. L'énergie est utilisée dans tous les secteurs d'activités, qu'ils soient notamment industriels, commerciaux, agricoles, transports ou encore résidentiels Kuang et al. (2016).

Au cours des dernières décennies, la forte dépendance aux combustibles fossiles a soulevé un nombre alarmant de questions liées à l'énergie, évoquant les préoccupations d'ordres économiques, sociales et environnementales Kosai (2019). Les crises pétrolières, les instabilités politiques dans les pays producteurs, les catastrophes naturelles, les attentats terroristes survenus dans le monde ont sonné l'alerte d'une insécurité énergétique. Cette insécurité a été très alarmante pour les pays industrialisés, mais aussi les pays émergents. En effet, les pays industrialisés pour leur part ont cherché à maintenir leur position de stabilité économique. Ces pays sont très dépendants de ces énergies qui assurent le quotidien de la population en l'accompagnant dans chaque instant, dans son mode vie, son confort, ses déplacements, de même pour leur production en touchant tous les différents secteurs d'activités : primaire par l'agriculture et élevage intensif nécessitant une grande assistance énergétique, leur secteur secondaire où toute leur chaîne de production ne peut se faire qu'à partir de l'énergie, et enfin le secteur tertiaire fortement lié avec le progrès technologique (wifi, réseaux) qui les rendent aussi très dépendants énergétiquement. Aussi, de leur côté, dans les pays émergents, l'énergie est tout aussi primordiale. Ces pays sont dans une phase de construction dans la mesure où ils commencent leur industrialisation, une étape importante qui pourra assurer la phase croissante de leur développement Beers (2012); Gasser (2020). L'une des composantes les plus importantes de la sécurité nationale d'un pays est sa sécurité énergétique Kvon et al. (2018). Maîtriser cette insécurité, qui est perçue comme une faiblesse, ou plus encore une vulnérabilité d'Artigues (2012) devient alors une priorité nationale Papada and Kaliampakos (2019) à l'échelle des pays. Aux États-Unis par exemple, plus de 180 projets de loi avec le terme « sécurité énergétique » dans le texte du projet de loi ont été présentés au Congrès américain au cours du 111^e Congrès (2009-2010) et plus de 200 projets de loi ont été présentés au cours du Congrès qui l'a précédé Cohen et al. (2011). Étant donné que les activités économiques actuelles dépendent totalement de l'énergie, il est important pour les pays de sécuriser leurs sources d'énergie Mutani and Todeschi (2018). L'objectif a été par conséquent dans un premier temps d'assurer « la sécurité énergétique », impliquant particulièrement l'approvisionnement en pétrole. Un objectif qui s'est par la suite étendu vers la sécurité de l'approvisionnement en gaz naturel, du charbon et de toutes autres ressources énergétiques Novikau (2019). Puis, l'enjeu de l'insécurité énergétique a été de résoudre à la fois le problème de dépendance énergétique, mais aussi de limiter les émissions de gaz à effets de serre, premier responsable des changements climatiques Garabedian and Ricci (2018). Les pays se sont donc concentrés vers de nouvelles sources d'énergie, afin de limiter leur dépendance au pétrole. De plus, de nombreux sommets, comme Kyoto dès 1997, Rio en 1992, G8 en 2005 et ceux qui ont suivi ont fait ressortir de nouvelles politiques et planification qui tiennent compte du changement climatique par l'utilisation d'une énergie propre afin d'assurer un développement durable Lamy (2006). Il s'est avéré que le choix de la France par exemple, qui a opté dans les années 80 pour un renforcement de sa production énergétique par le biais du nucléaire, a été justifié Magnin (2013). Les pays se sont orientés progressivement vers une diversification de leur bouquet énergétique. D'autant plus que c'est l'un des principaux objectifs de la sécurité énergétique mondiale issue du plan d'action de Saint-Petersbourg du sommet des G8 de 2006 De Jong (2011).

Pour trouver les politiques énergétiques les mieux adaptées à cette situation, définir et me-

sur la vulnérabilité énergétique s'avère être la solution adéquate. Que ce soit au niveau de la communauté internationale, des grandes firmes industrielles, technologues, scientifiques et chercheurs, la maîtrise de la vulnérabilité énergétique suscite désormais une attention particulière et croissante. L'évaluation de la vulnérabilité énergétique est nécessaire pour réussir une planification efficace afin de contourner les enjeux énergétiques actuels, intégrant des stratégies qui contribueront à faire face au changement climatique, à la volatilité des prix du pétrole et à la vulnérabilité globale du secteur de l'électricité [Gatto and Busato \(2019\)](#). Cependant, la vulnérabilité énergétique ne trouve pas encore de définition unanime dans la littérature [Genave et al. \(2020\)](#).

C'est dans ce contexte que l'idée d'apporter une clarification conceptuelle de la notion de vulnérabilité énergétique est utile. Pour ce faire, ce chapitre prendra soin de définir les termes essentiels constituant la vulnérabilité énergétique afin de mieux cerner le sujet. Ainsi, la première partie de ce chapitre visera à comprendre d'abord le terme même de "vulnérabilité" et apporter les définitions existantes issues de la littérature. Par la suite, la deuxième partie abordera les éléments à considérer dans le contexte de l'énergie, avant d'explorer les enjeux et les différentes caractéristiques à prendre en compte lorsqu'on aborde la question de l'énergie à l'échelle d'un territoire donné. Enfin, la troisième partie s'intéressera à la vulnérabilité énergétique en soi, en passant en revue ses définitions théoriques et sa mise en pratique à travers le système énergétique territorial.

1.2 Vulnérabilité : un terme polysémique à définir

Une notion doit passer obligatoirement par plusieurs étapes avant d'être quantifiable. La figure 1.1 décrit comment cette évolution se construit jusqu'à ce qu'elle devienne une approche scientifique, reconnue et validée. Nous présentons ci-après les étapes d'évolution dans la caractérisation du terme de vulnérabilité.

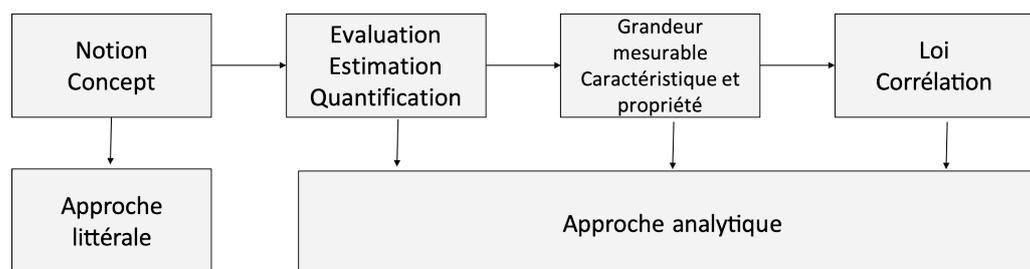


FIGURE 1.1 – Évolutions d'une notion vers une approche scientifique. Source : Réalisation propre

térisation du terme de vulnérabilité.

1.2.1 Origine et évolution du concept de vulnérabilité

Dans son sens le plus élémentaire, la vulnérabilité transmet une idée de susceptibilité aux dommages ou aux préjudices [Eakin and Luers \(2006\)](#). L'American Heritage Dictionary of the English language (sixième édition, 2016) définit la vulnérabilité comme « *une susceptibilité de subir un préjudice ou des dommages physiques, de provoquer des troubles émotionnels, notamment en étant facilement blessé, ou la susceptibilité d'être attaqués* », simplifié par Le Collins

English Dictionary (deuxième édition, 1986) comme, entre autres, la « *propension à être blessé physiquement ou émotionnellement* ». En retraçant les racines linguistiques du terme de vulnérabilité, l'origine se trouve dans le Latin *vulnus* (blessure), et *vulnerare* (blesser) qui d'une part invoque une notion de fêlure ou de fragilité et donc sous-tend la zone sensible et fragile d'où arrivera l'atteinte et d'autre part de blessure qui est la matérialisation de l'atteinte Brodiez-dolino (2016), Timmerman (1981). Plus précisément, le mot vulnérabilité vient du Late Latin *vulnerabilis* qui était le terme utilisé par les Romains pour décrire l'état d'un soldat blessé sur le champ de bataille, c'est-à-dire déjà blessé et donc en danger d'une nouvelle attaque Cuevas (2010), Cassel-gintz (2007). Dans ce sens classique, la vulnérabilité est définie principalement par les dommages antérieurs (la blessure existante) et non par le stress futur (toute nouvelle attaque) Kelly and Adger (2000). Ensuite, le sens du terme a évolué progressivement, ayant à la fois une dimension historique avec les aspects économiques, politiques, et sociaux. La définition et le sens de la vulnérabilité ont évolué dans le temps Adger (1999) et à travers l'espace Cutter et al. (2003) selon la discipline ou le domaine qui en fait l'usage Ercole et al. (1994). Les premières évaluations de la vulnérabilité ont été tracées aux États-Unis à travers le floodplain management¹ dans les années 1950 Barroca et al. (2013b). Cette époque marque aussi l'entrée du terme de vulnérabilité dans les objets des sciences sociales à travers les politiques de protection sociale (souvent rencontré en science sociale ou en médecine) Delcroix (2012). En effet, les catastrophes naturelles comme les inondations, les tempêtes, les tremblements de terre, accidents technologiques ont un dénominateur commun : leur potentiel de pertes humaines ou matérielles ainsi que de profondes perturbations de l'organisation socioéconomique et politique du territoire. L'augmentation de la fréquence d'apparition de ces catastrophes naturelles ont poussé la volonté des institutions publiques et des communautés scientifiques à trouver des solutions pour maîtriser et gérer ces catastrophes en réponse à une demande de protection croissante des populations Becerra (2012). Par conséquent, la dimension sociale s'est intégrée de plus en plus à la notion de vulnérabilité Delor and Hubert (2000). Le département de géographie de l'université de Chicago a été reconnu comme propulseur des recherches menées sur ce thème Hufschmidt (2011). Au début des années 60 par exemple, les géographes de l'université de Chicago lancent un programme de recherche pour « *interroger l'interaction entre le système social et le système naturel dans la variété des environnements et des cultures* » White (1964). Si l'analyse des risques a été liée depuis longtemps à l'aléa, on a commencé à cette époque à traiter les risques en fonction de la vulnérabilité Veyret (2006). En effet, les recherches sur les risques se sont d'abord basées sur le paradigme du « *risque = aléa × vulnérabilité* », où le risque est le croisement de l'aléa et de la vulnérabilité. Concrètement, c'est l'étude de l'aléa qui a eu le plus de poids dans l'analyse du risque, non seulement dans la démarche scientifique, mais également dans toutes les procédures opérationnelles liées à l'organisation de la protection civile, à la réglementation de l'usage du sol ou à la prévention des risques au sens le plus large Metzger and d'Ercole (2008). Cependant, les limites de la protection qui ont été mises en place ont montré l'insuffisance d'une focalisation exclusive sur l'aléa Veyret (2006). De plus, les sciences sociales ont mis en évidence l'existence d'une vulnérabilité sociale. La vulnérabilité a alors pris sa place dans l'analyse des risques et a été employée par de nombreux auteurs en

1. Le floodplain management ou gestion des plaines inondables fait référence à l'ensemble des stratégies, politiques et pratiques mises en place pour gérer et contrôler les risques liés aux inondations dans les zones basses et plates adjacentes aux cours d'eau. Elle vise à minimiser les dommages causés par les crues en tenant compte de l'utilisation des terres, de la planification urbaine, de la gestion des ressources en eau et de la protection des infrastructures et des habitants.

référence aux risques [Cardona \(2003\)](#). Dans cette nouvelle définition, la dimension des enjeux a été rajoutée, mettant l'accent sur les entités susceptibles d'être touchées par un aléa. Ainsi, le terme de vulnérabilité, a été défini dans son acception la plus large comme la propension d'un enjeu humain, matériel, environnemental, etc. à subir un dommage. Autrement dit, dans cette implication de l'enjeu dans la définition du terme de vulnérabilité, il a été défini que : est vulnérable tout enjeu qui ne peut faire face (to cope with) à l'existence et l'occurrence d'un aléa [Gleyze \(2005\)](#), [Gleyze and Reghezza \(2007\)](#). Ainsi, la vulnérabilité a été définie comme une fragilité préexistante d'un objet (l'individu, le ménage, le groupe, le territoire...) qui favorise la non-résorption d'un aléa et provoque des pertes dues à la réalisation de celui-ci [Borderon and Oliveau \(2016\)](#). Le terme a connu ensuite un succès international et transdisciplinaire dans sa forme anglaise « vulnerability » depuis les années 1970 et surtout les années 1990 [Brodiezdolino \(2016\)](#). Après les premiers exploits du terme dans la recherche sur la géographie et les risques naturels, la vulnérabilité est désormais un concept central dans toute une série d'autres contextes de recherche [Fussel \(2006\)](#) tels que l'écologie [Dulvy et al. \(2003\)](#), la santé publique [Martin \(2013\)](#), la pauvreté et le développement [Rabemalanto \(2018\)](#); [Morduch \(1994\)](#), la sécurité des moyens de subsistance et la famine [Bourguignon et al. \(2006\)](#); [Downing \(1991\)](#), la science de la capacité de durabilité, le changement des terres, et les impacts et l'adaptation au climat [Luers \(2005\)](#); [Bassett and Fogelman \(2013\)](#) et même le droit [Tanner and Mechanic \(2007\)](#).

Les incompatibilités de définition entre les différentes disciplines se font peu à peu sentir [Antonio et al. \(2019\)](#). Par exemple, son utilisation dans les sciences naturelles et appliquées a suscité de nombreuses critiques par les sociologues, que ce soit en Europe, dans certains pays en développement, en Amérique latine, ou encore en Asie [Cardona \(2003\)](#).

En général, la nouvelle approche suggérée des sociologues part du constat que la vulnérabilité a un caractère social et n'est pas limitée aux dommages physiques potentiels ou aux déterminants démographiques [Cardona \(2003\)](#). Sociologues et climatologues ont aussi une signification différente lorsqu'ils utilisent le terme : alors que les spécialistes des sciences sociales ont tendance à considérer la vulnérabilité comme représentant l'ensemble des facteurs socio-économiques qui déterminent la capacité des personnes à faire face au stress ou au changement, les climatologues considèrent souvent la vulnérabilité en termes de probabilité d'occurrence et d'impacts des événements météorologiques et climatiques [Brooks \(2003\)](#). Dans sa dimension sociale, le concept se concentre plus sur les systèmes et porte sur la capacité à faire face au stimulus que représente l'aléa. La vulnérabilité est définie par l'incapacité à faire face à un aléa ou encore désigne le niveau des dommages ou des pertes de toute nature que pourrait engendrer directement ou indirectement la survenance d'un aléa [Bertrand et al. \(2007\)](#). De ce voyage en science sociale en découle l'identification de trois composants liés au terme de vulnérabilité que sont l'exposition aux perturbations ou stress extérieur, la sensibilité à la perturbation et la capacité d'adaptation [Adger \(2006\)](#); [Shah et al. \(2013\)](#). Ces trois caractéristiques de la vulnérabilité ne sont pas nouvelles. Ils sont apparus dans la littérature sur les risques et la sécurité alimentaire entre la décennie 1990 et 2000 et ont été élargis et intégrés dans le discours de la communauté de recherche sur le changement environnemental mondial [Luers \(2005\)](#). Ce nouvel apport issu d'un point de vue systémique rend encore plus complexe le terme de vulnérabilité, en le liant aux termes de résilience et capacité d'adaptation [Delaître et al. \(2016\)](#) et qui ne peuvent être compris qu'en relation les uns avec les autres [Young et al. \(2006\)](#); [Smit and Wandel \(2006\)](#). D'une part, le concept de capacité d'adaptation fait référence au potentiel d'adaptation et intervient dans la réduction de la vulnérabilité d'un système [Luers](#)

(2005). En effet, la capacité d'adaptation est définie de manière générale, comme l'aptitude ou la capacité d'un système à modifier ou à changer ses caractéristiques ou son comportement afin de mieux faire face aux contraintes extérieures existantes ou prévues. L'adaptation permettra donc à un système de réduire le risque associé aux aléas en réduisant sa vulnérabilité sociale Brooks (2003). D'autre part, issu d'un point de vue holistique, très documenté dans le domaine socioécologique Abson et al. (2012) et très utilisé dans l'analyse des interactions entre l'homme et l'environnement Janssen et al. (2006), le concept de résilience a donné aussi d'autres perspectives à la notion de vulnérabilité. En effet, les deux mots ont été liés indirectement. Cette association s'est fondée sur le contraste entre la résilience, qui évoque des attributs positifs tels que la persistance, la résistance, l'adaptation, la flexibilité et l'élasticité, et la vulnérabilité, qui, au contraire, renvoie à des termes négatifs tels que la fragilité, la sensibilité, la faiblesse et la défaillance. Barroca et al. (2013a). Rousseau a souligné dans son analyse des deux notions que la résilience serait l'opposé de la vulnérabilité, car elle permet de réduire la probabilité de voir une situation se dégrader à la suite d'un choc. Plus un individu est résilient, plus sa capacité de résistance à la suite d'un choc exogène est grande et moins, il est vulnérable Rousseau (2007). Dans cette opposition, la résilience paraît être une approche à connotation positive tandis que la vulnérabilité serait négative Provitolo and Antipolis (2009). Ainsi, la vulnérabilité est un concept qui a été utilisé dans différentes traditions de recherche, mais il n'y a pas de consensus sur sa signification Demoraes (2009). Il a été appliqué exclusivement au sous-système sociétal, au sous-système écologique, naturel ou biophysique, ou au système économique et sociale couplé, également appelé système cible, unité exposée ou système de référence Gallop (2006). La vulnérabilité a été et est encore au cœur des interdépendances entre les chocs endogènes ou exogènes, voire les catastrophes, et les capacités de résilience des acteurs, des sociétés et des États. Il y a vulnérabilité quand il y a fragilité, faiblesse d'organismes ou d'organisations, de personnes, de sociétés ou de zones géographiques face à des événements aléatoires, anthropiques ou naturels, facteurs de risques probabilisables ou d'incertitudes Hugon (2015). En résumé, les définitions de la vulnérabilité et la pratique de l'évaluation de la vulnérabilité ont émergé de trois grandes lignées intellectuelles Safi et al. (2012) :

- (a) les études qui s'inspirent fortement des approches du risque/danger ou de la biophysique,
- (b) l'application de cadres politico-écologiques et/ou politico-économiques,
- (c) les recherches récentes sur la vulnérabilité inspirées du concept de résilience en écologie.

L'emprunt de la notion de vulnérabilité à travers ces différents domaines scientifiques a transformé la notion fondamentale de la vulnérabilité qui a été désignée dans la littérature comme « l'approche du soldat blessé » à divers autres concepts et approches Cassel-gintz (2007) : la vulnérabilité a été perçue au départ comme un "état du système avant que le danger n'agisse", le "point de départ" de l'analyse où la notion met l'accent sur les composantes du système social. Finalement, elle est perçue comme un stimulus externe grâce à son voyage vers la cindynique sur laquelle elle trouve d'autres considérations et descriptions en tant que probabilité d'occurrence et d'impact de l'aléa. Ainsi, le concept est considéré comme la "probabilité et le résultat de l'aléa" ou le "point final" de l'analyse Cuevas (2010). Cela prouve l'hypothèse que le concept de vulnérabilité est en constante évolution Giupponi and Biscaro (2015). La notion de temps qui s'est immiscée conceptuellement et historiquement dans la notion de la vulnérabilité lui a conféré un caractère aujourd'hui incertain et probabiliste. Le contexte temporel de la vulnérabilité est de ce fait crucial, mais cette dimension reste l'un des aspects les moins étudiés de la vulnérabilité Cutter (1996).

1.2.2 Les différents concepts et approches de la vulnérabilité

À l'écoute, la vulnérabilité est un terme familier et facile à saisir. Au niveau de son interprétation et définition, sa compréhension devient difficile. Elle peut caractériser tantôt le matériel (dégâts) et tantôt l'immatériel (vécu des populations) [Barroca et al. \(2005\)](#). La vulnérabilité par son usage pluridisciplinaire est devenue un terme polysémique, avec une diversité de sens et de définitions [Claeys et al. \(2017\)](#). Les chercheurs tentent de l'appliquer dans leurs domaines selon leur besoin sans adopter de définitions communes. C'est pour cela que le terme de vulnérabilité est utilisé de manière très différente par des chercheurs dans des domaines distincts, et même au sein d'un même domaine [Antonio et al. \(2019\)](#). Dans le seul domaine de la sociologie par exemple, on recense plus d'une vingtaine de définitions différentes de la vulnérabilité, avec six écoles théoriques, une vingtaine de manuels et plusieurs guides concernant son évaluation, sans pour autant trouver de définitions unanimes [Becerra \(2012\)](#). L'ensemble des définitions proposées dans la littérature se sépare en différents domaines, difficilement compatibles [Veyret \(2006\)](#). D'un côté les sciences dures qui cherchent à trouver des réponses uniques et palpables dans ses résultats de recherches et de l'autre, les sciences sociales qui offrent plutôt des multiples réflexions, d'où les besoins de monter des écoles de pensées. La pluralité de définition de la vulnérabilité a soulevé de nombreux débats qui s'avèrent plutôt bénéfique. En effet, cette diversité a largement enrichi les approches et conceptualisations du terme, permettant de dégager quelques consensus [Rufat \(2008\)](#). Selon [Tapsell et al. \(2010\)](#), la vulnérabilité peut se présenter sous plusieurs facettes : physique, systématique, culturelle, sociale, organisationnelle, institutionnelle, économique, ou encore territoriale. La vulnérabilité est alors considérée selon un concept (physique, biophysique, social, analytique, systémique, etc.) qui a surtout permis de mettre à jour plusieurs dimensions : exposition aux aléas, degré de résistance, capacité d'adaptation, fragilité du système, incapacité à faire face à la crise et dysfonctionnement des infrastructures [Rufat \(2008\)](#). L'analyse bibliographique des nombreuses définitions de la vulnérabilité soulève une vision binaire du terme. La vulnérabilité a une connotation négative et présuppose donc une notion de « mauvais » et de « bon », ou au moins de « pire » et de « meilleur » [Ionescu et al. \(2008\)](#) : dans sa conceptualisation par exemple, la tendance présente souvent le couple physique/social, son facteur extérieur/intérieur, pour des risques endogènes/exogènes, son analyse starting point/ending point, analytique/système, etc. Pour réduire le foisonnement des nombreuses définitions existantes, beaucoup d'ouvrages proposent de réunir les différentes définitions de la vulnérabilité en deux grandes lignes que sont la vulnérabilité physique et la vulnérabilité sociale [Lee \(2014\)](#), d'autres en trois en ajoutant aux deux précédents la vulnérabilité spatiale [Cutter \(1996\)](#). Certains remplacent ce dernier terme par la résilience [Provitolo and Antipolis \(2009\)](#). Afin d'apporter plus de clarté à la notion de vulnérabilité et faciliter l'approche générale du concept, nous nous alignons à cette tendance en proposant de regrouper les différents concepts liés au terme de vulnérabilité en quatre grandes lignes [Leone and Vinet \(2006\)](#); [Provitolo \(2019\)](#); [Berrouet et al. \(2018\)](#) :

- dans sa dimension technique, la vulnérabilité prise en tant que mesure de l'endommagement : la vulnérabilité physique,
- dans sa dimension sociale, la vulnérabilité équivalant à la propension à l'endommagement : la vulnérabilité sociale,
- dans une vision duale : la combinaison de ces deux préceptes conduisant à une autre conception de la vulnérabilité : la vulnérabilité territoriale,

- dans une dimension plus globale, une approche récente de la vulnérabilité issue, du point de vue holistique : la résilience écologique (figure 1.2).

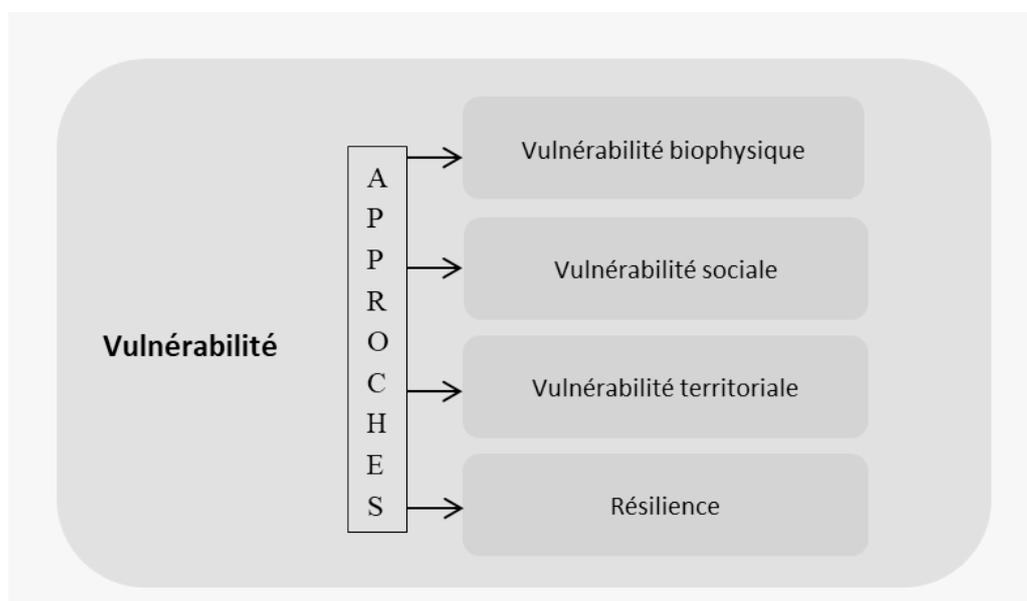


FIGURE 1.2 – Schéma de synthèse des différentes typologies de vulnérabilité. Source : Réalisation propre

Vulnérabilité physique ou biophysique L'approche de la vulnérabilité par sa dimension physique est l'approche la plus ancienne de la vulnérabilité assimilée à l'« approche du risque » dans la littérature scientifique générale [Naylor et al. \(2020\)](#). Les analyses liées aux risques et catastrophes se sont concentrées sur l'identification des éléments à risque (des bâtiments, des réseaux, des infrastructures, des populations, appelés « enjeux ») et de leurs dommages ou pertes potentiels. L'apport de la vulnérabilité dans l'analyse des risques a été de qualifier l'incapacité d'un processus à survivre à un danger particulier [Hizbaron et al. \(2018\)](#). La vulnérabilité est définie comme le degré de risque d'occurrence de la rupture, qui peut par exemple être évalué en termes de probabilité ou de difficulté de réalisation [Marignac and Legrand \(2003\)](#). Ainsi, la vulnérabilité physique se traduit par l'évaluation quantitative, voire monétaire, des dommages ou des impacts [Barroca et al. \(2005\)](#). En effet, la vulnérabilité physique se détermine par la nature de l'aléa, sa probabilité, l'importance de l'exposition des enjeux et la sensibilité physique des enjeux. Cette vulnérabilité résume l'impact net du problème, et peut-être représentée quantitativement comme un coût monétaire ou comme un changement de rendement ou de flux (par exemple la mortalité humaine, les dommages aux écosystèmes...) ou qualitativement comme une description du changement relatif ou comparatif [O'Brien et al. \(2004\)](#). La vulnérabilité physique équivaut à analyser la vulnérabilité par une mesure de l'endommagement liée par des idées d'exposition, ou de capacité de résistance physique (figure 1.3).

Dans cette vulnérabilité physique, aussi appelé biophysique (destinée à intégrer les objets non inertes : infrastructures, etc.), l'étude porte sur les caractéristiques des événements et des contextes physiques qui influencent la probabilité de pertes et la capacité des individus ou des communautés à se rétablir [Schmidtlein et al. \(2008\)](#). Elle dépend essentiellement de trois facteurs (figure 1.3) : l'exposition, la résistance et la sensibilité. L'exposition est définie

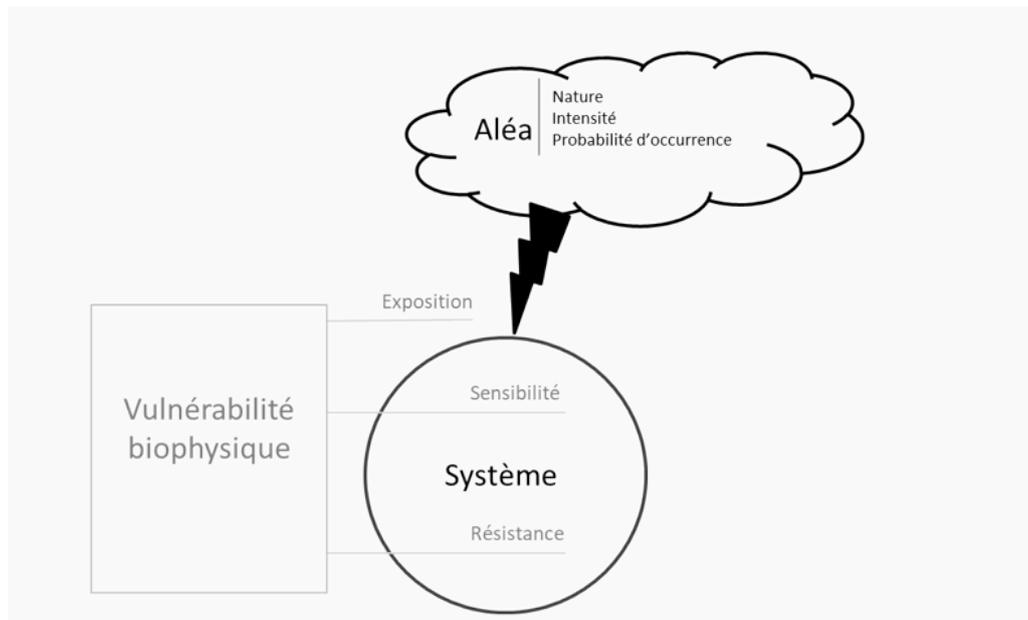


FIGURE 1.3 – Schéma de synthèse de la vulnérabilité biophysique. Source : Réalisation propre

par la proximité entre l'aléa et les enjeux qui permettent de tenir compte de l'effet de cette proximité dans les mécanismes d'endommagement [Provitolo \(2019\)](#) tandis que la résistance est la possibilité d'un système d'absorber ou contrecarrer les effets d'une perturbation sans subir de dégâts : résistance physique d'infrastructures pour une protection de digues contre les inondations par exemple [Dauphiné and Provitolo \(2013\)](#). De cette résistance découle la sensibilité, qui est le degré d'endommagement que les enjeux peuvent subir [Devalière \(2014\)](#), [Adger \(2006\)](#) face au risque. Le risque est défini comme une probabilité de pertes ou de dommages pour un élément donné (l'enjeu) soumis à un événement naturel (l'aléa). Pour le calculer, il est défini comme une espérance mathématique des dommages. On obtient la relation : $\text{Risque} = \text{Probabilité} \times \text{Vulnérabilité}$. Pour calculer cette espérance de dommages (le risque), on cherche à définir les impacts de l'aléa sur les enjeux et donc à déterminer pour chaque élément menacé le degré de pertes qu'il est susceptible de subir. Ce degré de pertes ou d'endommagement qui est la sensibilité de l'enjeu face au risque représente la vulnérabilité. Cette vulnérabilité dépend uniquement de l'impact physique de l'aléa et de la valeur des enjeux concernés. Elle est évaluée à partir des matrices de dommages, des fonctions de pertes, des indices de vulnérabilité, qui vont corrélés un degré de pertes à une intensité donnée du phénomène physique [Reghezza \(2006\)](#).

L'exposition est définie comme la proximité entre un aléa et des enjeux, permettant ainsi de tenir compte du rôle joué par la proximité dans les mécanismes d'endommagements [Dauphiné and Provitolo \(2013\)](#). Elle insiste sur la distribution spatiale des enjeux. En plus de la nature et de l'intensité de l'aléa, son extension spatiale dont dépend l'exposition des enjeux est aussi prise en compte, tout en assurant de mesurer la durée de cette exposition et sa variabilité dans le temps. Le risque, qui est fonction de l'aléa et de la vulnérabilité, est présenté à travers une cartographie qui est formée par le croisement de la cartographie des aléas et de la cartographie de la vulnérabilité [Pigeon \(1995\)](#). Autrement dit, l'évaluation du risque sera donnée par la superposition de la carte de l'aléa et de la vulnérabilité, interprétée par la relation :

$$\text{Risque} = \text{aléa} \cup \text{vulnérabilité}$$

où la vulnérabilité exprime ici la valeur des enjeux qui permettra de produire ainsi une estimation quantitative du potentiel d'endommagement, exprimé parfois sous forme d'indice d'exposition, estimation fondée sur le nombre de personnes ou la valeur des biens exposés dans la zone d'extension spatiale de l'aléa [Reghezza \(2006\)](#).

Enfin, la résistance est définie par la capacité d'un système d'absorber ou repousser les effets d'une perturbation sans subir de dégâts [Provitolo \(2019\)](#). Une approche par la résistance ne considère que les enjeux matériels. Liée étroitement à la notion de fragilité, cette mesure porte essentiellement sur la qualité des matériaux, sur la conception ou encore la construction [Reghezza \(2006\)](#). La vulnérabilité est ainsi un caractère physique propre à l'enjeu, un facteur interne du risque.

Dans cette approche traditionnelle, la vulnérabilité est une composante du risque qui renvoie à la propension de l'enjeu à subir un endommagement et formant une paire avec l'aléa, qui désigne le processus physique source de danger [Renard and Soto \(2015\)](#). Cette approche se focalise dans la prédiction des impacts physiques de l'aléa sur le système homme/environnement [Safi et al. \(2012\)](#).

Vulnérabilité sociale Le concept de vulnérabilité sociale a été introduit dans la gestion des catastrophes lorsque les chercheurs ont reconnu que la vulnérabilité implique également des facteurs socio-économiques qui affectent la résilience des communautés [Flanagan et al. \(2011\)](#). La vulnérabilité sociale a été négligée au départ car elle est difficile à évaluer [Nasution et al. \(2020\)](#). En effet, la vulnérabilité sociale est souvent cachée, complexe et imbriquée dans divers aspects et contingences humains liés à différents niveaux de la société [Fekete \(2009\)](#). La vulnérabilité sociale se concentre plus sur les systèmes et non sur les enjeux pris individuellement. Les éléments liés à la vulnérabilité sociale sont relativement plus complexes que les éléments liés à la vulnérabilité biophysique [Schmidtlein et al. \(2008\)](#). La vulnérabilité sociale porte sur la capacité à faire face au stimulus que représente l'aléa. Elle est définie comme l'exposition de groupes ou d'individus à des stress résultant à la fois de risques exogènes en sus de leur situation sociale et économique [Adger \(1996\)](#). Elle est fonction de :

- la capacité à anticiper l'occurrence de l'aléa : la capacité à prévoir les actions à entreprendre pour s'en protéger, la capacité à être alerté à l'avance ;
- la capacité à s'adapter à l'existence de cet aléa. Cela inclut la recherche de mesures de réduction de l'aléa ou de protection pour minimiser l'exposition et l'impact ;
- la capacité à se préparer à la survenue de l'aléa : la préparation de la société à faire face à l'urgence en ayant à disposition des plans de gestion de crise, des exercices de simulation ;
- la capacité de réaction : le comportement de la société pendant la crise, à savoir la gestion d'urgence/capacité d'adaptation/réactivité, gestion de panique ;
- la capacité à anticiper les conséquences de l'aléa : capacité à effectuer la reconstruction dans les meilleurs délais [Reghezza \(2006\)](#).

La vulnérabilité sociale permet d'agir en l'absence de certitudes sur l'aléa et l'exposition à travers la capacité à anticiper l'aléa et les conséquences et intègre les temporalités du risque [Barroca et al. \(2005\)](#). Dans la vulnérabilité sociale, le point de départ de l'analyse n'est pas porté sur l'aléa (un évènement extérieur) car la vulnérabilité représente plutôt une incapacité actuelle à faire face ou encore une vulnérabilité intérieure de l'enjeu à l'aléa ou le choc extérieur [O'Brien](#)

et al. (2004). Les sciences sociales ont exprimé une approche assez différente de la vulnérabilité en mettant en évidence les facteurs sous-jacents qui expliquent comment une personne devient vulnérable. L'approche ne se limite pas à l'identification de l'impact, mais s'étend aux divers attributs sociaux, économiques et politiques de l'objet d'étude qui influencent son incapacité à survivre à une menace particulière Hizbaron et al. (2018). La vulnérabilité sociale est centrée sur la dimension humaine, et dépend ainsi des déterminants variés, tels que les niveaux de ressources et d'accessibilité aux crédits et à l'information, les facteurs culturels et institutionnels, ou encore les facteurs techniques et organisationnels Dauphiné and Provitolo (2013). La figure 1.4 résume les définitions de la vulnérabilité sociale.

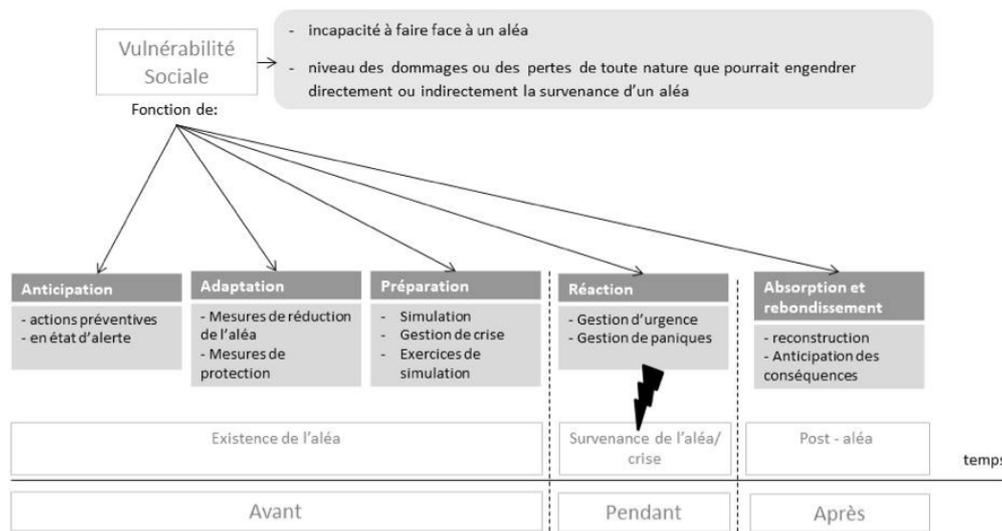


FIGURE 1.4 – Schéma de synthèse de la vulnérabilité sociale. Source : Réalisation propre

En résumé, l'analyse de vulnérabilité sociale tient aussi compte de l'utilisation humaine des ressources et de l'accès à celles-ci Neiladger (2000).

Vulnérabilité territoriale Susan Cutter a souligné le caractère complémentaire de la vulnérabilité biophysique et de la vulnérabilité sociale et a proposé de les regrouper dans la vulnérabilité spatiale, car la prise en compte de ces deux ensembles est selon elle indispensable pour mener une analyse territorialisée de la vulnérabilité Rufat (2008). En effet, le système territorial est l'élément commun à ces deux différentes vulnérabilités Soto et al. (2014). La vulnérabilité territoriale est à la fois un risque biophysique et une réponse sociale appliquée dans un espace. Cet espace peut désigner un espace géographique, où se trouvent les personnes et les lieux vulnérables, ou un espace social, où se trouvent les personnes les plus vulnérables Cutter (1996). La vulnérabilité territoriale peut être :

- Une vulnérabilité locale, définie à partir des vulnérabilités biophysiques et sociales du lieu,
- Une vulnérabilité territoriale définie à partir des espaces susceptibles de subir des dommages importants mais aussi les lieux à partir desquels pourront se propager les perturbations au sein d'un territoire, ou encore les lieux stratégiques qui empêcheront cette propagation.

La vulnérabilité territoriale est davantage liée aux enjeux tandis que la vulnérabilité locale est liée à l'occurrence de l'aléa [Dauphiné and Provitolo \(2013\)](#).

L'approche territoriale de la vulnérabilité permet surtout d'adopter une démarche qui ne se focalise pas sur le risque c'est-à-dire qui gère le risque sur un territoire. Elle permet plutôt de gérer le territoire en prenant en compte l'existence d'un ou de plusieurs risques [Provitolo \(2019\)](#). L'étude du territoire amène à considérer une démarche systémique de la vulnérabilité en faisant du territoire l'objet de la recherche. Le territoire est alors considéré comme un système. L'approche systémique de la vulnérabilité prend en compte la double dimension de la vulnérabilité qui est à la fois endogène et exogène. La première dimension en tant qu'état de fragilité, et la deuxième en fonction de sa capacité à connaître une perturbation, l'absorber, s'y adapter et retrouver un fonctionnement satisfaisant. Cette dernière ouvre la voie à la résilience (se référant à la capacité d'adaptation) [Dauphiné and Provitolo \(2013\)](#).

Résilience De son origine étymologique, le terme de résilience vient du latin *resalire*. *Salire*, signifiant sauter et associé au préfixe *re* exprime le fait de sauter en arrière. Dans cette action de sauter en arrière, deux raisons peuvent justifier ce geste : soit que le sujet fait un saut en arrière pour un besoin de recul ou pour éviter un obstacle/danger auquel il fait face, soit il le fait pour prendre un élan afin de mieux rebondir [Provitolo \(2019\)](#). Dans la première initiative, le sens du mot résilience se réfère au verbe résilier qui suggère le retour d'un sujet à son état initial. Cette définition se rattache à la traduction française du terme par résistance. Dans la seconde, la résilience se réfère au participe présent du mot latin, *resiliens*, et donne à son sens le caractère de rebondissement, d'une réaction, d'une réponse au choc pour trouver un état d'équilibre différent de son état initial, se rattachant à la traduction anglaise par «*resiliency*» [Chevillot-Miot \(2017\)](#). Il faut noter une différence nette d'interprétation selon la culture : dans la littérature francophone, le terme équivaut à la capacité de résistance tandis qu'elle signifie la capacité à rebondir dans la littérature anglo-saxonne [Chevillot-Miot \(2020\)](#). Dans son usage, la résilience est un concept qui a pris naissance en physique. Plus précisément, c'est en sciences des matériaux où elle signifie la capacité des matériaux à résister ou la capacité d'élasticité (absorber et revenir à son état antérieur) face à un choc extérieur [Woloszyn \(2018\)](#) que la notion a été utilisée de prime abord. Petit à petit, nombreuses disciplines ont adopté la résilience, comme en sciences sociales, sciences de la terre, etc. De sa transposition en écologie par exemple, la résilience a été définie par Holling comme «*la persistance des relations au sein d'un système et constitue une mesure de la capacité de ces systèmes à absorber les changements des variables d'état, des variables motrices et des paramètres, et à persister encore*» [Holling \(1973\)](#). Les modifications de sa perception ont mis en exergue sa transdisciplinarité et ont diversifié le terme en le rendant polysémique. Les différentes définitions apportées à la résilience dans les différents domaines qui l'utilisent ont permis finalement le dialogue entre des disciplines ayant été souvent divisées ou séparées du fait de la divergence de leur objectif d'études et résultats. De ce fait, la résilience est devenue un lien entre la science physique et la science sociale, un intégrateur qui permet de faire une gestion de risque avec cette double dimension à la fois physique et humaine [Dauphiné and Provitolo \(2007\)](#); [Toubin et al. \(2012\)](#). La figure 1.5 illustre très bien cette imbrication qui fait de la résilience un terme pluridisciplinaire et polysémique [Djament-tran et al. \(2011\)](#).

Pour certains, la résilience se traduit par un état, pour d'autres elle est un processus a posteriori : qui se met en œuvre après un choc [Villar and David \(2014\)](#). Cela rappelle l'interprétation de la racine du mot qui renferme instinctivement une vision binaire. Pour résoudre



FIGURE 1.5 – Transdisciplinarité du terme de résilience. Source : [Lhomme \(2012\)](#)

ce problème de différence entre les deux visions de la résilience, les systèmes socio-écologiques complexes tentent de réconcilier ces deux dimensions physique et sociale par le développement des approches systémiques de la résilience [Woloszyn and Quenault \(2013\)](#). Une acception générale réunit alors cette double vision en avançant que la résilience est liée étroitement à la notion de système et donc, s'applique à tout système : économique, écologique, humain, couplé [Toubin et al. \(2012\)](#). C'est la rencontre entre un système (que ce soit physique, territorial, socio-économique, écosystème, humain) et un choc qui produit la résilience. Ainsi, la résilience fait l'étude de systèmes et pour appliquer l'étude de résilience à un territoire par exemple, il faut considérer le territoire comme un système [Lhomme \(2012\)](#). C'est l'approche systémique de la résilience, une approche qui tient en compte des liaisons et des interactions des différents éléments composants du système étudié, et qui prend en main leur caractère complexe et dynamique [Provitolo \(2007\)](#). La résilience attire alors de plus en plus l'objet d'étude des chercheurs. Barocca a démontré par exemple une forte utilisation du terme de résilience dans les bases de données liées aux sciences de la géographie et de l'aménagement du territoire aux environs de 2005, dans une même époque où il a aussi observé une forte utilisation du terme de vulnérabilité [Barroca et al. \(2013a\)](#). Le monde scientifique a reconnu que l'intérêt pour la vulnérabilité et la résilience révèle des changements en profondeur sur la perception de notre environnement, de la place de l'homme et du rôle des facteurs anthropocentriques dans la survenance des catastrophes naturelles [Sanseverino-Godfrin \(2009\)](#). La portée des études liées à la vulnérabilité sur des enjeux et à leur propriété de résilience revient à admettre implicitement que l'aléa se réalisera quelles que soient les mesures de prévention mises en œuvre. Ce qui marque la fin d'une approche cartésienne, techno centriste en tant que « *Maître et possesseur de la Nature* » ayant pour objectif la maîtrise des phénomènes naturels [Barroca et al. \(2013a\)](#). De plus, l'approche analytique portée par la vulnérabilité ne donne plus une réponse globale dans la compréhension de la catastrophe et dans la diffusion des risques. La résilience qui est associée à l'approche systémique s'est imposé naturellement [Barroca et al. \(2013a\)](#). La question de la vulnérabilité des territoires exposée aux risques naturels et leur capacité à faire face à la perturbation et par conséquent de leur développement durable se trouve ainsi au centre des problématiques de management des risques naturels. Dans ce contexte, la durabilité ou encore soutenabilité sont devenues la finalité des recherches liées aux systèmes socio-écologiques, et la solution pour y parvenir seraient la réduction de la vulnérabilité et l'augmentation des capacités de résilience

Sanseverino-Godfrin (2009).

1.3 Énergie : de la quantité au système

L'énergie est un terme polysémique qui peut avoir plusieurs définitions. Pour le physicien, elle représente une grandeur physique qui peut se transformer par du travail ou de la chaleur que possède un système ou un corps. Dans le monde scientifique, l'énergie est celle qui régit les lois des phénomènes physiques, réactions chimiques, processus biologiques qui déterminent et gouvernent notre monde (objets et êtres vivants). L'énergie peut se présenter sous différentes formes, par exemple : énergie mécanique, chimique, nucléaire, chaleur. Sa conversion peut être nécessaire lors de son utilisation : comme pour utiliser la chaleur, on peut le convertir en travail. C'est l'énergie qui est récupérée lors des transformations qui est utile à l'homme pour subvenir à ses besoins. C'est souvent l'énergie récupérée qui intéresse l'homme plus que l'énergie contenue dans le corps. L'énergie est la condition nécessaire au bien-être de l'homme, car c'est un élément clé qui contribue à sa survie et ses besoins fondamentaux (nourriture, chauffage, transport...,) Ngô (2008). Ainsi, le terme "énergie" est tout aussi complexe, multidisciplinaire et peut prendre plusieurs aspects tels que l'aspect scientifique, économique, politique, fiscal ou encore environnemental. Dans les sciences sociales, l'énergie correspond à l'ensemble des sources et des formes utilisables massivement par les sociétés humaines, que ce soit pour la production de la chaleur ou pour faire actionner les machines. Elle peut être perçue comme un bien marchand, un besoin social et / ou une ressource écologique. Dans ce cas, trois domaines majeurs sont identifiés autour de l'énergie Fléty (2014) :

- le domaine économique qui se fonde sur la compétitivité et le développement des activités grâce à l'énergie et qui dépendent directement de la disponibilité et du prix de l'énergie,
- le domaine politique qui vise à assurer l'accès aux ressources énergétiques
- le domaine technologique qui vise à produire de l'énergie efficiente
- et enfin, le domaine écologique qui évalue les impacts sur l'environnement de l'usage et la production de l'énergie

Ensemble, ces domaines font partie intégrante du système énergétique. Le système énergétique est défini comme l'ensemble des techniques et des technologies qui réalisent les transformations permettant de passer des énergies primaires telles qu'on les trouve dans la nature aux formes d'énergies utiles, qui satisferont les besoins de l'homme, en passant par le transport (sur des distances qui peuvent être plus ou moins longues) et la distribution de formes d'énergie souvent intermédiaires en tenant compte des pertes liées ces différentes instances source vers une mise en observation...). À l'échelle du territoire, l'énergie est plutôt prise dans cette dimension où on prend en compte la production, le transport, la distribution, le pilotage et gestion dans l'objectif de satisfaire le besoin énergétique du territoire, de l'ensemble de sa population. Le système ainsi formé est résumé par la figure 1.6

Ce bref descriptif permet d'illustrer la complexité qu'on peut rencontrer aussi avec le terme énergie et qui devrait être pris en compte avant d'aborder la vulnérabilité énergétique.

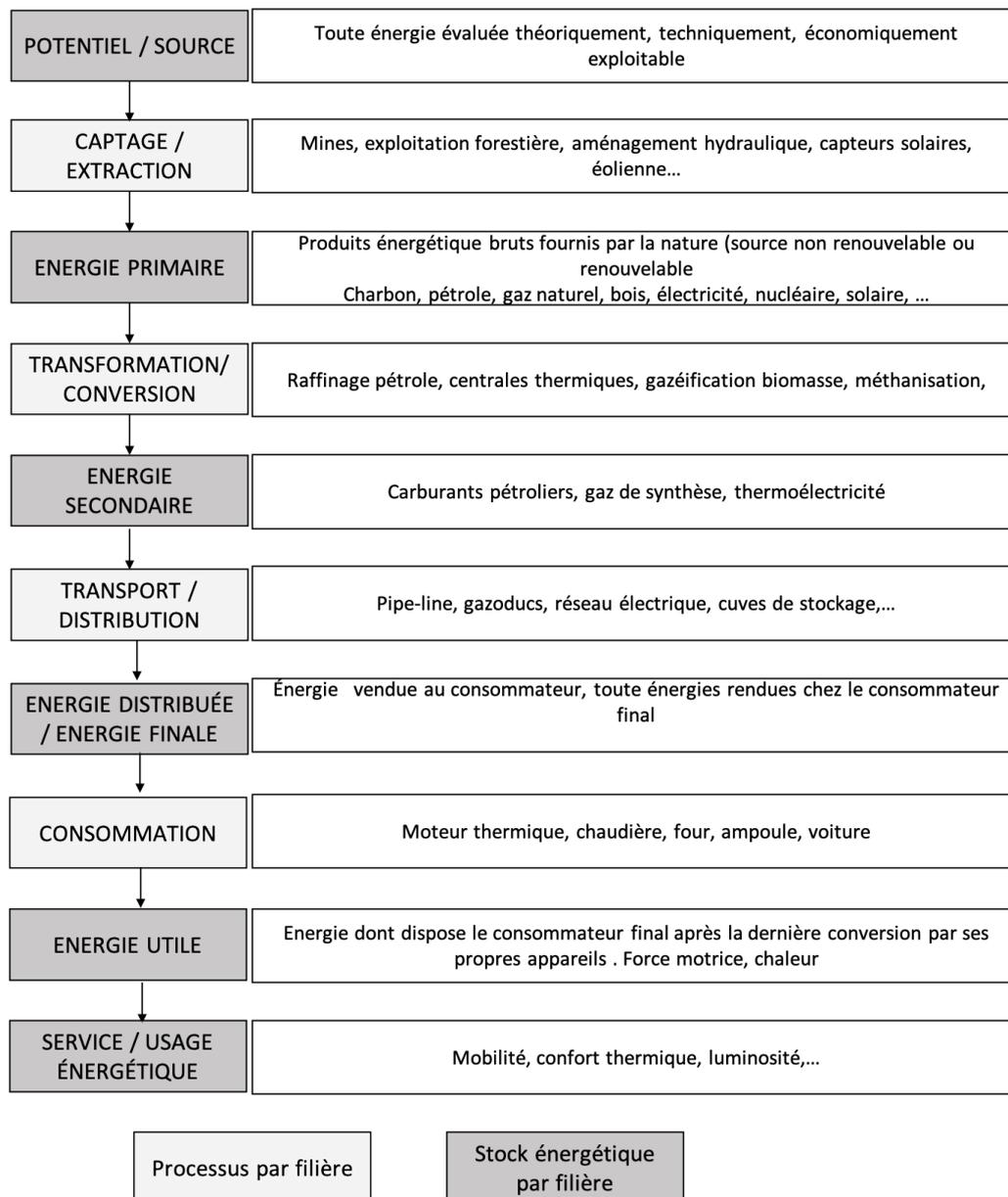


FIGURE 1.6 – Présentation de la chaîne énergétique d’un territoire. Source : Fléty (2014)

1.4 Vulnérabilité énergétique

Essai de définition Comme nous l’avons déjà vu précédemment dans la définition de la vulnérabilité, elle exprime un état de fragilité face à un danger. En analyse des risques par exemple, la vulnérabilité exprime et mesure le niveau de conséquences prévisibles de l’aléa/-d’un danger sur les enjeux afin de mener des actions qui peuvent la réduire Barroca et al. (2006). L’objectif dans l’étude de la vulnérabilité reste toujours le même : réduire et éliminer toute forme de faiblesse, de fragilité, etc. En ce qui concerne l’énergie, les enjeux mondiaux concernant la limitation (et l’épuisement) des réserves d’énergie fossile, la demande croissante d’énergie, l’accessibilité et la capacité d’achat de ressources énergétiques alternatives, l’acceptabilité environnementale de la production et de la consommation d’énergie, l’efficacité éner-

gétique et bien d'autres sont devenus des questions majeures de vulnérabilité pour lesquelles les chercheurs, les scientifiques, les entités politiques et les États, la Communauté Internationale tentent de trouver des solutions durables [Martchamadol and Kumar \(2012b\)](#). En effet, les politiques énergétiques sont de plus en plus consacrées à une finalité « durable » ; la durabilité figure en tête de l'agenda des gouvernements locaux et des institutions internationales. En partie, grâce à la publication du rapport de Brundtland en 1987 qui a incité les organisations internationales et nationales à élaborer des indicateurs de développement durable, renforcé par l'adoption d'Action 21 au Sommet de la Terre de 1992 qui a demandé spécifiquement aux pays, et aux organisations internationales gouvernementales ou non de définir la notion d'indicateurs de développement durable à tous les niveaux : national, régional et mondial [AIEA \(2008\)](#). Les stratégies énergétiques sont par conséquent confrontées à de nouvelles préoccupations, comme la pauvreté énergétique, la sécurité énergétique, l'équité dans l'accès à l'énergie, qui renvoient à des notions interconnectées de résilience et de vulnérabilité énergétique [Kiryama and Kajikawa \(2014\)](#). Parmi les orientations récentes de la politique communautaire européenne par exemple, la sécurité d'approvisionnement est présentée comme une condition nécessaire pour réduire la vulnérabilité énergétique des pays de l'Union européenne [Artigues \(2008\)](#). Toutefois, cela représente juste une dimension de la vulnérabilité énergétique et ne permet pas d'appréhender toute la complexité de la notion en entier. La vulnérabilité énergétique qui peut être vue comme la vulnérabilité liée au système énergétique a hérité des caractères polysémiques et multidimensionnels de la vulnérabilité et n'a pas jusqu'ici trouvé une définition commune [Gatto and Busato \(2019\)](#). La vulnérabilité énergétique est définie comme la mesure dans laquelle un système énergétique est dans une incapacité à faire face ou est susceptible d'être exposé à certains événements ou encore des changements indésirables/défavorables et risque ainsi de tomber dans des pièges en termes économiques, sociaux, environnementaux et institutionnels [Gatto and Busato \(2019\)](#), [Murias et al. \(2020\)](#). D'autres la définissent comme « *la mesure dans laquelle des événements exogènes négatifs concernant le système d'approvisionnement énergétique d'un pays peuvent nuire au bien-être de la population du pays et/ou à l'intégrité de l'État, de son territoire ou de ses institutions* » [Christie \(2009\)](#). Ces définitions sous-tendent une vulnérabilité énergétique, conçue comme l'exposition d'un système énergétique à des événements et des changements défavorables. Une vulnérabilité biophysique, mais qui recoupe souvent d'autres concepts de politique énergétique tels que la résilience, la sécurité, la pauvreté, la justice et la durabilité, comme le précise [Gatto and Busato \(2019\)](#). Le terme touche ainsi plusieurs dimensions, ce qui rend son concept difficile à saisir. L'usage commun, et qui reste encore la plus prépondérante dans la littérature, est d'étudier la vulnérabilité énergétique à travers ses diverses dimensions englobant une idée générale de sécurité d'approvisionnement énergétique [d'Artigues \(2012\)](#). Ainsi, les études de la vulnérabilité énergétique portent davantage sur la dépendance énergétique, la sécurité énergétique, ou encore la précarité/pauvreté énergétique que nous allons détailler ci-après.

La dépendance énergétique La dépendance énergétique est un facteur prépondérant de sécurité énergétique tant pour les économies développées que pour les économies en développement, depuis les périodes de crise pétrolière des années 1970. Selon l'Administration américaine de l'information sur l'énergie, sur les 60 plus grands pays consommateurs d'énergie, 36 étaient dépendants des importations nettes d'énergie en 2014 [Berk and Volkan \(2018\)](#). Ainsi, dans la littérature, la vulnérabilité énergétique est parfois associée, de manière restrictive, à la notion de dépendance énergétique. Une tendance qui se réfère plus à une dimension économique. En

économie, il est défini que la vulnérabilité est le risque d'être affecté par des chocs extérieurs et naturels, des événements imprévus et incontrôlables qui seraient une menace de tomber ou retomber dans une situation de pauvreté et entraver un développement [Lallau \(2011\)](#), [Goavec and Hoarau \(2015\)](#); la transposition de cette vulnérabilité économique à l'énergie par la dépendance énergétique fait référence à une situation dans laquelle donc l'approvisionnement énergétique du pays est dominée par les produits d'importations [Artigues \(2008\)](#) qui est sujet à la fluctuation des prix, aux problèmes d'approvisionnements et de transports. Le travail mené par Serge Rey [Rey \(2010\)](#) en illustre une démarche de cette méthode de rallier la dépendance énergétique à la vulnérabilité. La vulnérabilité énergétique est définie par la dépendance de l'économie d'un pays au prix des matières premières. L'auteur tend vers une grande tendance de littérature se basant sur l'impact de chocs externes sur l'économie. Le cadre d'étude s'est basé sur une comparaison à l'aide de ratios de vulnérabilité et d'un modèle multivarié de type régressif des Pays du Sud et de l'est Méditerranéens PSEM à des chocs de prix des matières premières. Cependant, définir la vulnérabilité par la dépendance énergétique omet les autres facteurs de vulnérabilité énergétiques (autres que ceux liés à l'économie). En effet, à part les risques économiques liés au marché (d'effets macro-économiques dus à l'imprévisibilité des fluctuations des prix sur les marchés, etc.) et à l'approvisionnement (pénurie, perturbations physiques ou techniques dans l'approvisionnement, etc.), il existe d'autres principaux risques qui contribuent à la vulnérabilité énergétique : des risques environnementaux (liés aux changements climatiques, le réchauffement de la planète, les accidents et les émissions polluantes dues à l'accroissement des consommations énergétiques) et aussi, les risques sociaux (condition de vie, confort, stabilité, etc ...) référence. Sovacool a ainsi fait la remarque que les études qui reposent sur des définitions incomplètes ou incohérentes, centrées sur des aspects seulement techniques et économiques sont incomplètes. Des études qui se concentrent seulement sur la sécurité de l'approvisionnement en combustibles fossiles ou sur les prix pour l'utilisateur final et ne comportent pas des éléments sociaux et politiques tels que l'intendance ou la bonne gouvernance sont incomplètes et incohérentes à une sécurité énergétique [Sovacool et al. \(2011\)](#). La dépendance énergétique est une condition nécessaire, mais pas suffisante pour appréhender la complexité du concept de vulnérabilité [Artigues \(2008\)](#). Ainsi, la dépendance à l'égard des importations d'énergie représente une dimension importante de la vulnérabilité énergétique, mais ne peut la représenter à elle seule [Berk and Volkan \(2018\)](#).

La précarité ou pauvreté énergétique La précarité ou encore pauvreté énergétique est l'un des problèmes socio-économiques cruciaux du monde moderne, avec des effets importants sur les groupes vulnérables de la population. Le fléau que représente la pauvreté énergétique condamne des milliards de personnes dans les pays en développement à vivre dans la pauvreté absolue : 1,2 milliard de personnes (soit 16 % de la population mondiale) n'ont pas accès à l'électricité et plus de 2,7 milliards de personnes (38 % de la population mondiale) n'ont pas accès à des installations de cuisson propres [Papada and Kaliampakos \(2019\)](#). À l'échelle du ménage, on estime que plus de 2 milliards de ménages dans le monde sont incapables d'assurer un degré de services énergétiques domestiques (chauffage, refroidissement, cuisine) qui leur permettrait de participer pleinement aux coutumes et activités qui définissent l'appartenance à la société [Bouzarovski and Thomson \(2017\)](#). Le concept de précarité énergétique a été introduit par Isherwood et Hancock en 1979 à la suite de l'inflation des prix de l'énergie due à la crise pétrolière (1973-1974). Sa définition a été donnée pour la première fois par le Dr Brenda Boardman en 1991 selon que « la précarité énergétique apparaît lorsque les ménages ne peuvent

pas disposer de services énergétiques adéquats pour 10 % de leur revenu » [Castaño-rosa et al. \(2019\)](#). Le terme de précarité énergétique est plutôt utilisé dans le cercle Européen, c'est une directive de l'Union Européenne [Guyet \(2014\)](#). La Commission européenne a abordé le concept pour la première fois en 2009, avec la publication des directives 2009/72/CE et 2009/73/CE, qui ont chargé les États membres d'élaborer des plans d'action nationaux ou d'autres cadres appropriés pour lutter contre la pauvreté énergétique [Gouveia et al. \(2019\)](#). Dans cette perception de la vulnérabilité énergétique, la notion est ramenée à une échelle plus petite, qui est celle des ménages [Devalière \(2010\)](#) à partir du concept de l'exposition et d'adaptation. D'un côté, l'exposition concerne une importante dépense de nature énergétique du ménage. De l'autre, le concept d'adaptation renferme la faculté dont dispose plus ou moins le sujet/le ménage pour agir et modifier son comportement afin de contenir les effets d'une augmentation d'un coût unitaire sur un poste de dépense [CETE \(2011\)](#). Au Royaume-Uni, la précarité énergétique est connue sous le nom de « *fuel poverty* » et portant essentiellement sur la consommation d'énergie domestique qui met en évidence l'incapacité des ménages à atteindre un niveau de services énergétiques domestiques socialement et matériellement nécessaire [Robinson and Mattioli \(2020\)](#). La précarité énergétique est une perception de la vulnérabilité énergétique qui permet d'apprécier la vulnérabilité de la personne au regard de son environnement. Le système ainsi formé est l'ensemble des objets en interaction que sont : les ressources de la personne, son logement et sa fourniture d'énergie. La précarité énergétique est favorisée par plusieurs facteurs comme les mauvaises conditions d'habitat, la hausse des prix des différentes énergies et ou encore un faible revenu de la personne, l'empêchant d'accéder à un confort thermique convenable [Devalière \(2014\)](#). Ainsi, la précarité énergétique est définie comme une situation de tension qui pourrait amener à une situation de précarité sur un ménage, où cette tension va avoir des conséquences réelles sur le ménage. Les ménages vulnérables sont les ménages qui sont les plus exposés à des aléas (hausse de prix de l'énergie, maladie...), qui va atteindre le pic de vulnérabilité en étant dans une situation de précarité, où des effets cumulatifs se feront sentir comme des factures impayées, des endettements [Saujot \(2012\)](#). La vulnérabilité est ici, une situation de précarité potentielle dans laquelle un ménage peut basculer lorsqu'il est confronté à des aléas. Rappelons que la précarité est définie par une inadéquation entre les ressources des ménages (monétaires et humaines) et leur situation contrainte. Nombreux moyens permettent de mesurer ou d'estimer la précarité énergétique. La mesure de la vulnérabilité énergétique est dans cet exemple le résultat du croisement de deux indicateurs synthétiques qui recourent les deux dimensions de la précarité énergétique [Insee \(2013\)](#) :

- le revenu des ménages : dont l'indicateur retenu est la valeur du premier quartile par unité de consommation
- et les dépenses énergétiques des ménages : de trois origines (le chauffage des logements, les déplacements domicile/travail et l'accès aux commerces et services).

Ainsi, pour la première dimension, les indicateurs retenus concernent les dépenses liées au chauffage du logement et de l'eau sanitaire et définissent que le ménage est en vulnérabilité énergétique quand il consacre plus de 8 % de ses revenus pour se chauffer. Pour la deuxième forme de vulnérabilité, elle concerne les dépenses engendrées par la mobilité en voiture quand la part des dépenses dépasse 4,5 % [Maury and Gilbert \(2015\)](#), [Ferret and Levasseur \(2018\)](#). Les résultats d'analyses aboutissent à des comparaisons, des classifications. D'après les données du Parlement européen de 2013 par exemple, la précarité énergétique a touché entre 50 et 125 millions d'Européens, soit un citoyen européen sur sept [Derdevet \(2013\)](#), [Castaño-rosa et al.](#)

(2019). Dans le monde, la situation est tout aussi alarmante. En 2013, 1,3 milliards d'individus soit 20 % de la population mondiale n'ont pas accès à l'électricité. Cette situation touche en moyenne 57 % de la population en Afrique [Derdevet \(2013\)](#). Brenda Boardman, chercheuse britannique qualifiée pour avoir apporté les premières définitions de la précarité énergétique n'a pas omis de souligner son caractère dynamique. Pour elle, la précarité énergétique n'est pas juste un état statique, mais c'est un état qui évolue au fur et à mesure que la situation du sujet évolue. L'individu en situation de précarité énergétique peut être dans une situation vulnérable, mais peut également en sortir grâce à une évolution de sa situation économique ou sociale (augmentation de son revenu, baisse de prix de l'électricité) [Guyet \(2014\)](#).

La sécurité énergétique Dans la perception de la sécurité énergétique, certains perçoivent la vulnérabilité énergétique comme une dimension de la sécurité énergétique et non son équivalent. D'autres soulignent que la sécurité énergétique et vulnérabilité énergétique sont interdépendantes [Laldjebaev et al. \(2018\)](#). Il y a une immensité de définitions, de perceptions qui rendent difficile l'interprétation de la notion de vulnérabilité énergétique, on en retient le fait que la vulnérabilité énergétique est souvent définie à travers la sécurité énergétique. Cela se traduit par le fait que le pays est vulnérable énergétiquement dans le cas où la sécurité d'approvisionnement énergétique du pays n'est pas assurée [Artigues \(2008\)](#). Ainsi, l'insécurité énergétique équivaut à une faible vulnérabilité des systèmes énergétiques vitaux et fourniture durable de services énergétiques modernes [Laldjebaev et al. \(2018\)](#). Contrairement à un simple fait de dépendance, la sécurité énergétique englobe non seulement la dimension économique, mais aussi les aspects sociaux et environnementaux de l'énergie. Par conséquent, tout ce qui touche l'énergie de la production à l'utilisation, en passant par la conversion, le transport et l'efficacité de l'offre et de la demande, sont pris en compte [Martchamadol and Kumar \(2012a\)](#). Nombreux travaux et références peuvent être trouvés sur la sécurité énergétique, sans donner des définitions universellement acceptées [Kiryama and Kajikawa \(2014\)](#). En raison de sa nature multidimensionnelle, l'interprétation du concept varie en fonction du point de vue de celui qui l'utilise. En outre, sa signification est contextuelle et dépend du pays où elle est définie, influencée par des facteurs tels que le niveau de développement économique, la perception des risques, la résilience du système énergétique, les enjeux géopolitiques et les orientations en matière de politique énergétique. [Ang et al. \(2015b\)](#). En effet, en raison des différences entre les pays en termes de ressources naturelles, de systèmes politiques, de bien-être économique, d'idéologies, de situation géographique et de relations internationales, la sécurité énergétique peut avoir des significations différentes et les politiques énergétiques assujetties peuvent avoir des priorités variées [Gasser \(2020\)](#). La sécurité énergétique est une question complexe et interdépendante qui fait interagir plus d'une discipline scientifique. Et plus encore, elle est de nature dynamique, car elle évolue au fil du temps et possède un aspect inter-temporel (qui évolue dans le court et long terme) [Narula and Reddy \(2015\)](#). Aujourd'hui, la sécurité énergétique est une question de sécurité nationale pour de nombreux pays et spécifiquement les pays développés.

Des exemples de définitions sont présentés ci-après :

- Dans [Sovacool et al. \(2011\)](#), la sécurité énergétique est définie comme « *la manière de fournir équitablement aux utilisateurs finaux des services énergétiques disponibles, abordables, fiables, efficaces, respectueux de l'environnement, gérés de manière proactive et socialement acceptable* »
- D'autres définissent la sécurité énergétique comme « *la disponibilité constante d'approvi-*

- sionnements énergétiques abordables», tandis que d'autres comme « *capacité d'une économie à garantir la disponibilité de ressources énergétiques de manière durable et en temps voulu, le prix de l'énergie étant à un niveau qui n'affectera pas la performance économique de l'économie* » [Selvakkumaran and Limmeechokchai \(2013\)](#).
- D'autres ont tendance à distinguer deux définitions de la sécurité énergétique. À la faveur des pays développés, la sécurité énergétique fait référence à « *un système énergétique résilient et garantissant la quantité d'énergie nécessaire à la vie des gens, aux activités économiques et sociales, à la défense et à d'autres fins à des prix acceptables*». Pour les pays en développement, par contre, la sécurité énergétique équivaut à « *fournir suffisamment d'énergie (quantité et qualité) pour satisfaire à tout moment tous les besoins de tous les citoyens à un prix abordable et stable, et cela permet également de maintenir les performances économiques et de réduire la pauvreté, d'améliorer la qualité de vie sans nuire à l'environnement*» [Martchamadol and Kumar \(2012a\)](#).
 - [Genave \(2019\)](#); [Martchamadol and Kumar \(2012a\)](#); [Demski et al. \(2018\)](#) relèvent des définitions issues des institutions internationales comme l'APEREC ([Centre de recherche sur l'énergie pour l'Asie et le Pacifique](#)), où la sécurité énergétique est définie par « *la capacité d'une économie à garantir la disponibilité de l'approvisionnement en ressources énergétiques de manière durable et opportune, le prix de l'énergie étant à un niveau qui ne nuit pas à la performance économique de l'économie* ». De même pour l'IIASA ([Institut International pour l'Analyse des Systèmes Appliqués](#)), la sécurité énergétique est « *la fourniture ininterrompue de services énergétiques vitaux, et essentielle pour la nation*». Dans ces deux définitions, la sécurité énergétique est comme la continuité de l'approvisionnement en énergie par rapport à la demande. Et enfin, l'AIE ([Agence Internationale de l'Énergie](#)) qui définit la sécurité énergétique comme « *la disponibilité ininterrompue de sources d'énergie à un prix abordable*». Cette dernière nous interpelle que la notion de sécurité énergétique soulève une dimension sociale, même si le terme n'est pas directement cité. Le mot abordable sous-entend cet aspect social de la notion. En effet, le fait que l'énergie soit abordable signifie qu'elle pourra être accessible auprès des consommateurs et donc de la société.

À travers ces différentes définitions, on s'aperçoit que la sécurité énergétique est un concept complexe qui n'est pas clairement défini en soi [Mutani and Todeschi \(2018\)](#), aux multiples facettes, qui est parfois défini en termes étroits, par exemple exclusivement autour de la demande et de l'offre d'énergie, et parfois en termes larges, englobant de vastes domaines des politiques énergétiques et environnementales [Demski et al. \(2018\)](#). Malgré cette large définition de la sécurité énergétique, on retrouve quand même des consensus. Des accords existent sur les aspects que la sécurité énergétique devrait inclure, mais il n'y a pas encore d'accord sur sa définition précise [Ang et al. \(2015b\)](#). Un critère courant pour la sécurité énergétique prend en compte des éléments tels que la disponibilité des ressources énergétiques, l'atteinte d'une plus grande autosuffisance, l'accès équitable aux combustibles, la satisfaction de la demande d'énergie à un coût acceptable, la diversification des sources d'énergie, la stabilité économique sans nuire à l'environnement, l'offre d'énergie de qualité, ainsi que les considérations géopolitiques et la gestion des risques [Martchamadol and Kumar \(2012b\)](#). Ces critères se résument dans les sept principales dimensions que sont : la disponibilité de l'énergie, les infrastructures, les prix de l'énergie, les effets sur la société, l'environnement, la gouvernance et l'efficacité énergétique. Ce résultat a été obtenu à partir de l'analyse de 83 définitions existantes de la sécurité énergétique

Ang et al. (2015b). Quelles que soient les différences entre les systèmes énergétiques, ils ont toujours des caractéristiques communes et, par conséquent, un concept universel de sécurité énergétique peut être développé Novikau (2019).

1.5 Conclusion de chapitre

L'approche par la conceptualisation de la vulnérabilité est une étape qui mène à la compréhension du terme. Grâce au tableau de Safi et al. (2012) (adapté des travaux de Eakin and Luers (2006) (tableau 1.1), on peut avoir un résumé clair des différents concepts de la vulnérabilité : la vulnérabilité biophysique à travers l'approche du risque et catastrophe qui se concentre sur la prévision des impacts physiques, l'approche sociale, qui se concentre sur la capacité des humains, en tant qu'individus ou communautés, à éviter les dangers qui menacent leurs moyens de subsistance et leur bien-être, à y faire face et à s'y adapter ; et enfin, l'approche de la résilience écologique, qui se concentre sur la manière dont les systèmes humains/environnementaux font face aux perturbations tout en conservant leurs fonctions et leurs caractéristiques principales Safi et al. (2012).

TABLE 1.1 – Différentes approches du terme de vulnérabilité. Source : Eakin and Luers (2006)

Points de comparaisons/ Approches	Biophysique	Sociale	Résilience
Questions centrales	Que sont les dangers ?	En quoi les personnes et les lieux sont-ils affectés différemment	Qu'est-ce qui change et comment les systèmes changent-ils
	Quels sont les impacts	Qu'est-ce qui explique les différences de capacités à faire face et à s'adapter ?	Quelle est la capacité à répondre au changement ?
	Où et quand ?	Quelles sont les causes profondes et les conséquences de la sensibilité différentielle	Quels sont les processus sous-jacents qui contrôlent la capacité à faire face ou à s'adapter ?
Principaux attributs	Exposition (menace physique, externe aux systèmes), sensibilité	Individus, ménages, groupes sociaux, communautés, moyens de subsistance	Écosystèmes, systèmes couplés homme-environnement

Suite à la page suivante

Table 1.1 – Suite du tableau de la page précédente

Points de comparaisons/ Approches	Biophysique	Sociale	Résilience
Unité d'exposition	Lieux, secteurs, activités, paysages, régions	Individus, ménages, groupes sociaux, communautés, moyens de subsistance	Écosystèmes, systèmes couplés homme-environnement
Échelle	Régional, global	Régional, global	Paysage, écorégions, échelles multiples
Définitions choisies	"la probabilité qu'un individu ou un groupe soit exposé à un danger et en subisse les effets néfastes. C'est l'interaction du lieu dangereux avec le profil social des communautés"	"Caractéristique d'une ou plusieurs personnes en termes de capacité à anticiper, à faire face, à résister et à se remettre de l'impact des risques naturels"	"Vulnérabilité définie comme l'opposé de la résilience, où la résilience est la capacité d'un système à subir des perturbations et à maintenir ses fonctions et ses contrôles"
	"l'idée d'un potentiel de conséquences négatives qu'il est difficile d'atténuer par des mesures d'adaptation étant donné l'éventail des changements"	"La vulnérabilité se situe au confluent du sous-développement, la marginalité sociale et économique, et l'incapacité à rassembler des ressources naturelles"	"La résilience présente les trois propriétés suivantes : la quantité de changements qu'un système peut subir, la mesure dans laquelle le système est capable de s'auto-organiser. La mesure dans laquelle le système peut développer la capacité d'apprendre et de s'adapter"

L'entrée du terme de vulnérabilité dans la sécurité énergétique, ou de la précarité énergétique, a permis de prendre en compte les facteurs qui rend le sujet (le système énergétique en question) vulnérable et le met dans une position d'insécurité [Bouzarovski and Thomson \(2017\)](#). Ainsi, les études bibliographiques autour de la vulnérabilité énergétique ont permis de trouver des analogies par rapport à l'approche même du terme de vulnérabilité. On a identifié

trois approches qui peuvent être mises en parallèle avec les approches du terme de vulnérabilité lui-même. Perpétuant ainsi l'héritage qu'a délégué le terme de vulnérabilité à la vulnérabilité énergétique pour son caractère polysémique. En première approche, nous identifions la déclinaison de la vulnérabilité énergétique en tant que dépendance énergétique, elle reflète l'aspect économique et peut-être rattaché à la vulnérabilité biophysique. Ensuite, la précarité énergétique se concentre davantage sur les aspects sociaux et correspond ainsi à l'approche de la vulnérabilité sociale. D'autre part, la sécurité énergétique intègre l'aspect environnemental de la vulnérabilité énergétique et peut être associée à la vulnérabilité territoriale ou à la résilience. Le tableau 1.2 nous propose un résumé de ce constat.

TABLE 1.2 – Différentes approches du terme de vulnérabilité. Source : [Eakin and Luers \(2006\)](#)

Points de comparaisons	Biophysique	Sociale	Résilience
Définitions	Dépendance de l'approvisionnement énergétique aux produits d'importations extérieurs (dépendance de l'économie)	Situation de précarité potentielle d'un ménage Incapacité à faire face à un choc qui pourrait ramener le ménage dans une situation de précarité.	Capacité d'un pays à satisfaire ses besoins énergétiques sans rupture dans l'approvisionnement et soucieux à la fois de l'impact environnementale
Facteurs	Exposition (menace physique, externe aux systèmes), sensibilité aux fluctuations du prix des matières premières, perturbations physiques ou techniques de l'approvisionnement	Choc lié aux individus, ménages, groupes sociaux, communauté, moyens de subsistance comme maladie, hausse de prix de l'énergie, perte d'emploi, changement de situation, mauvais état de l'habitation, localisation de l'habitation, chômage	Menaces sur les écosystèmes, le système couplé homme-environnement : inégalité de répartition des ressources, disponibilité des ressources, situation géographique, instabilité politique, pauvreté, changement climatique
Échelle	Régional, pays	Individu, ménage, groupe social	Régions, Pays, Global

La vulnérabilité énergétique d'un territoire est l'ensemble d'un système complexe, où différents facteurs entrent en jeu et interagissent pour créer cette situation de fragilité, comme la figure 1.7 le décrit.

Finalement, l'ensemble de l'état de l'art autour du terme de vulnérabilité, énergie ainsi que de l'ensemble des travaux effectués d'ores et déjà autour de la vulnérabilité énergétique nous permet de proposer le modèle 1.8 suivant pour le caractériser.

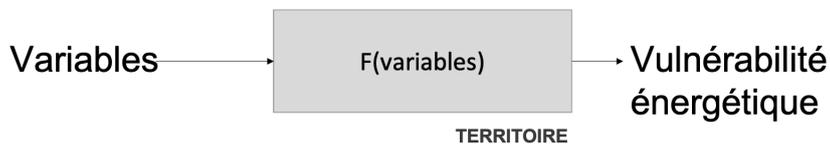


FIGURE 1.7 – Système de vulnérabilité énergétique

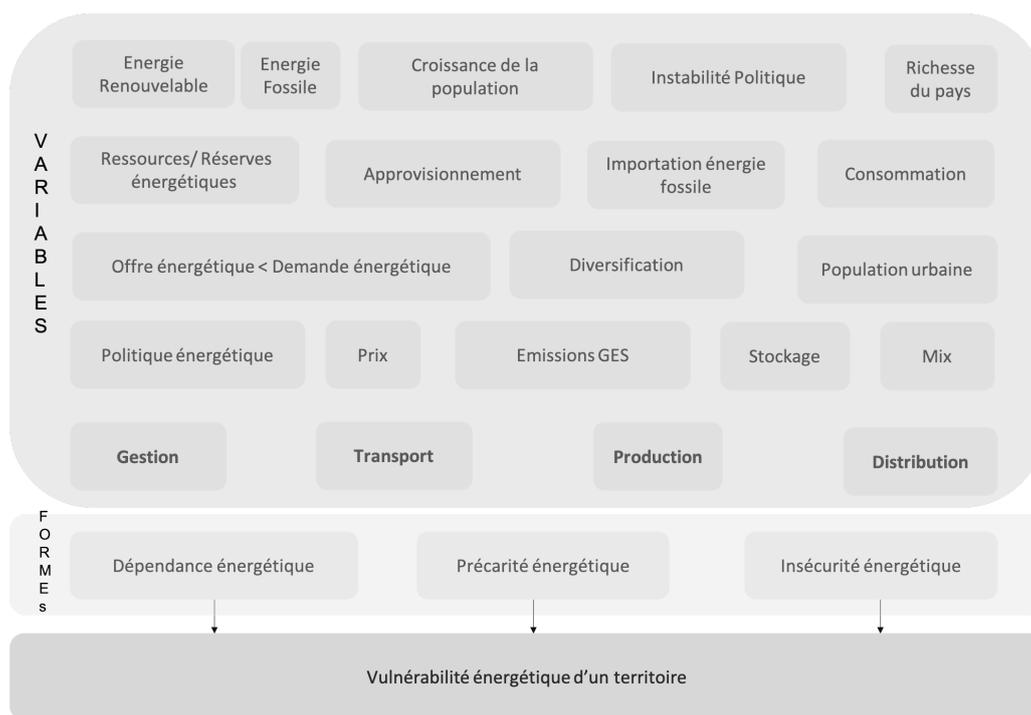


FIGURE 1.8 – Modèle pour caractériser la vulnérabilité énergétique d'un territoire. Source : Réalisation propre

CHAPITRE 2

Estimation et analyse de la vulnérabilité énergétique

Les indicateurs apportent une signification plus approfondie des enjeux liés aux jeux de données et aident à mieux cerner et analyser les relations entre les données que les statistiques de base ne font pas apparaître de manière évidente

AIEA

Sommaire

2.1	Introduction du chapitre	33
2.2	Base théorique et revue des méthodologies de construction d'indicateur de vulnérabilité énergétique	35
2.2.1	Méthodologie de construction d'indicateurs de vulnérabilité énergétique	35
2.2.1.1	La préparation des données	35
2.2.1.2	La normalisation	36
2.2.1.3	La pondération	36
2.2.1.4	L'agrégation	36
2.2.1.5	L'analyse de sensibilité	36
2.2.2	Revue sur les indicateurs de vulnérabilité énergétique existants	36
2.3	Analyse multivariée et multidimensionnelle pour évaluer la vulnérabilité énergétique	42
2.3.1	Préparation de la base de données	42
2.3.2	Construction de l'indicateur de vulnérabilité énergétique "IVEN"	47
2.3.3	Principaux résultats obtenus	47
2.3.3.1	Résultats d'ACP	47
2.3.3.2	L'indicateur IVEN	51
2.4	Limites des méthodes de construction d'indicateurs de vulnérabilité énergétique	53
2.5	Conclusion du Chapitre	55

2.1 Introduction du chapitre

Pour donner du sens aux données statistiques recueillies dans l'étude des territoires, des indicateurs ont été construits. Parmi ces indicateurs, nous pouvons prendre l'exemple du PIB. Cet indicateur traditionnel PIB s'est imposé bien avant les années 1990. Il a été utilisé pour

définir la situation économique d'un pays, le plus souvent pour orienter la prise de décision des chefs d'états dans leur politique économique. Il a été aussi d'un grand intérêt pour les grandes institutions internationales dans l'attribution d'aide financière aux pays en développement [Garabedian and Hoarau \(2011\)](#). Les limites du PIB, qui se focalise essentiellement sur la production marchande et se prête davantage à la mesure des économies sous un angle global (de niveau national) et non celle des niveaux de vie, ont soulevé des critiques par la suite. Ces critiques ont conduit les recherches à proposer des indicateurs alternatifs de mesure pour satisfaire le besoin qui était d'avoir à disposition des indicateurs capable de mesurer non seulement l'économie ou la puissance économique, mais aussi le niveau de développement et de bien-être. De ces initiatives sont nées deux grandes catégories d'indicateurs. Le premier ensemble met l'être humain au centre des débats et a abouti à un indicateur que l'on connaît aujourd'hui sous le nom d'IDH ([Indice de Développement Humain](#)). Le second ensemble découle du rapport Brundtland et des recommandations de Rio : les indicateurs de développement durable [Garabedian and Hoarau \(2011\)](#). Les indicateurs ont été des moyens pour définir une situation donnée, et des outils à disposition pour gérer et planifier les pays et nations. Les indicateurs jouent un rôle très important dans la compréhension des données mises à notre disposition. Ils apportent une signification plus approfondie des enjeux liés aux jeux de données et aident à mieux cerner et analyser les relations entre les données que les statistiques de base ne font pas apparaître de manière évidente [AIEA \(2008\)](#). Les indicateurs sont maintenant des principaux outils dans les études d'évaluation et planification touchant le domaine de l'énergie et surtout dans l'objectif d'une politique de développement durable. Les indicateurs sont même pris comme des critères de décision dans le choix des actions souvent à mettre en œuvre [Neves and Leal \(2010\)](#).

Pour définir la vulnérabilité énergétique, le premier réflexe a été de se tourner vers la création d'indicateur. Cette méthode est particulièrement définie comme des méthodes analytiques basées sur des analyses de données et statistiques. Leur finalité permet de faire des classements, de faire des comparaisons des pays étudiés, ou encore de faire une analyse spatiale ou cartographique à partir des indicateurs calculés [Augutis et al. \(2011\)](#).

Dans la perspective de parvenir à une définition précise de la vulnérabilité énergétique, nos premières investigations ont été aussi consacrées à la création d'indicateurs. Ainsi, ce chapitre s'organise dans un objectif de mettre en relief les travaux de construction d'indicateur de vulnérabilité énergétique connus jusqu'ici et se base sur trois parties bien distinctes. La première partie donne une présentation générale de la méthode de construction d'indicateur et propose ensuite une revue bibliographique des indicateurs de vulnérabilités énergétiques existants. Dans la deuxième partie, nous tenterons de construire un indicateur de vulnérabilité énergétique. La méthode utilisée va se reposer essentiellement sur l'analyse en composante principale, en tenant compte dans le choix des variables, les informations retenues de la bibliographie sur les indicateurs de vulnérabilité. Enfin, la troisième partie donne une synthèse de la démarche de construction d'indicateur en mettant en relief ses limites. Cette dernière partie réitère à nouveau l'intérêt de cette thèse de recourir à d'autres méthodologies pour définir la vulnérabilité énergétique des territoires.

2.2 Base théorique et revue des méthodologies de construction d'indicateur de vulnérabilité énergétique

2.2.1 Méthodologie de construction d'indicateurs de vulnérabilité énergétique

Les données sont analysées et traitées statistiquement, ou par d'autres méthodes d'agrégations afin d'obtenir un indicateur. Il y a beaucoup de méthodes identifiées pour aboutir à la construction d'un indicateur, mais dans tous les cas, la méthode se base essentiellement sur les données disponibles et accessibles du territoire étudié. Les données peuvent concerner différentes dimensions, comme la dimension économique, sociale ou environnementale d'un territoire afin de mieux refléter la réalité et captent ainsi les caractères complexes et multidimensionnels de la vulnérabilité énergétique. À ce jour, la littérature offre une très large palette d'indicateurs énergétiques. En effet, l'attrait des indicateurs énergétiques a conduit à l'émergence d'un grand nombre d'indicateurs "simples" ainsi que d'indicateurs "agrégés". La construction d'indicateur dépend essentiellement des concepts et objectifs du chercheur, mais en général, on distingue trois grandes tendances selon Liu Gang dont [Liu \(2014\)](#) :

- Les indicateurs simples : qui sont les résultats du traitement (à des degrés divers) et d'interprétation des données primaires.
- Les indicateurs agrégés : indicateurs combinés, généralement par une méthode d'agrégation additive, un certain nombre de composantes (données ou sous-indicateurs) définis dans les mêmes unités.
- Les indicateurs composites : combinés à travers divers aspects d'un phénomène donné, basés sur un concept parfois complexe, en un seul nombre avec une unité commune.

Des indices peuvent être construits à partir des indicateurs [Ang et al. \(2015a\)](#). Les indices sont des indicateurs agrégés ou synthétiques. Les indices sont pris généralement sous la forme d'un nombre unique sans dimension. Les indices nécessitent la transformation de données mesurées dans différentes unités pour produire un nombre unique. En effet, les indices aident à quantifier les performances d'un pays au fil du temps et les tendances clés connexes qui, autrement, pourraient ne pas être apparentes [Narula and Reddy \(2015\)](#). Sa construction se fait ainsi à travers cinq échelons bien distincts qui sont :

- la préparation des données,
- la normalisation,
- la pondération,
- l'agrégation
- et enfin, une étape que beaucoup de travaux minimisent : l'analyse de sensibilité.

Les points qui suivent donnent une brève description de ces étapes.

2.2.1.1 La préparation des données

La préparation des données commence par la recherche des données à traiter. Cette étape dépend évidemment de la définition de la vulnérabilité énergétique que l'on veut représenter. C'est à partir de cette définition que l'on cherche les données qui correspondent ou représentent aux mieux cette définition.

2.2.1.2 La normalisation

La normalisation est utile pour rendre les indicateurs qui sont généralement mesurés à l'aide de différentes unités à une échelle commune. Cela permet de les comparer les uns aux autres afin de les combiner en un indice.

2.2.1.3 La pondération

La pondération consiste à attribuer une importance relative à chaque indicateur.

2.2.1.4 L'agrégation

L'agrégation est une étape qui consiste à construire des fonctions qui combinent les ensembles de données normalisées avec les profils de pondération des indicateurs et calculent un score unique pour chaque pays. Ce score qui représente la valeur ou la performance de l'indice permet de construire un classement des pays et ainsi, une comparaison entre eux.

2.2.1.5 L'analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité aide à valider l'indice obtenu. Le schéma ci-après 2.1 résume les étapes de construction d'indicateur et d'indice de vulnérabilité énergétique.

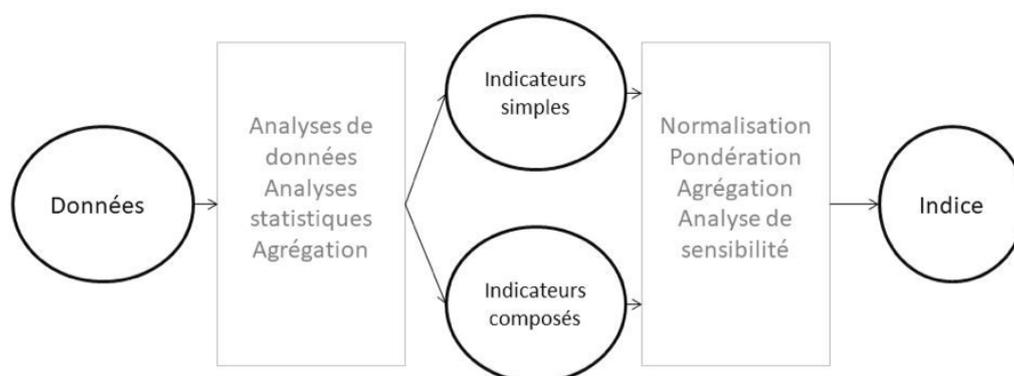


FIGURE 2.1 – Étape de construction d'indicateur et d'indice de vulnérabilité énergétique. Source : Réalisation propre

Des travaux comme [Joint Research Center of the European Commission \(2008\)](#) sont mis à disposition pour les lecteurs qui souhaitent avoir des informations plus détaillées.

2.2.2 Revue sur les indicateurs de vulnérabilité énergétique existants

Nombreux travaux ont été effectués autour de la vulnérabilité énergétique, beaucoup d'indicateurs ont été construits. Ces travaux aboutissent à des essais de définitions, comme dans [Winzer \(2012\)](#) où ils définissent la vulnérabilité énergétique comme étant en lien avec la sécurité énergétique. Ainsi, la sécurité énergétique représente pour eux la satisfaction de la demande en énergie et équivaut à l'assurance d'une continuité dans l'approvisionnement. Cette définition

est relative à la situation du pays et aux objectifs des chercheurs qui s'y investissent. Dans ce même esprit, la sécurité de l'approvisionnement énergétique de l'UE (Union Européenne) a été l'objet des travaux dans un article auquel ils ont conçu un indice pour évaluer les risques immédiats associés à l'approvisionnement externe en énergie des États membres de la zone. Leur recherche recommande une approche sectorielle ou par type d'énergie dans le calcul d'indice pour mieux appréhender le risque énergétique externe surtout à court terme [Le Coq and Paltseva \(2009\)](#). Dans cette même tendance, des travaux sur les pays de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économiques) ont été menés comme dans [Cohen et al. \(2011\)](#) où ils mesurent l'ampleur de la diversification énergétique dans la sécurité énergétique. Ils ont pu mettre en lumière le rôle prépondérant de la diversification énergétique dans la vulnérabilité énergétique comme étant un facteur positif qui la réduit. D'autres travaux ont par la suite souligné l'intérêt d'intégrer la diversification énergétique dans les politiques énergétique à mettre en place pour promouvoir la sécurité énergétique [Vlado \(2009\)](#), [Yang et al. \(2014\)](#). D'autres essais ont permis d'établir le lien entre les relations bilatérales de deux pays et ce que cela peut affecter à leur sécurité énergétique. Ils ont ainsi distingué des degrés d'affinité, de rivalité et de non-pertinence énergétique entre les pays qui constituent l'UE et les pays tiers [María Marín-Quemada and Muñoz-Delgado \(2011\)](#). Cette revue a permis de mettre à jour des travaux qui aident à faire des projections sur le futur, comme dans le travail de [Kruyt](#) où ils se basent sur des scénarii qui prédisent l'épuisement des réserves fossiles que sont le pétrole (épuisement en 2035 selon leur premier scénario), le gaz naturel (pour 2050) et enfin le charbon qui vont s'épuiser après un siècle en se basant sur la tendance de la demande mondiale actuelle [Kruyt et al. \(2009\)](#). Dans des objectifs similaires, l'indicateur [Martchamadol and Kumar \(2012a\)](#), AESPI (Aggregated Energy Security Performance Indicator) a permis à [Martchamadol et Kumar](#) d'étudier la vulnérabilité énergétique d'un pays, en étudiant son passé, mais aussi en offrant une possibilité de faire une analyse prospective du futur des pays étudiés grâce à l'utilisation de séries de données temporelles. Cet indice est composé de 25 indicateurs simples représentant les dimensions sociale, économique et environnementale d'un pays. Cet indicateur agrégé leur a donc permis de faire des prédictions en considérant les politiques énergétiques du pays. Toujours dans la définition de la vulnérabilité énergétique liée à la sécurité énergétique, les travaux de [Yang et al. \(2014\)](#) portant sur le risque d'approvisionnement en pétrole ont tenté d'évaluer les risques liés à l'offre externe de pétrole des pays importateurs de pétrole, aux risques liés au pays et à sa capacité d'exportation de pétrole. Le premier risque est ainsi lié à l'approvisionnement en pétrole associé à la stabilité macroéconomique et socio-politique des fournisseurs de pétrole, et le second lié directement à la disponibilité effective du pétrole. En faisant l'étude sur les principaux pays que sont la Chine, le Japon, l'UE et aussi les États-Unis, ils ont montré que la stratégie d'importation de pétrole du Japon est davantage centrée par les exportations potentielles de fournisseurs de pétrole que par le risque pays ; les importations de pétrole de l'UE ont un bon équilibre entre le risque pays et les exportations potentielles de fournisseurs de pétrole ; les États-Unis ont réussi à diversifier leurs importations de pétrole pour maintenir la sécurité de leur approvisionnement externe. Et enfin, avec l'augmentation rapide de la demande de pétrole, la Chine a modifié sa politique d'importation de pétrole en élargissant ses partenaires commerciaux et en passant par des fournisseurs ayant un potentiel élevé d'exportation de pétrole. La vulnérabilité énergétique a été aussi liée à des dimensions qualitatives telles que les risques géopolitiques. Les travaux de [García-verdugo et al. \(2015\)](#) ont montré par exemple que la stabilité économique et le degré de développement sont des conditions de sécurité énergétique pour un pays. La dimension environnementale joue aussi

un rôle dans le maintien de la sécurité énergétique. Pour cela, Bollen démontre dans son rapport qu'insérer une politique visant à accroître la sécurité énergétique intégrée à une politique de réduction de la pollution de l'air peut avoir un impact positif sur l'économie du pays. Ainsi, il fait le lien entre l'environnement et l'économie dans sa définition de vulnérabilité énergétique [Bollen \(2008\)](#).

Ces quelques exemples montrent que des essais de conceptualisation ont été grandement menés afin de trouver des directives dans la construction des indicateurs [Winzer \(2012\)](#). De nombreuses revues traitent du sujet [Zeng et al. \(2017\)](#); [Gatto and Busato \(2019\)](#). Pour résumer les revues existantes, une attention particulière sera faite sur celle de Gasser. Dans son article, Gasser a effectué un travail très riche qui permet d'avoir un aperçu général des nombreux essais de construction d'indicateurs de vulnérabilité énergétique existants [Gasser \(2020\)](#). Il a ainsi travaillé sur des articles ayant été publiés de 2005 à 2018. Son travail a permis d'inventorier 63 études correspondant à 63 indicateurs de sécurité énergétique différents. Les parties soulignées dans son analyse portent essentiellement sur les différentes dimensions utilisées dans la construction d'indicateurs : la couverture géographique des études, le nombre de pays analysés, la période étudiée et la méthodologie adoptée dans la construction de l'indicateur (type : indicateur simple ou composé). Il a démontré que plus du quart des travaux de construction d'indicateur de sécurité énergétique portent sur un grand nombre de pays (à un niveau mondial), ensuite à un ensemble de pays ou région comme l'Europe, l'Asie, les États-Unis et enfin des études sur un seul pays. Cela prouve bien que la finalité des indicateurs est de pouvoir faire des comparaisons ou des classements. Les comparaisons examinent la performance d'un pays par rapport à un autre, ou, dans les cas où l'étude se concentre sur un seul pays, elles analysent comment les performances de ce pays évoluent au fil du temps. [Ang et al. \(2015a\)](#). Un exemple probant de ces démarches est le travail effectué par le conseil mondial de l'énergie ([WEC \(World Energy Council\)](#)) en construisant le « Energy trilemma Index [ETI](#) » : indice de trilemme énergétique (ITE) [World Energy Council \(2020\)](#). C'est un indice qui permet de mesurer la performance du système énergétique d'un pays. Le système énergétique doit remplir trois dimensions pour avoir une bonne santé : la sécurité énergétique, l'équité énergétique et pour finir la durabilité environnementale. L'indicateur a pour objectif de montrer que les systèmes énergétiques peuvent être sains et efficaces, équitables et durables sur le plan environnemental avec le trio équilibré et soigneusement géré entre les trois dimensions. Dans cet indice de trilemme énergétique, trois indicateurs ont été calculés : la sécurité énergétique qui mesure la capacité d'un pays à répondre de manière fiable à la demande actuelle et future d'énergie, à résister et à rebondir rapidement en cas de choc sur le système, avec un minimum de perturbation des approvisionnements. Cela recouvre à la fois l'efficacité de la gestion des sources d'énergie intérieures et extérieures, ainsi que la fiabilité et la résilience des infrastructures énergétiques. Par la suite, l'équité énergétique évalue la capacité d'un pays à assurer un accès universel à une énergie fiable, abordable et en quantité suffisante pour ses habitants. [World Energy Council \(2020\)](#). Cette dimension est fonction de l'accès de base à l'électricité et aux combustibles et technologies de cuisson propres, de l'accès à des niveaux de consommation d'énergie propices à la prospérité, et du caractère abordable de l'électricité, du gaz et des combustibles. Et enfin, la troisième variable constitutive de l'indice est une variable qui représente la durabilité environnementale des systèmes énergétiques, c'est-à-dire la transition du système énergétique d'un pays vers l'atténuation et la prévention des dommages environnementaux potentiels et des impacts du changement climatique. Cette dimension est axée sur la productivité et l'efficacité de la production, du transport et de la distribution, la décarbonisation et la qualité de l'air. Un

calcul de cet indice pour des données mondiales et nationales de 2020 ont donné un classement qui met la Suisse, la Suède et le Danemark au trois premiers rangs comme étant les pays les plus performants avec un score respectivement de ETI de 84,3 %, 83,2 % et 84 %. La carte 2.2 ci-après donne un aperçu général des résultats obtenus des 128 pays qui ont été étudiés par le WEC [World Energy Council \(2020\)](#).

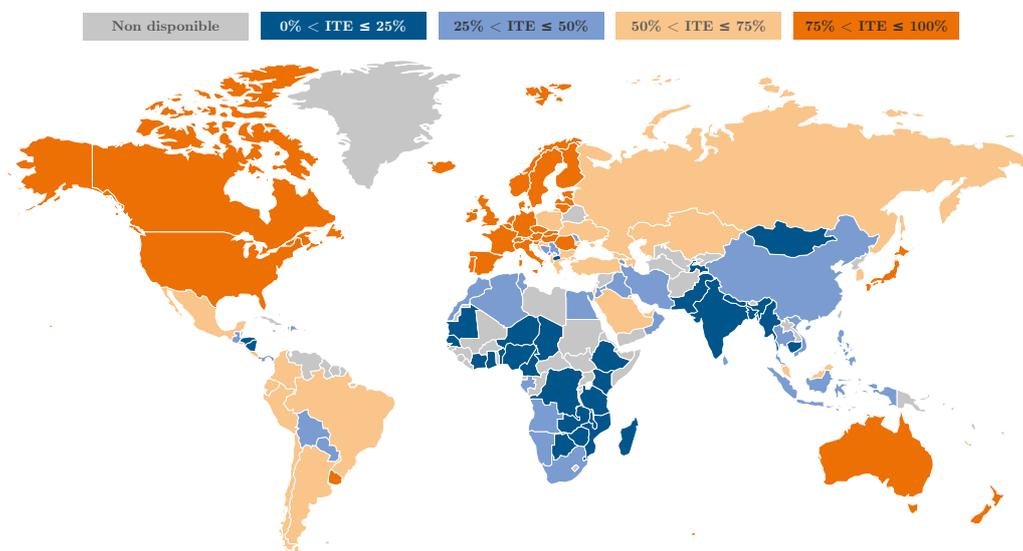


FIGURE 2.2 – ETI de différents pays du monde. Source : [World Energy Council \(2020\)](#)

De nombreuses informations sont données sur l'indice ETI (Energy Trilemma Index), mais ce qu'on déduit des valeurs obtenues est que la performance du pays dépend beaucoup de sa situation économique. En effet, on remarque dans cette carte, que les pays qui sont les plus performants ayant un ETI supérieur à 75 % sont les pays développés, les grandes puissances comme l'Europe, les États-Unis. Ensuite, on aperçoit des pays de l'est comme l'Asie, ou du sud comme le Brésil qui sont des pays émergents ont un ETI supérieur à la moyenne 50 %, les pays en développement se retrouvent dans les derniers rangs comme la plupart des pays africains ou encore des pays du sud de l'Asie [World Energy Council \(2020\)](#). Un travail similaire de construction d'indice de performance est aussi rapporté ci-après, celui de Sovacool, souvent référencé dans les articles tentant de mesurer la vulnérabilité énergétique par des indicateurs [Sovacool \(2013\)](#). Dans ce travail, le but a été de mesurer l'évolution dans le temps de la performance en sécurité énergétique d'un pays. L'outil comparatif a été construit en associant 20 dimensions qui représentent les facteurs de sécurité énergétique définie par la disponibilité, l'accessibilité économique, l'efficacité, la durabilité et la gouvernance 2.1. L'indice obtenu a été testé sur 18 pays du monde. Dans cette étude, les trois premiers pays en tête de liste ont été le Japon, Brunei et les États-Unis. L'Europe a été étudiée en un seul bloc, ce qui fait qu'on n'a pas pu avoir des données sur la Suisse, Suède et Danemark, les plus performants issus de l'indicateur de WEC pour avoir une comparaison avec ce dernier. Cet obstacle nous donne un aperçu des limites de la démarche de construction d'indicateurs. En effet, les résultats obtenus dans les travaux de construction d'indice ne sont pas comparables les uns aux autres, ils sont relatifs aux données utilisées et méthodologies de calcul. Les nombreux travaux et articles écrits pour la mesure de vulnérabilité énergétique à partir d'indicateurs ont permis de rassembler des informations importantes sur les dimensions les plus utilisées, et ce, précisément grâce aux apports

de Gasser [Gasser \(2020\)](#). Ces dimensions concernent notamment les indicateurs liés à l'impact environnemental, à l'économie (dépendance), à la disponibilité et existence des ressources, à l'abordabilité du prix de l'énergie, à la consommation et enfin au PIB. On voit que les dimensions couvrent à la fois le volet environnemental, social et économique d'un pays. Cela rejoint les dimensions que [Ang et al. \(2015a\)](#) ont conclues lors de leurs investigations. De même, on retrouve ces dimensions dans le travail de [Sovacool et al. \(2011\)](#) dont la contribution est aussi une référence de nombreux travaux sur la vulnérabilité énergétique d'après nos lectures. Ainsi, le tableau 2.1 donne un résumé des données généralement utilisées et des composants qui aident à choisir la dimension selon la définition de vulnérabilité énergétique.

TABLE 2.1 – Dimensions retenues pour définir la sécurité énergétique. Source : [Sovacool \(2013\)](#)

Dimensions	Composant	Paramètres mesurés	Unité de mesures / indicateurs
Disponibilité	Sécurité d'approvisionnement	Approvisionnement total en énergie primaire par habitant	ktep
	Production	Rapport moyen entre les réserves et la production pour les trois combustibles énergétiques primaires (charbon, gaz naturel et pétrole)	Année de production restante
	Dépendance	Autosuffisance	% demande en énergie domestique
	Diversification	Part des énergies renouvelables dans l'approvisionnement total en énergie primaire	% mix énergétique
Abordabilité	Stabilité	Stabilité du prix de l'énergie électrique	% fluctuation des prix
	Accessibilité	Les populations ayant accès à l'électricité	% de population ayant une bonne qualité de connexion au réseau électrique
	Abordabilité	Prix de détail du pétrole/gaz	Prix moyen

Suite à la page suivante

Table 2.1 – Suite du tableau de la page précédente

Dimensions	Composant	Paramètres mesurés	Unité de mesures / indicateurs
	Équité	Les ménages dépendant des combustibles traditionnels	% de la population qui utilise encore le combustible solide
Développement technologique et efficacité :	Recherche et innovation	Intensité de la recherche	% dépense du gouvernement en recherche et développement
	Efficacité énergétique	Intensité énergétique	Consommation énergétique / dollar de PIB
	Sécurité et fiabilité	Efficacité du réseau	% transmission et pertes en distribution électrique
	Résilience	Ressources et stock énergétiques	Années de réserves énergétiques restants
Durabilité environnementale :	Usage du sol	Couverture forestière	% couverture végétale du sol
	Eau	Disponibilité de l'eau	% population ayant accès à l'eau
	Changement climatique	Émissions de dioxyde de carbone liées à l'énergie par habitant	% Mt of CO ₂ /personne
	Pollution	Émissions de dioxyde de soufre par habitant	% Mt of SO ₂ /personne
Règlementation et gouvernance	Gouvernance	Classement de gouvernance mondiale	Score de gouvernance mondiale
	Commerce et connectivité	Les exportations d'énergie	Valeur d'exportation annuel en énergie
	Compétition	Subventions énergétiques par habitant	Coût de la subvention en énergie/habitant
	Information	Qualité des informations lié à l'énergie	% disponibilité des données en énergie

2.3 Analyse multivariée et multidimensionnelle pour évaluer la vulnérabilité énergétique

Le chapitre 1 a donné différentes méthodologies existantes pour la construction d'un indicateur. L'intérêt de ces différentes méthodes est de pouvoir synthétiser un grand nombre d'informations en une valeur. Pour construire l'indicateur de vulnérabilité énergétique, on s'est basé sur le même principe. Le travail demande ainsi deux étapes bien distinctes :

- la constitution de la base de données avec les variables qui nous semblent importantes pour refléter la vulnérabilité énergétique,
- ensuite, la synthétisation de ces données pour obtenir l'indicateur.

2.3.1 Préparation de la base de données

Notre base de données est constituée de 16 variables réunissant un grand nombre de pays (115 au total visibles dans le tableau 2.2). Les données proviennent de la Banque Mondiale pour l'année 2014 qui a classé les pays selon leur situation économique en Pays à revenu élevé, à revenu faible, à revenu intermédiaire, tranche inférieur et enfin à revenu intermédiaire, tranche supérieure. Tenant compte des diverses dimensions mentionnées dans le chapitre 1 et aussi de la disponibilité des données, les variables qui ont été utilisées pour définir la vulnérabilité énergétique des territoires recouvrent les trois dimensions clés d'un territoire : économique, sociale et environnementale. Les variables retenues sont données ci-après :

- La première dimension prise en compte est la dimension économique. Pour la représenter, la base de donnée a pris en compte plusieurs variables. La première variable retenue est le PIB. Il permet de rendre compte de la richesse du pays, plus le PIB est grand et plus le pays est fort économiquement. Dans notre jeu de données, le PIB est exprimé par *GDP*. Ensuite, la richesse monétaire (dans le tableau de donnée désigné par *CURRENT – BALANCE*) a été aussi prise en compte. Cette variable représente le flux monétaire du pays, ou le solde de compte courant. La variable *TOTAL – RESERVES* évalue la richesse en dépôt du pays, c'est-à-dire l'ensemble de l'argent, or en placement dans les banques. Enfin, une variable qui représente la valeur ajoutée par les industries de transformation du pays : *INDUSTRY*. Cette variable prend compte des richesses apportées des productions manufacturières, la construction, la production électrique, eau et gaz.
- Ensuite, trois données bien distinctes représentant l'IDH, l'instabilité politique et la densité de la population ont été relevées pour enrichir la base et exprimer la dimension sociale. L'IDH est une variable composée qui prend en compte trois axes fondamentaux du développement humain : santé, niveau de vie et éducation. La densité de la population ou *DENS* dans le tableau de données représente le nombre de populations ou d'habitants par kilomètre. Une variable sur l'instabilité politique (*Politic – Stability* dans le jeu de données) a été prise en compte, afin de montrer que l'instabilité politique a aussi un impact majeur dans la vulnérabilité du territoire.
- Afin d'inclure le volet environnemental, l'indicateur d'émission de Gaz à effet de Serre, qui a été nommé *GES* dans le travail a été ajouté. Cette variable est liée à la situation économique et sociale du pays, car plus le pays est productif, plus il émet de gaz à effet de serre à cause d'une grande consommation d'énergie fossile et plus le niveau de vie de la population est élevé.

- Des données portant sur la situation énergétique ont permis de constituer en totalité la base de données. Pour cela, celles qui ont été retenues sont : le taux d'accès à l'électricité (*ELEC – ACCES*). Il recouvre à la fois le besoin social de la population et économique du pays et exprime la vulnérabilité énergétique du pays. La surface de Forêt des pays (*FOREST – AREA* dans le tableau de donnée) a été aussi prise en compte. Beaucoup de pays en développement et détenant un taux faible d'électrification utilisent encore l'énergie de la biomasse pour leur besoin énergétique pour la cuisson. Ensuite, la consommation par habitant (*CONS – HAB*) permet d'évaluer la consommation énergétique au niveau du territoire. La consommation en énergie fossile (*FOSSIL – FUEL – CONS*) évalue donc le pourcentage d'énergie fossile dans la production d'électricité du pays pour assurer sa productivité économique et sa pérennité sociale. L'importation en énergie fossile (*IMPORT – ENERGY*) évalue la quantité en énergie fossile importée. L'intensité énergétique (*ENERGY – INTENSITY*) évalue la quantité d'énergie utilisée et enfin, la consommation en énergie électrique (*ELEC – POWER*) permet d'évaluer le taux de production d'énergie électrique, et donc sera en relation avec le taux d'accès à l'électricité.

TABLE 2.2 – Liste des pays étudiés

	Code du Pays	Nom du pays	Classe
1	AUS	Australie	Revenu élevé
2	AUT	Autriche	Revenu élevé
3	BHR	Bahreïn	Revenu élevé
4	BEL	Belgique	Revenu élevé
5	BRN	Brunéi Darussalam	Revenu élevé
6	CAN	Canada	Revenu élevé
7	CHL	Chili	Revenu élevé
8	HRV	Croatie	Revenu élevé
9	CYP	Chypre	Revenu élevé
10	CZE	République tchèque	Revenu élevé
11	DNK	Danemark	Revenu élevé
12	FIN	Finlande	Revenu élevé
13	FRA	France	Revenu élevé
14	DEU	Allemagne	Revenu élevé
15	GRC	Grèce	Revenu élevé
16	HUN	Hongrie	Revenu élevé
17	ISL	Islande	Revenu élevé
18	IRL	Irlande	Revenu élevé
19	ISR	Israël	Revenu élevé
20	ITA	Italie	Revenu élevé
21	JPN	Japon	Revenu élevé
22	KOR	Corée, République de	Revenu élevé
23	KWT	Koweït	Revenu élevé
24	LVA	Lettonie	Revenu élevé

Suite du tableau 2.2

	Code du Pays	Nom du pays	Classe
25	LTU	Lituanie	Revenu élevé
26	LUX	Luxembourg	Revenu élevé
27	MLT	Malte	Revenu élevé
28	MUS	Maurice	Revenu élevé
29	NLD	Pays-Bas	Revenu élevé
30	NZL	Nouvelle-Zélande	Revenu élevé
31	NOR	Norvège	Revenu élevé
32	OMN	Oman	Revenu élevé
33	PAN	Panama	Revenu élevé
34	POL	Pologne	Revenu élevé
35	QAT	Qatar	Revenu élevé
36	ROU	Roumanie	Revenu élevé
37	SAU	Arabie saoudite	Revenu élevé
38	SGP	Singapour	Revenu élevé
39	SVK	République slovaque	Revenu élevé
40	SVN	Slovénie	Revenu élevé
41	ESP	Espagne	Revenu élevé
42	SWE	Suède	Revenu élevé
43	CHE	Suisse	Revenu élevé
44	TTO	Trinité-et-Tobago	Revenu élevé
45	GBR	Royaume-Uni	Revenu élevé
46	USA	États-Unis	Revenu élevé
47	URY	Uruguay	Revenu élevé
48	COD	Congo, République démocratique du	Faible revenu
49	HTI	Haïti	Faible revenu
50	MOZ	Mozambique	Faible revenu
51	SDN	Soudan	Faible revenu
52	TJK	Tadjikistan	Faible revenu
53	DZA	Algérie	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
54	AGO	Angola	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
55	BGD	Bangladesh	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
56	BOL	Bolivie	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
57	KHM	Cambodge	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
58	CMR	Cameroun	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
59	COG	Congo, République du	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
60	EGY	Égypte, République arabe d'	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
61	SLV	El Salvador	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
62	GHA	Ghana	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
63	HND	Honduras	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
64	IND	Inde	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
65	KEN	Kenya	Revenu intermédiaire, tranche inférieure

Suite du tableau 2.2

	Code du Pays	Nom du pays	Classe
66	KGZ	République kirghize	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
67	MDA	Moldova	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
68	MNG	Mongolie	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
69	MAR	Maroc	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
70	MMR	Myanmar	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
71	NPL	Népal	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
72	NIC	Nicaragua	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
73	NGA	Nigéria	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
74	PAK	Pakistan	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
75	PHL	Philippines	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
76	LKA	Sri Lanka	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
77	TZA	Tanzanie	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
78	TUN	Tunisie	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
79	UKR	Ukraine	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
80	ALB	Albanie	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
81	ARG	Argentine	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
82	ARM	Arménie	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
83	AZE	Azerbaïdjan	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
84	BLR	Bélarus	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
85	BIH	Bosnie-Herzégovine	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
86	BWA	Botswana	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
87	BRA	Brésil	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
88	BGR	Bulgarie	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
89	CHN	Chine	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
90	COL	Colombie	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
91	CRI	Costa Rica	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
92	DOM	République dominicaine	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
93	ECU	Équateur	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
94	GAB	Gabon	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
95	GEO	Géorgie	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
96	GTM	Guatemala	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
97	IDN	Indonésie	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
98	IRQ	Iraq	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
99	JAM	Jamaïque	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
100	JOR	Jordanie	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
101	KAZ	Kazakhstan	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
102	LBN	Liban	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
103	MYS	Malaisie	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
104	MEX	Mexique	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
105	MNE	Monténégro	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
106	NAM	Namibie	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
107	MKD	Macédoine du Nord	Revenu intermédiaire, tranche supérieure

Suite du tableau 2.2

	Code du Pays	Nom du pays	Classe
108	PRY	Paraguay	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
109	PER	Pérou	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
110	RUS	Fédération de Russie	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
111	SRB	Serbie	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
112	ZAF	Afrique du Sud	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
113	SUR	Suriname	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
114	THA	Thaïlande	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
115	TUR	Turquie	Revenu intermédiaire, tranche supérieure

Par rapport à notre modèle de vulnérabilité énergétique (figure 1.8), notre base de données ne reconstitue pas en totalité le modèle initial. Le modèle se restreint à la disponibilité des données. Il est présenté dans la figure 2.3.

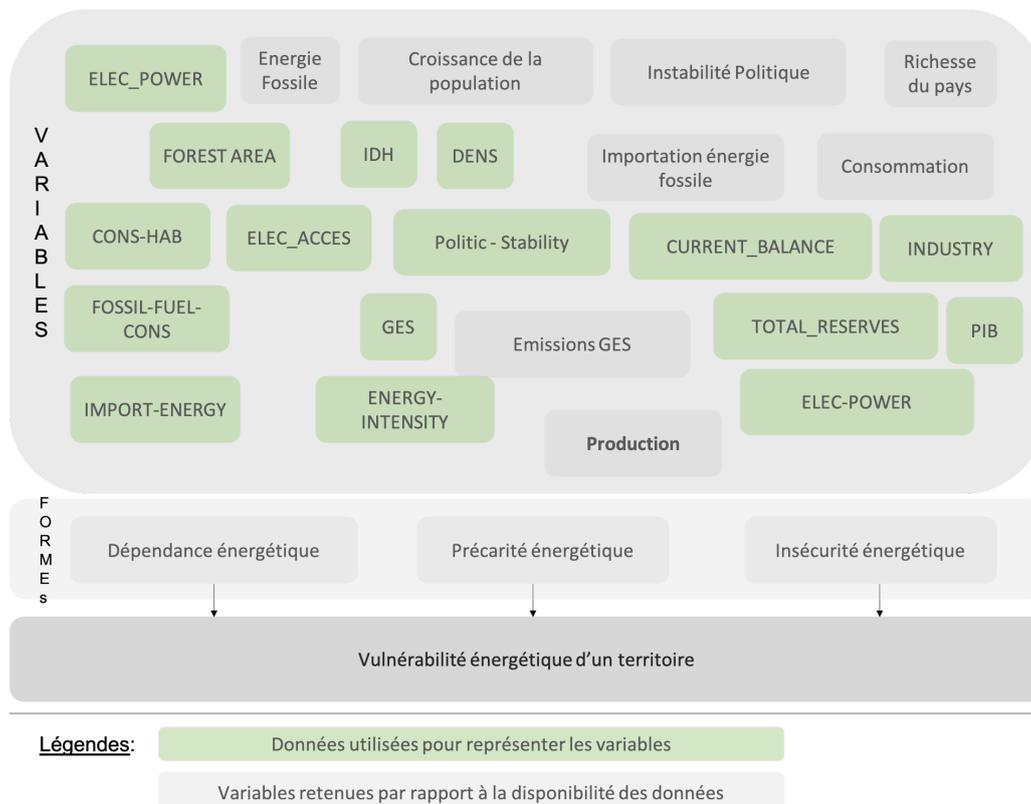


FIGURE 2.3 – Modèle de base pour la construction de l’indicateur de vulnérabilité énergétique. Source : Réalisation propre

2.3.2 Construction de l'indicateur de vulnérabilité énergétique "IVEN"

Après avoir construit la base de donnée, l'étape suivante consiste à synthétiser les informations du tableau de données. La méthode utilisée est l'ACP (*Analyse en Composantes Principales*) (ACP). L'ACP est une méthode statistique qui permet la visualisation et l'analyse d'un jeu de données multivariées ou multidimensionnelles. Des détails plus approfondis sont apportés en annexe B. L'ACP nous permet de créer un indicateur obtenu par l'équation suivante Tao et al. (2012); Praene et al. (2018) :

$$IVEN = \frac{\sum_{k=1}^j (C_{ki} \lambda_k)}{\sum_{k=1}^j \lambda_k} \quad (2.1)$$

Où C_{ki} est la coordonnée du pays i dans la composante k avec j le nombre de composantes principale retenue. Dans notre calcul, j est égal à 16. Nous choisissons en effet d'utiliser l'ACP non pas dans un objectif de réduction des dimensions mais plutôt de pondération des variables. λ_k est la valeur propre de la composante k .

2.3.3 Principaux résultats obtenus

2.3.3.1 Résultats d'ACP

Les résultats d'ACP mettent en lumière la ressemblance entre les pays qui sont constitués dans la base de données étudiées. Pour cela, l'ACP reforme des dimensions, qui vont permettre de mieux visualiser ces ressemblances. Nous avons pu avoir plusieurs compositions pour chaque dimension nouvellement créée, nous présentons ici quatre de ces dimensions.

- Les dimensions 1 et 2 nouvellement créées représentent 40,85 % de la variance totale. Le cercle des corrélations (figure 2.4) des dimensions 1 et 2 permet de mettre en avant plusieurs points.

Tout d'abord, la dimension 1 est corrélée positivement aux variables IDH, *FOSSIL – FUEL – CONS*, *ELEC – ACCES*, *CONS – HAB*, *ELEC – POWER*, et négativement avec la variable *ENR*. Cela signifie donc que, dans l'échantillon de pays étudié, le niveau de développement, l'accessibilité et la consommation d'énergie en général ne sont pas liées à la production d'énergie renouvelable. Ainsi, cela semblerait indiquer qu'un bon niveau de développement soit lié à un faible niveau d'*ENR* dans le mix électrique. Dans un deuxième temps, la dimension 2 est liée positivement aux variables *GDP*, *GES* et *TOTAL – RESERVES*. Cela permet d'affirmer que dans notre échantillon de pays, un bon niveau de développement économique est lié à de bonnes réserves énergétiques et à un niveau élevé de gaz à effet de serre. L'orthogonalité constatée entre les vecteurs *GDP* et IDH montre bien que le développement au sens de l'IDH diffère de la richesse économique représentée par le PIB (GDP).

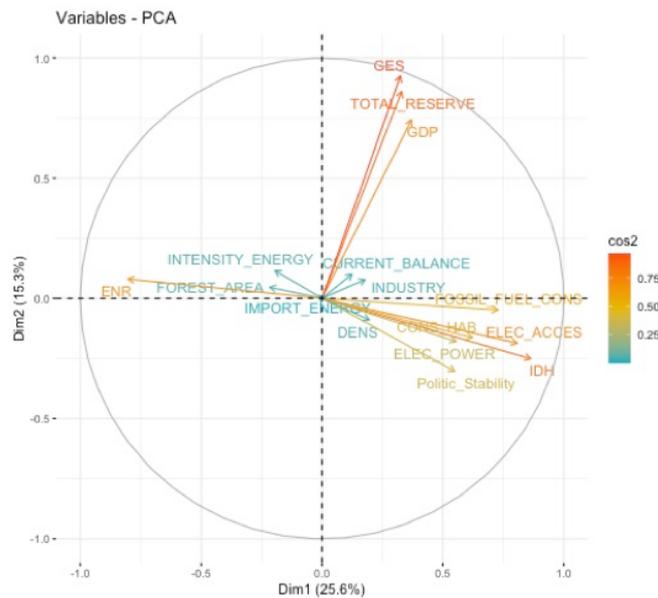


FIGURE 2.4 – Cercle de corrélation du plan formé par les dimensions 1 et 2. Source : Réalisation propre

Ensuite, dans le graphe des individus (figure 2.5), nous observons un premier groupe de pays (groupe 1) qui représentent une corrélation négative avec la dimension 1 à savoir : *COD* (Démocratique du Congo), *MOZ* (Mozambique), *TZA* (Tanzanie), *NGA* (Nigeria), *HTI* (Haïti), *SDN* (Soudan), *KEN* (Kenya), *NPL* (Népal), *PAK* (Pakistan), *GTM* (Guatemala), *GAB* (Gabon). Ce premier groupe a des valeurs fortes pour l'*ENR*, et faibles pour *IDH*, *ELEC – ACCES*, *PoliticS – tability*, *FOSSIL – FUEL – CONS*, *CONS – HAB*, *ELEC – POWER*.

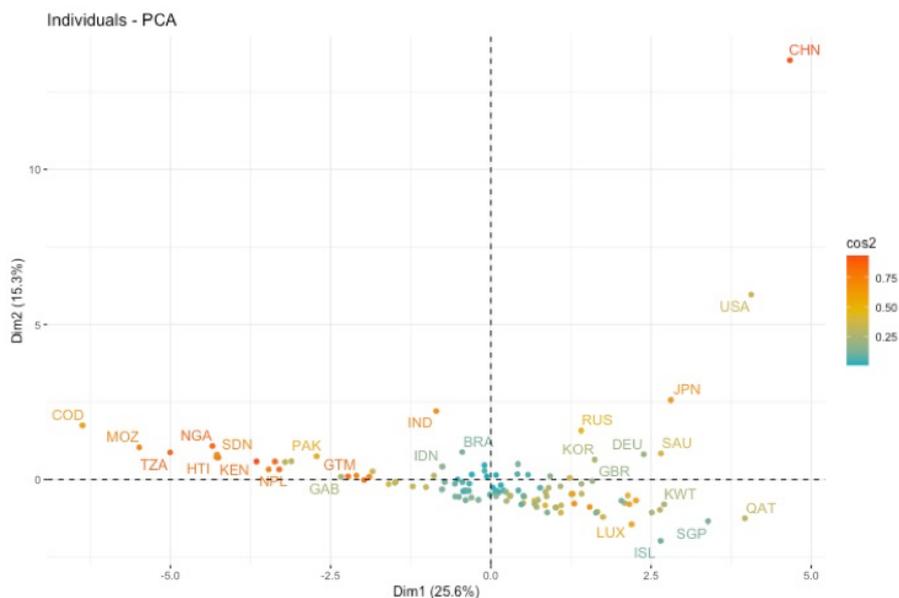


FIGURE 2.5 – Graphe des individus du plan formé par les dimensions 1 et 2. Source : Réalisation propre

Les données concernant ces pays confirment effectivement ces constats, ces pays ont un indicateur de *Politic – Stability* négatif ou égal à 0 avec un IDH compris très moyen ne dépassant pas les 0,7. La moyenne de la production d'énergie électrique d'origine fossile du groupe est de 23,59 % avec les valeurs extrêmes entre 5 % et 62 %. Aucun de ces pays n'a encore atteint un taux d'accès électrique à 100 %. La part de l'énergie renouvelable dans la production d'énergie électrique est assez importante dans ces pays, cela représente presque la moitié de leur mix électrique. Néanmoins, cette proportion n'a aucune influence sur leur performance dans l'indicateur IVEN parce que le taux d'accès à l'électricité n'est pas encore à son maximum, le besoin énergétique du pays et de l'ensemble de sa population n'est pas encore satisfait. Ce groupe 1 s'oppose au groupe 2 de pays formés par *QAT* (Qatar), *SGP* (Singapour), *ISL* (Islande), *LUX* (Luxembourg), *SAU* (Arabie saoudite), *JPN* (Japon), *RUS* (Russie), *KOR* (Corée), *GBR* (Grande-Bretagne) et qui sont corrélés positivement aux dimensions 1 et 2. Pour les pays du groupe 2, ce sont tous des pays classés pays à revenu élevé par la Banque Mondiale. On voit que ce groupe renseigne dans son ensemble des pays où l'IDH est très élevé, si l'on ne prend en compte que la moyenne du groupe par exemple qui est bien au-dessus des 0,89. Le taux d'accès à l'électricité de ces pays sont tous à 100 %. Ces pays sont soit de la région Europe-Asie centrale, soit de l'Asie de l'Est. On voit aussi que ces pays ont une stabilité politique positive et supérieure à 0, sauf pour trois d'entre eux (*KOR* (Corée), *RUS* (Russie), *SAU* (Arabie Saoudite)). Ce groupe démontre bien que lorsque la consommation d'énergie par habitant du pays est élevée, cela veut dire aussi que le pays arrive à satisfaire ce besoin par une grande production. Cette condition n'est satisfaite que par une grande pénétration de l'énergie fossile dans le mix énergétique du pays. De ce constat, on peut dire qu'une condition pour améliorer la qualité de vie de la population d'un pays est d'augmenter le taux d'accès à l'électricité. D'autres éléments montrent que ces pays sont cependant de différente taille : on a des îles (*JPN* (Japan), *SGP* (Singapore)), des petites îles (*ISL* (Islande)), de grand territoire (*RUS* (Russie), *GER* (Allemagne)). Beaucoup de travaux disent que la petite taille des îles est un frein à leur développement, nos résultats au contraire soulignent que l'effet de taille, ne devrait pas être impérativement un frein ou facteur influant dans le développement d'un pays. On trouve aussi deux grandes classes de pays dans ce lot : pays importateurs de pétrole et pays exportateurs. Une ressemblance constatée dans ce groupe de pays qui se démarquent du plan formé des dimensions 1 et 2 est sur leur situation géographique. En effet, on peut remarquer que ces pays se trouvent tous dans les régions Sud du monde : Asie du Sud, Afrique Sub-Saharienne et Amérique latine - Caraïbes. La figure 2.5 permet d'avoir cette vue dans son ensemble. On peut dire que le groupe 1 rassemble des pays en voie de développement.

- Pour continuer dans cette analyse des résultats d'ACP, en s'intéressant aux dimensions 3 et 4, nous pouvons voir que les variables qui sont bien représentées dans le cercle de corrélation de ce nouveau plan sont *IMPORT – ENERGY*, *INDUSTRY*. La variable *IMPORT – ENERGY* est négativement à la dimension 3, tout comme *INDUSTRY* à la dimension 4. La figure 2.6 représente le cercle de corrélation des variables dans ces dimensions. Ce nouveau plan renferme 25,5 % de l'inertie totale, dont 13,98 % par la dimension 3 et 11,52 % par la dimension 4.

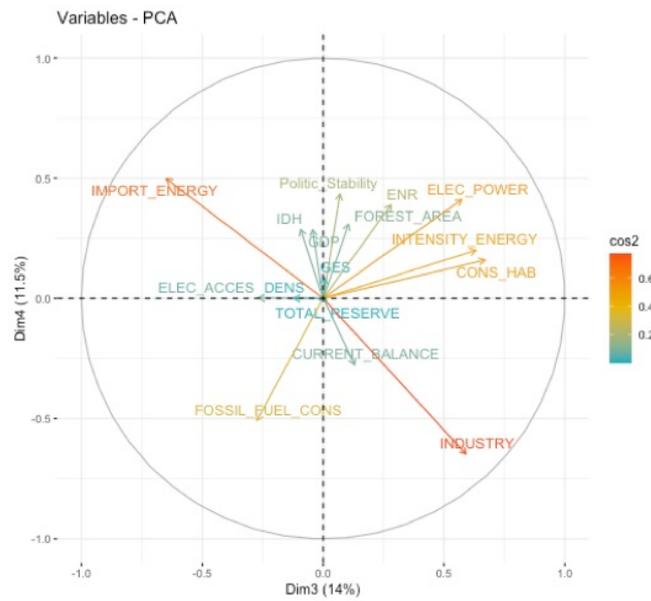


FIGURE 2.6 – Cercle de corrélation du plan formé par les dimensions 3 et 4. Source : Réalisation propre

Le plan formé par ses dimensions 3 et 4 met en évidence un grand nombre de pays, comme illustré dans le graphe des individus (figure 2.7). Cependant, certains de ces pays se trouvent trop près de l'origine ou présentent un faible coefficient de détermination (cos2), ce qui limite leur interprétation.

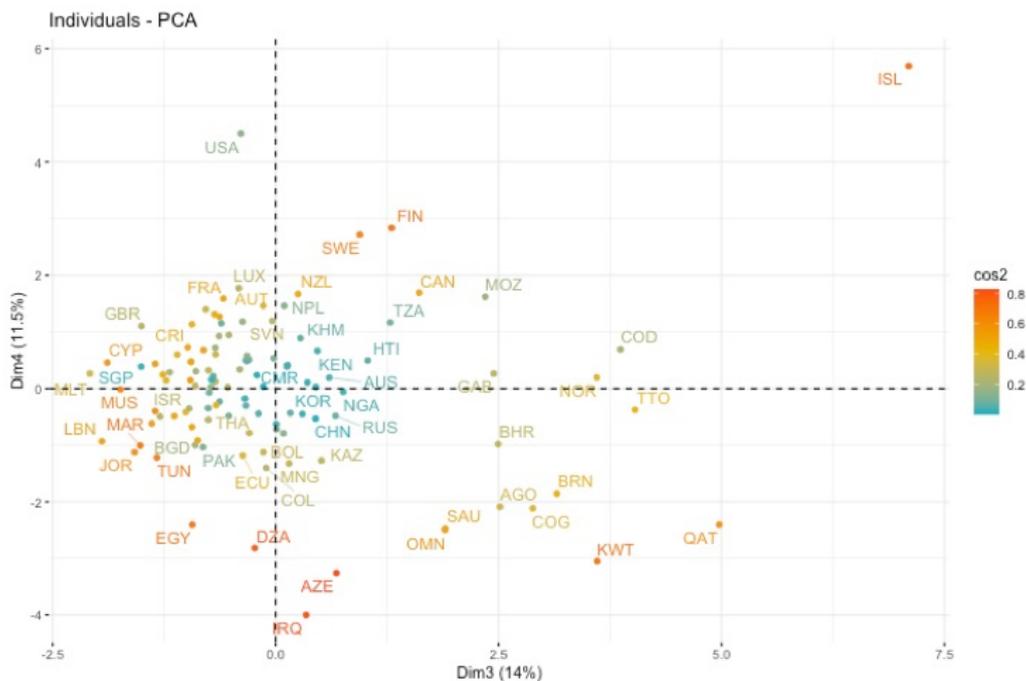


FIGURE 2.7 – Graphes des individus du plan formé par les dimensions 3 et 4. Source : Réalisation propre

Le graphe des individus permet de considérer de nouveaux groupes de pays, comme IRQ (Iraq), AZE (Azerbaïdjan), DZA (Algérie) qui sont fortement corrélés négativement à la dimension 4 et donc qui ont une valeur forte en *IMPORT – ENERGY* et *INDUSTRY*, ce sont tous des pays exportateurs de pétrole. SWE (Suède) et FIN (Finlande), CAN (Canada) : ont une valeur faible en *IMPORT – ENERGY* effectivement du fait que CAN lui dispose de ressources, et est lui-même exportateur, et SWE (Suède) et FIN (Finlande) pour leur part ont une pénétration considérable d'énergie renouvelable à hauteur de 50 % dans leur mix électrique. Ils ont une valeur faible pour leur importation d'énergie fossile. Dans la dimension 4, ces pays ont des valeurs fortes de la variable *INDUSTRY*. Les pays tels que MUS (Maurice) et MAR (Morocco), LBN (Liban) sont corrélés négativement à la dimension 3 tandis que NOR (Norway), TTO (Trinidad et Tobago), GAB (Gabon), COD (Démocratique du Congo), BHR (Bahrain) liés positivement à la dimension 3.

Le plan formé par les dimensions 3 et 4 ne conserve que le quart des informations contenues de la base de données. Nombreux pays qui apparaissent dans ce plan formé ne sont pas bien représentés. Cependant, nous avons pu identifier des caractères similaires qui méritent d'être soulevés. Dans ce groupe, on a une majorité de pays qui sont situés géographiquement dans le nord, et qui sont classés dans le groupe de pays développés. Ce plan de projection 3-4 nous permet alors de voir la ressemblance de ces pays, ce sont les pays comme FRA (France), CAN (Canada), BRN (Brunei), FIN (Finlande), CYP (Chypre)..., des pays de l'Europe et de l'Asie centrale, du nord et centre américain et les pays du Nord et Centre de l'Afrique. Ces pays se ressemblent par leur forte valeur IDH et leur taux d'accès à l'électricité élevée. Ensuite, on a des groupes de pays qui ont les mêmes caractéristiques comme des groupes de pays producteurs de ressources fossiles. La situation politique n'est pas homogène, on a des pays avec des indicateurs positifs, d'autres avec des indicateurs négatifs. Dans l'ensemble, les groupes de pays qui sont bien représentés dans le graphe des individus des dimensions 3 et 4 sont les pays développés ou émergents. Ils ont soit déjà atteint leur taux d'accès à l'électricité à 100 % soit presque (minimum 99 %). Le plan permet de voir des groupes de pays ayant une ressemblance dans la variable IDH qui est assez élevée pour une moyenne de 0,8 pour tout le groupe, leur IDH est au-dessous des 0,5. Le graphe des individus nous montre des pays qui sont opposés comme TTO et MUS. Ces deux pays sont des îles, TTO (Trinidad et Tobago) est placé 5^e producteur mondial en gaz naturel liquéfié, tandis que MUS (Maurice) un grand importateur d'énergie fossile.

2.3.3.2 L'indicateur IVEN

La construction des indicateurs par le biais de l'ACP nous a permis d'obtenir les indicateurs qu'on a nommés IVEN. Les 115 pays étudiés ont été classés selon l'indicateur que le pays a obtenu 2.8. Le classement reflète les ressemblances qu'on a déjà observées à travers les résultats des ACP.

- Les indicateurs obtenus montrent les dix pays qui ont obtenus les meilleurs scores sont : CHN (Chine), ISL (Islande), SGP (Singapour), USA (Étas Unis), TTO (Trinidad et tobacco), JPN (Japon), QAT (Qatar), DEU (Allemagne), BHR (Barhreïn), KOR (Corée du sud). Ce sont des pays qui ont été bien représentés soit dans le plan de dimensions (1,2) ou (3,4), des résultats d'ACP avec des valeurs fortes en *ELE – POWER* et *CONS – HAB*. Cela veut dire que ces pays sont tous en grande production électrique, soit qu'ils

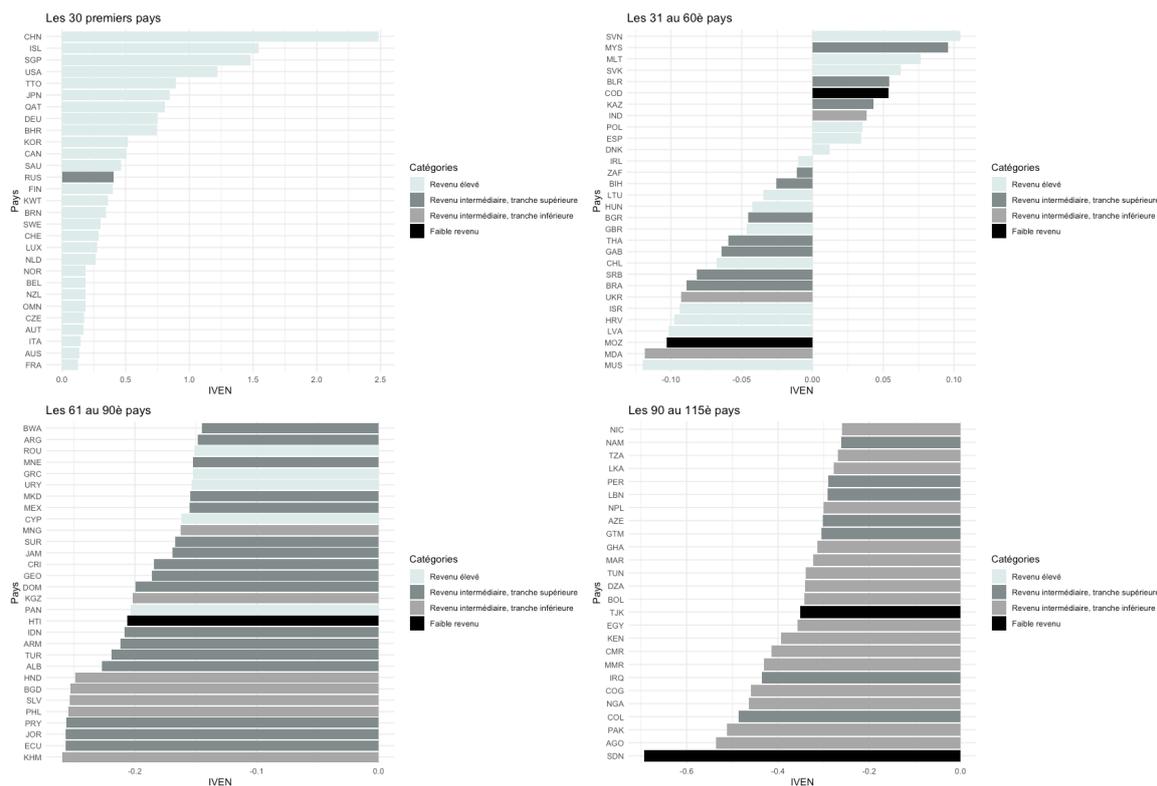


FIGURE 2.8 – Classement des pays selon leur indicateur IVEN. Source : Réalisation propre

ont une grande production électrique avec une grande importation d'énergie fossile, mais qu'ils sont économiquement forts (PIB élevé), soit ce sont des pays exportateurs avec toujours une grande capacité de production et donc une consommation par habitant élevé, qui fait un taux d'accès à l'électricité élevé.

- Les pays qui ont été classés parmi ceux qui ont obtenu les scores les plus bas sont présentés dans la figure 2.8, 4^e cadran. Il a été observé que les pays qui ont obtenu de faibles valeurs de l'indicateur IVEN sont précisément ceux qui traversent des périodes de perturbations et de conflits sur leur territoire, ce qui se traduit par une instabilité politique notable. Cela renforce le fait que l'instabilité politique est un facteur déterminant de la situation de vulnérabilité énergétique d'un territoire.
- L'IVEN catégorise les pays en deux groupes : les pays développés, qui regroupent généralement les pays du Nord comme l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Asie centrale et est à celui des pays du sud, en voie de développement qui sont l'Afrique Sub-Saharienne, l'Asie du sud, l'Amérique du sud et Caraïbes. Cela montre le contraste nord/sud existant dans le monde et met en relief des pays du sud en retard de développement et qui connaissent une situation de précarité et vulnérabilité énergétique plus importante que ceux du nord, développés. La figure 2.9 démarque ce constat, on y voit clairement qu'un découpage se fait entre les pays du nord et du sud. Les pays du sud sont sur la carte dans une tendance plus claire que ceux du nord.
- Les pays qui sont classés à faible revenu par world data banque obtiennent indéniablement un IVEN très faible, de même pour certains pays à revenu intermédiaire, tranche inférieure.

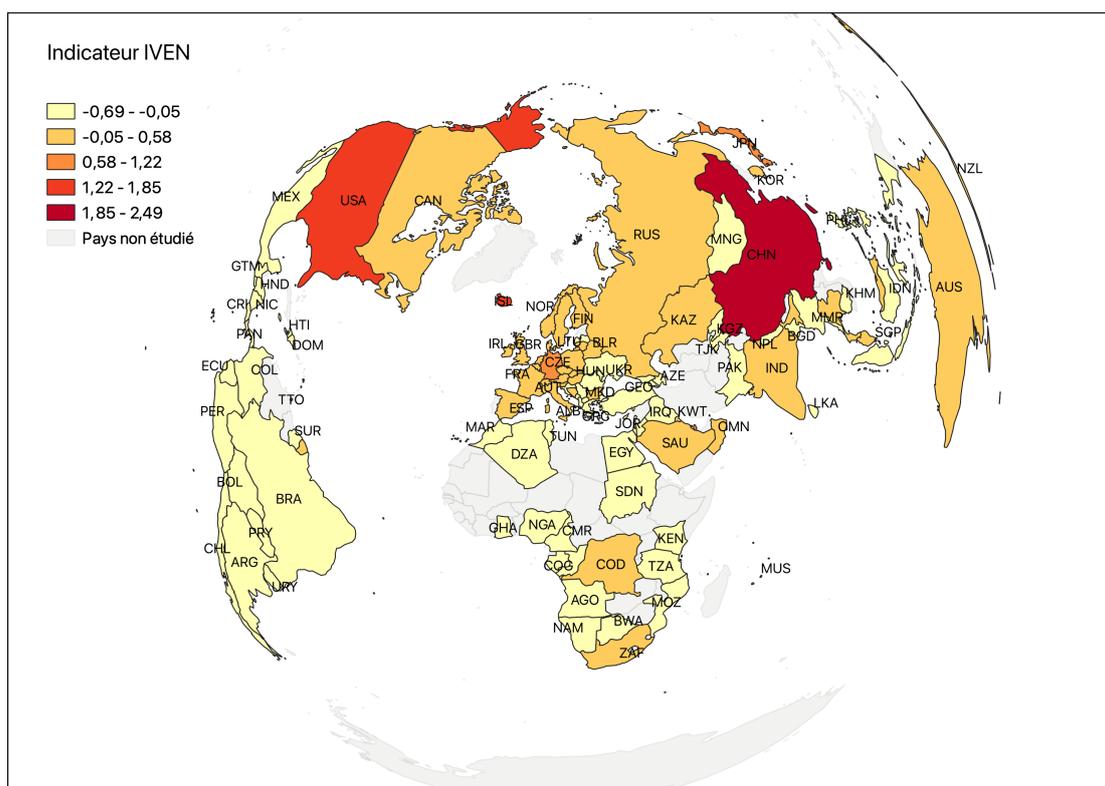


FIGURE 2.9 – Cartographie de l’indicateur de vulnérabilité énergétique des pays étudiés pour l’année 2014. Source : Réalisation propre

- Dans le cas des pays développés, les pays classés à revenu élevé devraient majoritairement avoir une valeur de l’IVEN élevée. Par contre, les résultats montrent que certains de ces pays ont obtenu une valeur faible d’IVEN minimum $-0,4$. Ce constat nous guide dans la compréhension du phénomène de vulnérabilité énergétique. Elle ne touche pas que les pays pauvres, mais peuvent aussi atteindre les pays riches.

L’ensemble des résultats obtenus dans la construction de notre indicateur de vulnérabilité IVEN des différents pays étudiés nous a permis de mettre en relief que plus de la majorité des pays étudiés (63 %) ont obtenu un IVEN au-dessous de 0 comme nous le montre la figure 2.10.

2.4 Limites des méthodes de construction d’indicateurs de vulnérabilité énergétique

Malgré le grand intérêt des diverses institutions et chercheurs sur la définition de la vulnérabilité énergétique, le terme reste encore très vague et chacun le définit selon leur finalité de définition, et des données qu’ils ont à leur disposition par rapport à la situation de la région, communauté ou pays qu’ils souhaitent étudier. Les approches existantes du cadre de la vulnérabilité énergétique restent encore dans un cadre très statique et déterministe, basées sur une conceptualisation plus large de la pauvreté énergétique ou sur l’introduction d’indicateurs supplémentaires (principalement des évaluations autodéclarées et, dans certains cas, des mesures

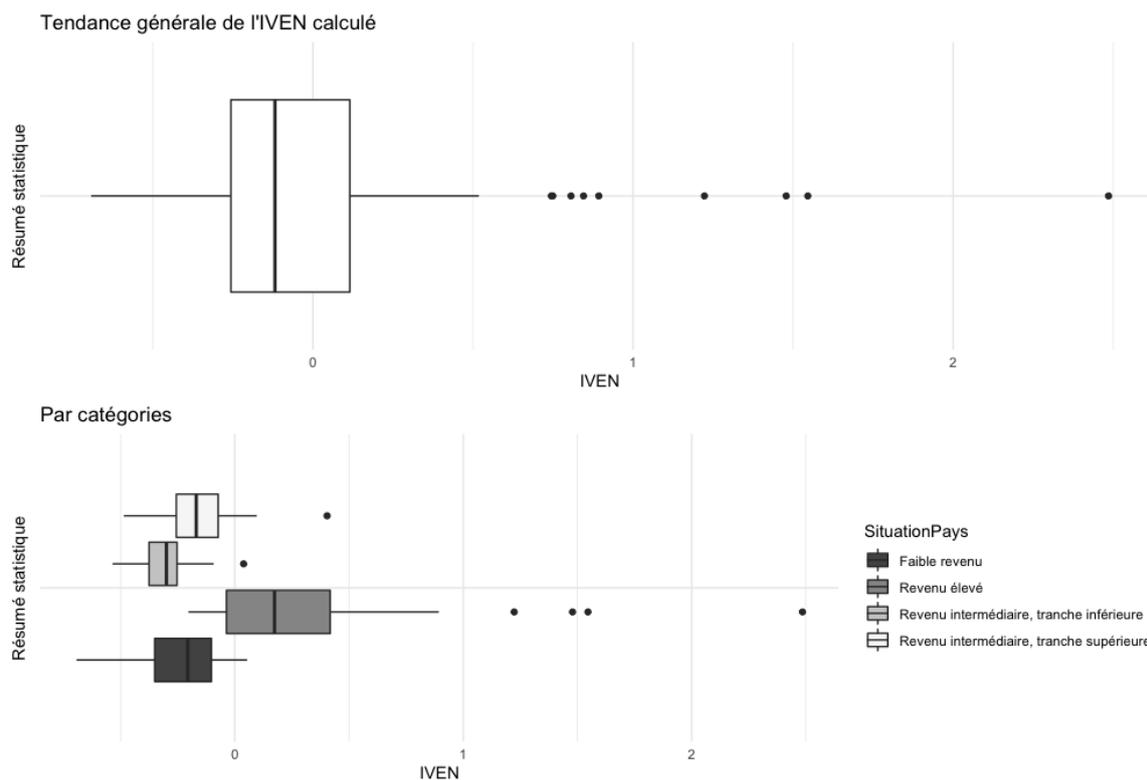


FIGURE 2.10 – Tendances générales des valeurs prises par les IVEN de l'ensemble des pays étudiés. Source : Réalisation propre

directes) [Papada and Kaliampakos \(2019\)](#). Les indicateurs construits sont relatifs aux pays étudiés, la même valeur d'un indicateur énergétique donné n'a pas nécessairement la même signification pour deux pays différents. Cette signification dépendra de la situation du pays comme son état de développement, la nature de son économie, sa géographie, des ressources énergétiques dont il dispose, etc [AIEA \(2008\)](#). Dans l'analyse de 63 indicateurs de mesure de la sécurité énergétique par exemple, les résultats ont montré qu'il existe un manque de transparence dans les méthodes adoptées comme la normalisation des données, la pondération, etc, ce qui met en doute les résultats obtenus [Gasser \(2020\)](#). À ce jour, il n'y a pas de consensus méthodologique sur la manière d'évaluer la vulnérabilité, que ce soit sur la collecte de données comme à propos de leur agrégation dans un index synthétique [Becerra \(2012\)](#). L'approche analytique portée par la vulnérabilité ne donne pas la réponse attendue dans la compréhension de l'enjeu, car elle est plutôt conceptuelle et implique qu'il faut encore qu'on synthétise les indicateurs obtenus pour avoir une interprétation globale [Barroca et al. \(2013b\)](#). La méthodologie de construction d'indicateur, basée sur des analyses statistiques et méthode d'agrégation, ne prend pas en compte les aspects dynamiques du territoire [Brisepierre \(2012\)](#). Le territoire est plus que la somme de ses composantes structurelles, géographiques, sociales, économiques, etc qui sont en interaction et nécessite de prendre en compte sa dimension dynamique. Ainsi, les indicateurs structurels ne suffisent pas à évaluer le territoire et nécessitent de faire appel à la sociologie non quantitative, et de se confronter au terrain afin d'intégrer à l'évaluation l'histoire, la culture, l'identité du territoire, la stratégie politique envisagée [Villar and David \(2014\)](#). La caractérisation de la dynamique nécessite de prendre en compte cet aspect.

2.5 Conclusion du Chapitre

L'objectif de ce chapitre a été double. D'abord de faire une revue bibliographique des méthodes de définitions de la vulnérabilité énergétique existantes. Ensuite de proposer un indicateur de vulnérabilité énergétique, à travers les connaissances acquises sur le sujet. La lecture des travaux existants a montré que la tendance de définition et de caractérisation de la vulnérabilité énergétique est jusqu'ici basée sur la construction d'indicateurs. Les principaux résultats par la suite nous permettent de dire que la vulnérabilité énergétique est une situation qui peut toucher n'importe quel pays du monde. Que le pays soit riche ou pauvre, exportateur ou importateur de pétrole, la vulnérabilité peut y être présente. La vulnérabilité énergétique ne dépend pas d'une seule dimension d'un territoire mais touche toutes les dimensions, dès que le pays accuse encore des formes de fragilité dans une de ses dimensions, il est sensible à cette vulnérabilité. Si le pays est riche, mais reste très dépendant des importations dans son mix énergétique, le pays devient vulnérable. Dans un autre cas, même si le pays accuse un taux de pénétration de plus de 50% en énergie renouvelable dans son mix électrique par exemple, ce qui devrait être un point positif dans sa vulnérabilité énergétique, mais que ce même pays a encore un taux d'accès à l'électricité très bas, la part importante en énergie renouvelable n'aura aucun effet sur sa vulnérabilité énergétique affaiblie par le nonaccès à l'électricité de sa population. Un pays exportateur qui accuse des instabilités politiques malgré le fait de détenir une réserve d'énergie fossile peut encore être en situation de vulnérabilité énergétique. Beaucoup de facteurs entre en jeu pour influencer la vulnérabilité énergétique d'un pays. Ces prémices de résultats permettent déjà de soutirer des implications qui peuvent informer les décideurs et les concepteurs de planifications territoriales, énergétiques et les institutions étatiques dans leur prise de décision. En effet, grâce aux résultats obtenus de ces premiers essais de caractérisation, on peut déduire que le taux d'accès à l'électricité peut être un objectif à atteindre pour un territoire afin d'atteindre un niveau de développement élevé et une bonne qualité de vie de la population. Et pour atteindre ce taux, il faut que la production d'énergie électrique soit élevée, ce qui va augmenter aussi la consommation par habitant du pays. Le niveau de développement d'un pays est aussi conditionné par sa situation politique. Plus le pays a une bonne gouvernance et une situation politique stable, et plus la qualité de vie y est élevée. Cette situation politique permet de mettre en place une politique énergétique qui pourra permettre aux pays d'atteindre cette qualité de vie. En effet, on constate que les pays qui sont corrélés positivement à la dimension 1 connaissent aussi un taux d'accès à l'électricité élevée et une consommation en énergie fossile corrélée avec la consommation par habitant qui est en relation positive. Les résultats obtenus confirment aussi la limite des indicateurs statiques pour la mesure de la vulnérabilité énergétique. Une classification ou comparaison est la seule action qu'on puisse faire des résultats obtenus, on ne pourra pas reporter le calcul vers d'autres pays, n'ayant pas été dans la base de données construite au départ.

CHAPITRE 3

Approche dynamique de la vulnérabilité énergétique

Un système compliqué, on peut le simplifier pour découvrir son intelligibilité. Un système complexe, on doit le modéliser pour construire son intelligibilité

Le Moigne

Sommaire

3.1	Introduction du chapitre	58
3.2	La dynamique des systèmes par le portrait de phase	61
3.2.1	Définition du portrait de phase dans la littérature	61
3.2.2	Informations obtenues d'un portrait de phase	65
3.3	Mise en œuvre de l'approche dynamique pour mesurer la vulnérabilité énergétique	68
3.3.1	Intégration du paramètre temps	70
3.3.2	Modélisation de la vulnérabilité énergétique par analogie à l'équation de Lorenz	70
3.3.2.1	Choix du système et des variables	71
	Description de l'équation de Lorenz	71
	Description des variables mises en jeu	73
3.3.2.2	Mise en œuvre de la modélisation	73
	Description du travail à faire	73
	Explication des variables x , y et z	74
	Optimisation de l'équation de Lorenz, présentation des résultats et validation	76
3.3.3	Modélisation de la vulnérabilité énergétique par construction de portrait de phase issu d'indicateurs	80
3.3.3.1	Construction du portrait de phase	81
	Construction du portrait de phase à partir de variables simples.	82
	Construction du portrait de phase à partir d'un indicateur synthétique.	86
3.3.3.2	Analyse des portraits de phase	91
	La position des pays dans le bassin d'attraction.	91
	Dynamique dans le système de territoire.	100
3.4	Conclusion du chapitre	103

3.1 Introduction du chapitre

Le territoire est aujourd'hui un sujet qui est au cœur des préoccupations scientifiques, politiques et économiques mondiales. Le territoire est défini comme un système complexe, constitué par trois entrées en interrelation et qui évoluent dans le temps. Il s'agit de l'espace géographique, du système de représentation de l'espace géographique et, enfin, du système des acteurs qui agissent directement ou indirectement dans cet espace géographique [Moine \(2006\)](#). La dimension sociale, qui se retrouve dans les trois décompositions du territoire, est de plus en plus intégrée dans les études et recherches scientifiques. Cependant, l'étude de cette dimension sociale est très difficile. En effet, les systèmes sociaux sont des systèmes complexes qui possèdent des comportements dynamiques rendant leur compréhension difficile [Bérard \(2007\)](#). Alexandre Moine a défini cette complexité comme *"un moyen de rendre concret ce qui nous entoure, sans le caractériser de manière définitive, mais en ouvrant la possibilité à de multiples interprétations"* [Moine \(2004\)](#). C'est ce qui a donc permis de révolutionner l'approche des sciences sociales par des approches empruntées à la dynamique des systèmes permettant d'intégrer ainsi la complexité du système mais également la notion du temps. La dynamique des systèmes est devenue alors un outil d'investigation des recherches dans les sciences sociales [Forrester \(1989\)](#).

Pour mieux parler de dynamique des systèmes, il est primordial de bien définir le système. Un système est défini comme un ensemble d'éléments en interactions, une totalité organisée, plus ou moins ouverte sur l'environnement [Dauphiné \(2003\)](#). C'est *"un ensemble organisé de processus liés entre eux par un ensemble d'interactions à la fois cohérent et souple pour le rendre capable d'un certain degré d'autonomie"* qu'il n'est pas facile à interpréter, à évaluer ni à projeter dans le futur à cause des variables interreliées qui le composent [Dantas and Point \(2009\)](#). Pour faire court, la définition usuelle du mot système est *"un ensemble d'éléments ou objet d'observation en interaction dynamique et organisé en fonction d'un but"* [Cambien \(2008\)](#). La description des principales caractéristiques et propriétés des systèmes peuvent enrichir considérablement ces définitions pour mieux les comprendre. Le système est en constante relation avec son environnement : soit c'est le système qui modifie son environnement (on parle alors d'environnement passif), soit c'est son environnement qui agit sur lui (on parle alors d'environnement actif). Connaître l'environnement du système est un point clé pour son étude. Le système peut être décrit aussi par ses composants, les relations entre ses composants, leurs frontières. Ces composants intègrent trois idées clés : la complexité, le rôle essentiel des interactions, et enfin l'organisation. Le système peut être décomposé en sous-système, de son caractère hiérarchisé en niveaux d'organisation [Cambien \(2008\)](#). Ensuite, les systèmes sont finalisés : pour des systèmes en équilibre par exemple, ils ont la capacité de maintenir leur équilibre par des phénomènes de régulation. Enfin, les systèmes sont auto-organisateurs : ils possèdent la double capacité à l'adaptabilité et au maintien de la cohérence interne. Il est aussi important de souligner différents champs lexicaux liés au système : l'analyse de système, la théorie des systèmes, l'approche systémique. Ce sont des termes qui sont bien différents de la dynamique des systèmes. En effet, ces termes qui appartiennent au même champ lexical renvoient plus ou moins directement à la systémique en général, alors qu'ils recouvrent des réalités très différentes. Il existe une grande confusion autour de ces notions : bien souvent, un mot est utilisé pour un autre, le même mot, à l'inverse, est employé pour désigner des notions très différentes, ce qui fait que les théories, les méthodes et les outils se confondent entre elles [Cambien \(2008\)](#). Quelques éclaircissements

de ces concepts sont apportés ci-dessous.

- L'approche systémique est l'analyse des systèmes. C'est une méthode qui comprend trois phases : l'étude des éléments, des structures et des relations entre les variables (structure fonctionnelle), les espaces (structure spatiale) et enfin l'étude de la dynamique du système, c'est-à-dire de ses relations avec son environnement [Dauphiné \(2003\)](#).
- La théorie des systèmes ou la systémique, quant à elle, est comme toutes les théories un ensemble de lois, d'ordre très générales, comme la théorie générale des systèmes par exemple. La théorie des systèmes est une théorie scientifique où le premier exposé global et formulation ont été faits par Ludwig Von Bertalanffy [Bertalanffy \(1972\)](#).
- Au-delà d'une simple technique, d'outil de simulation, la dynamique des systèmes permet d'étudier le mouvement, le changement, l'évolution, en agrégeant : le comportement dynamique de systèmes complexes dont l'objectif est de procéder à des simulations pour analyser, comprendre et éventuellement prévoir le comportement des systèmes [Cambien \(2008\)](#).

Étudier la dynamique des systèmes revient à modéliser un système dans le but de fournir un modèle aussi formalisé et plus, un modèle dynamique susceptible d'être écrit en langage informatique, sur lequel on peut se livrer à des simulations [Chamussy et al. \(1984\)](#). La dynamique des systèmes est donc une technique, un langage pour simuler un ensemble d'équations de stocks et de flux [Dauphiné \(2003\)](#). C'est une technique de modélisation et de simulation qui favorise une meilleure appréhension des systèmes complexes et donne des orientations sur les prises de décisions [Bérard \(2007\)](#). Comme les systèmes sociaux sont des systèmes complexes, Aracyl a apporté une précision dans cette définition en définissant la dynamique des systèmes comme une méthodologie pour construire des modèles de systèmes sociaux [Aracyl \(1984\)](#), une tentative de traduire par des moyens techniques, dans un langage formel qui est celui des mathématiques, les modèles abstraits (verbaux ou mentaux) des systèmes sociaux [Cambien \(2008\)](#). En science sociale, on ne dispose pas de laboratoire pour mener des expériences, on ne peut pas créer la réalité ni la reproduire. De ce fait, la simulation y prend une place très importante. La dynamique des systèmes est un outil précieux des sciences sociales pour faire des simulations et devient un outil d'aide à la gestion. En effet, dans le travail de Dantas et Point par exemple, le recours à la dynamique des systèmes a permis de modéliser l'ensemble des interactions régissant la gestion du sol urbain afin de mieux appréhender leur complexité, mais aussi d'évaluer et d'anticiper les conséquences de l'adoption de politiques de maîtrise de l'étalement urbain et de valorisation économique des milieux naturels par les pouvoirs publics locaux [Dantas and Point \(2009\)](#). L'usage de la dynamique des systèmes passe ainsi par les modèles, des modèles qui sont en fait la représentation d'un système, concret ou réel par un objet formel, et qui permet de réfléchir et agir sur ce réel [Armatte and Dalmedico \(2004\)](#). Le modèle possède trois caractéristiques : son réductionnisme (seules quelques caractéristiques du réel sont saisies dans le modèle) ; son parti pris (la représentation est orientée par les outils de l'observation et de la pensée théorique, mais aussi par les objectifs du modélisateur). Enfin, sa réversibilité : le modèle est à la fois abstraction d'une réalité préexistante et prototype ou support d'une construction à venir, il peut être l'original ou la copie, l'archétype ou la réalisation. En résumé, il existe aujourd'hui un courant de pensée transdisciplinaire dans la science sociale, dont les points communs aux différentes disciplines sont les principes d'analyse et les modes de représentation consistant à aborder un phénomène comme un ensemble organisé dont les états résultent de l'interaction dynamique des composants et de l'ensemble avec son environnement. Ce paradigme facilite le

passage d'un monde fragmenté par l'analyse cartésienne à celui des interdépendances [Moine \(2007\)](#). La figure 3.1 donne un aperçu général des liens entre les différents éléments qu'on rencontre dans le paradigme de la systémique et mettent en relief la position de la dynamique des systèmes dans cet ensemble.

La définition de la vulnérabilité énergétique des territoires par la dynamique des systèmes est au cœur de ce chapitre. Plusieurs étapes ont été entreprises à ces fins. Dans un premier temps, on proposera de définir l'approche de la dynamique des systèmes par le portrait de phase, une méthode bien connue et déjà utilisée dans les sciences dures. Ensuite, nous entamerons des analyses de la vulnérabilité énergétique à travers différents moyens en faisant une analogie avec des systèmes déjà existants ou encore par construction d'ensemble de système de couple de variable / dérivée pour pouvoir appliquer la méthode de portrait de phase dans l'analyse de la vulnérabilité énergétique.

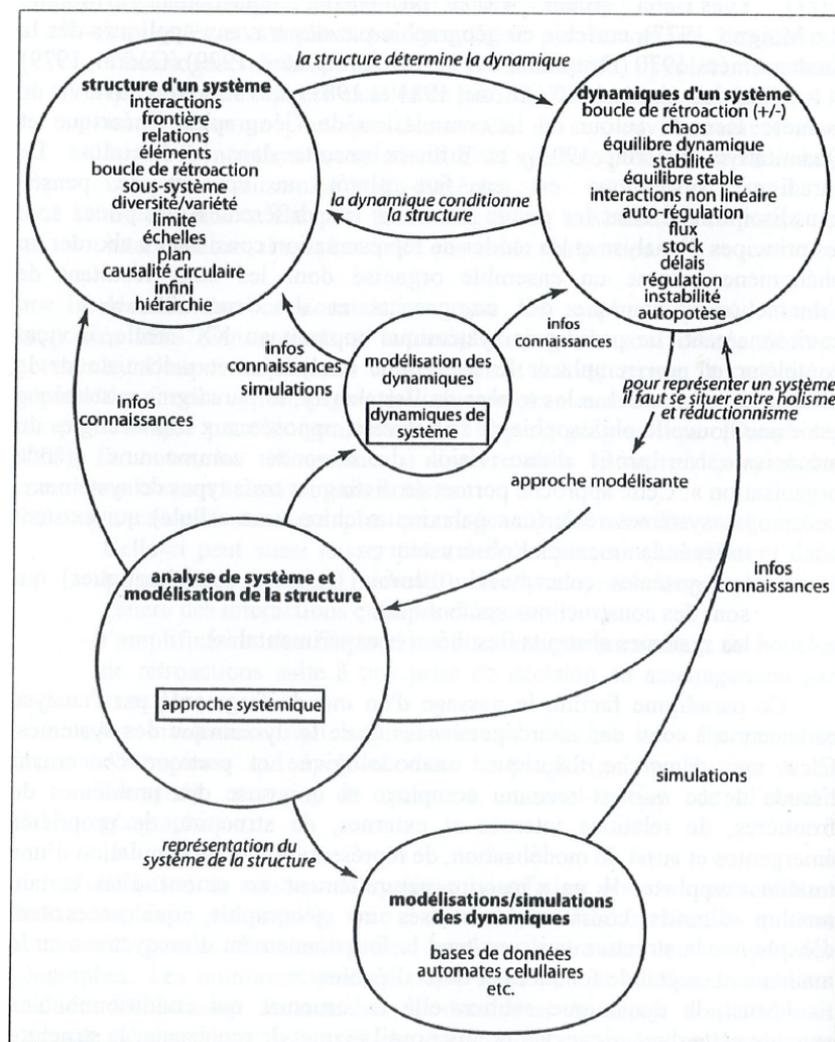


FIGURE 3.1 – Paradigme de la systémique. Source : [Moine \(2007\)](#)

3.2 La dynamique des systèmes par le portrait de phase

3.2.1 Définition du portrait de phase dans la littérature

Le portrait de phase est l'ensemble des trajectoires de phase possible d'un système dynamique dans un plan de phase [Gié and Sarmant \(1992\)](#) (figure 3.3.c). La notion du système dynamique est un formalisme qui permet de décrire de nombreux phénomènes partageant certaines caractéristiques communes, qu'il s'agisse d'objets du monde réel, tels que les systèmes mécaniques, chimiques, économiques ou d'objets purement mathématiques [Arrowsmith and Place \(2001\)](#). Tout élément dont l'état évolue au cours du temps est appelé système dynamique. L'état est l'ensemble des informations qui caractérise le système, il permet de prédire son évolution [Bonnet \(2008\)](#). L'état du système est variable, il varie au cours du temps. On l'appelle aussi variable d'état. Un système peut être défini par plusieurs variables d'état. Ces variables d'état sont mises en relation, ou décrites, par un ensemble fini d'équations et prennent des formes mathématiques diverses (équations différentielles, équations aux dérivées partielles, fonctions). Ainsi, un système dynamique, dans son acception générale, est défini par un système d'équations différentielles [Birkoff \(1912\)](#). Pour rappel, notons qu'une équation différentielle est une équation, qui implique une ou plusieurs dérivées d'une fonction inconnue par rapport à une ou plusieurs variables [Picard \(2019\)](#). Les équations permettent de connaître l'évolution du système à un instant donné, d'où leurs noms : équations d'évolution. Elles font passer les variables d'état du système d'un instant initial à un instant final [Ginoux \(2005\)](#). Par exemple, si on prend le cas d'une balle en chute libre dans un champ de pesanteur uniforme. Un élément-clé qui permet de définir l'état de la balle serait sa position par rapport au sol. Mais seule, cette information ne peut suffire, on doit connaître aussi la vitesse de la balle qui permettrait de savoir si elle est en mouvement ou immobile par rapport au sol. L'état de la balle est donc le couple de variables : position et vitesse. Avec la position et la vitesse de la balle à un instant donné, on peut calculer la nouvelle vitesse et la nouvelle position de la balle à un instant ultérieur par son équation horaire¹. Ce calcul définit la manière dont l'état évolue au cours du temps : c'est la loi d'évolution du système. Dans cet exemple, l'état du système peut être calculé à des intervalles très petits ou infinitésimaux, ce qui veut dire que le temps est en grandeur continue, et dans ce cas, on parle de système dynamique continu [Bonnet \(2008\)](#). À l'inverse, un système dynamique peut aussi être discontinu, on parle de systèmes dynamiques discrets. Dans ce cas, le temps est discret, c'est-à-dire que les changements d'états sont obtenus par itération ou à intervalles réguliers (toutes les deux minutes, toutes les heures). La figure 3.2 résume l'exemple du système de balle en chute libre qu'on a présenté ci-dessus. On peut y voir différents instants où on dispose des variables d'état du système, c'est-à-dire la position et la vitesse de la balle pour un instant donné. Les deux graphes présentent l'évolution de la position en fonction du temps dans le premier graphe, et en fonction de la vitesse dans le deuxième.

Cet exemple permet de voir la logique d'études de phénomène physique au temps du siècle précédent. Cela consistait par la définition de celui-ci à l'aide des grandeurs physiques, ensuite la mise en équation de ces grandeurs physiques en fonction du temps dans un but d'observer l'évolution temporelle de ces grandeurs [Letellier and Maquet \(2006\)](#). Mais les choses ont changé depuis que l'étude des phénomènes a rencontré de nouveaux défis dans les années 30, avec les travaux d'Henri Poincaré. Ces travaux visaient à relier la résolution des équations de mouvement

1. L'équation horaire est une loi physique sous forme d'équation qui permet de définir le mouvement d'un corps, dans cet exemple le chute libre

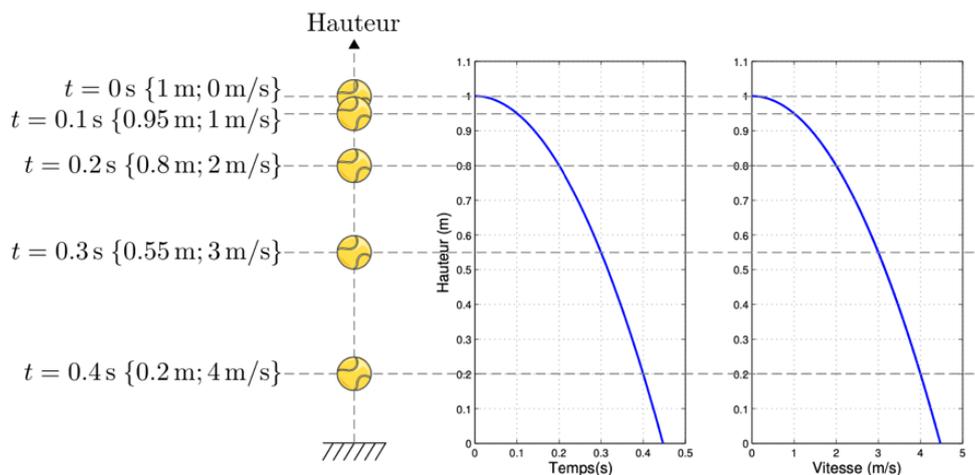


FIGURE 3.2 – Un système dynamique continu : différents états d’une balle au cours de sa chute. source : [Bonnet \(2008\)](#)

à des investigations plus vastes en introduisant de nouveaux concepts mathématiques dans les systèmes dynamiques, tels que l’espace des phases et le chaos déterministe. Ces théorèmes sont devenus les fondements de la recherche au cours du vingtième siècle [Boi and Bois \(2009\)](#).

Chaque état instantané d’un système dynamique est représenté par un point dans l’espace des états du système, aussi appelé "espace de phase" [Pezard and Nandrino \(2001\)](#). L’espace de phase est un outil d’observation d’un système ou d’un objet. Un système de coordonnées est un repère cartésien en 1, 2 ou 3 dimensions (x, y, z) avec éventuellement une dimension supplémentaire qui est le temps. On a donc affaire à trois variables, ou trois dimensions représentées par trois axes. On passe à la notion d’espace des phases en représentant ces trois axes par un seul axe, un point sur cet axe représente l’état du système en lien avec la position du point observé. On peut avoir une représentation dans un plan en observant la position et la vitesse, c’est le deuxième niveau de définition de l’espace des phases. L’espace des phases ou encore appelé plan de phases (en science physique) est donc un support graphique de la trace de trajectoire ou courbe qui permet de décrire un système dynamique et suivre son évolution [Ricardo \(2009\)](#). C’est un plan mathématique abstrait, dont l’axe de coordonnées comporte la valeur du niveau d’état du système et de sa dérivée : chaque valeur d’un niveau du système correspond au point du plan de phase ayant pour coordonner le couple suivant : valeur du niveau d’état (x) et la dérivée (dx) (valeur changeante) à un moment donné (t) [Shakhovska et al. \(2017\)](#). La notion de point représente ici, l’état du système dynamique, il se situe dans l’espace qui contient toutes les combinaisons des états possibles du système [Bonnet \(2008\)](#). Les coordonnées sont les composantes de l’état qui définissent le système. Pour illustration, en reprenant l’exemple de la balle en chute libre, l’espace de phase sera un plan formé par le couple position-vitesse de la balle. Ce plan est visible sur la figure 3.2, graphique de droite. Enfin, un élément clé dans la compréhension de la définition de portrait de phase est la trajectoire de phase. Elle est définie comme étant la trajectoire des points de représentation sur le plan de phase [Shakhovska et al. \(2017\)](#). La trajectoire de phase est une courbe tracée dans un plan qui représente les variations de la dérivée d’une fonction. C’est la représentation de $v = dx/dt = f(x)$ en fonction de $f(x) = x(t)$. La courbe est illustrée sous forme de vecteur en mathématiques [Boi and Bois](#)

(2009). La courbe de trajectoire est obtenue en intégrant le système différentiel sur le plus grand intervalle possible à partir d'un état initial donné, ainsi, elle est aussi appelée courbe intégrale et l'union de toutes ces courbes intégrales obtenues à partir de toutes les conditions initiales possibles forme le portrait de phase Bonnet (2008).

On reprend l'exemple de la balle vue précédemment. On considère que la balle est un objet ponctuel avec une masse m et en chute libre dans le champ gravitationnel uniforme d'intensité g . La fonction z , qui traduira la trajectoire de la balle peut être définie comme étant la relation entre le temps et la hauteur de la balle par rapport au sol. Dans ce contexte, l'équation qui décrit la trajectoire de la balle est formulée de la manière suivante :

$$\sum_i F_i = \frac{dp}{dt} \tag{3.1}$$

où F_i représente les forces exercées sur la balle et $p = mv$ la quantité de mouvement, qui est le produit de sa masse par sa vitesse.

La vitesse étant la dérivée de la position (de z), la relation 3.1 devient alors :

$$-mg = m \frac{dv}{dt} \tag{3.2}$$

Ce qui donne

$$\frac{dv}{dt} = -g \tag{3.3}$$

Ce qui permet d'avoir le système d'équations différentielles suivant :

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = v \\ \frac{dv}{dt} = -g \end{cases} \tag{3.4}$$

La solution de ce système, obtenue par intégration de l'équation 3.4, est la fonction telle que :

$$\Phi(t, x) = \begin{cases} z + vt - \frac{1}{2}gt^2 \\ v = -gt \end{cases} \tag{3.5}$$

C'est la loi d'évolution du système dynamique qui modélise la balle en chute libre. Cette loi définit la trajectoire de la balle dans l'espace de phase. Sur la figure 3.2, cette trajectoire est tracée dans le graphique de droite : la courbe donne la trajectoire de l'état de la balle au cours du temps, à partir de la condition initiale x (position = 1, vitesse = 0) Bonnet (2008). Pour obtenir une trajectoire de phase donc, on a tracé la courbe de l'équation 3.5 à partir d'un couple de variable d'état donné (condition initiale donnée). En traçant les trajectoires de phase obtenues par les différentes conditions initiales possibles dans le même espace de phase, on obtient le portrait de phase d'un système dynamique Masudi et al. (2021).

Pour définir le portrait de phase d'un système dynamique, trois vocabulaires sont donc à retenir : le plan de phase, la trajectoire de phase et enfin les conditions initiales. C'est ce que nous résume la figure 3.3 ci-après.

La figure 3.3 permet de segmenter la visualisation du portrait de phase : d'abord un plan de phase (a), puis un exemple de trajectoire et enfin le plan de phase (c) construit à partir de (a) et (b).

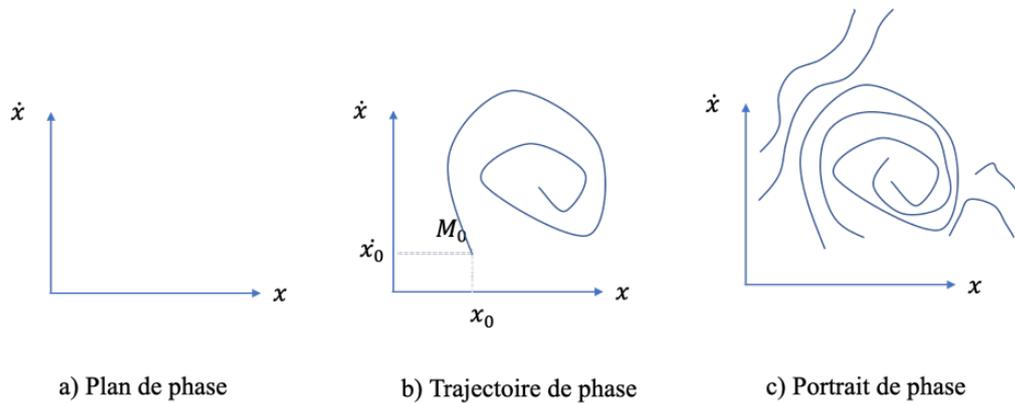


FIGURE 3.3 – Vocabulaire utile pour définir le portrait de phase. Source : Réalisation propre

Pour tracer le portrait de phase, deux moyens peuvent être mis en œuvre : soit tracer les trajectoires associées à chaque condition initiale choisie du système à représenter dans le plan de phase, soit subdiviser ce plan de phase en cellules pour y associer un vecteur représentant la tangente à la trajectoire [Bonnefoy \(2021\)](#). On pourrait associer le portrait de phase à la représentation des lignes de champs de vitesse d'un fluide en écoulement [Coste \(2011\)](#). Le vecteur représenté dans le plan de phase représente la vitesse d'un état du système en un point de ce plan [Bonnet \(2008\)](#).

Le concept de portrait de phase est une extension de la résolution des systèmes d'équations différentielles [Ricardo \(2009\)](#). Le portrait de phase permet d'obtenir des informations de nature qualitative sur les solutions d'une équation différentielle et cela est très utile pour le cas où on est dans l'impossibilité de déterminer explicitement ces solutions [Barreira and Valls \(2012\)](#). En effet, le portrait de phase vise à s'affranchir des calculs analytiques qui ne sont pas réalisables pour des systèmes complexes [Baglio \(2007\)](#). Ainsi, le portrait de phase est un graphe qui permet d'accéder à la résolution d'un système dynamique par une analyse qualitative. L'étude qualitative est très appropriée pour obtenir une vue d'ensemble du système, car elle permet de représenter les caractéristiques pertinentes de ce dernier [Dumortier et al. \(2006\)](#) et aide à la prédiction de son comportement futur par intégration de son équation différentielle partant d'une position initiale connue [Tuffiaro et al. \(1992\)](#). Le principal avantage de la méthode de portrait de phase est qu'elle permet d'évaluer le système sans avoir à résoudre les équations différentielles ordinaires qui le régissent [Li et al. \(2018\)](#). L'étude qualitative des équations différentielles donne des informations sur l'existence d'un équilibre [Guillopé \(2020\)](#). Ainsi, le portrait de phase est un graphique qui permet d'observer les équilibres et les trajectoires typiques ou orbites d'un système [International Conference on Computer Science and Information Technologies \(2017\)](#). Le portrait de phase permet aussi de faire l'étude des conditions de stabilité du système, de révéler la présence d'un attracteur et de définir cet attracteur [Naiwert and Spindler \(2020\)](#), [Masudi et al. \(2021\)](#). En d'autres termes, la méthode du portrait de phase est utile pour étudier les systèmes dynamiques en formant une série de trajectoires typiques dans l'espace d'état, ces trajectoires permettent d'étudier le comportement du système dynamique. Ces trajectoires peuvent aussi révéler la stabilité des solutions (des états caractéristiques qui définissent le système), la présence d'attracteur et l'influence de la perturbation de la condition initiale sur son état final [Li et al. \(2018\)](#).

3.2.2 Informations obtenues d'un portrait de phase

La trajectoire d'un système dynamique peut converger vers des équilibres qui sont représentés sur le portrait de phase par une concentration des courbes vers un endroit précis, cette portion de l'espace de phase est appelé "attracteur" [Pezard and Nandrino \(2001\)](#). Un des intérêts de l'étude par le portrait de phase est de pouvoir décrire cet attracteur. Un attracteur est une portion de l'espace des phases qui attire toutes les orbites voisines [Chevillot-Miot \(2017\)](#). Les attracteurs sont les trajectoires caractéristiques des systèmes, ils montrent le comportement à long terme du système [Pryor and Bright \(2007\)](#). Il y a différents types d'attracteurs [Eckmann and Ruelle \(1985\)](#); [Vojak and Danech-Pajouh \(1994\)](#); [Masudi et al. \(2021\)](#); [Oestreicher \(2007\)](#); [Lorenz \(1993\)](#); [Philippou and Strickland \(1997\)](#) :

- Le plus simple est un attracteur ponctuel qui correspond à la convergence du système vers un état d'équilibre : un point fixe. C'est un point de l'espace des phases vers lequel tendent les trajectoires, c'est une solution stationnaire du système. Le système dynamique est en mouvement régulier.
- Dans le cas d'une dynamique périodique, l'attracteur est un cycle dit "cycle limite", le système évolue dans ce cas vers un régime périodique à une fréquence. La trajectoire est fermée par une forme (exemple : cercle) dans l'espace des phases vers laquelle tendent les trajectoires.
- L'attracteur appelé "tore" qui représente le mouvement produit par deux ou plusieurs oscillations indépendantes que l'on appelle parfois mouvement quasi-périodique. Il peut y avoir plus d'une fréquence dans la trajectoire périodique du système à travers l'état d'un cycle limite. Si deux de ces fréquences forment un rapport irrationnel, la trajectoire n'est plus fermée et le cycle limite devient un tore limite. La représentation physique typique d'un tel système est le labyrinthe dans lequel il n'y a qu'un seul chemin à parcourir et qui conduit finalement à son point de départ pour recommencer. Une fois la solution trouvée, chaque nouveau passage dans le labyrinthe répète les itinéraires précédents pour achever la tâche. C'est un exemple d'attracteur qui se répète.
- Enfin, dans le cas des dynamiques complexes aperiodiques, l'attracteur est un objet fractal dit "attracteur étrange". En effet, quand on observe le système suffisamment longtemps, les points dessinent une forme particulière, qui présente une structure feuilletée (fractale, qui a conduit au nom d'attracteur étrange). Ces évolutions sont dites "chaotiques" car elles sont imprédictibles à long terme. Il est connu par sa sensibilité aux conditions initiales : une légère différence aux conditions initiales amène à deux trajectoires bien différentes.

À titre d'illustration, nous prenons ci-après l'exemple d'un oscillateur : un pendule simple (le système est composé d'un point matériel m , suspendu à un fil, supposé de masse négligeable). Les trajectoires de phase de ce pendule est représenté ci-après (3.4).

Deux cas d'attracteurs peuvent se présenter selon qu'on prend en compte les forces de frottements ou non.

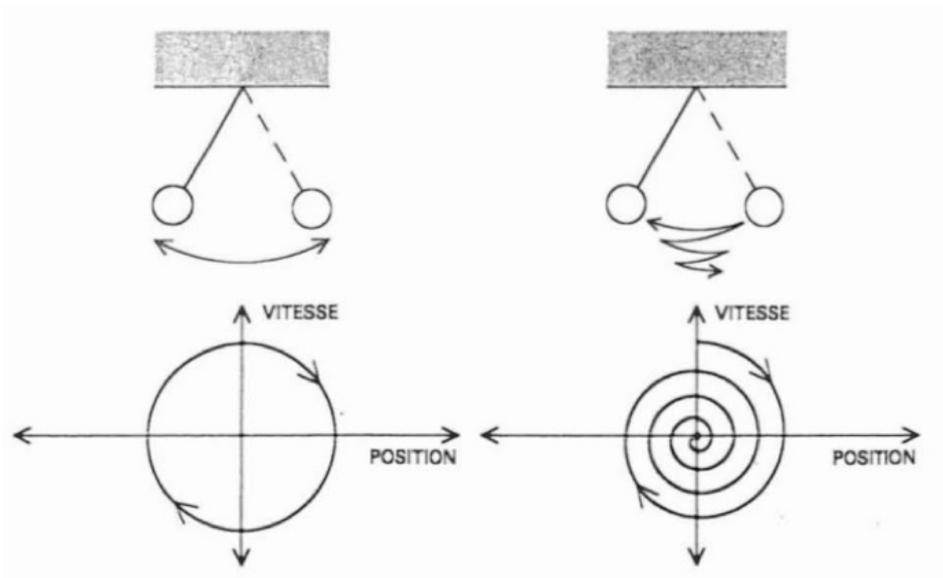


FIGURE 3.4 – Trajectoire de phase d’un pendule. Source : [Chevillot-Miot \(2017\)](#)

Pour un pendule idéal ne perdant aucune énergie sous forme de frottements, la trajectoire est une courbe fermée (bas à gauche), l’attracteur est un cycle limite formant un cercle pour ce cas. Pour un pendule réel, où les frottements diminuent l’amplitude des oscillations, la trajectoire est une spirale dont le point central représente la position finale du pendule (en bas à droite) : un attracteur ponctuel. Pour le cas de l’attracteur tore, le cas d’un pendule soumis à une force extérieure peut être pris comme exemple, la figure 3.5 ci-après permet d’avoir une visualisation de ce type d’attracteur.

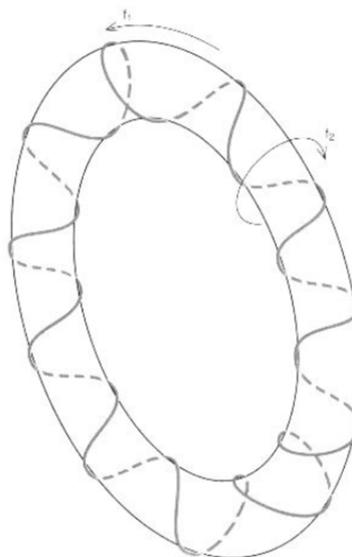


FIGURE 3.5 – Attracteur d’un régime périodique à deux fréquences. Cas d’un pendule soumis à une force extérieure. Source : [Vojak and Danech-Pajouh \(1994\)](#)

Et enfin, pour l'attracteur étrange, de nombreux attracteurs étranges sont maintenant connus comme celui de Lorenz. L'attracteur de Lorenz est obtenu à partir du système d'équations à trois inconnues, décrivant un phénomène de convection (transmission de la chaleur entre deux éléments de différents types : une paroi solide et un fluide en mouvement). L'attracteur obtenu est en forme de papillon qu'on peut voir sur la figure 3.6 [Tsonis and Ditto. \(1994\)](#).

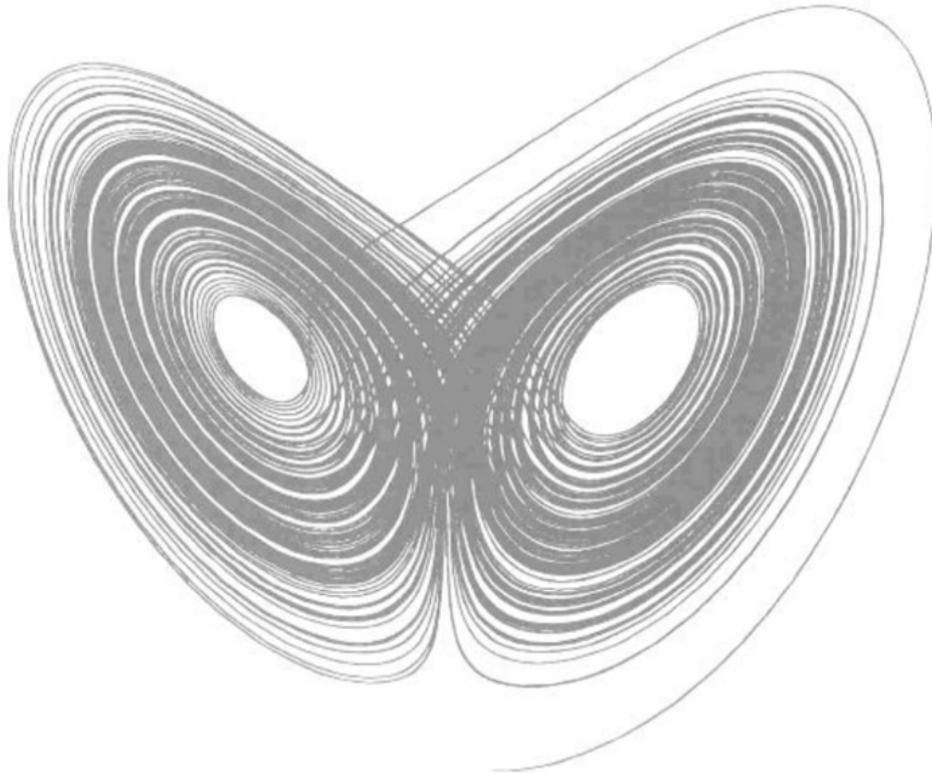


FIGURE 3.6 – Attracteur de Lorenz correspondant à un système dynamique à trois variables. Source : [Tsonis and Ditto. \(1994\)](#)

Dans le cas général, un système dynamique peut avoir un grand nombre d'attracteurs de complexités topologiques différentes, c'est-à-dire de formes différentes. Ainsi, l'espace des phases se divise en portion constituée d'un ou plusieurs "bassin d'attraction". Les bassins d'attraction sont définis comme l'ensemble des points qui convergent vers un attracteur donné [Pezard and Nandrino \(2001\)](#); [Vojak and Danech-Pajouh \(1994\)](#).

L'utilisation des portraits de phase contribue à la compréhension de l'origine et des caractéristiques de toutes les évolutions rencontrées dans la nature, qu'elles soient régulières, stables ou instables, et même celles qui ont un comportement chaotique, dominé d'instabilité [Boi and Bois \(2009\)](#). L'approche analytique par les portraits de phase a permis l'étude des systèmes dynamiques non-linéaires et discontinus. En effet, dans les systèmes dynamiques linéaires et continus, les systèmes évoluent dans le temps de manière à la fois causale et déterministe, c'est-à-dire que son avenir ne dépend que des phénomènes de son passé et de son présent (causalité) et que chaque condition initiale donnée ne conduira qu'à un seul état ultérieur donné du système

(déterminisme) [Oestreicher \(2007\)](#). La connaissance exacte de l'état du système à un instant donné (l'instant initial) permettait de faire le calcul de son état à n'importe quel moment [Goncalves da Silva \(2004\)](#). Tandis que pour les équations non linéaires, la résolution des équations reste encore très difficile, voire impossible. L'analyse des systèmes par les portraits de phase a bel et bien permis de s'affranchir de cet obstacle. On arrivait à avoir une approximation du comportement à long terme du système, de la tendance de son évolution au cours du temps grâce à cette méthode géométrique [Letellier and Maquet \(2006\)](#).

3.3 Mise en œuvre de l'approche dynamique pour mesurer la vulnérabilité énergétique

Dans l'analyse de vulnérabilité d'un territoire, on a plusieurs variables d'observations à prendre en compte d'un côté et des dérivées de ces variables de l'autre. Ces deux éléments sont utilisés pour caractériser un état du système. Cependant, il n'y a pas d'autres moyens pour observer ces éléments que de les représenter dans un espace de phases avec lequel sur un axe, on positionnera toutes les positions ou variable d'observation et sur l'autre, les quantités de mouvement (la dérivée par rapport au temps des variables d'observation). À partir de là, on se positionne dans un espace ou plan de phase où l'on pourra définir une trajectoire de phase, puis un portrait de phase. En addition, nous rencontrons maintenant de nouvelle méthode d'évaluation, comme la caractérisation systémique de la résilience qui implique l'analogie à la dynamique des systèmes. Dans cette perception, la résilience est la capacité d'un système à absorber les changements, c'est-à-dire, la persistance des relations au sein d'un système. La résilience constitue une mesure de la capacité des systèmes à absorber les changements des variables d'état, des variables motrices et des paramètres, et à persister [Chevillot-Miot \(2020\)](#). Les variables d'état sont des paramètres ou ensemble de règles qui permettent de caractériser le système, mais dans les sciences sociales où on est amené à faire l'étude de phénomène qui peuvent être des concepts, des systèmes abstraits, les variables d'état peuvent être une portion de la réalité à un moment donné de l'observation [Rapoport and Carisse \(1970\)](#). En reprenant la définition de la résilience donnée au chapitre précédent, l'étude de l'espace des phases semble pouvoir résoudre la problématique de définition.

En effet, la résilience est définie comme la capacité d'un système à revenir à son état initial après avoir subi des perturbations. Cette notion équivaut donc à étudier la stabilité ou l'équilibre du système. Par analogie avec les approches utilisées dans les sciences dures, plus précisément dans l'analyse des systèmes dynamiques, les sciences sociales ont également envisagé la possibilité de mesurer la résilience par une analyse qualitative en se référant au portrait de phase. Cette démarche a été qualifiée de : "*définition mathématique (pour d'autres : définition physique) de la résilience*" [Dauphiné and Provitolo \(2013\)](#). La définition de la résilience va se baser sur les attracteurs et les bassins d'attractions [Provitolo \(2019\)](#). Cela conduit à l'étude du portrait de phase du système. L'état d'équilibre d'un système est défini comme un attracteur pour les systèmes qui tendent vers un état d'équilibre. Par analogie aux systèmes écologiques et sociaux, comme dans le cas d'un territoire, le portrait de phase est l'espace d'état du territoire, défini par les variables d'état qui le constituent. Ce portrait de phase va dépendre du nombre de variables d'état du système considéré. Il peut comprendre plusieurs attracteurs vers lequel peut tendre le système. Chaque attracteur a son propre bassin d'attraction comme il capte les trajectoires issues de son bassin d'attraction. Et enfin, l'ensemble des différents bassins qu'un

système peut occuper avec les frontières qui les séparent sont appelés paysages de stabilité. Pour mesurer cette résilience, une nouvelle approche a été proposée. Sachant qu'avant cela, la notion de vitesse de retour à l'équilibre a conduit à mesurer la résilience de façon technique, et même si cet aspect est relié à un aspect de résilience écologique, elle ne peut être considérée comme la mesure de la résilience. En raison de la possibilité d'états stables multiples, lorsqu'on considère la mesure dans laquelle un système peut être modifié, le temps de retour ne mesure pas toutes les façons dont un système peut échouer de façon permanente ou temporaire à conserver ses fonctions essentielles. Ainsi, pour mesurer la résilience systémique, la nouvelle approche est de mesurer la résilience à partir des trois paramètres caractéristiques de son portrait de phase (figure 3.7) : la latitude, la résistance, la précarité Walker et al. (2004).

- La latitude L : qui est la quantité maximale de modification qu'un système peut subir avant de perdre sa capacité de récupération (avant de franchir un seuil qui, s'il est franchi, rend la récupération difficile ou impossible)
- La résistance R : qui est la facilité ou difficulté à changer le système, le degré de "résistance" au changement
- Et enfin, la précarité Pr : qui est la proximité de l'état actuel du système par rapport à une limite ou un "seuil"

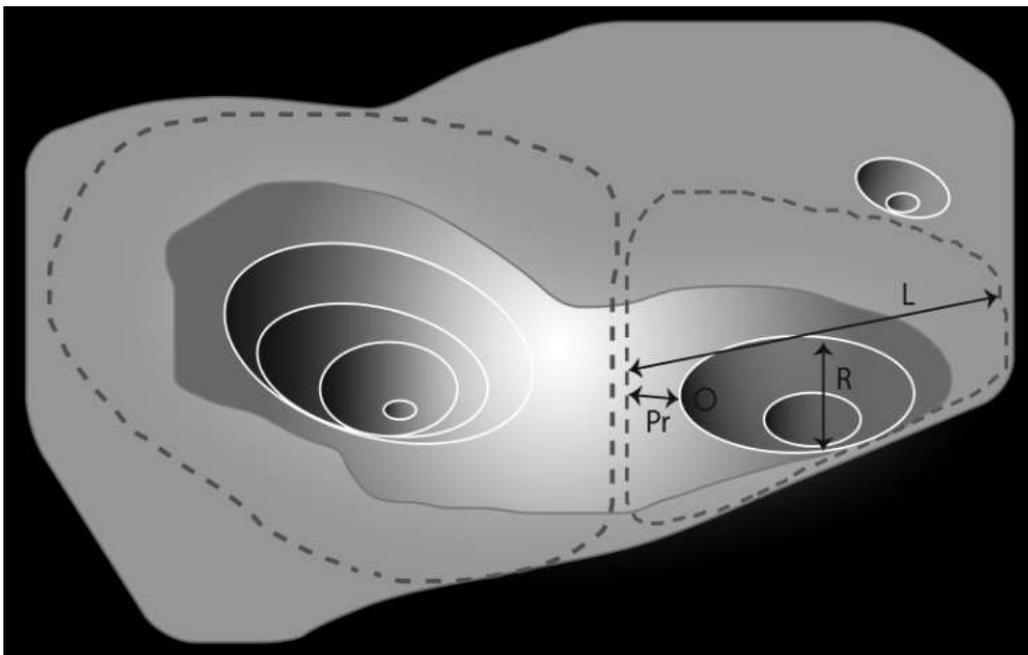


FIGURE 3.7 – Paysage de stabilité tridimensionnel avec deux bassins d'attraction montrant, dans un bassin, la position actuelle du système et trois aspects de la résilience. Source : Provitolo (2019)

Dans le chapitre 1, nous avons pu voir les différentes définitions de la vulnérabilité. Dans ces définitions, il a été mis en lumière que la vulnérabilité et la résilience sont des termes qui peuvent être opposés ou complémentaires. Ainsi, dans cet objectif de définir la vulnérabilité

énergétique de façon dynamique, nous nous sommes appuyés et inspirés de la mesure de la résilience systémique et nous proposons dans cette recherche de mesurer la vulnérabilité énergétique par l'analyse de portrait de phase, en considérant ainsi le territoire ou un ensemble de territoire comme un système.

3.3.1 Intégration du paramètre temps

L'état d'un système dynamique est décrit par un certain nombre de quantités ou variables dépendantes du temps. L'approche dynamique permet de prendre en compte l'évolution d'un système dans le temps. Notre base de données est ainsi constituée par des indicateurs propres à un territoire donné évoluant dans le temps (l'unité de temps choisie est l'année). Dans toutes les analyses que l'on va entreprendre dans ce travail, la dynamique tient compte des changements observables à l'année.

3.3.2 Modélisation de la vulnérabilité énergétique par analogie à l'équation de Lorenz

L'emprunt des théories liées aux systèmes dynamiques devient de plus en plus courant en sciences sociales. Dans ce domaine dans lequel les systèmes sont très complexes (à plusieurs dimensions, à différentes échelles, relatives qui interagissent entre eux), le besoin de s'affranchir des obstacles liés aux complexités des systèmes est devenu primordial. Les sciences sociales accaparent de nouveaux outils prometteurs pour résoudre ces problèmes. Par exemple, l'adoption de la théorie du chaos dans ses outils d'analyse a permis aux sciences sociales de dépasser la limite qu'offraient les résolutions déterministes et statistiques existantes [Loye and Eisler \(1987\)](#); [Baumol and Benhabib \(1989\)](#).

L'objet de cette partie est de proposer un modèle mathématique qui pourrait caractériser la vulnérabilité énergétique d'un territoire. En effet, définir la vulnérabilité énergétique par analogie à la dynamique des systèmes implique de trouver une relation, une équation différentielle qui pourrait représenter le phénomène, pour pouvoir ensuite en faire l'étude qualitative. Notre objectif est de travailler sur le comportement du système dans la compréhension de sa trajectoire par les portraits de phase. Dans notre démarche, on a choisi dans un premier temps de travailler sur des équations connues. L'avantage dans ce cas est que si le phénomène peut être représenté par l'équation choisie, le portrait de phase du système est dès lors connu. Dans l'approche dynamique et précisément la théorie du chaos (étude des systèmes non linéaires), la théorie de Lorenz est connue comme le modèle pionnier qui a permis l'avancée des recherches dans le domaine. En effet, c'est grâce aux premiers calculs réalisés par Edward Lorenz, que l'on a découvert une propriété essentielle, base de la théorie du chaos : la sensibilité aux conditions initiales. Dans cette propriété, un petit changement aux conditions initiales peut donner deux réponses bien différentes de la part du système [Oestreicher \(2007\)](#). De cette découverte a permis l'expansion de la théorie du chaos. En effet, cela a permis aux études et recherches de mieux comprendre la dynamique des systèmes dans l'analyse des caractéristiques typiques de ces derniers. De nombreux travaux ont été portés sur le système d'équations de Lorenz et il devenait courant de toujours parler de la théorie de Lorenz dans la théorie du chaos et de la dynamique des systèmes [Ge and Li \(2010\)](#). C'est le paradigme du chaos : analyser et observer l'attracteur de Lorenz ne suffit pas pour comprendre tout sur le mécanisme de la théorie du chaos, mais c'est une étape incontournable [Ghys \(2010\)](#)). L'étude de système d'équations

différentielles à comportement chaotiques a montré que la trajectoire décrite par le système suit une trajectoire bien précise appelée attracteur étrange. Dans le cas du système d'équations différentielles de Lorenz, l'attracteur est appelé attracteur de Lorenz Joy (2010) (l'attracteur de Lorenz se ramène à une forme qui est semblable à un papillon). Cela a donné naissance à une nouvelle conception des systèmes non linéaires. Dans un premier temps, on voudrait tester si l'équation de Lorenz pourrait représenter le phénomène de vulnérabilité énergétique. En effet, comme la vulnérabilité énergétique est un phénomène dynamique et complexe, on ne dispose pas encore de formulation mathématique validée pour sa définition jusqu'à maintenant. Dans l'objectif d'aboutir à une caractérisation dynamique de la vulnérabilité énergétique, on a cherché à savoir si cette dernière aurait un comportement chaotique, non prévisible. Comme le phénomène ne peut être mesuré directement, on voudrait proposer une définition qui se basera sur un système d'équations. On émet l'hypothèse que la vulnérabilité énergétique décrit une dynamique chaotique et on va tester si l'équation de Lorenz pourrait être utilisée pour la définir.

3.3.2.1 Choix du système et des variables

Description de l'équation de Lorenz L'application de l'équation de Lorenz a d'abord été dans la physique. L'article de Lorenz qui présentait la fameuse équation de Lorenz datait de 1963. L'équation de Lorenz est un système obtenu par la simplification de l'équation de Rayleigh-Bénard portant sur la convection. C'est un système d'équations différentielles à trois variables décrivant les mouvements d'un fluide dans l'atmosphère Viana (2000); Goncalvès da Silva (2004). La convection est l'ensemble des mouvements engendrés dans un fluide par des différences de températures dans celui-ci. La figure 3.8 suivante donne une illustration de ce phénomène.

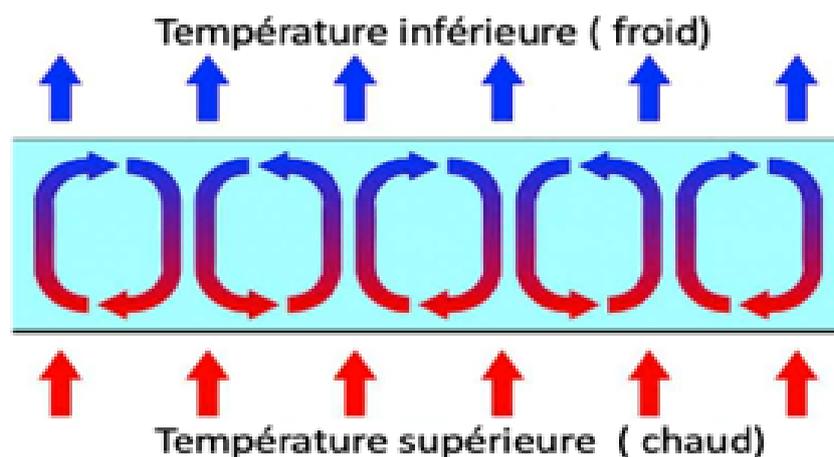


FIGURE 3.8 – Représentation schématique des cellules de Bénard d'un mouvement de convection. Source : Wikipédia

Les écoulements qui se font sous forme de cellules de Bénard sont le modèle simplifié qui reproduit le comportement de la convection dite de Rayleigh-Bénard ou le fluide est supposé

Newtonien et incompréhensible. Les écoulements dans les cellules sont une sorte de mouvements circulaires entre zones chaudes basses et froides hautes, le fluide moins dense ayant tendance à s'élever et le froid plus dense à s'enfoncer.

Le système de Lorenz est un système dynamique dans un espace de phase de $\lambda = \mathbb{R}^3$:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Pr(y - x) \\ \frac{dy}{dt} = Rx - xz - y \\ \frac{dz}{dt} = xy - bz \end{cases} \quad (3.6)$$

Tels que :

- La variable x caractérise le taux de convection, elle est proportionnelle à l'intensité du mouvement de convection. Elle peut être prise aussi comme la vitesse de rotation du cylindre que forme l'air entre les deux plaques de température différente où a lieu la convection.
- La variable y quant à elle représente la différence de températures entre deux côtés opposés du cylindre. C'est-à-dire la différence de températures entre les courants ascendants et descendants, elle équivaut à un gradient de température (verticale).
- Et enfin, la variable z représente la déviation de la pente de température par rapport à la ligne verticale, c'est le proportionnel à la distorsion, le gradient de température horizontale.

Pour les paramètres mis en jeu dans le système, on a :

- Pr désignant le nombre de Prandtl, R le nombre de Rayleigh réduit et b qui représente la taille typique du système sont les paramètres du système d'équations ou pour les valeurs : $Pr = 10$, $r = 28$ et $b = 8/3$, le système de Lorenz a un comportement chaotique. Sachant que :

$$Pr = \frac{\nu}{D} \quad (3.7)$$

est le rapport entre la viscosité dynamique du fluide ν et le coefficient de diffusion thermique du fluide D . Il compare la rapidité des phénomènes thermiques avec celle des phénomènes hydrodynamiques dans le fluide.

-

$$R = \frac{g\beta}{\nu D} \frac{\Delta T(L_c)^3}{R_0} \quad (3.8)$$

Avec g : accélération de la pesanteur, β : coefficient de dilatation thermique, ΔT : écart de température dans le fluide entre la surface et un point au centre dans une zone de "quiétude", L_c est l'épaisseur du fluide, et enfin R_0 une valeur critique telle que pour $R > 1$ le transfert thermique se fait essentiellement par convection alors que pour $R < 1$ le transfert thermique se fait essentiellement par conduction (explication apportée dans le tableau 1). R caractérise le mode de transfert de chaleur dans le fluide.

- Et pour finir,

$$b = \frac{4\pi^2}{\pi^2 + q^2} \quad (3.9)$$

où q est le vecteur d'onde convectif.

Description des variables mises en jeu L'état de l'art sur la vulnérabilité énergétique nous a permis de voir que celle-ci est multidimensionnelle. En effet, on a pu voir que la vulnérabilité énergétique touche trois grands aspects du territoire qui est la dimension économique, sociale et environnementale. Cela s'est présenté selon plusieurs déclinaisons du terme par la dépendance énergétique, précarité énergétique et (in) sécurité énergétique. Pour faire l'analogie de la vulnérabilité énergétique à l'équation de Lorenz, on a représenté la vulnérabilité énergétique en mettant en avant trois variables qui seront les variables x , y et z de l'équation de Lorenz. Dans notre analogie, x serait représenté par la dimension économique. L'économie joue un rôle dans le changement d'état du système qu'est le territoire. Il est souvent pris comme un levier de développement et sous-entend un sens de force ou de facteur de mouvement. On l'assimile donc à la variable x de l'équation de Lorenz qui représente une vitesse. Pour la variable y , comme elle représente une différence de températures des deux points opposés et donc un état, dans l'équation de Lorenz, on a pensé à choisir la dimension sociale et environnementale pour la représenter par rapport au phénomène de vulnérabilité énergétique. En effet, ces variables sont des variables d'état qui représentent le caractère propre du territoire : son état géographique par ses données physiques et sa santé par les données environnementales, mais aussi, l'état des êtres vivants dans le territoire (les données sociales). Ces variables représentent l'état qu'est la vie du territoire à travers l'homme et la nature, tout comme la température représente l'état du gaz étudié dans l'équation de Lorenz. Enfin, la variable z de l'équation de Lorenz représente la déviation de la pente de température par rapport à la ligne verticale, c'est-à-dire le gradient de température horizontale. L'énergie quant à elle joue un rôle important pour un territoire car elle peut mettre en relief ses disparités et ses inégalités socio-spatiales. Ainsi, la variable z , qui représente aussi une différence, sera substituée par la dimension énergétique dans cette modélisation.

3.3.2.2 Mise en œuvre de la modélisation

Description du travail à faire L'objectif dans la modélisation de la vulnérabilité énergétique par l'équation de Lorenz sera de trouver un système d'équation analogue à celui de Lorenz, qui permet d'obtenir l'évolution des variables (économie, socioenvironnemental et énergie) que nous avons choisi pour définir le phénomène. Pour cela, on aura besoin de valeurs réelles de ces évolutions. La première étape de ce travail a été de constituer cette base de données, qui doit contenir l'évolution des trois variables pour un territoire donné. Selon la disponibilité des données, on aura à constituer pour les pays à étudier les variables x , y et z pour différentes années. Ensuite, on aura à caler le modèle de Lorenz à cette base constituée. On passe ainsi dans l'étape d'optimisation du modèle, où on va demander à l'équation de Lorenz de retrouver l'évolution des variables x , y et z réels. Pour mener à bien cette étape, on fait donc une optimisation des paramètres de Lorenz : on fait varier les paramètres jusqu'à trouver la meilleure combinaison possible qui permet à ce que la résolution du système d'équations (réécrit avec les paramètres trouvés) permet de se rapprocher le plus des variables réelles qu'on a construites

pour le territoire étudié. Et enfin, la dernière étape est l'analyse des résultats pour la validation du modèle. Nous allons voir en détail ces étapes.

Explication des variables x, y et z L'objectif dans cette première étape est de disposer des variables x, y et z d'un territoire donné, pour différentes années. Cet objectif s'est décliné en deux étapes bien distinctes : la constitution de la base de données, la synthèse des données par **ACP** (même méthodologie de calcul des indicateurs du chapitre 2, équation 2.1) pour obtenir des indicateurs composites x, y et z qui vont représenter les variables économiques, socioenvironnementales et énergétiques du territoire. Nous avons construit dans un premier temps notre base de données qui est un tableau de données composé de 24 variables, et 46 individus (tableau 3.1).

TABLE 3.1 – Tableau des données utilisées pour la construction des variables composites.

Variable	Données constituantes
X	
Dimension économique	PIB Taux de croissance PIB Revenu national brut Valeur ajoutée dans le secteur de l'industrie Valeur ajoutée dans le secteur primaire Richesse en dépôt Flux monétaire actif Valeur ajoutée dans le secteur tertiaire
Y	
Dimension sociale et environnementale	IDH Nombre de population Superficie du pays Superficie du sol recouvert par la forêt Proportion de la population urbaine Proportion de la population rurale GES Densité de la population
Z	
Dimension énergétique	Consommation d'énergie électrique par habitant Consommation d'énergie fossile Part de l'importation en énergie Intensité énergétique Production d'électricité Exportation d'énergie fossile taux d'accès à l'électricité Part de l'énergie renouvelable dans la production électrique

Une contrainte liée à la disponibilité des données nous a conduit à faire ce choix. Les variables prises sont des données relatives aux trois aspects choisis. Nous avons établi une base de données qui décrit les caractéristiques de 46 pays. Les indicateurs économiques, socioenvironnementaux et énergétiques pour chaque pays de cet ensemble ont été construits de l'année

1995 à 2014. L'évolution de ces trois indicateurs sur la période 1995-2014 permet de dégager les variables x, y et z nécessaires pour la mise en œuvre de l'analogie au modèle de Lorenz. On a une évolution sur 20 ans de ces indicateurs.

La figure 3.9 donne un aperçu pour les variables calculées pour quelques pays d'Europe.

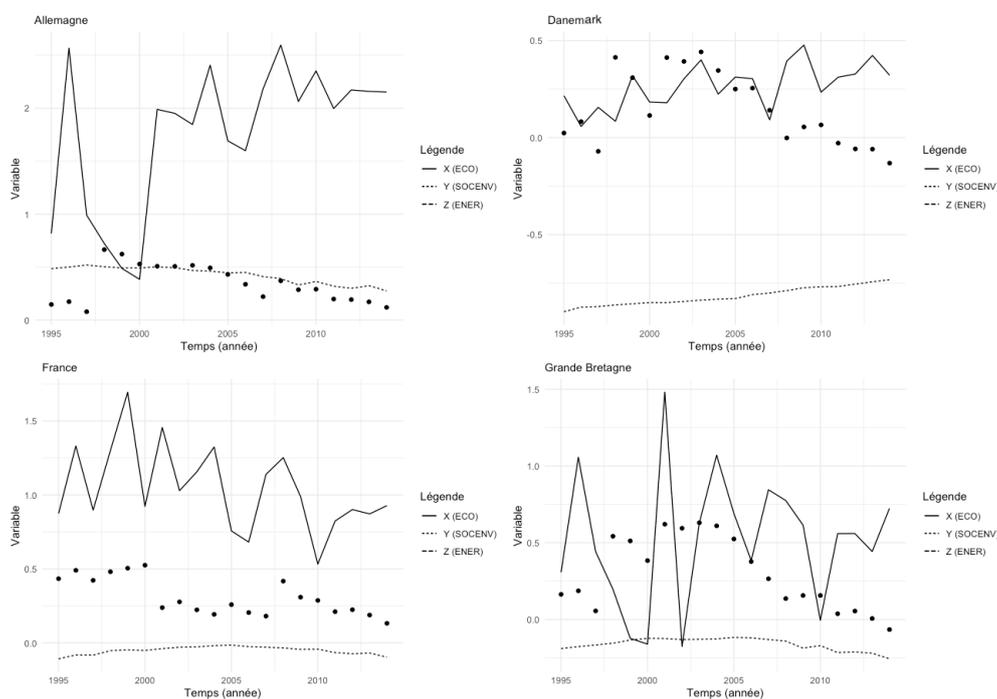


FIGURE 3.9 – Évolution des variables x, y et z entre 1995 et 2014 pour quelques pays d'Europe

Ensuite, les figures 3.10 et 3.11 donnent un aperçu des variables calculées pour des pays insulaires en premier lieu et en second lieu pour des pays du Moyen-Orient.

Enfin, la dernière figure 3.12 montre les résultats obtenus pour des pays d'Amérique Latine.

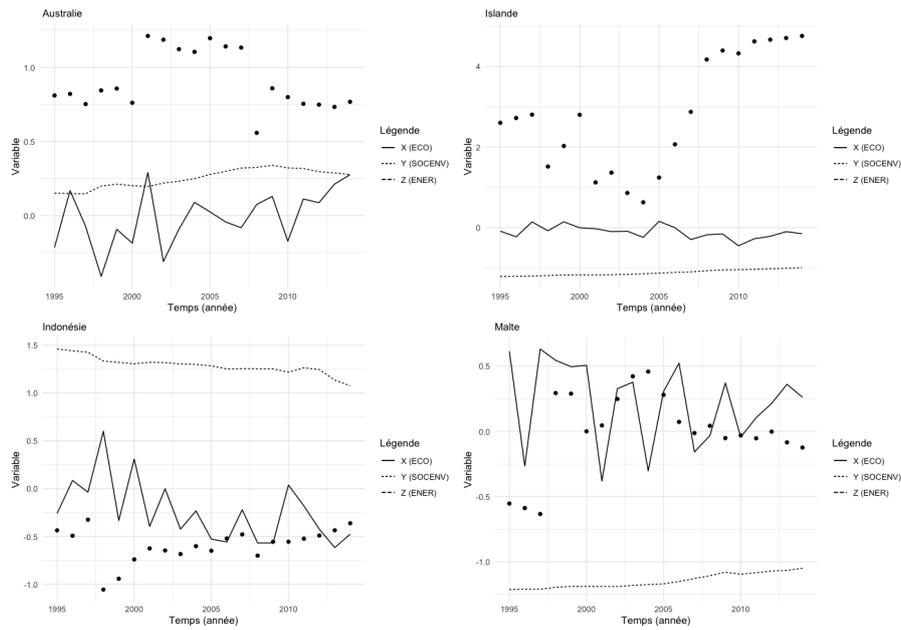


FIGURE 3.10 – Évolution des variables x, y et z entre 1995 et 2014 pour des exemples de pays insulaires

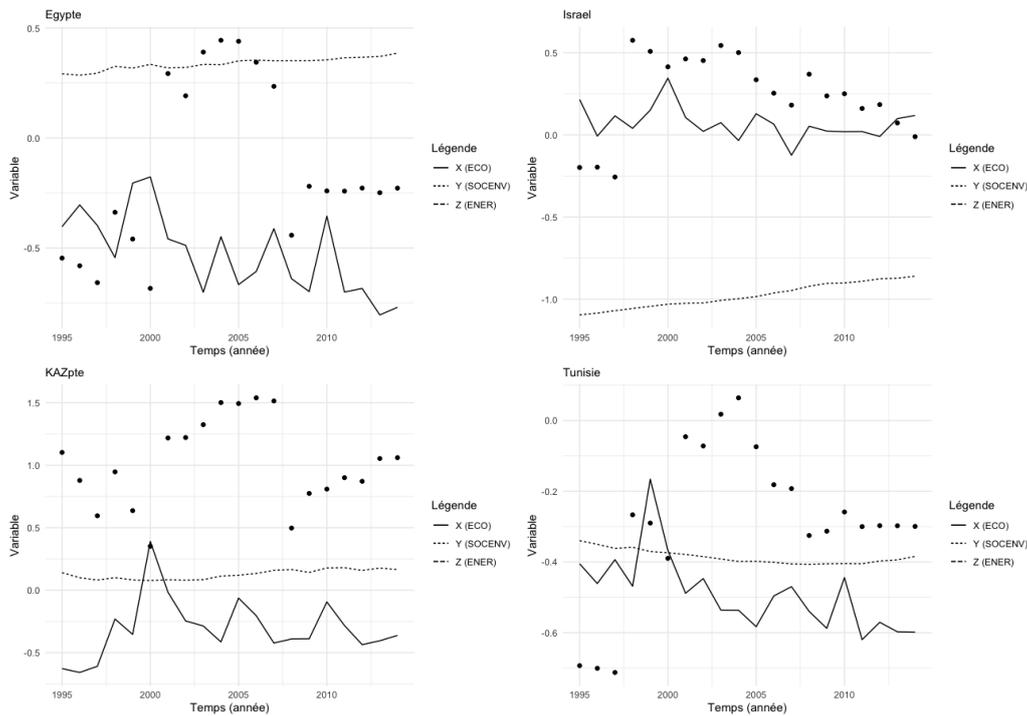


FIGURE 3.11 – Évolution des variables x, y et z entre 1995 et 2014 pour quelques pays du Moyen Orient

Optimisation de l'équation de Lorenz, présentation des résultats et validation La prochaine étape de ce travail consiste à optimiser l'équation de Lorenz, pour voir si on arrive à retracer l'évolution des variables x, y et z construites précédemment. Concrètement, le tra-

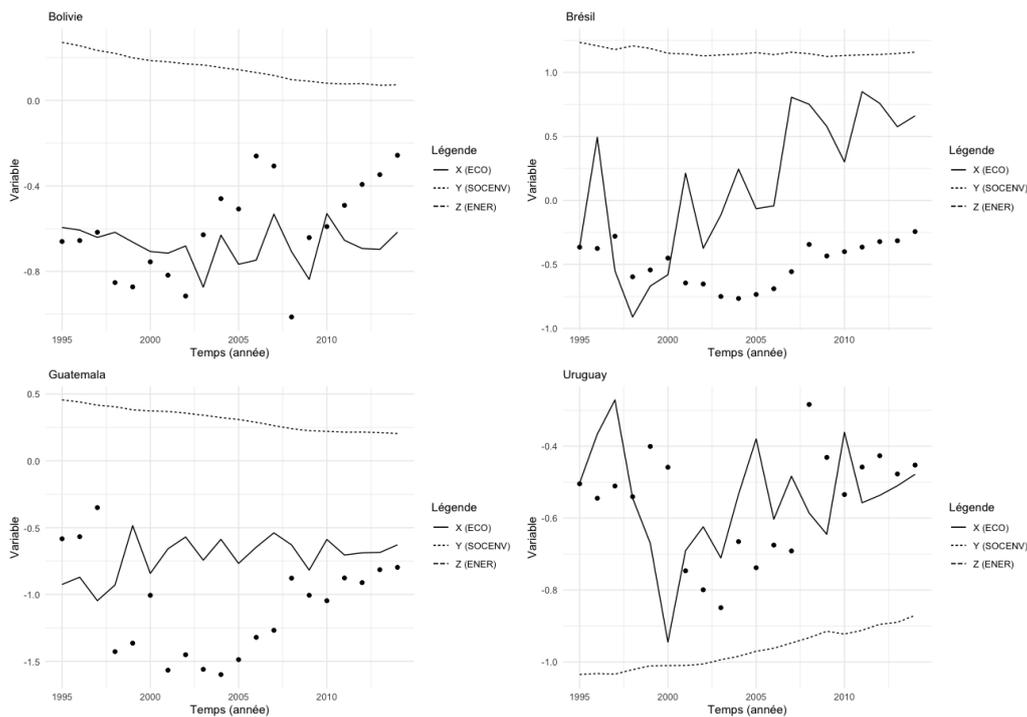


FIGURE 3.12 – Évolution des variables x, y et z entre 1995 et 2014 pour des pays d’Amérique Latine

vail demande à trouver les paramètres qui pourront permettre au système d’équations à trois variables de Lorenz de retrouver les valeurs de x, y et z qui décrivent les pays pour chaque pas de temps. La résolution de l’équation a été rendue possible grâce aux outils de calcul proposés dans le logiciel R, avec les packages *deSolve* et *minpack.lm* qui contiennent notamment la fonction *ode*. Ensuite, pour trouver les bons paramètres, la fonction *nls.lm* a été utilisée. Cette fonction permet de trouver les paramètres adéquats en se basant sur la méthode de résolution de l’algorithme des moindres carrés non linéaires de Levenberg-Marquardt. Sachant que les variables sont discrètes et non continue, le logiciel R s’inscrit dans cette démarche, ce qui favorise son utilisation dans notre simulation. Nous avons commencé l’optimisation avec les données relatives à AUS (Australie). Le modèle a rencontré des difficultés à retrouver les valeurs x, y et z du pays, on n’a pas pu aboutir à une optimisation qui permet de valider les calculs. En effet, nous pouvons voir à travers la figure 3.13 que les courbes *x_Lorenz*, *y_Lorenz* et *z_Lorenz* qui sont les résultats issus du modèle de Lorenz ont du mal à épouser les courbes d’évolutions réelles des variables x, y et z représentant l’Australie. Les résultats issus du modèle de Lorenz ne permettent pas d’être validés.

Nous avons testé pour les autres pays, sachant que chaque pays a ses caractéristiques types, qui font que chacun a son évolution propre. Nous avons lancé la même opération pour des pays qui ont des caractéristiques différentes que l’Australie. Pour les autres pays, les résultats ont

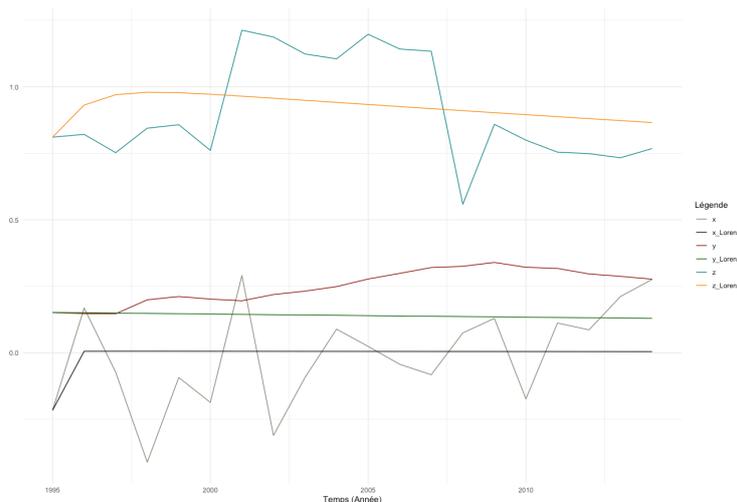


FIGURE 3.13 – Résultats d’optimisations de l’équation de Lorenz pour l’Australie

été similaires, le modèle choisi qui est le système d’équations de Lorenz n’arrive pas à retrouver les valeurs réelles des variables x , y et z des différents pays étudiés. Comme dans les figures 3.14, 3.15 et aussi 3.16, les valeurs des x_Lorenz , y_Lorenz , z_Lorenz n’arrivent pas à épouser les courbes x , y et z qu’ils devraient représenter.

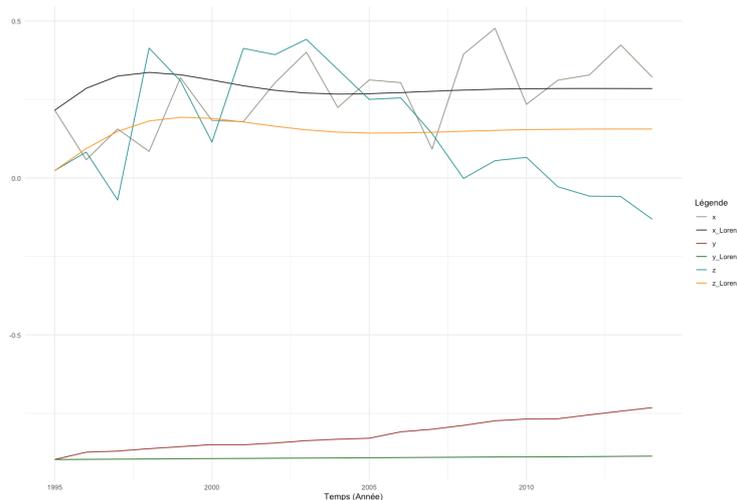


FIGURE 3.14 – Résultats d’optimisation de l’équation de Lorenz pour le Danemark

Pour l’exemple des quatre pays étudiés précédemment, on a évalué les erreurs relatives par rapport aux résultats d’optimisation. Le tableau 3.2 suivant présente, pour chaque pays, les paramètres calculés qui donnent la meilleure optimisation. On peut y voir aussi les erreurs

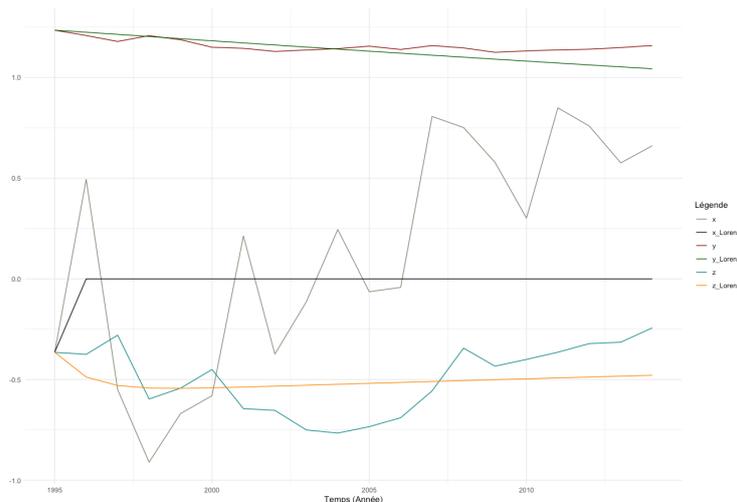


FIGURE 3.15 – Résultats d’optimisations de l’équation de Lorenz pour le Brésil

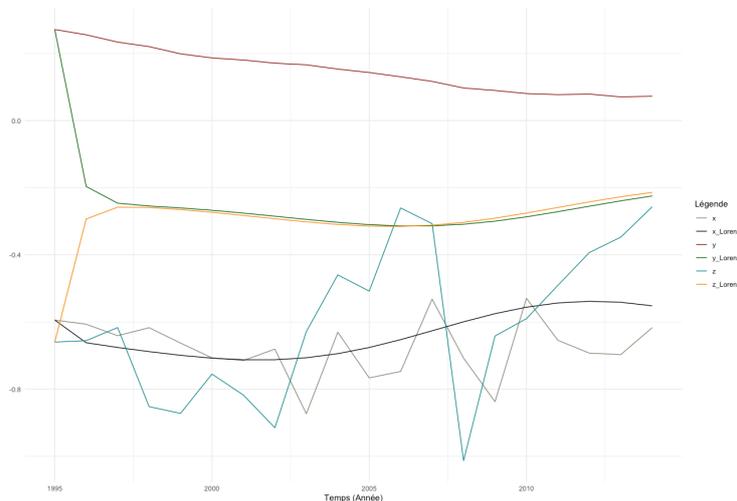


FIGURE 3.16 – Résultats d’optimisations de l’équation de Lorenz pour la Bolivie

MAE, **MBE** et **RMSE**. Le **RMSE** ou erreur quadratique moyenne est la racine carrée de la **MSE** qui est le carré moyen des erreurs : c’est la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre prévisions du modèle et observations. Elle mesure l’ampleur moyenne de l’erreur. La **MAE** ou erreur arithmétique des valeurs absolues des écarts mesure l’ampleur moyenne des erreurs dans un ensemble de prédictions, sans tenir compte de leur direction. C’est la moyenne sur l’échantillon de test des différences absolues entre la prédiction et l’observation réelle ou toutes les différences individuelles ont le même poids. Si la valeur absolue n’est pas prise, c’est-à-dire les signes des erreurs ne sont pas supprimés, l’erreur moyenne devient l’erreur de biais moyenne **MBE** et est généralement destinée à mesurer le biais moyen du modèle. Plus l’erreur est petite, et mieux la prédiction est bonne. Or, les erreurs obtenues ne permettent pas de valider nos résultats, le pourcentage d’erreur est très significatif (largement supérieur à 10 %).

Cette modélisation a été motivée dans l’objectif d’obtenir un portrait de phase du système de territoire dont on fait l’étude. Il fallait construire les évolutions des variables x, y et z caractérisant le système pour chaque pays. Chaque pays représentant ainsi une trajectoire de

TABLE 3.2 – Tableau des erreurs d’optimisation de l’analogie de Lorenz.

	Paramètres		Erreur (%)	sur X	sur Y	sur Z
Australie	Pr	-9742	mae	-1324	44	18
	R	0,0015	mbe	-2	-44	2
	b	6,6437	rmse	-1626	52	20
Danemark	Pr	0,48	mae	37	-9	104
	R	-0,00053	mbe	7	9	1
	b	0,109	rmse	47	-11	120
Bolivie	Pr	0,1128	mae	-12	265	-52
	R	-1,2684	mbe	-6	-265	-51
	b	0,3481	rmse	-15	274	-63
Brésil	Pr	-14234	mae	372	3	-27
	R	-0,00614	mbe	-114	-2	3
	b	-0,455	rmse	431	4	-31

phase, et l’ensemble des évolutions de chaque pays, c’est-à-dire l’ensemble des trajectoires de phase obtenues, nous permettrait d’obtenir le portrait de phase de l’ensemble des pays étudiés, de l’ensemble du système. Le portrait de phase nous permettra de faire des études qualitatives de la dynamique du système pour connaître le comportement du système et pouvoir identifier la présence ou non d’attracteur. L’identification d’éventuels attracteurs permettra d’identifier les régimes d’équilibre du système, de voir les facteurs qui définissent l’état du système comme étant dans un état stable ou instable. Cela fournira de plus amples informations dans la maîtrise de ces états. Dans ce travail, on s’est concentré sur l’état de vulnérabilité énergétique des pays étudiés. Pour les quatre pays pris dans le lot que sont AUS (Australie), BRA (Brésil), BOL (Bolivie) et DNK (Danemark), des pays qui ont chacun leur caractéristique différente, on arrive à des résultats qui ne permettent pas de valider le modèle de Lorenz. Les conclusions que nous avons obtenues nous conduisent à affirmer que le modèle d’équations de Lorenz s’avère inapproprié pour rendre compte de la vulnérabilité énergétique des territoires. La théorie du chaos, plus précisément le modèle de Lorenz, constitue un cadre mathématique qui détaille les fonctions non linéaires caractérisées par leur instabilité comportementale. Cette théorie permet d’examiner des systèmes chaotiques et turbulents, remettant en question les paradigmes antérieurs des sciences en matière d’équilibre et de stabilité. Son premier attribut réside dans sa réactivité aux conditions initiales, comme en témoigne l’adage "à petites causes, grands effets". Les constatations que nous avons obtenues clarifient ainsi que notre système correspond davantage à une dynamique qui n’est ni instantanée ni impulsive. Les trajectoires du système ne se conforment pas à un chaos désordonné susceptible de restreindre les analyses du système. Notre système doit donc être représenté par un modèle qui permettra de mettre en lumière son caractère non turbulent et non impulsif.

3.3.3 Modélisation de la vulnérabilité énergétique par construction de portrait de phase issu d’indicateurs

L’analyse par les portraits de phase est une démarche permettant l’étude de la dynamique des systèmes, que nous voulons appliquer aux territoires. Elle consiste à faire une étude qualitative du comportement du système étudié. Elle va permettre d’étudier la dynamique des

territoires, son évolution au cours du temps. Les résultats obtenus des modélisations issues des modèles connus, notamment la théorie du Chaos à travers l'équation de Lorenz ont montré que la vulnérabilité énergétique ne conduit pas le territoire dans une dynamique de chaos. Nous allons de ce fait recourir à de nouvelles méthodes afin d'obtenir le portrait de phase de notre système. Pour cela, nous avons nos variables à notre disposition, des variables qui traduisent différents états de notre système. Par définition, le portrait de phase est obtenu à partir de la combinaison de plusieurs états d'un système. Pour ce faire, le système que l'on va étudier portera sur un ensemble de pays. Dans ce cas, pour un certain nombre de pays, à différentes temporalités (différentes années), on doit pouvoir connaître son état. L'ensemble de tous ces états formera la trajectoire de phase du pays, et l'ensemble des trajectoires des différents pays formera le portrait de phase de notre système de territoires. Pour pouvoir représenter l'état d'un pays, c'est-à-dire ses caractéristiques, on s'est basé sur différents indicateurs déjà à disposition. Des indicateurs qui pourraient avoir un impact direct ou indirect sur la vulnérabilité énergétique. Pour construire le portrait de phase du système, nous allons tracer graphiquement l'évolution d'une variable (qui traduira la vulnérabilité énergétique) par rapport à sa dérivée. Dans un premier temps, le travail consiste donc à la construction des portraits de phase. Pour cela, on aura plusieurs portraits de phase à proposer selon les variables à notre disposition. Ensuite, le travail se poursuivra par l'analyse des portraits de phase obtenus qui permettra de définir la vulnérabilité énergétique et la dynamique du système de territoire étudié.

3.3.3.1 Construction du portrait de phase

Pour rappel, le portrait de phase est une représentation graphique d'un état du système en fonction d'un autre à différentes conditions initiales. Les paragraphes précédents ont mis en relief des cas particuliers dans les sciences physiques ou mathématiques où les portraits de phase ont été construits en traçant sur le même graphique un état $x(t)$ en fonction de sa dérivée $dx(t)$. Cela se traduit par l'observation de l'évolution de la vitesse en fonction de la position du système à étudier par exemple, ou encore de l'accélération en fonction de la vitesse. Pour faire simple, ce serait donc une représentation de fonction (quand le système peut être représenté par une fonction, un modèle, et donc de relation mathématique, dans le cas contraire, on dispose de valeurs), par rapport à sa dérivée : on a donc dans l'axe des abscisses $f(x)$ et en ordonnée $df(x)$. Pour notre cas d'étude, nous ne disposons pas de modèle ou fonction représentant la vulnérabilité énergétique. Nous avons à notre disposition des variables sous forme d'indicateur, qui représentent l'état de notre système. Par analogie aux portraits de phase rencontrés en sciences exactes, ce qu'on cherche à représenter va être alors le graphe obtenu des variables et de leurs dérivées. On tâchera ainsi de calculer la dérivée des variables indicateurs pour obtenir le portrait de phase. Les indicateurs vont être les coordonnées en abscisses. Pour avoir les coordonnées en ordonnées, (les valeurs dérivées des indicateurs) on doit disposer de leur dérivée. Or, les variables observées sont discrètes. Les dérivées des variables seront calculées à partir de la méthode des différences finies comme on ne dispose pas du modèle permettant de lier la variable x à sa dérivée. Nous choisissons ainsi d'utiliser des méthodes de dérivation par approximation par différence finie progressive, centrée et rétrograde selon la position de x . Les deux premières valeurs de x seront ainsi dérivées par une approximation par différence finie progressive (les valeurs correspondantes aux années 1994 et 1995) (équation 3.10), les deux dernières valeurs (2013 et 2014) seront approximées par une différence finie rétrograde (équation 3.11) et enfin les valeurs comprises entre les années 1996 et 2012 seront approximées par une

différence finie centrée (équation 3.12).

$$f'(x_i) = \frac{-3f(x_i) + 4f(x_{i+1}) - f(x_{i+2})}{2h} \quad (3.10)$$

$$f'(x_i) = \frac{3f(x_i) - 4f(x_{i-1}) + f(x_{i-2})}{2h} \quad (3.11)$$

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1})}{2h} \quad (3.12)$$

Construction du portrait de phase à partir de variables simples. Dans la construction des portraits de phase, nous avons choisi de travailler dans un premier temps sur des variables simples, c'est-à-dire des variables qui permettent de définir l'état du territoire, des variables communément connus et qui sont d'ores et déjà disponibles. Dans l'étude d'un territoire, le système peut être décliné en différentes échelles allant du micro (niveau ménage, iris, quartier, ville, commune) à une échelle macro (régionales, départementales, nationales). Notre travail concerne le niveau macro, l'échelle nationale. Les variables qui ont été prises pour cette étape sont :

- Le Produit Intérieur Brut (PIB) : le PIB est souvent pris comme une variable déterminante pour un territoire, car il permet d'évaluer la situation économique du pays. Cette variable est aussi intéressante du fait que c'est l'un des indicateurs le plus disponible dans les bases de données recensées, pour une large amplitude de temps et pour un large choix de pays.
- L'Indice de Développement Humain (IDH) : cet indicateur permet de mesurer plusieurs dimensions à la fois. En effet, c'est un indicateur qui prend en comptes plusieurs critères que sont le PIB par habitant, l'espérance de vie à la naissance et le niveau d'éducation. Cet indicateur permet ainsi de capter en plus du niveau économique la dimension sociale du territoire.
- L'émission de Gaz à Effet de Serre (GES) : cet indicateur est fortement lié à la transition énergétique, car il permet d'évaluer le rejet des gaz à effet de serre de chaque pays, qui est maintenant limité par les accords de Paris.
- Enfin, la consommation d'énergie électrique par habitant ([CONSHAB](#)) : cet indicateur permet de faire une approche plus précise sur la consommation énergétique du territoire.

Pour obtenir le portrait de phase avec la variable PIB, on a constitué un tableau qui permet d'observer le PIB pour un certain nombre de pays s'étalant sur plusieurs années, ensuite, on a fait le calcul de la dérivée de chaque PIB en s'appuyant sur les formules présentées dans les paragraphes précédents. Nous avons tracé ce portrait dans la figure 3.17 en s'appuyant du logiciel R.

Cette figure montre les différents points des trajectoires de phases de différents pays, par rapport à l'évolution de leur PIB de 1960 à 2019. Le système est composé de 60 pays. Dans un premier constat, le graphe ne permet pas d'avoir un aperçu clair des trajectoires des pays étudiés et d'observer une information particulière par rapport à la présence ou forme quelconque d'un attracteur qui est notamment un des intérêts du portrait de phase. On peut y observer une forte densité de point dans une zone bien précise du portrait, mais ce n'est pas précis. Sur ce graphe, on ne dispose pas d'information sur la dynamique ou le mouvement de notre système qui pourrait être périodique (le portrait de phase ne présente pas de cycle), ou sinusoidal



FIGURE 3.17 – Portrait de phase obtenu avec la variable PIB. Source : Réalisation propre

(le portrait de phase ne présente pas une forme elliptique) car le portrait de phase dans cette présentation n'est pas précis. On voit qu'il y a une forte concentration de point sur le graphique, ce qui pourrait révéler la présence d'attracteur. Mais on ne peut pas encore le confirmer. Le portrait de phase que l'on a obtenu est difficile à interpréter. Pour mieux l'appréhender, nous avons cherché une meilleure visualisation de ce dernier. On s'est tourné vers la méthode de densité de noyau qui est la fonction de densité de Kernel. La fonction de densité de Kernel est une fonction qui estime la distribution des données étudiées. Elle permet de voir la tendance des variables étudiées. Dans ce travail, la fonction de densité de Kernel va nous permettre de trouver les valeurs tendances des points des trajectoires que le système des territoires pourraient prendre. La fonction de densité de Kernel donne une visualisation de la distribution en ligne de surface. Le long d'une ligne, on aura la même densité de probabilité. Dans la mise en œuvre de la méthode, il existe de nombreuses fonctions et logiciels prédéfinis qui permettent de faire les calculs de distribution par la méthode de Kernel. Nous nous sommes appuyés sur les fonctions courantes telles que `kde2m()` et `countour()` ou encore `geom_density2d()` que l'on peut retrouver en utilisant les packages `ggplot2`, `Reshape` et `MASS` du logiciel R. Ces fonctions permettent de tracer directement les courbes de densité pour une double variable en abscisse et ordonnée comme dans notre cas. Grâce à cette nouvelle représentation (figure 3.18), la concentration de point remarqué dans le portrait de phase précédemment devient plus visible sur le graphe de distribution. On arrive alors à identifier une forte densité pour les valeurs de **GDP** entre 0 et 5, et les valeurs de dérivée proche de 0. On observe ainsi une petite variation de la variable GDP, qui pourrait induire que la dynamique des territoires composants les systèmes n'est pas très forte². Les territoires ont tendance à avoir un comportement stationnaire. Cela nous permettrait de dire que pour le système donc, il n'existe pas plusieurs régimes ou bassins d'attraction vers qui

2. Dans cette figure 3.18, on représente l'évolution du PIB (sa variation annuelle) : plus la variation est proche de 0, moins le PIB évolue

il peut tendre. Ce régime est le modèle économique commun adopté par la majorité des pays étudiés (le capitalisme), l'attracteur du système étudié. Le portrait de phase obtenu confirme la présence de cet attracteur.

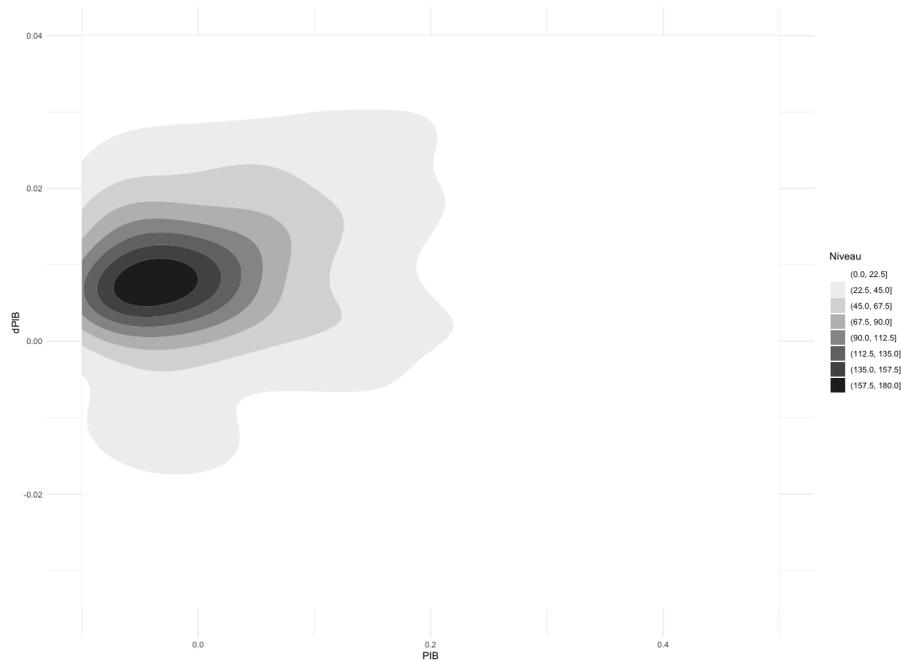


FIGURE 3.18 – Portrait de phase obtenu avec la variable PIB avec la représentation en distribution de densité. Source : Réalisation propre

Nous avons construit les portraits de phases issus des autres variables simples, nous avons procédé avec la même démarche. Pour la variable GES, la base de données a permis de détenir un ensemble de 22 pays à étudier pour la période comprise entre 1991 et 2012. On peut observer dans ce nouveau portrait de phase (figure 3.19) les mêmes observations qu'avec les portraits de phase obtenus de la variable PIB. Il existe un attracteur, une zone du portrait où les trajectoires des pays étudiés dans le système tendent à rester. Dans l'ensemble, le comportement de la dérivée de la variable GES oscille autour de 0, ce qui nous permet de dire que l'on est face à un mouvement stationnaire, qui ne connaît pas beaucoup de variation ou de grande fluctuation.

Nous prenons par la suite la variable IDH. Nous avons construit pour cela des variations se basant sur les années 1990 à 2019 pour 30 pays. En prenant le portrait de phase, issu de l'indicateur IDH, nous constatons les mêmes tendances que pour les précédentes variables. On voit une grande stationnarité du système autour d'une zone du portrait de phase. Une différence par rapport aux deux premières variables réside dans la plus grande amplitude de trajectoire pour la variable IDH. En effet, le bassin d'attraction est plus large : ce portrait de phase offre plus de choix, de possibilité de caractéristique par rapport aux deux autres, mais on observe toujours qu'il n'existe qu'un seul attracteur (figure 3.20).

L'observation de la variable CONSHAB montre une zone d'attraction qui est plus développée autour de 0 et moins large que les attracteurs observés sur les portraits de phase obtenus précédemment (figure 3.21). La variation des trajectoires des pays s'observe lentement avec cette variable parce qu'elle est fonction de la demande énergétique. Cette demande énergétique est corrélée avec le nombre de la population et donc sa croissance. Les constats rejoignent les

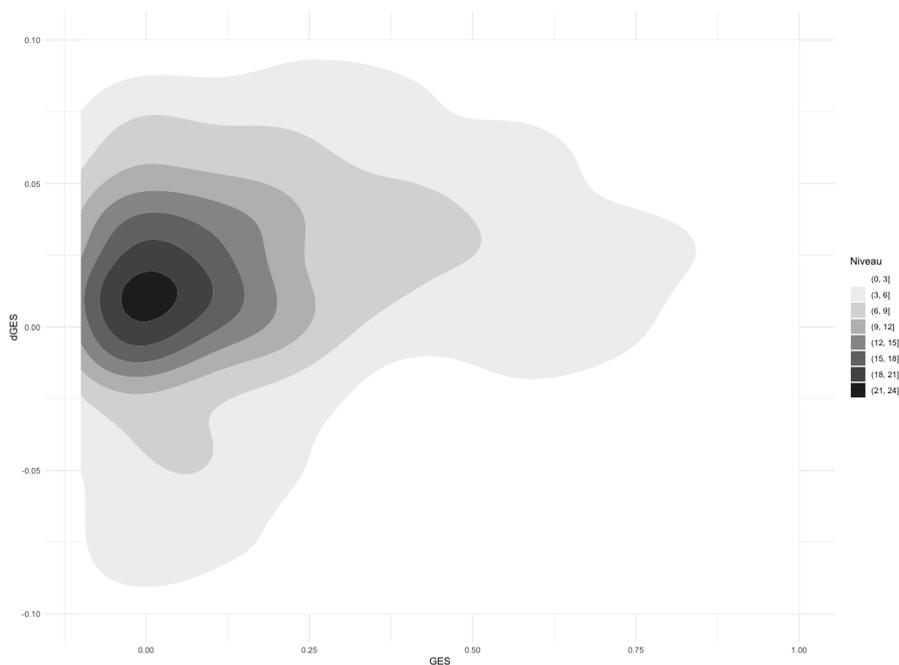


FIGURE 3.19 – Portrait de phase obtenu avec la variable GES avec la représentation en distribution de densité. Source : Réalisation propre

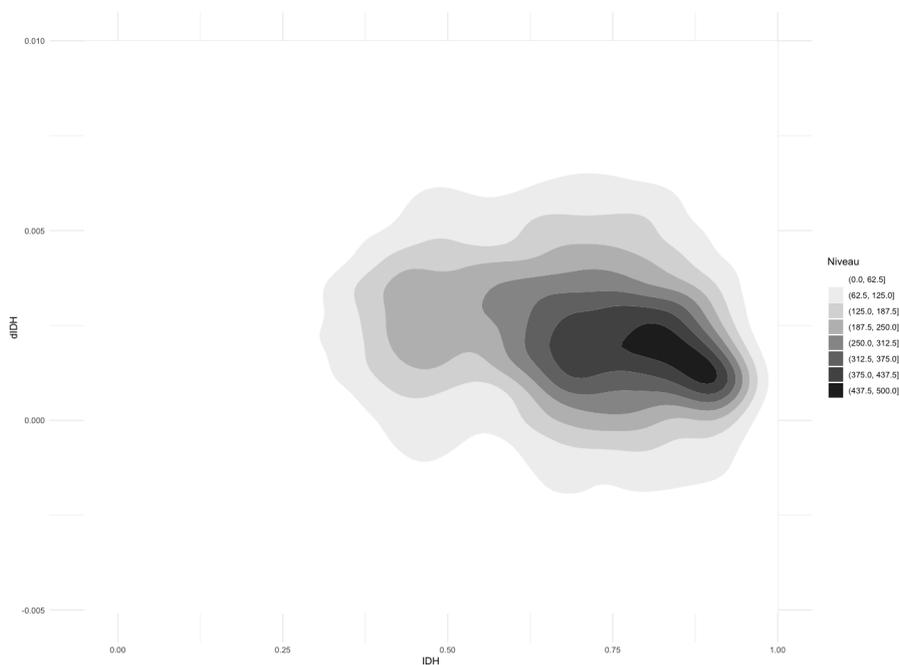


FIGURE 3.20 – Portrait de phase obtenu avec la variable IDH avec la représentation en distribution de densité. Source : Réalisation propre

mêmes observations précédentes, le portrait de phase permet de voir que le système formé par l'ensemble des territoires étudiés ont une dynamique statique et présente un attracteur commun.

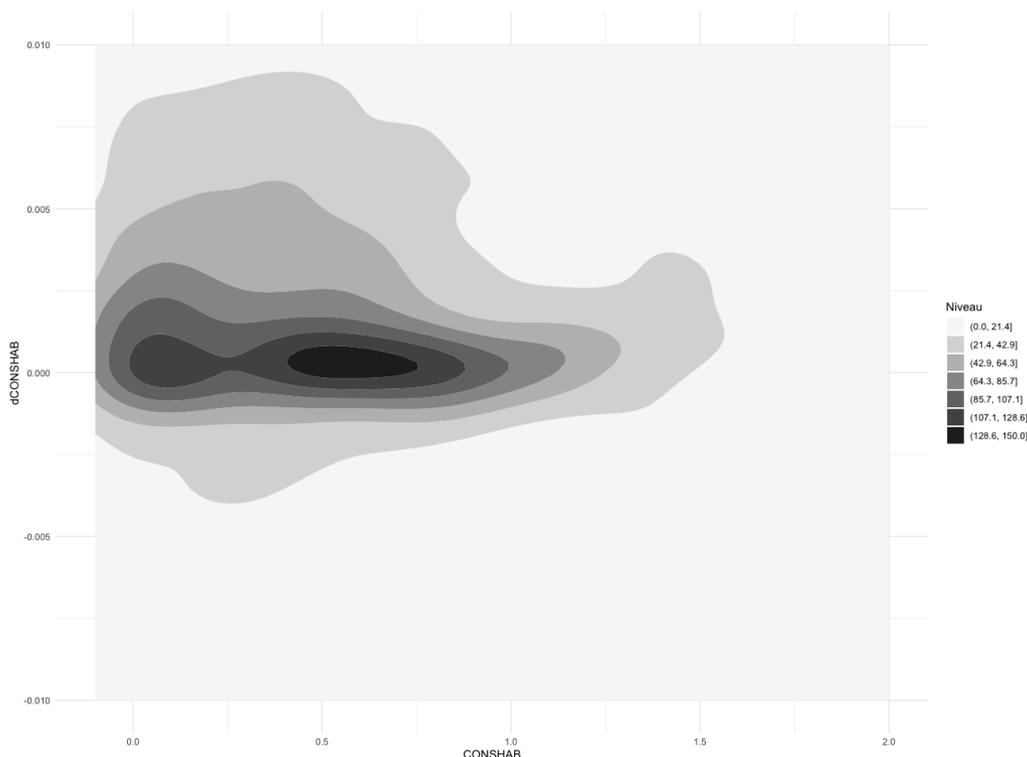


FIGURE 3.21 – Portrait de phase obtenu avec la variable CONSHAB avec la représentation en distribution de densité. Source : Réalisation propre

Construction du portrait de phase à partir d’un indicateur synthétique. Dans cette partie, nous allons utiliser un indicateur composite dans la construction du portrait de phase du système. Le système est formé par un ensemble de territoires : au total 45 pays. Ce sont des pays situés dans quatre grandes régions du monde : des pays de la région de l’Asie de l’Est et du Pacifique, des pays de l’Amérique Latine et Caraïbes, des pays de l’Europe et de l’Asie centrale, la région Sud de l’Asie, et enfin, des pays du Nord et Est de l’Afrique. Dans cet échantillon, plus de la moitié est qualifiée de pays à haut revenu comme l’Australie (AUS), l’Islande (ISL), la Corée du Sud (KOR), qui sont principalement des régions de l’Europe et de l’Asie Centrale (Pays à haut revenu). Le reste, classé dans les pays à moyen revenu, dont 18 % de l’échantillon situé dans le cadre supérieur (à revenu intermédiaire, tranche supérieure), et le quart de l’échantillon dans le cadre inférieur (à revenu intermédiaire, tranche inférieure). Notre système est un ensemble de pays qui sont des pays à fort potentiel économique, ou des pays émergents. Le choix de cet échantillon a été délimité par la disponibilité des données. Ces pays sont présentés dans le tableau 3.3 suivant :

TABLE 3.3 – Liste des pays étudiés. Source : World data Bank

	Code du Pays	Nom du pays	Classe
1	AUS	Australie	Revenu élevé
2	BOL	Bolivie	Revenu intermédiaire, tranche inférieure

Suite du tableau 2.2			
	Code du Pays	Nom du pays	Classe
3	BRA	Brésil	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
4	CHL	Chili	Revenu élevé
5	COL	Colombie	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
6	CRI	Costa Rica	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
7	CYP	Chypre	Revenu élevé
8	CZE	République tchèque	Revenu élevé
9	DNK	Danemark	Revenu élevé
10	ECU	Équateur	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
11	EGY	Égypte	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
12	SLV	El Salvador	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
13	FIN	Finlande	Revenu élevé
14	FRA	France	Revenu élevé
15	DEU	Allemagne	Revenu élevé
16	GTM	Guatemala	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
17	HUN	Hongrie	Revenu élevé
18	ISL	Islande	Revenu élevé
19	IND	Inde	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
20	IDN	Indonésie	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
21	ISR	Israël	Revenu élevé
22	ITA	Italie	Revenu élevé
23	JAM	Jamaïque	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
24	KAZ	Kazakhstan	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
25	KOR	Corée du Sud	Revenu élevé
26	MEX	Mexique	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
27	MAR	Maroc	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
28	NLD	Pays-Bas	Revenu élevé
29	NIC	Nicaragua	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
30	NOR	Norvège	Revenu élevé
31	PAN	Panama	Revenu élevé
32	PRY	Paraguay	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
33	PER	Pérou	Revenu intermédiaire, tranche supérieure
34	PHL	Philippines	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
35	POL	Pologne	Revenu élevé
36	PRT	Portugal	Revenu élevé
37	ROU	Roumanie	Revenu élevé
38	SGP	Singapour	Revenu élevé
39	SVK	République slovaque	Revenu élevé
40	SVN	Slovénie	Revenu élevé
41	SWE	Suède	Revenu élevé
42	CHE	Suisse	Revenu élevé
43	TUN	Tunisie	Revenu intermédiaire, tranche inférieure
44	GBR	Royaume-Uni	Revenu élevé

Suite du tableau 2.2			
	Code du Pays	Nom du pays	Classe
45	URY	Uruguay	Revenu élevé

Les états des territoires à définir, c'est-à-dire les variables qui ont été prises dans la construction de l'indicateur composite vont prendre en compte le caractère multidimensionnel du phénomène de vulnérabilité énergétique. Pour cela, nous avons rassemblé 25 variables qui touchent les dimensions sensibles de la vulnérabilité énergétique des territoires. Pour ces 45 pays, on a constitué un tableau de données, regroupant les 25 variables. Les variables retenues sont présentées dans le tableau 3.4.

TABLE 3.4 – Présentation des variables utilisées

Dimensions	Code Variable	Variables
Économie	GDP	Produit Intérieur Brut (PIB) par habitant
	croisGDP	Croissance du PIB
	GNI	Richesse active
	INDUSTRY	Revenus du secteur de l'industrie
	AGRI_FOREST_FISH	Revenus des secteurs primaires
	CURRENT_BALANCE	Actif
	TOTAL_RESERVE	Richesse passive
	GOOD_SERVICES	Biens et services
Sociale / Environnement	IDH	Indice de développement humain
	POP	Nombre de populations
	GES	Émission de gaz à effet de serre
	LAND_AREA	Superficie du territoire
	croisPOP	Croissance de la population
	URB_POP	Population urbaine
	FOREST_AREA	Surface forestière
	DENS	Densité de la population
Énergie	RURAL_POP	Population rurale
	CONS_HAB	Consommation par habitant
	FOSSIL_FUEL_CONS	Pourcentage d'énergie fossile dans la production électrique
	IMPORT_ENERGY	Quantité d'importation en énergie fossile
	ELEC_ACCES	Taux d'accès à l'électricité
	INTENSITY_ENERGY	La quantité d'énergie utilisée
ELEC_POWER	Le taux de production d'énergie électrique	

Suite du tableau 3.4		
Dimensions	Code Variable	Variables
	FUEL_EXPORT	Quantité d'exportation en énergie fossile
	ENR	Taux de pénétration de l'énergie renouvelable dans la production électrique

On dispose ainsi de 25 états de notre système. Nous avons par la suite adopté la même méthodologie développée dans les chapitres précédents : avec les états représentés par les indicateurs relatifs, on a construit un indicateur synthétique. Cet indicateur synthétisera alors les 25 états choisis pour représenter le système, ce qui permet ainsi de résumer ces variables en une seule information. Pour cela, on a construit un tableau de données des variables, pour les différents pays étudiés. Pour chaque année, de 1995 à 2014, on dispose d'un tableau de donnée. On a ensuite initié une analyse en composantes principales (ACP) sur la première année, soit 1995. Les résultats d'ACP permettent d'avoir les valeurs propres, les coordonnées des pays dans chaque composante principale ainsi que la contribution des variables dans la construction des composantes. S'appuyant de ces résultats d'ACP, on a ensuite calculé l'indicateur synthétique selon la méthode déjà explicitée dans le chapitre 2, formule 2.1. Dans cette démarche de construction d'indicateur, le but était de pouvoir synthétiser le grand nombre de variables par méthode d'agrégation, en s'appuyant sur les pondérations attribuées par l'ACP. Au final, on dispose d'un indicateur unique, qui représente donc les 25 états synthétisés que l'on a nommés IV. Cette démarche a été faite pour chaque pays, ce qui a permis d'avoir un indicateur de vulnérabilité énergétique de l'année 1995 pour les 45 pays étudiés. On a répété cette opération pour toutes les autres années (de 1996 à 2014). On a ainsi obtenu les évolutions des indicateurs des pays pour la période entre 1995 et 2014, ce qui permet d'avoir une évolution sur 20 ans. C'est une évolution plutôt aléatoire, car on n'identifie aucune tendance cyclique, ou de redondance, elle peut être croissante ou décroissante par pas de temps. Chaque pays a son évolution propre, certains avec de grandes amplitudes de fluctuations et d'autres non. La figure 3.22 donne des informations plus précises concernant l'évolution de l'indicateur pour chaque pays étudié. On peut voir une brève synthèse qui permet de distinguer les différents IV moyens de chaque pays étudié pour les valeurs d'indicateurs calculés (avoisinant le 0 pour les pays comme Suisse (CHE), l'Inde (IDN), le panama (PAN) ou encore la Slovénie (SVN). On peut aussi voir les valeurs minimales et maximales des évolutions des indicateurs pour chaque pays, qui permettent d'observer une très grande disparité entre les pays. Il y a des pays qui ont de grands écarts d'IV et se démarquent considérablement des autres. C'est le cas de la Corée (KOR), ou encore l'Australie (AUS). Ces graphes montrent également que la majorité des pays ont des valeurs faibles de l'indicateur de vulnérabilité énergétique. Ainsi, on peut déduire dans la caractérisation de la vulnérabilité énergétique qu'un pays à haut revenu peut être en situation de fragilité dans sa capacité de faire face aux risques liés à l'énergie.

Pour tracer le portrait de phase, à partir de l'indicateur construit IV, on a effectué le calcul des valeurs dérivées des indicateurs. Le calcul a été effectué pour chaque pays, nous avons formé un tableau qui résume les indicateurs IV, et les variables dérivées dIV. Ayant à disposition les valeurs de IV et dIV, on peut par la suite tracer le portrait de phase de notre système. Tout comme les portraits de phase obtenus des variables simples PIB, IDH, GES et CONS_HAB

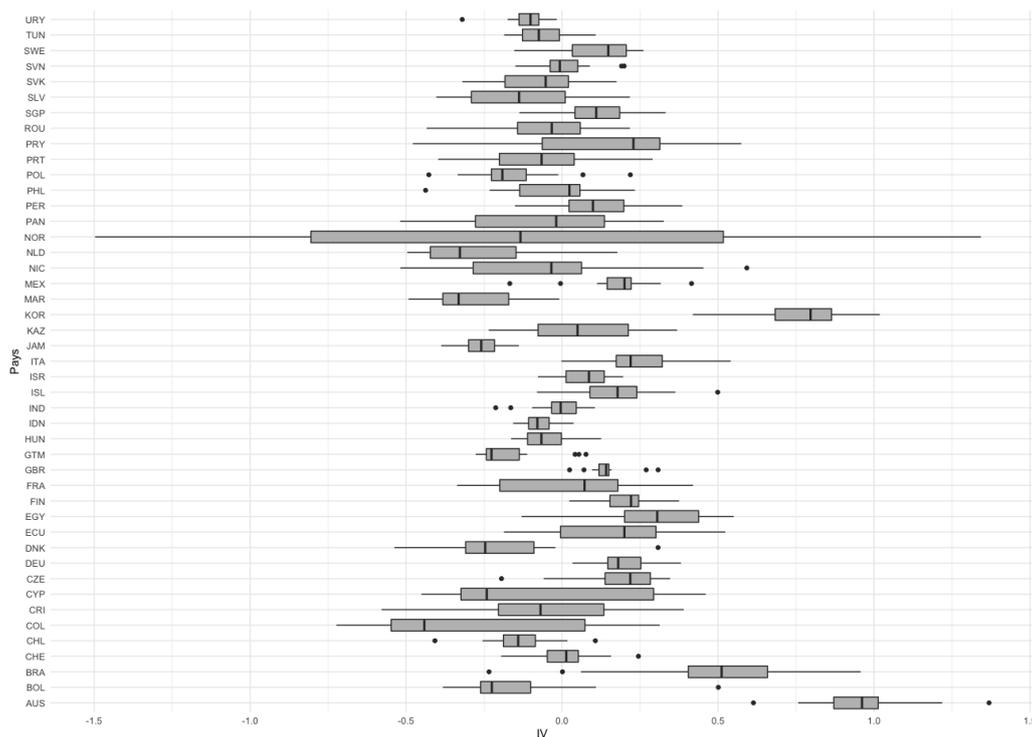


FIGURE 3.22 – Valeur moyenne, médiane, maximum et minimum des indicateurs pour chaque pays

vu précédemment, on obtient le portrait de phase de l'ensemble des territoires, en traçant les trajectoires de phase de chacun des territoires, et donc les évolutions de IV et dIV pour chaque pays. La figure 3.23 représente ce portrait de phase en une représentation en ligne de surface résultant de la représentation de densité de Kernel déjà utilisé auparavant.

Comme dans la construction du portrait de phase des variables simples, la méthode de densité de Kernel nous offre une meilleure visualisation de notre portrait de phase. Cette nouvelle présentation nous donne plus d'éléments :

- Dans un premier temps concernant la tendance des données qui constituent notre portrait de phase. Les niveaux de couleurs dans le graphe informent différentes probabilités de distribution des données. La couleur moins sombre indique une faible valeur et le dégradé converge peu à peu vers la zone plus sombre qui permet de voir les fortes probabilités. Les régions sombres sont les endroits où il y a plus de chance de retrouver des points (les données utilisées) que les régions plus claires. Ce graphe représente la tendance du portrait de phase obtenu des données mises à notre disposition (des variables IV et de leurs dérivées dIV).
- En perspective (figure 3.24) la forme qu'on observe de la tendance des points issue de la fonction de densité de Kernel est en cloche. Cette vue renforce le constat précédent : les points les plus élevés de la cloche indiquent où se concentre le plus grand nombre de points et inversement pour les endroits les plus bas.

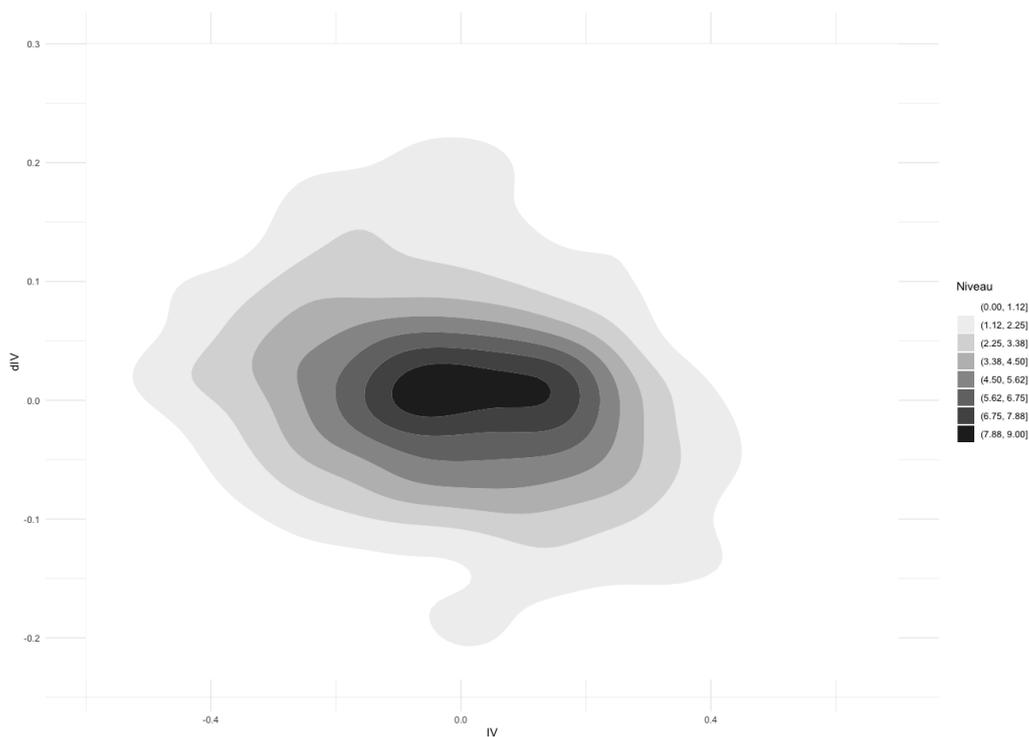


FIGURE 3.23 – Portrait de phase du système de territoire (visualisation 2D avec l’estimation de densité de Kernel)

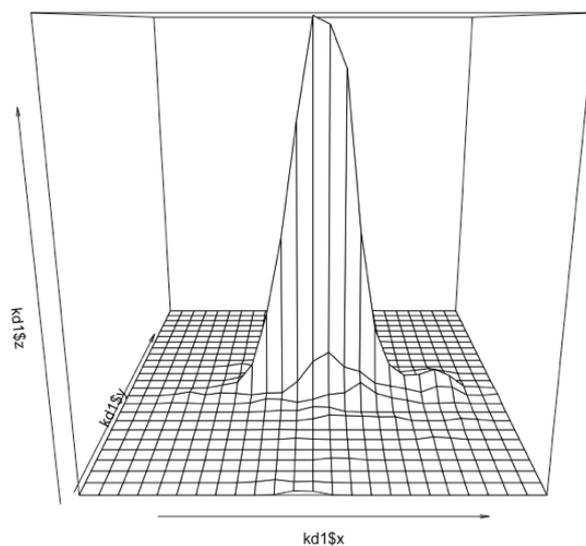


FIGURE 3.24 – Vue en perspective du portrait de phase obtenu des fonctions de densité)

3.3.3.2 Analyse des portraits de phase

La position des pays dans le bassin d’attraction. La construction des portraits de phase nous a permis de vérifier la présence d’un attracteur. Que ce soit dans les indicateurs simples

utilisés ou l'indicateur synthétique construit, l'existence d'un attracteur est toujours vérifiée. Il existe, dans le portrait de phase, une zone dans laquelle les points constituant les trajectoires de phase des pays ont tendance à se trouver. Cette information est essentielle dans cette étude parce qu'elle permet ainsi de dire que les pays, évoluent dans un même bassin d'attraction et donc qu'un régime tient en équilibre l'ensemble des territoires étudiés. Dans cet ensemble donc, le système possède un attracteur. Si on s'intéresse à la trajectoire de phase de chaque pays, on observe que les trajectoires sont au premier constat aléatoire. Chaque pays a sa propre évolution. Chaque pays a son propre développement résultant de leur politique et historique. Dans la suite de nos analyses, on se basera essentiellement sur le portrait de phase obtenu de l'indicateur synthétique construit précédemment. De ce portrait de phase, on a distingué trois profils de pays tels que :

- Un profil de pays qui ont des trajectoires qui sont plus situées à l'intérieur des surfaces de densité tracées dans le portrait de phase de Kernel, à l'intérieur du bassin d'attraction, là où se concentre le plus de points.
- Un autre profil dont les trajectoires chevauchent entre le bassin dans ses extrémités supérieures (sur son bord) et à l'extérieur du bassin
- Et enfin, un type de profil qui reste à l'extérieur du bassin, dans la zone moins dense.

Zone 1 : Pays positionnés à l'intérieur du bassin. Ce profil regroupe les pays qui ont des trajectoires dans les zones denses du portrait de phase obtenu. La trajectoire de phase des pays a plus de probabilité de se situer dans cette zone. On a pris quelques exemples de pays qui se trouvent dans cette zone.

L'Inde : Le pays de l'Inde est un pays démocratique, qui est devenu indépendant en 1947 après une lutte marquée par de grandes résistances non-violentes et manifestations. Il est parmi les pays le plus peuplé au monde (derrière la Chine). L'Inde est reconnue comme une puissance émergente, il est classé dans les pays à moyens revenus. Entre la période de 1995 et 2014 de cette étude, l'Inde est passé du 16^e rang mondial en termes de PIB, au 8^e rang [Mazzucchi \(2015\)](#). Malgré les progrès économiques et ce statut de pays émergent, l'Inde connaît encore de grands problèmes de pauvreté persistants. Des violences et des conflits ont marqué la chronologie de l'Inde, notamment dans les périodes 1994 à 2014, on peut recenser :

- Entre 1990-2005 : Guerre ethnique (Cachemire)
- Entre 1991-2002 : Violence ethnique (hindoues et musulmans)
- Entre 1996-1997 : Violence entre Inde et Pakistan
- En 1999 : Violence entre Inde et Pakistan (Kargil)
- Entre 2001-2005 : Insurrection maoïste

Sur le plan énergétique, pour la période de 1994 à 2015, l'Inde se trouve dans une situation d'insécurité sur le plan énergétique, sachant que son approvisionnement énergétique est désormais dépendant de produits d'importations, malgré ses immenses réserves. En effet, la croissance économique se heurte avec la hausse de demande énergétique, que ce soit la demande en électricité ou en carburant à cause de la forte croissance démographique croisée avec l'industrialisation massive du pays [Mazzucchi \(2015\)](#). L'état de l'Inde, décrit par les indicateurs IV montre des faibles valeurs. Le maximum se situe légèrement au-dessus de 0. La valeur médiane des indicateurs avoisine les $-0,075$. Le graphe [3.25](#) permet de voir comment évolue l'indicateur IV de l'Inde entre 1995 et 2014.

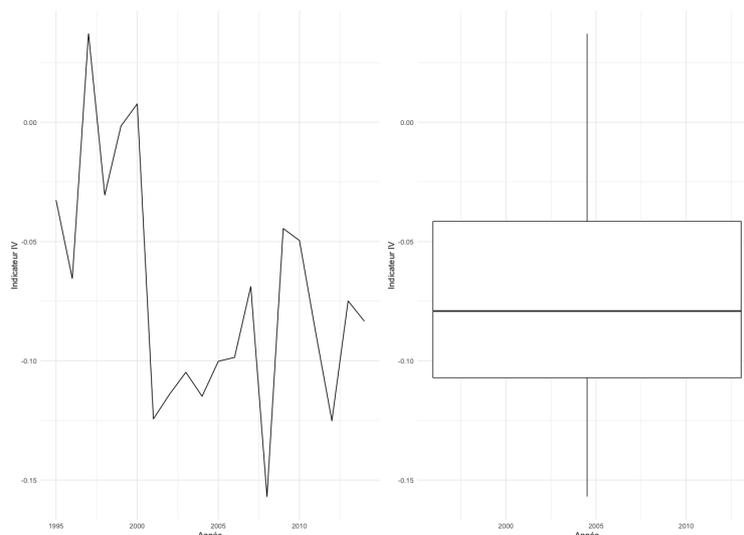


FIGURE 3.25 – Évolution de l’indicateur IV entre 1995 et 2014 pour l’Inde

La trajectoire de phase de l’Inde, représentée par la figure 3.26 donne un premier aperçu de la dynamique de sa trajectoire. Elle décrit un mouvement non cyclique.

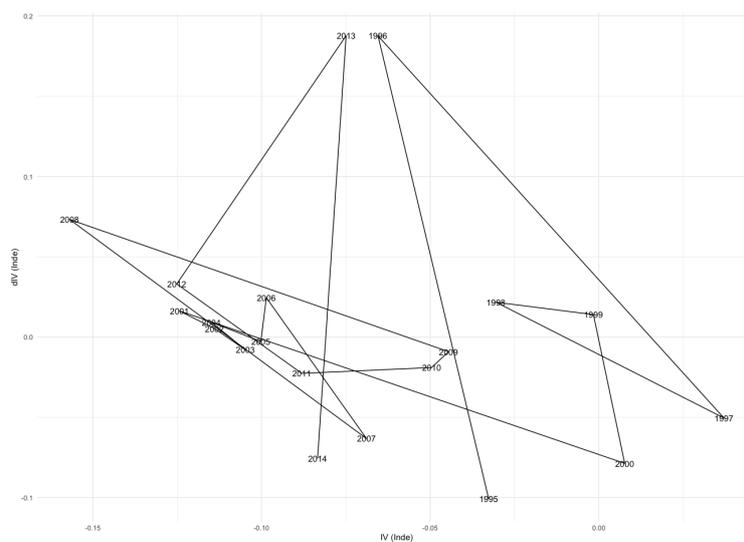


FIGURE 3.26 – Trajectoire de phase de l’Inde

Si on prend maintenant les positions de l’Inde dans le portrait de phase, on remarque que le pays (visible dans la figure 3.27) se retrouve à l’intérieur du bassin, dans sa zone d’attraction ou en est proche. On émet l’hypothèse que le profil de l’Inde est un profil, un exemple de pays que l’on pourrait rencontrer dans cette zone du portrait de phase.

Cas de la Jamaïque, du Guatemala et de l’Uruguay Ces pays sont des territoires qui

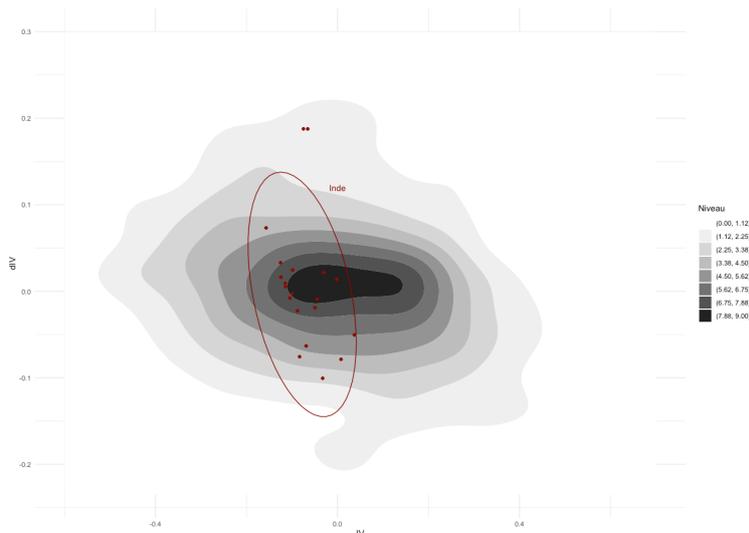


FIGURE 3.27 – Position de l’Inde sur le portrait de phase

font partie de la région de l’Amérique Latine et des Caraïbes. La Jamaïque et le Guatemala sont classés dans la catégorie de pays à revenus moyens, tandis que l’Uruguay dans les pays à haut revenu. Les trois pays obtiennent dans les calculs d’indicateurs des valeurs inférieures à 0 dans la figure 3.28.

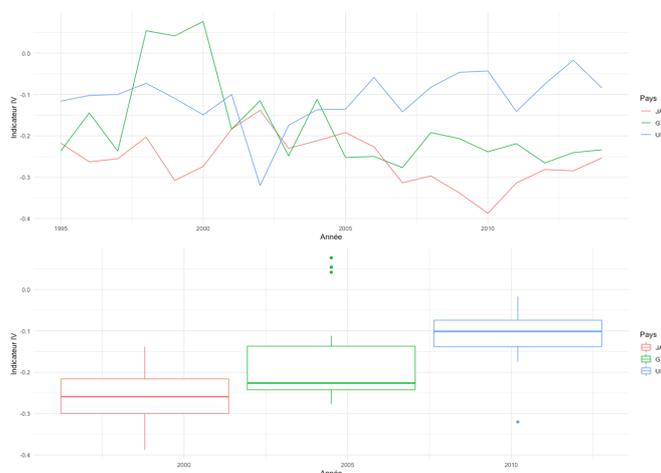


FIGURE 3.28 – Évolution des indicateurs IV de l’Uruguay, le Guatemala et la Jamaïque. Source : Réalisation propre

Dans le portrait de phase 3.29, les différentes positions de la Jamaïque sont présentées en couleur verte et le cercle tracé donne une étendue de ces trajectoires dans le portrait de phase, pour le Guatemala en orange, et enfin pour l’Uruguay en rouge), ces pays se retrouvent dans le bassin, à l’intérieur. Leurs positions sont assez proches. Ces pays sont aussi situés dans une même région (ce sont tous des pays d’Amérique latine et Caraïbes) mais par rapport aux indicateurs qu’ils ont obtenus, leurs valeurs minimales et maximales obtenues ainsi que la valeur moyenne font que l’Uruguay peut être classé devant le Guatemala et la Jamaïque.

Le Guatemala est parmi les pays puissants d’Amérique latine. Elle est même la première

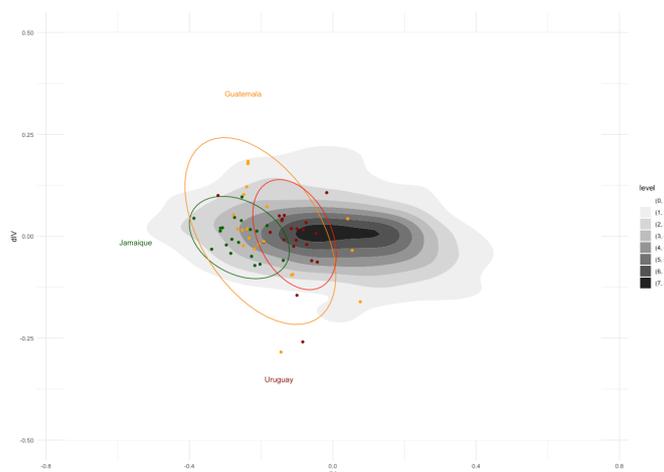


FIGURE 3.29 – Position des trajectoires de phase du Guatemala, Uruguay et Jamaïque dans le portrait de phase. Source : Réalisation propre)

en Amérique latine. Son économie est dominée par l'agriculture et son exportation. Il détient aussi une industrialisation soutenue. Cependant, c'est un pays qui connaît aussi une grande pauvreté. En 2013, l'[UNICEF](#) reconnaît au Guatemala que presque la moitié du pourcentage de la classe d'âge des enfants souffrent de malnutrition chronique. Le pays a été le témoin de nombreuses violences persistantes depuis la fin des années 1960. Il a pu retrouver la paix qu'en 1996. Le pays avait aussi à affronter des crises extrêmes de famine meurtrière. Une situation qui l'a même forcé à décréter en 2009 l'état de « calamité publique ». Les violences causées par des groupes de trafiquants de drogue représentent aussi des risques quotidiens que le Guatemala doit gérer. Ces derniers sont des obstacles majeurs dans la recherche de stabilité et croissance du pays. La Jamaïque, quant à elle, est une île dont les ressources naturelles sont le fondement de son économie comme la bauxite qui fait de lui le premier exportateur mondial de ce minerai dans le monde. En plus de cela, il peut aussi s'appuyer sur l'agriculture et le tourisme qui est pour lui une source de revenus et générateur d'emplois. Le pays reste quand même fragilisé par des problèmes sociaux (taux d'homicides élevé par exemple). Concernant l'Uruguay, c'est un pays dont l'économie est aussi basée sur l'agriculture, avec une forte proportion sur l'élevage. Le pays a connu de multiples crises économiques et grèves. La situation a commencé à s'améliorer vers 2003 et depuis a continué de croître. Un développement a pu se mettre en place, fruit d'une stabilité économique, d'un niveau de corruption bas et de politiques d'ouverture aux échanges commerciaux extérieurs comme la Chine que le pays a mis en place. Les conditions de vie de la population ont été aussi améliorées de ce fait. Ces brefs aperçus des situations de ces trois pays permettent de faire un point sur leur état.

On peut retrouver aussi les pays comme la Slovaquie (pays de l'Europe de l'est), la Suisse (pays de l'Europe centrale) qui se retrouve dans la même situation que les pays précédents par rapport à leur situation dans le bassin. La Slovaquie est parmi les pays développés à haut revenu, intégré dans la zone de l'[UE](#). Par rapport à ses besoins énergétiques, la Slovaquie est très dépendante de l'importation : en 2006 par exemple, elle importait 98 % de ses besoins pétroliers et 100 % de ses besoins en gaz naturel, et 72 % de l'Uranium nécessaire à sa production nucléaire. Son bouquet énergétique est composé de 34 % de pétrole, 22 % de combustibles solides et 22 % de nucléaire, 14 % de gaz naturel, et enfin 10 % d'énergie renouvelable [Crnčec \(2011\)](#). On a

retrouvé ainsi différents pays dans l'intérieur de bassin obtenu du portrait de phase des indicateurs synthétiques. La ressemblance de tous ces pays qui se retrouvent dans ce bassin est le fait qu'ils ont obtenu des scores IV entre $-0,25$ et $0,25$. Le bassin regroupe les pays de même région comme ceux de l'Amérique latine et Caraïbes (Uruguay, Guatemala, Jamaïque) ou encore celui du pays de l'Europe centrale (Suisse), de l'Europe de l'Est (Slovénie), de l'Asie centrale (Indonésie, Inde), avec une valeur IV assez faible. De tous ces exemples types, nous pouvons voir que malgré leur puissance économique déjà établie ou émergente, ces pays connaissent encore d'autres situations qui les rendent fragiles. Des situations qui sont d'ordre social, économique ou encore énergétique. Ces pays pris en exemple ont des points de ressemblance : la plupart de ces pays ont établi leurs gouvernements après avoir obtenu leur indépendance. Ce sont aussi en majorité des pays dont l'économie est émergente. Dans l'indicateur obtenu par contre, leur score sont différents, on peut avoir des pays à indicateur négatif, d'autres positif.

Zone 2 : Pays près du bord du bassin. Le second profil concerne les pays qui ont des trajectoires basculantes entre les deux zones du bassin. Les pays qui sont dans cette zone se retrouvent au bord du bassin, dans un comportement instable qui leur fait chevaucher les bords intérieurs et extérieurs du bassin d'attraction pour les 20 années étudiées. Ce sont des pays qui sont la plupart classés à haut revenu comme l'Italie, l'Allemagne, le Mexique ou le Royaume-Uni. Les figures 3.30, 3.33, 3.32, 3.31) montrent la position de ces quatre pays par rapport au bassin d'attraction du système de territoire étudié. Ces pays se retrouvent tantôt dans des zones à forte densité du portrait de phase, tantôt dans les extrémités à faible densité.

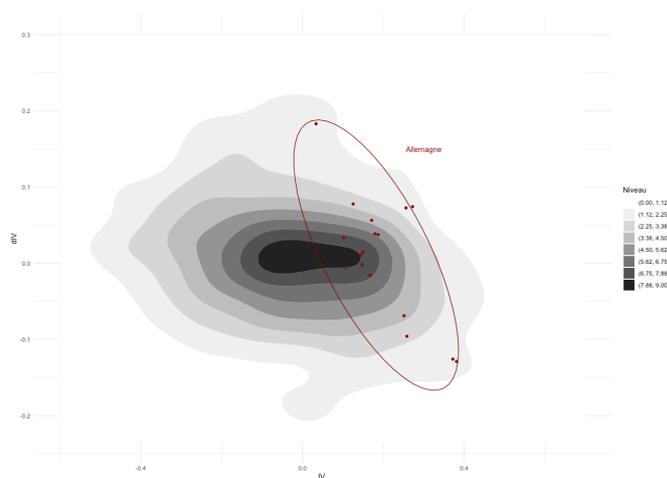


FIGURE 3.30 – Position de l'Allemagne sur le portrait de phase. Source : Réalisation propre

L'Allemagne (DEU), le Royaume-Uni (GBR) et l'Italie sont de cette liste, des puissances Européenne membre du G8. Entre les années 1995 à 2014, l'Allemagne a traversé trois grandes étapes. En premier, elle a dû s'adapter au dynamisme de l'immédiate post-réunification de

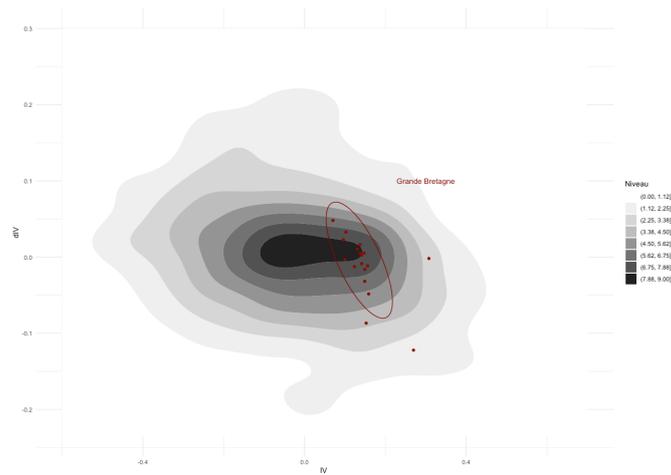


FIGURE 3.31 – Position de la Grande-Bretagne sur le portrait de phase. Source : Réalisation propre

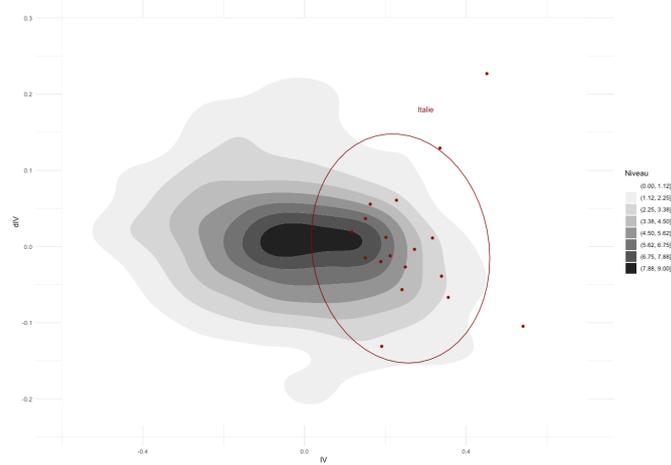


FIGURE 3.32 – Position de l'Italie sur le portrait de phase

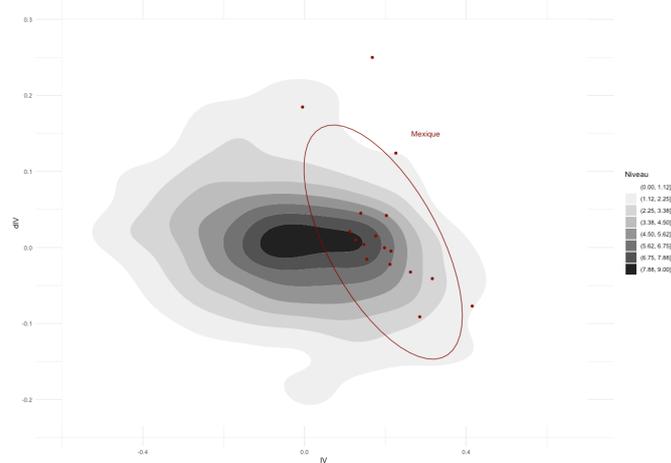


FIGURE 3.33 – Position du Mexique sur le portrait de phase. Source : Réalisation propre

l'Allemagne de l'Est et de l'ouest, après la chute des régimes communistes en Europe. Ensuite, elle a vécu le temps des désillusions et des contre-performances économiques (1995-2005) résultant de la réunification allemande en 1990, qui a engendré d'énormes coûts de reconstruction et d'intégration des anciennes régions de l'Allemagne de l'Est. Ces coûts ont exercé une pression significative sur les finances publiques et ont ralenti la croissance économique [Chervalier \(2009\)](#). Enfin, les nouvelles orientations qu'elle a adoptées dans sa politique énergétique pour la sortie du nucléaire l'ont exposé plus à une dépendance énergétique. La dépendance est due essentiellement à la nécessité d'importer la quasi-totalité des hydrocarbures qu'elle consomme. En 2006 par exemple, cela représentait 59 % de sa consommation d'énergie primaire [Deshaies \(2007\)](#).

Le Royaume-Uni a été le berceau de la révolution industrielle. À partir de 1979, la politique du gouvernement a basculé vers la privatisation des grandes entreprises publiques, l'adoption d'un modèle économique fondé sur l'expansion du secteur des services et de la finance, la délocalisation de l'industrie. Des situations qui ont favorisé la paupérisation de la classe ouvrière et l'accroissement des inégalités sociales de sa population. Malgré sa puissance économique mondiale, il y a encore des pourcentages importants des populations pauvres (22 % en 2010 par exemple) dans le pays. Cette pauvreté se traduit par des concepts tels que l'exclusion sociale, les inégalités, ou encore la précarité [Nativel \(2012\)](#), [Bost \(2017\)](#).

L'Italie a été bâtie sur un héritage historique et culturel très fécond. Malgré cela, elle n'a pas su maintenir cet élan économique. Elle a connu des périodes d'instabilité politique après l'effondrement de la Démocratie Chrétienne. Le vieillissement de la population, les inégalités sociales qui se creusaient de plus en plus, un développement économique en déclin sont des exemples des phénomènes qui fragilisaient le pays [Abis \(2009\)](#).

Dans ce profil de pays qui ont des trajectoires en chevauchement du bassin, on retrouve aussi le Mexique. Le Mexique est un pays émergent de l'Amérique latine. Il a connu une croissance économique très rapide, qui a été même qualifiée de miraculeuse, s'étalant sur deux décennies au lendemain de la Seconde Guerre mondiale [López G. \(2012\)](#). L'ALENA ([Accord de Libre-Échange Nord-Américain](#)) entre le Mexique, les États-Unis et le Canada a représenté un véritable tournant pour le pays dans le processus de libération économique et commerciale entamé par ses dirigeants depuis les années 1980. Cela lui a permis d'enregistrer une croissance économique de 6 % en moyenne entre 1996 et 2000. Cependant, cela a créé de grandes inégalités entre le nord et le sud du pays [Doire \(2004\)](#). L'exportation qui était sa force depuis la signature du contrat a été fragilisé quand les États-Unis ont noué des relations avec la Chine à partir de 2001.

Certes, les pays comme l'Allemagne, le Royaume-Uni, l'Italie ou encore le Mexique ont de fort potentiels économiques. Cependant, les hauts et les bas qu'ils ont connus dans leur croissance économique, leur politique, leur situation sociale, leur histoire expliquent comment leurs trajectoires ont des valeurs changeantes par rapport à leur indicateur IV pour la période de 1995 à 2014.

Zone 3 : Pays à l'extérieur du bassin. Ce groupe de pays est formé par des pays dont le portrait de phase se démarque des autres pays en se positionnant vraiment à l'extérieur du bassin. Trois pays se distinguent dans ce profil : l'Australie (AUS), la Corée du Sud (KOR) et la Norvège (NOR). Si l'on prend le cas de l'Australie, sa trajectoire se situe à l'extrémité droite du bassin d'attraction (Indicateur IV positif). L'Australie est un pays fédéral qui a connu la colonisation, la domination (britannique) avant d'être un État indépendant en 1986. Il est

classé douzième puissance économique au niveau mondial. Il a été classé en 2015 en seconde position pour son IDH élevé. Pays classé à haut revenu, l’Australie a connu un développement soutenu, assuré par une modernisation rapide de son économie, avec les politiques de grandes réformes que ses différents dirigeants ont adoptées depuis les années 1980. Dans notre calcul d’indicateur de vulnérabilité, Australie détient des scores très supérieurs à ceux des autres pays en valeur positive. Ses indicateurs restent bien supérieurs à 0, avec une valeur médiane de 0,9 avec une valeur minimale supérieure à 0,6 et un maximum au-dessous de 1,4. Le graphe 3.34 permet de voir l’indicateur IV de l’Australie.

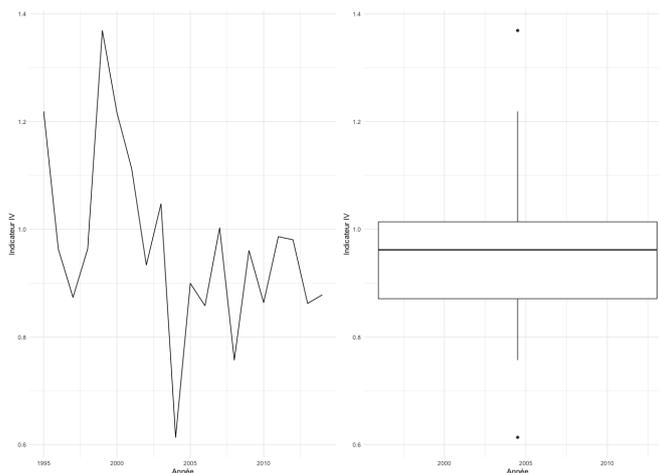


FIGURE 3.34 – Évolution de l’indicateur IV pour l’Australie et leur résumé statistique

Dans le portrait de phase, le pays se trouve dans un niveau de densité de [0,0 à 0,5], le graphe 3.35 donne un aperçu de la position de l’Australie dans le portrait de phase.

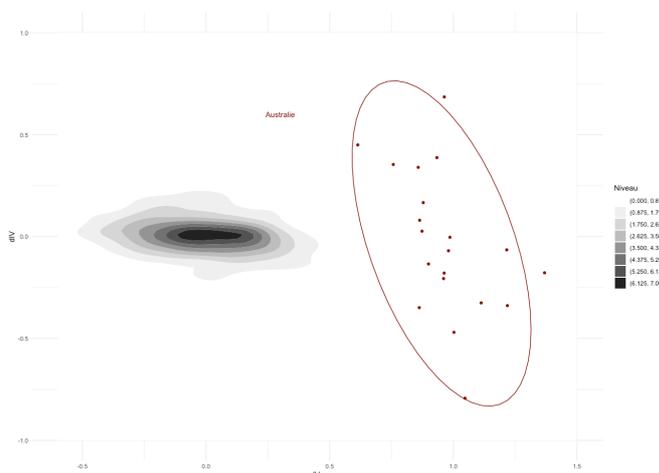


FIGURE 3.35 – Position de l’Australie dans le portrait de phase

Tous les points de position de l’Australie restent dans cette zone entre 1995 et 2014. L’histoire peut être témoin de la prospérité de l’Australie. Il a connu une progression continue et soutenue durant plusieurs années consécutifs (25 ans). On parle de « miracle australien » : l’Australie n’a pas connu de récession économique depuis 1991. La prospérité de l’économie

australienne repose sur sa grande richesse en ressources naturelles. Son économie s'appuie sur l'extraction de ces ressources naturelles. Un pays dit « chanceux », il est parmi les exportateurs de premier rang mondial de fer, de bauxite (40 % de la production mondiale), d'alumine (32 % de la production mondiale), d'aluminium (6 % de la production mondiale), de sables minéraux (50 % de la production mondiale), d'or (12 % de la production mondiale), de diamants (36 % de la production mondiale), de charbon. Les prises de décisions politiques des dirigeants australiens ont favorisé son maintien d'équilibre face aux crises. Par exemple, entre 2007 et 2013, le monde a connu une crise économique (la Grande Récession) mais cela n'a pas empêché l'Australie d'accumuler un taux de croissance de 16 %. Sa politique intérieure est marquée par une grande stabilité politique depuis 1949. La Corée du Sud quant à elle est un pays à haut revenu. Située dans la région de l'Asie, sa croissance a été soutenue entre les périodes de 1995-2014. En 1997, la Corée a souffert de la crise asiatique et a vu son économie mise à rude épreuve, mais elle a su rebondir très vite. En effet, le pays a de nouveau connu des croissances qui lui ont fait gagner la 13^e place mondiale par rapport à son PIB dès 2009. La trajectoire de la Corée du Sud est visible dans le graphe 3.36.

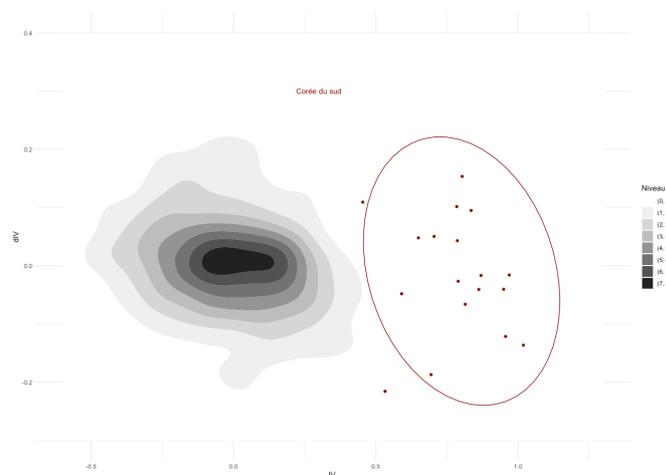


FIGURE 3.36 – Position de la Corée du Sud dans le portrait de phase

Dynamique dans le système de territoire. Notre paysage de stabilité est constitué par un bassin d'attraction. Afin de déterminer l'état du pays, pour une année donnée, s'il est vulnérable ou pas, on propose des valeurs seuils qui permettent de définir selon la position du pays dans le bassin. Les analyses des différents profils des pays positionnés dans le portrait de phase précédemment permettent de mettre en relief les similitudes entre les pays. Il permet aussi d'identifier par la zone sombre un seuil de vulnérabilité qu'on pourra soulever. En effet, les pays qui se retrouvent dans cette zone, après étude de leur cas, sont des pays qui sont fragiles par leur économie et leur situation énergétique (dépendance énergétique, taux d'accès à l'électricité encore bas). On se propose de répartir le bassin à plusieurs niveaux qui peuvent être pris comme l'état d'un territoire. Cette mesure se base sur l'axe principal qui est l'indicateur IV. On a procédé à une évaluation qualitative pour l'évaluation des seuils d'indicateurs IV qui permettra de définir la dynamique des pays au sein du bassin d'attraction. Le tableau 3.5 donne un résumé de cette évaluation.

Les résultats ont permis d'observer la dynamique de chaque pays durant les années 1994 à

TABLE 3.5 – Évaluation qualitative de l'indicateur IV utilisées

IV	Interprétation de l'indice
$IV < -0,5$	Très vulnérable
$- 0,5 \leq IV < 0$	Vulnérable
$0 < IV < 0,5$	Peu vulnérable
$IV \geq 0,5$	Non vulnérable

2015 et comment leurs états ont pu évoluer. Nous avons observé que l'Australie et la Corée du Sud sont des pays qui sont non vulnérables et qui ont su maintenir cette situation durant 20 ans déjà. Leur évolution dans le temps reste stable dans cet état pour toutes les années étudiées. Le Brésil, quant à lui, est un exemple de pays qui a pu passer d'un état vulnérable à un état non vulnérable en l'espace de 20 ans. En effet, le Brésil a connu une évolution significative en termes de dépendance énergétique au fil des années et c'est l'un des facteurs prépondérants de cette évolution. Historiquement, le pays avait une forte dépendance aux énergies fossiles, en particulier au pétrole importé, ce qui le rendait vulnérable aux fluctuations des prix sur le marché international. Cela avait un impact direct sur la stabilité économique et la sécurité énergétique du pays. Dans les années 2000, le Brésil a entrepris des initiatives majeures pour diversifier son mix énergétique et réduire cette dépendance. Le pays est pionnier dans l'utilisation des biocarburants à base d'éthanol par exemple. Les figures 3.37, 3.38, 3.39 montrent cette dynamique dans le temps et dans l'espace que les pays ont subi pour la période étudiée.

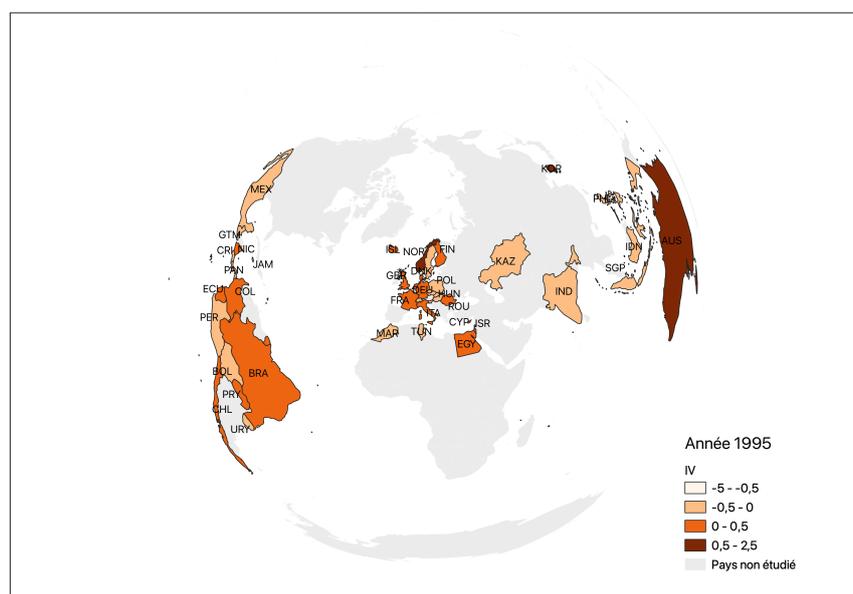


FIGURE 3.37 – Cartographie de la vulnérabilité énergétique des 45 pays étudiés pour l'année 1995

Les indicateurs qu'ils ont obtenus pour les années 1995, 2005 et 2014 y sont présentés. Ces trois figures montrent une grande stabilité des pays dans son ensemble qui se répartissent majoritairement dans deux grands états : peu vulnérable ou vulnérable. Les résultats renforcent

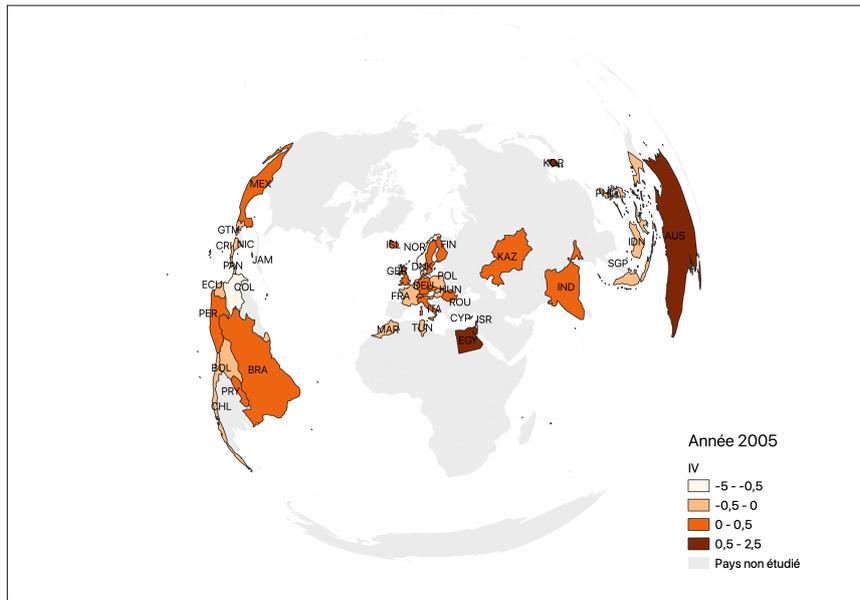


FIGURE 3.38 – Cartographie de la vulnérabilité énergétique des 45 pays étudiés pour l’année 2005

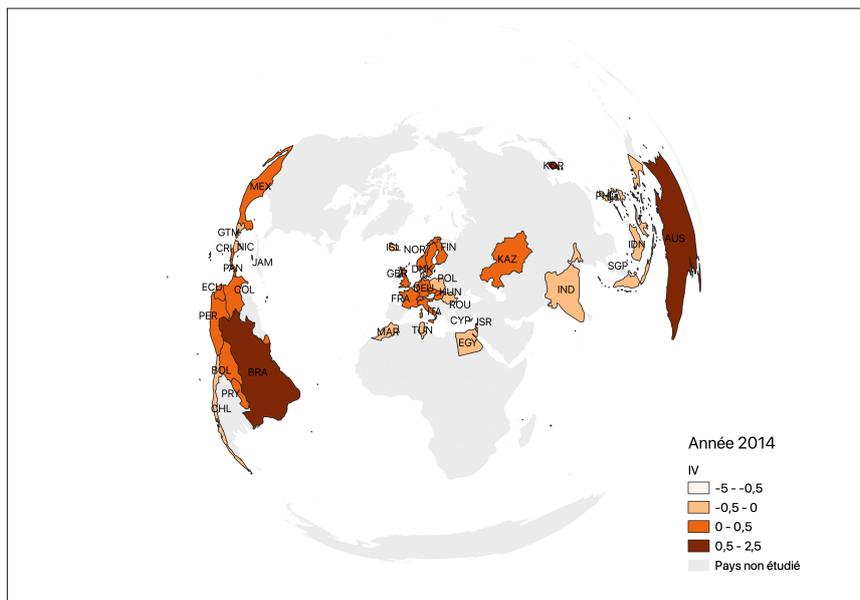


FIGURE 3.39 – Cartographie de la vulnérabilité énergétique des 45 pays étudiés pour l’année 2014

les constats sur la dynamique du territoire qui est lente et quasi stationnaire. Les changements ne sont palpables à ce niveau qu’à plusieurs décennies d’évolution. L’histoire le rappelle dans l’évolution des conditions de vie humaine par exemple. L’énergie a joué un rôle fondamental dans l’évolution des civilisations, depuis la découverte et domestication du feu, l’une des premières formes d’énergie utilisées par l’homme, il y a 500 000 ans, jusqu’aux formes et déclinaisons récentes découvertes et exploitées jusqu’à présent. L’homme avait besoin d’un demi-million

d'années pour devenir des « homo-industrialis » leur permettant de quitter le destin commun des êtres vivants et devenir ce qu'il est aujourd'hui [Jancovici \(2004\)](#). Avec peu d'énergie, l'évolution de la condition de vie de l'homme a été plus lente. L'utilisation massive du charbon a permis un accroissement de ce niveau de vie. Il a fallu encore 200 ans après pour que son espérance de vie soit doublée [Ngô \(2008\)](#). En l'espace de 20 ans, on ne peut pas observer de grands changements dans la trajectoire d'un pays qui le ferait basculer d'un régime à un tout autre. Il faut du temps. Les deux seules décennies pour lesquelles nous avons disposé de données ne sont donc pas suffisantes pour traduire un changement d'état majeur.

Cette démarche a été entreprise dans d'autres cas d'études. Dans une d'entre elle, une base de données constituée par des îles exclusivement a été construite. Les résultats reproduisent les mêmes constats trouvés dans les travaux antérieurs, notamment pour les îles comme l'Inde, le Japon, l'Australie, avec les mêmes caractéristiques trouvées. Cette base de données a aussi et surtout permis de mettre en relief la grande vulnérabilité des pays insulaires. En effet, on a pu mettre en évidence que la majorité des pays insulaires étudiés sont en vulnérabilité énergétique, et même que plus de la moitié des pays qui ont été qualifiés de [PEID \(Petits États Insulaires en Développement\)](#) le sont. La dépendance en énergie fossile est l'un des déterminants majeurs de cette fragilité, d'autant plus que les pays insulaires sont pour la plupart sans ressources et isolés [Randriafero Rajonandrianina and Benard \(2022\)](#). Une autre base, qui regroupait plusieurs pays de différents pays du monde, a permis cette fois de constater que si l'on prend l'ensemble des pays du monde, le portrait de phase permet de retrouver un contraste nord/sud. En effet, on peut apercevoir dans le portrait de phase deux attracteurs qui regroupent à chacun des pays du nord et des pays sud. La majorité des pays étudiés sont en vulnérabilité énergétique. Pour les pays généralement du sud, la vulnérabilité se traduit par leur incapacité à fournir l'électricité à l'ensemble de sa population, donc un taux d'accès faible, tandis que pour les pays du nord, la vulnérabilité persiste dans leur forte dépendance à l'usage de l'énergie fossile. Dans cette analyse, les pays du sud sont les plus susceptibles d'obtenir une valeur plus faible sur l'IV, ce qui prouve que les pays sous-développés ont beaucoup de difficultés à mettre en œuvre la transition énergétique en raison de leur grande vulnérabilité. Les pays du nord qui ont entrepris leur transition vers l'énergie verte, en améliorant l'intégration des énergies renouvelables dans leur mix énergétique, démontrent une grande efficacité pour obtenir des valeurs plus fortes en IV .

3.4 Conclusion du chapitre

L'objectif de ce troisième chapitre a été de construire le portrait de phase des territoires qu'on étudie afin d'analyser le comportement ou dynamique des pays le constituant, mais aussi

de cet ensemble de pays. La modélisation du système par les équations de Lorenz n'a pas pu être validée, car l'optimisation du modèle a abouti avec des erreurs de prédiction importantes. Nous savons que la théorie de Lorenz est un modèle chaotique et donc a la propriété d'être sensible aux conditions initiales et traitant la dynamique dans un pas de temps à la seconde. Ce qui n'est pas le cas de notre système, qui est définie par des variables annuelles, et donc on a un changement moins rapide et moins simultané, un mouvement plus stationnaire qu'on ne peut pas observer en une échelle petite qu'est la seconde. De plus, les conditions initiales qu'on a prises sont relatives aux données disponibles qui sont définies pour l'année 1995. Or, on est sûr que par rapport à l'évolution et développement du territoire, cela n'a pas pu commencer à cette année, mais bien avant. Tout cela justifie la non-adaptabilité du modèle de Lorenz pour modéliser le territoire et en parallèle sa vulnérabilité énergétique. Ainsi, les résultats obtenus de l'analogie avec les équations de Lorenz nous ont conduits à construire des portraits de phase propre à notre système et nous ont permis de justifier la démarche de construction de nouveau modèle, sachant que si le système avait eu un comportement chaotique, la poursuite de l'étude aurait été impossible. La deuxième démarche, qui consistait cette fois à la construction directe de portrait de phase, sans passer par des modèles mathématiques prédéfinis, nous a permis d'avoir deux nouveaux éléments de description de la dynamique des pays étudiés. En premier temps, les portraits de phase obtenus nous éclairent sur trois caractéristiques de la dynamique des territoires : le système a une dynamique lente et évolue de manière quasi stationnaire et ne connaît de grands changements sur la période de temps étudié. On peut en déduire qu'un changement à l'échelle d'un territoire n'est palpable que sur plusieurs décennies d'évolution et qu'une période de 20 ans comme dans cette étude ne permet pas d'observer un très grand changement. La méthode de densité nous a permis de vérifier que le portrait de phase montre la présence d'attracteur. Cet état attracteur définit une situation de stabilité. Cette attraction est associée à la stabilité macroscopique du système, à la stabilité de l'ensemble du système étudié. Ce résultat permet de voir comment l'économie mondiale s'est équilibré vers une économie basée par l'usage du pétrole, depuis l'ère d'industrialisation. Autrement dit, on peut affirmer que le maintien de la stabilité ou de l'équilibre mondial se base sur l'usage de l'énergie, jusqu'ici à base fossile. Ce constat justifiera également le fait qu'aucun système ne peut évoluer sans limites, la bifurcation sera le point critique à partir duquel l'ancien état attracteur s'avère instable et de nouveaux états attracteurs deviennent possibles. Dans notre cas, la transition énergétique représente une bifurcation pour notre système mondial, un mouvement qui va l'obliger à retrouver une nouvelle économie et régime qui ne sera plus basé sur l'utilisation massive de l'énergie fossile. L'état attracteur identifié permet, à partir des indicateurs synthétiques de vulnérabilité énergétique obtenus, d'identifier le niveau de vulnérabilité critique des territoires et par la suite d'effectuer une analyse qualitative des indicateurs calculés permettant de décrire quatre états de vulnérabilité énergétique qui sont : non vulnérable, peu vulnérable, vulnérable et très vulnérable, et enfin que les situations économiques ne sont pas les seuls déterminants de la vulnérabilité énergétique des territoires, car un pays classé développé est cependant vulnérable énergétiquement. Toujours dans cette deuxième démarche, un intérêt sur la trajectoire de chaque pays et de leur vulnérabilité énergétique nous permet aussi de voir que le facteur prépondérant qui contribue à la vulnérabilité énergétique d'un territoire est sa dépendance énergétique. La vulnérabilité d'un pays augmente à mesure qu'il devient davantage tributaire de sources extérieures pour son approvisionnement en énergie et sa production énergétique. En revanche, cette vulnérabilité diminue lorsque la dépendance diminue, comme c'est le cas pour les régions qui ont encouragé l'intégration de sources d'énergie renouvelable dans leur mix

énergétique. Ces constats rejoignent les travaux de Benard sur l'analyse de la dynamique des territoires [Benard \(2022\)](#). En deuxième temps, la construction du portrait de phase nous a amené à distinguer deux états de notre ensemble de territoire : la variable qui décrit son état et la dérivée de cette variable. On peut retrouver, pour l'ensemble de dérivées calculées, une fonction non linéaire, dépendante des variables de départ. Pour cela, de nombreux logiciels et algorithmes de calculs sont mis à disposition. In fine, cette démarche permettra de disposer d'équations différentielles qui pourra encore donner plus d'informations sur l'évolution de l'état des territoires passé et futur.

CHAPITRE 4

Application dans l'analyse comparée de la vulnérabilité énergétique des îles du Sud Ouest de l'Océan Indien

Savoir pour prévoir ; prévoir pour pouvoir

Bacon, XVII e siècle

Sommaire

4.1	Introduction du chapitre	108
4.2	Situation socio-économique des îles du sud-ouest de l'Océan Indien	110
4.2.1	Madagascar	110
4.2.2	Maurice	112
4.2.3	Seychelles	113
4.2.4	Comores	114
4.2.5	La Réunion	116
4.2.6	Mayotte	117
4.3	Analyse de la vulnérabilité énergétique des îles de l'Océan indien	118
4.3.1	Construction d'indicateur synthétique de vulnérabilité énergétique des îles	118
4.3.1.1	Présentation de la base de données	118
4.3.1.2	Construction et analyse de l'indicateur synthétique représentant la vulnérabilité énergétique des îles	119
	Madagascar.	120
	Les Comores.	121
	Maurice et Seychelles.	121
	Réunion et Mayotte.	122
4.3.1.3	Construction du portrait de phase des îles et identification des attracteurs de vulnérabilité énergétique de la région	122
4.4	Implication politique	124
	La Réunion et Mayotte.	124
	Madagascar.	127
	Les Comores.	129
	Maurice.	130
	Seychelles.	131
4.5	Conclusion du chapitre	132

4.1 Introduction du chapitre

L’océan Indien s’étend sur une superficie de 75 000 000 km², soit environ 20 % du globe terrestre [Nematchoua et al. \(2019\)](#). Il accueille dans sa partie sud-ouest les îles que sont Les Comores, la Réunion, Mayotte, Madagascar, Maurice et les Seychelles [Hammar et al. \(2012\)](#) (figure 4.1).

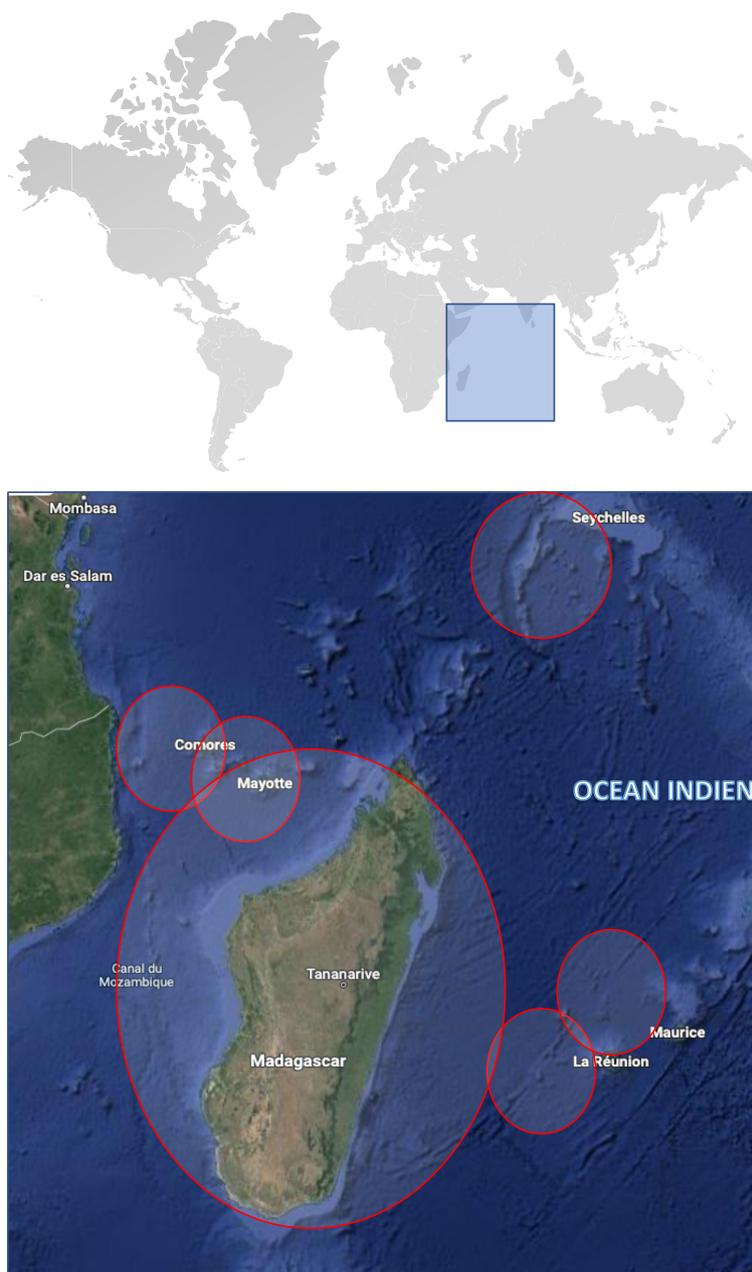


FIGURE 4.1 – Localisation géographique des îles Madagascar, La Réunion, Seychelles, Comores, Mayotte et Maurice dans le monde et dans l’Océan Indien)

Hormis Mayotte, ces îles forment la [COI \(Commission de l'Océan Indien\)](#), une organisation intergouvernementale visant à créer une plateforme de partage d'expériences et de coopération couvrant un large éventail de secteurs comme la préservation des écosystèmes, la gestion durable des ressources naturelles, la sécurité maritime, l'entrepreneuriat, la santé publique, les énergies renouvelables et la culture [Glachant \(2019\)](#). Créée par la Déclaration de Port-Louis en 1982, la COI a été institutionnalisée aux Seychelles en 1984 par l'Accord général de coopération, plus connu sous le nom d' « Accord de Victoria » [IOC \(2021\)](#). Comme toutes les îles, Maurice, la Réunion, Madagascar, les Comores, les Seychelles et Mayotte sont des territoires isolés et entourés par l'océan [Wolf et al. \(2016\)](#). Ces territoires se ressemblent par leur insularité, mais diffèrent par leur taille et leur statut. Trois classes se distinguent : la première regroupe les petits états insulaires qui sont les Comores, Maurice et Seychelles ; ensuite, un grand état insulaire représenté par Madagascar ; enfin, on a les petits territoires français formés par Mayotte (Collectivité départementale) et La Réunion (Département d'outre-mer). Les îles du Sud-Ouest de l'Océan Indien sont des lieux hétérogènes et uniques qui se différencient par leur géomorphologie, leur écosystème, leur culture, leur politique et leur gouvernance [Poti et al. \(2022\)](#). Malgré ces différences, ces îles sont toutes affectées, à des intensités variables, par des contraintes au développement et des formes de vulnérabilités liées à leur insularité [Bouchard \(2004\)](#). En effet, ce qu'elles ont en commun sont les caractéristiques qu'elles héritent de leur insularité, leur petite taille (sauf pour Madagascar), leur degré élevé d'endémicité, leur vulnérabilité aux risques naturels comme les ondes de tempêtes, les cyclones, les risques volcaniques, l'augmentation des niveaux de la mer, les ressources naturelles limitées, ressources financières et techniques inadéquates, forte densité de la population dans les zones littorales [Poti et al. \(2022\)](#). Les États insulaires du sud-ouest de l'Océan Indien sont vulnérables aux risques naturels qui sont aujourd'hui intensifiés par le changement climatique [Nciphra et al. \(2016\)](#). Le [GIEC \(Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat\)](#) a considéré la région de l'océan Indien comme l'une des régions les plus vulnérables au monde face aux impacts élevés du changement climatique. Cette dernière décennie, ces îles sont toujours victimes des cyclones chaque année [Nematchoua et al. \(2019\)](#). Ces îles sont très sensibles à la montée des eaux et aux risques d'inondations, d'autant plus que la majorité de leurs populations urbaines sont accueillies dans les zones côtières. Les îles de cette région sont aussi très dépendantes au marché extérieur et sont donc très sensibles aux inflations et chocs économiques éventuels. Bien que l'Afrique de l'Est soit la masse continentale la plus proche de ces îles, les relations commerciales des îles avec cette région restent très limitées [Rosalie and Campling \(2020\)](#). A part la grande île (Madagascar) et La Réunion, les îles du sud ouest de l'Océan Indien sont considérées comme des [PEID \(Petits États Insulaires en Développement\)](#)¹

Les déterminants de la localisation sont des sources importantes de vulnérabilité économique pour de nombreux PEID, car l'isolement physique des marchés régionaux dynamiques entraîne des coûts sensiblement plus élevés en termes de fret maritime et aérien. Les principaux partenaires commerciaux de ces îles sont notamment des pays de l'UE ([Union Européenne](#)), ou de l'Asie qui sont des pays géographiquement éloignés. Cela entraîne des coûts de transport

1. Les PEID sont des territoires reconnus comme étant des territoires particulièrement fragiles, et qui sont les premiers à subir les effets du réchauffement climatique. Les PEID en anglais : "*Small Island Developing States (SIDS)*" sont recensées par quatre listes différentes dans la littérature : une liste politique de 39 PEID crée par l'*Alliance Of Small Island States* (AOSIS), une liste économique de 48 PEID crée par les Nations Unies, une liste institutionnelle de 46 PEID crée par les Nations Unies et enfin une liste pragmatique de 29 PEID qui a été créé selon des critères de population, de développement, de statut politiques et bien d'autres.

plus élevés. La souveraineté politique de ces îles, surtout pour les Îles États, entraîne des coûts par habitant disproportionnés dans une multiplicité de facteurs, notamment la protection de l'environnement, le développement des infrastructures, la défense nationale et la représentation dans un large éventail de forums internationaux. Par exemple, 46 % de la superficie des Seychelles sont des parcs nationaux, des réserves ou des zones spéciales et 228 km² de la ZEE (*Zone Économique Exclusive*) sont désignées comme parcs marins nationaux. Bien que ces mesures soient généralement perçues comme une politique saine en termes de conservation de l'environnement, elles entraînent des coûts élevés par habitant en termes de main-d'œuvre et d'autres intrants nécessaires à une surveillance et une réglementation efficaces [Rosalie and Campling \(2020\)](#). En termes de ressources énergétiques, les îles du sud-ouest de l'Océan Indien disposent d'un grand potentiel en énergie renouvelable. Les îles disposent d'abondantes ressources solaires, géothermiques, éoliennes et bioénergétiques qui peuvent être utilisées pour remplacer l'utilisation importante de combustibles fossiles [Selosse et al. \(2018\)](#). La région dispose d'un gisement solaire important, les ressources énergétiques des océans peuvent offrir des opportunités futures propices au développement de leurs secteurs énergétiques [Hammar et al. \(2012\)](#). Malgré ce potentiel, les îles du sud-ouest de l'océan Indien restent, chacun à leurs degrés divers, souvent confrontées à des problèmes énergétiques, liées en partie à leur grande dépendance aux importations de combustibles fossiles qui sont souvent sujettes à des chocs de prix sur les marchés de l'énergie, à des perturbations dans l'approvisionnement [Genave \(2019\)](#). De plus, les îles de la région de l'Océan Indien sont des territoires insulaires avec aucune interconnexion au réseau électrique continental. Tout cela démontre que ces territoires insulaires sont très fragiles et vulnérables. Les études sur les îles sont d'une grande utilité pour pouvoir prendre en main cette situation. Cependant, la littérature ne recense pas beaucoup de travaux faits sur les îles du sud-ouest de l'Océan Indien. L'objectif de ce chapitre est donc d'apporter à partir des outils d'analyses développés au chapitre 2 et chapitre 3 une contribution dans l'analyse et la description de la situation de ces îles, de leur état de santé, surtout en termes d'énergie. Ce chapitre contribuera à enrichir cette littérature en ayant pour objectif de faire l'étude de la vulnérabilité énergétique de ces îles par la construction d'indicateur synthétique dynamique dans le temps et la construction de portrait de phase. Pour cela, le travail se fera en trois étapes bien distinctes. D'abord, la présentation des îles et de leur contexte socio-économiques sera fait. Ensuite, une description de leur situation énergétique sera développée dans un second temps à travers la caractérisation de leur vulnérabilité énergétique. Enfin, les politiques énergétiques mises en place dans chaque île seront ensuite analyser par rapport aux constats de leur vulnérabilité énergétique dans la troisième et dernière partie du chapitre.

4.2 Situation socio-économique des îles du sud-ouest de l'Océan Indien

4.2.1 Madagascar

Madagascar a une superficie avoisinant les 591 896 km² avec une population de 28 731 294 habitants dont plus de 73 % de population rurale (en 2021) [INSTAT \(2022\)](#). C'est un état républicain, insulaire situé dans l'océan Indien au large des côtes de l'Afrique australe. C'est la deuxième plus grande nation insulaire et la quatrième plus grande île du monde [Nematchoua et al. \(2019\)](#), [Eka Prasetya et al. \(2022\)](#). Le pays compte six grandes villes, accueillant 37,86 %

de sa population (en 2019) dont Antananarivo et Fianarantsoa (hautes terres centrales), Mahajanga (côte ouest), Toamasina (côte est), Antsiranana (côte nord), et Toliara (côte sud) [Eka Prasetya et al. \(2022\)](#). La géographie physique de Madagascar est marquée par une échine montagneuse de 1200 à 1500 m, traversant l'île du nord au sud sur toute sa longueur. Combinées avec l'influence maritime, les conditions du vent, sa situation géographique, ce relief provoque des conditions climatiques extrêmement variées sur l'île [Nematchoua et al. \(2019\)](#). Madagascar possède un grand potentiel en ressources naturelles, cependant il est l'un des pays les moins développés au monde et parmi les pays les plus pauvres du monde. Le taux de pauvreté² à Madagascar s'élève à 80,7% en 2012 et le PIB par habitant ne dépasse pas les 14,64 \$ par jour (en 2021) [World Energy Council \(2020\)](#). Madagascar est fragile économiquement, 77,9% (en 2018) de sa population ont pour activité économique la pratique de l'agriculture non intensive et traditionnelle [INSTAT \(2022\)](#). En 2018, 36,5% de sa population ont accès à l'électricité et 27,7% pour l'accès à l'eau potable. Les nombreuses crises et instabilités politiques qui se sont déroulées systématiquement depuis son indépendance en 1960 en sont les causes indéniables de cette fragilité. Le pays a connu trois ruptures politiques majeures en 1991, 2002 et 2009 qui ont contribué inévitablement au ralentissement économique extrême et à l'affaiblissement de sa population [Praene et al. \(2021b\)](#) alors que la population est déjà vulnérable dès le départ à cause de son passé colonial. Les crises économiques et pandémie mondiale ont aussi des répercussions sur son économie et développement comme la pandémie de COVID-19 qui a retardé de plus d'une décennie son progrès en termes de revenu par habitant, de lutte contre la pauvreté d'après les estimations de la Banque Mondiale [World Energy Council \(2020\)](#). L'enjeu majeur du pays est son développement. Le pays est aujourd'hui classé cinquième pays le plus pauvre du monde et au quatrième rang des pays avec les taux (un enfant sur deux) les plus élevés de malnutrition chronique et maladie liée à un retard de croissance pour les enfants de moins de cinq ans. L'inégalité sociale y est aussi flagrante, les conditions de vie dans les zones rurales restent très difficiles, avec un accès limité ou quasi inexistant aux transports, à l'électricité ou encore à l'eau potable. Même dans les villes, l'écart entre riches et pauvres est très grand [World Energy Council \(2020\)](#). La figure 4.2 ci-après nous montre la répartition de la population de Madagascar dans ses 22 régions pour l'année 2018. Dans son ensemble, Madagascar reste encore un vaste pays faiblement peuplé si on se réfère à sa densité au niveau national qui est de 43 habitants/km².

2. Le taux de pauvreté est la part de la population qui vit avec moins 2,15\$ par jour

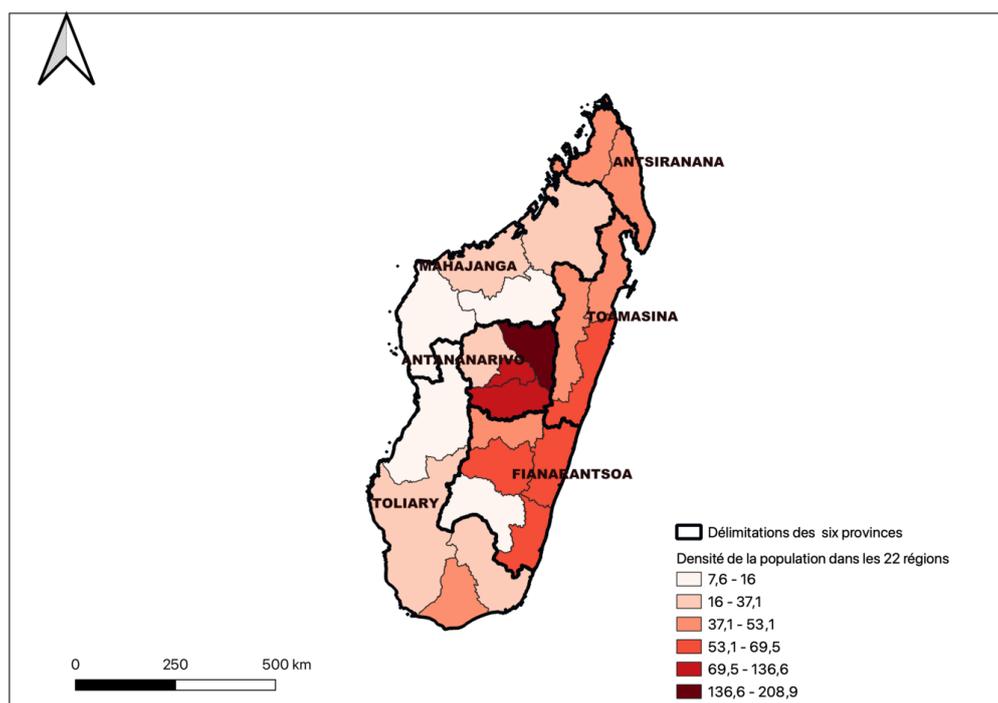


FIGURE 4.2 – Densité de la population de Madagascar par régions en 2018. Source de données : [INSTAT \(2022\)](#)

4.2.2 Maurice

Maurice a obtenu l'indépendance le 12 mars 1968 après avoir été sous l'autorité du Royaume-Uni. Il est devenu une république au sein du Commonwealth le 12 mars 1992, 24 ans plus tard. Maurice s'étale sur une petite superficie avoisinant les 1865 km² pour environ 1,3 million d'habitants, situé à environ 2000 km au large de la côte sud-est de l'Afrique et voisin de La Réunion. L'île Maurice est située à l'est de Madagascar et est classée en tant que petits états insulaires. La capitale est Port-Louis, une ville située au nord-ouest de l'île [Nematchoua et al. \(2019\)](#), [Edoo and Ah King \(2020\)](#). L'agriculture occupe 43 % des sols mauriciens, les zones bâties recouvrent 25 %, 25 % sont occupées par des forêts et des pâturages, le reste de l'occupation du sol forme des champs abandonnés, des réservoirs et des routes. L'économie mauricienne est dominée par le tourisme, la canne à sucre, l'industrie manufacturière, les technologies de l'information et de la communication et enfin les services financiers [Surroop and Raghoo \(2017\)](#). Le pays a connu une croissance économique soutenue depuis son indépendance, le faisant passer en juillet 2020 dans le groupe des économies à revenu élevé. Maurice est au premier rang des pays africains pour ses revenus liés à sa grande capacité d'emploi, son climat entrepreneurial dynamique et son attractivité au profit des investisseurs [Palanichamy et al. \(2004\)](#). Il doit s'atteler aujourd'hui à deux grands défis : la transition vers une économie de la connaissance et l'adaptation aux conséquences du changement climatique [World Energy Council \(2020\)](#). La figure 4.3 nous montre les grandes divisions administratives de Maurice.

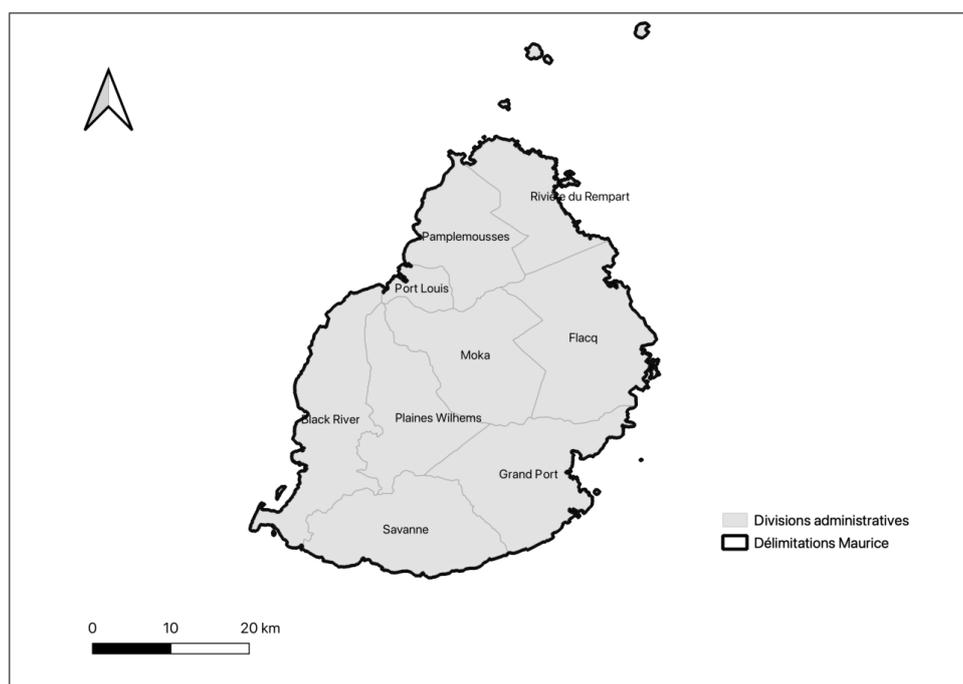


FIGURE 4.3 – Carte administrative de Maurice

4.2.3 Seychelles

Les Seychelles forment un État archipel tropical rassemblant 110 îles s'étalant sur 455 km² dont 40 îles granitiques et 75 îles coralliennes (figure 4.4). Le pays se situe à plus de 1500 km de la côte de l'Afrique de l'Est. La grande majorité de sa population vit sur les trois principales îles granitiques : 87,5 % sont recensés à Mahé, 8,6 % de la population à Praslin et enfin, 2,3 % à La Digue. Cette répartition représente respectivement, en termes de densité de population 446, 182 et 159 habitants/km² sur ces trois îles granitiques, 10 à 20 habitants/km² sur les îles coralliennes [Rosalie and Campling \(2020\)](#), [Etongo et al. \(2022\)](#). Les Seychelles ont des caractéristiques démographiques et culturelles uniques, issues de leur histoire d'esclavage et de migration impliquant des peuples et des cultures d'Afrique, d'Europe et d'Asie [Rosalie and Campling \(2020\)](#). La très petite population seychelloise (comptant moins de 100 000 habitants) se caractérise par un taux de croissance lent, un faible taux de natalité, une faible mortalité, et a été affectée par une intense migration à la fois externe et interne [Rosalie and Campling \(2020\)](#). Les Seychelles disposent des ressources limitées et peu diversifiées, il est très ouvert au commerce international et importent environ 90 % de leurs besoins de consommation. Comme tous les PEID, les Seychelles sont un « preneur de prix » dans l'économie mondiale (elles n'ont absolument aucune influence sur les marchés internationaux) et sont donc très vulnérables aux chocs extérieurs. Les Seychelles ont un climat tropical réparti sur deux saisons (saison des pluies et saison sèche). L'ensoleillement est tout aussi important (7 h par jour) dans l'île, et l'humidité y est toujours élevée. La température de la mer oscille entre 27 et 29 °C toute l'année. Les ouragans atteignent parfois les petites îles au sud de l'archipel, ce qui le rend vulnérable aux aléas climatiques. Pendant la saison des pluies, entre octobre et avril, les températures dépassent légèrement 30 °C, et l'humidité est très élevée (plus de 80 %). Le ciel

est régulièrement nuageux en raison des fortes précipitations. Tandis que pendant la saison sèche, entre mai et septembre, les températures sont stables (29 °C), les précipitations sont faibles et l'ensoleillement est très important [Nematchoua et al. \(2019\)](#). Le pays a obtenu son indépendance de la Grande-Bretagne en 1976. Aujourd'hui, il détient la valeur la plus élevée en PIB dans tout le continent Africain, s'élevant à 12,3 milliards de dollars (en 2020). Son économie est basée fortement sur le tourisme. Au temps de la pandémie de COVID, ils ont passé une rude épreuve à cause des restrictions sanitaires adoptées. La croissance, qui s'établissait à 3,9 % en 2019, s'est effondrée en 2020 avec une contraction de l'économie atteignant -13,5 % en raison des importantes perturbations de l'activité économique, avec notamment une chute de plus de 60 % du tourisme. Un des enjeux majeurs du pays est d'assurer l'adaptation au changement climatique par le renforcement des systèmes de préparation aux catastrophes et par une meilleure gestion de ses zones côtières [World Energy Council \(2020\)](#).

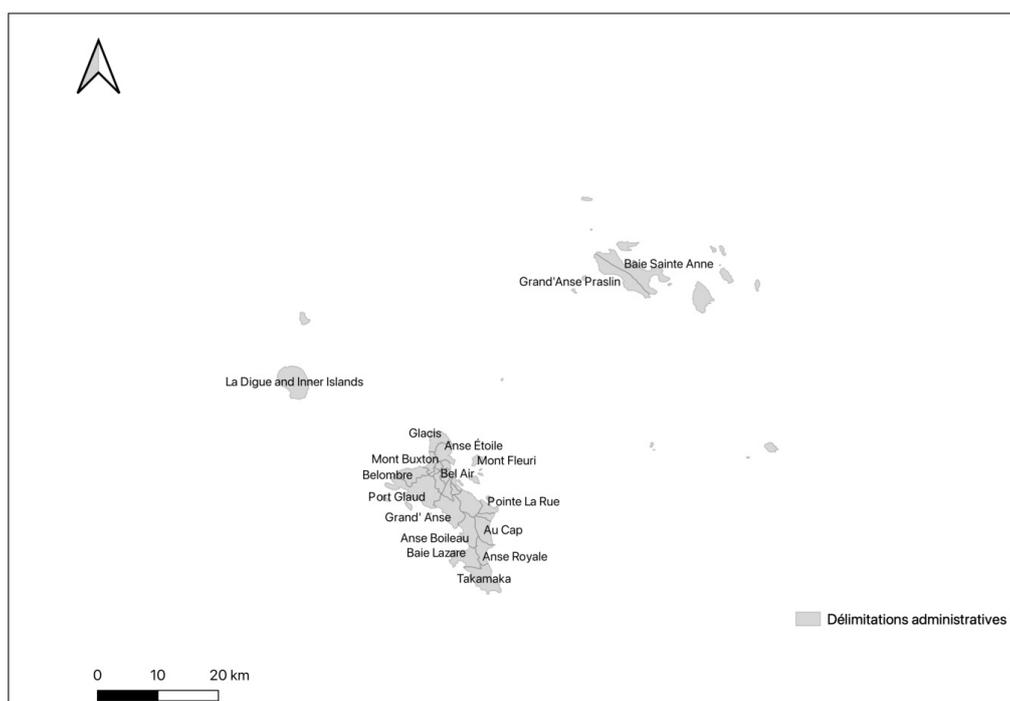


FIGURE 4.4 – Carte géographique de Seychelles

4.2.4 Comores

L'Union des Comores est un petit archipel situé dans l'océan Indien, dans le canal du Mozambique, entre la côte orientale de l'Afrique et l'île de Madagascar. Les Comores se compose essentiellement de trois principales îles : Ngazidja, Ndzواني et Mwali (4.5). Ngazidja aussi appelé la grande Comores et est la plus grande île des Comores avec une superficie approximative

de 1148 km². Elle est constituée de vastes plaines, mais aussi d'un volcan toujours actif s'élevant à environ 2500 m au-dessus du niveau de la mer, Ngazidja est une île volcanique couverte de cendres pouzzolaniques. Les activités économiques et administratives des Comores se situent principalement sur cette île. La deuxième île constituant Comores est Ndzuanani ou Anjouan, avec une superficie d'environ 424 km². La particularité de cette île repose sur sa géographie au relief très accidenté et très riche en rivières et chutes d'eau. Enfin, Mwali ou Mohéli est la troisième composante de Comores, la plus petite île avec une superficie approximative de 112 km². Cette île est différente des deux premières dans sa formation très argileuse, recouverte principalement par une forêt subtropicale [Praene et al. \(2021a\)](#). Ainsi, les Comores a une superficie totale estimée à 1862 km², avec une population totale de 1 145 209 (2019) et dont la capitale est Moroni. Comores est dominée par un climat tropical avec deux saisons (saison des pluies et saison sèche). Les températures varient peu au cours de l'année (24 à 28 °C), les précipitations sont abondantes (2000 mm par an en moyenne). L'ensoleillement est très important (2600 h par an). Pendant la saison des pluies (novembre à avril), les précipitations sont particulièrement abondantes entre décembre et mars et causent souvent des dégâts importants lorsqu'elles atteignent les côtes des trois îles formant l'archipel. Pendant la saison sèche (mai à octobre), les températures sont stables (24 °C), et les précipitations sont plus modérées. [Nematchoua et al. \(2019\)](#). L'Union des Comores est un petit État insulaire en développement, anciennement colonie française. Il accéda à son indépendance en 1975. Son histoire a été depuis imprégné par des tensions politiques récurrentes favorisées par les vellétés sécessionnistes de l'île d'Anjou (en 1997 et 2008). Suite aux "accords de Fomboni" et l'adoption de nouvelle constitution bâtie sur l'autonomie des îles et la condition d'une présidence tournante entre les trois îles, le pays a commencé à retrouver une stabilité politique. Ces dispositions ont été renforcées en 2009 par l'amendement constitutionnel qui prévoit de fixer le mandat présidentiel à cinq ans non renouvelable ([RDGE \(2019\)](#)). En dépit de tout cela, Les Comores reste encore l'un des pays les plus pauvres d'Afrique avec une valeur d'IDH ([Indice de Développement Humain](#)) de 0,497 en 2015, les plaçant au 160^e rang sur 188 nations africaines. Le taux de couverture de la pauvreté à 1,90 dollar par jour est passé de 13,5 % en 2004 à 18,1 % en 2013 [Praene et al. \(2021a\)](#). Le pays a une densité très élevée, avec environ 465 habitants/km², dont 53 % est constitué par une population très jeune au-dessous de 20 ans. Cette forte densité de population exerce une pression intense sur les ressources naturelles et l'environnement du pays. Sa situation et sa topographie rendent le pays parmi les plus vulnérables au climat dans le monde, sachant que 54,2 % de la population vit dans des zones à risque [World Energy Council \(2020\)](#).

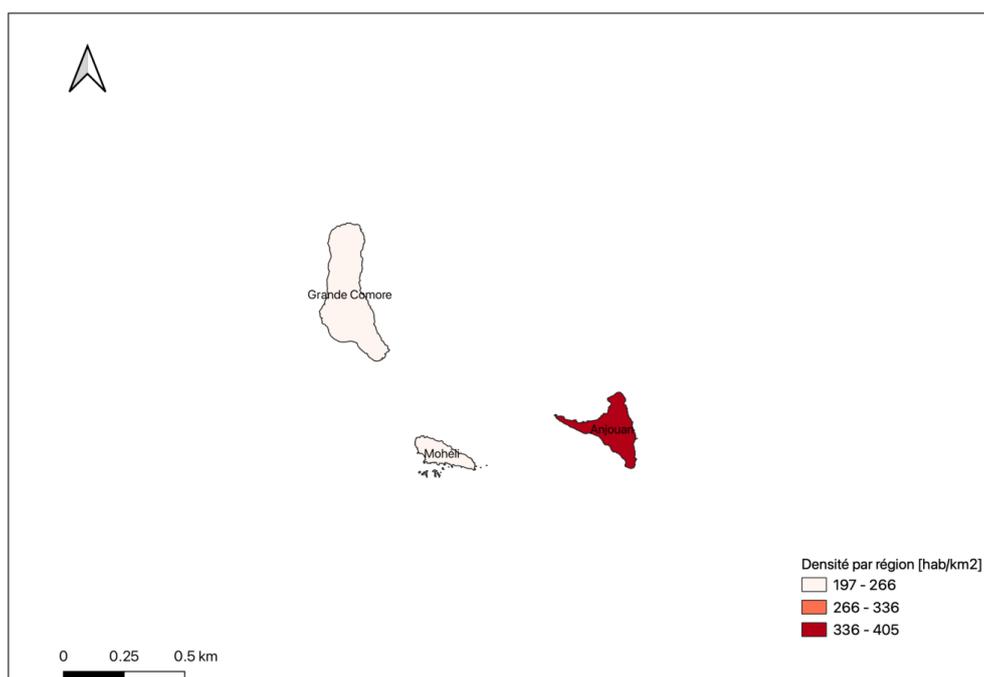


FIGURE 4.5 – Densité dans les trois principales îles constituantes de l’Archipel des Comores, année 2000. [RDGE \(2019\)](#)

4.2.5 La Réunion

L’île de la Réunion est située à 700 km à l’est de Madagascar, dans l’archipel des Mascareignes. La superficie de l’île est estimée à 2512 km², et sa capitale est Saint-Denis. Son climat est de type tropical humide. Il varie sensiblement selon les endroits, en raison du relief de l’île, mais on peut distinguer deux grandes saisons comme on peut voir dans ses îles voisines : une saison sèche entre mai et octobre, et une saison humide de novembre à avril [Nematchoua et al. \(2019\)](#). La Réunion est un département français. De formation géologique montagneuse, sa population est plus concentrée sur sa zone littorale à 80 %. Sa population en 2019 est estimée à 883 325 habitants. L’île a été reconnue patrimoine mondial de l’UNESCO depuis 2010. La Réunion a été sous la colonisation française jusqu’en 1946, date à laquelle elle est devenue un département français. Ce nouveau statut a engagé le progrès économique, social et démographique de l’île. En seulement quelques années, le progrès était déjà palpable comme l’extension des routes bitumées de 40 à 400 km [Bénard and Praene \(2016\)](#). Cela a été également accompagné d’un boom démographique et ainsi d’un pic de la demande en énergie pour satisfaire le nouveau confort que la population a accaparé très vite (air conditionné, télévision, réfrigérateur, voiture, etc). Si on compare à la France métropolitaine, le niveau de vie est sensiblement plus faible à La Réunion et la pauvreté y est plus visible. L’une des causes de ce faible niveau de vie est le manque d’emplois et l’insuffisance des revenus d’activités dans l’île [Sabine et al. \(2020\)](#). La figure 4.6 rapporte le taux de pauvreté sur chaque commune de l’île pour l’année 2020. Cette carte montre une inégalité sociospatiale au niveau de l’île, une inégalité qui est importante si on se fie au chiffre, en effet, il a été recensé que 20 % des Réunionnais les plus riches détiennent les 42 % du revenu total.

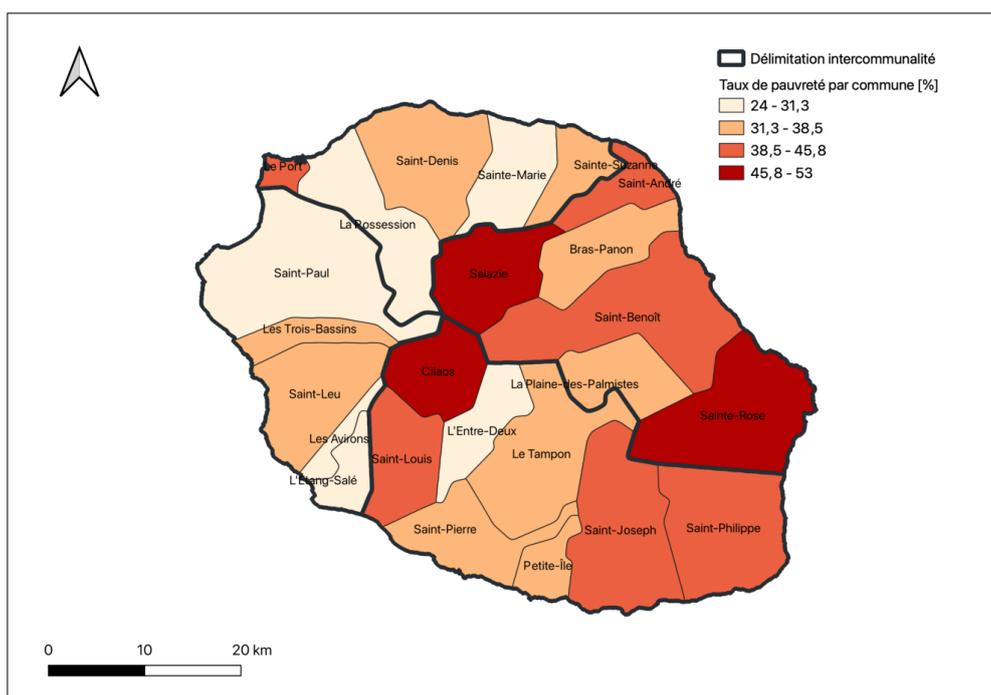


FIGURE 4.6 – Taux de pauvreté sur chaque commune de la Réunion en 2020. Source de données : Insee

4.2.6 Mayotte

Mayotte est une île tropicale de 374 km² environs (4.7), située dans l’Océan Indien et plus précisément au Nord-Ouest de Madagascar, et à l’est du Mozambique. L’île est constituée de deux grandes parties : la Grande-Terre représentant 363 km² et Petite-Terre 11 km² Tapolczai et al. (2017) séparées par un bras de 2 km et une trentaine de petits îlots. Mayotte a la particularité d’être le plus grand complexe récif-barrière-lagon du sud-ouest de l’océan Indien. Elle détient une zone lagunaire s’étalant sur près de 1500 km² avec une profondeur d’eau maximale de 80 m. La longueur de la barrière de corail est d’environ 140 km et peut atteindre une largeur de 2 km (Zinke et al. (2003)). Mayotte est aussi connu par la présence d’un volcan sous-marin situé à 50 km de ses côtes Mori (2021). Mayotte, dont la capitale est Mamoudzou, a un climat tropical humide comme ses îles voisines (moyenne annuelle en température de 25,6 °C), avec deux saisons (saison sèche et saison des pluies) Nematchoua et al. (2019). Mayotte est un territoire français depuis 1841 et est devenu le 101^e département français en 2011. 256 500 habitants ont été recensés à Mayotte en 2017, une population en majorité très jeune. En cette même année, plus de la moitié des habitants avaient moins de 18 ans et l’âge moyen était de 23 ans. Seul un tiers des personnes en âge de travailler à Mayotte ont un emploi. Ce faible taux d’emploi s’explique par le faible développement du tourisme et des secteurs marchands (agriculture, construction, industrie, commerce et autres services). Le territoire est divisé en 17 districts. Le principal pôle urbain est l’axe Mamoudzou-Dzaoudzi, qui sont les principales villes de Grande Terre et Petite Terre, respectivement. Ce pôle urbain comprend les principales infrastructures de l’île (par exemple, le port, l’aéroport, la préfecture et l’hôpital) et une zone industrielle, condensant les principales activités et le trafic automobile dans cette zone. De nombreux mé-

nages vivent dans des situations précaires, 40 % des maisons sont encore en tôle en 2017, 29 % n'ont pas accès à l'eau courante, et 10 % n'ont pas accès à l'électricité Courteille et al. (2022).

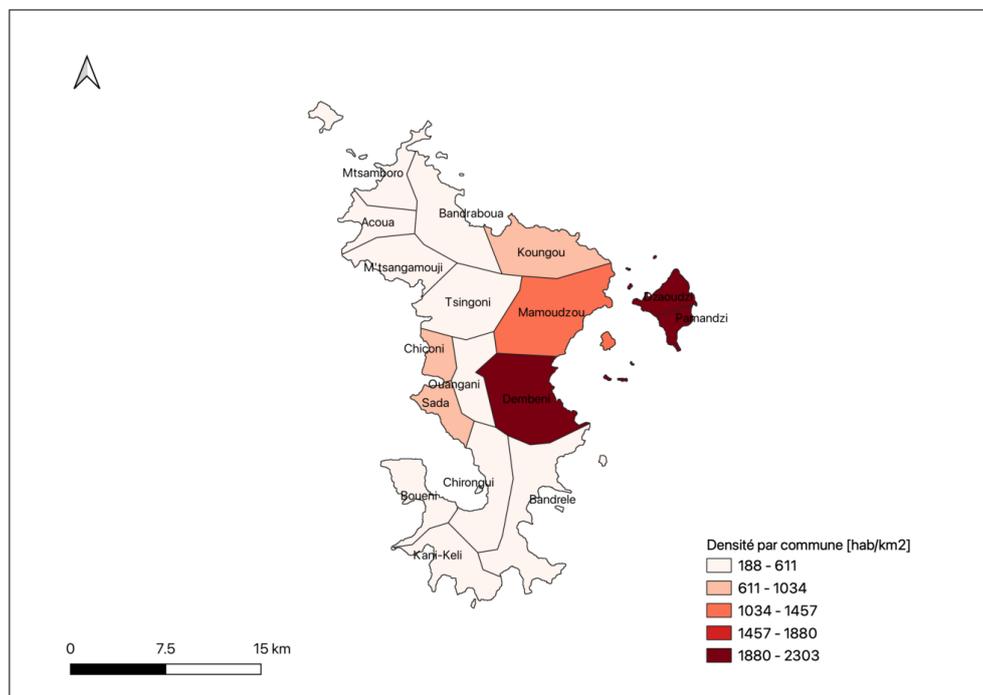


FIGURE 4.7 – Densité de la population dans les différentes communes de Mayotte

4.3 Analyse de la vulnérabilité énergétique des îles de l’Océan indien

4.3.1 Construction d’indicateur synthétique de vulnérabilité énergétique des îles

4.3.1.1 Présentation de la base de données

La constitution de la base de données pour les îles du sud-ouest de l’Océan Indien a été un travail laborieux à cause des manques de données. Nous n’avons pas pu retrouver les variables qui ont été utilisés auparavant dans les précédents chapitres. De plus, nous n’avons pas pu constituer de séries de données pour les îles françaises. Les données existantes relatives aux îles françaises sont souvent reportées à l’échelle nationale et de ce fait, l’analyse va se porter essentiellement sur Madagascar, Seychelles, Comores et Maurice dans un premier temps. Pour valider nos résultats, nous avons intégré dans la base des données des îles que nous avons déjà étudiées auparavant et dont nous avons pu connaître leur dynamique et comportement d’évolution. Ces îles sont l’Australie, l’Islande et le Japon. Ainsi, on a pu recueillir 10 variables caractéristiques des sept îles suivants : Maurice, Madagascar, Seychelles, Comores, Australie, Japon et enfin Islande pour la période entre 2000 et 2019. Ces variables sont présentées dans le tableau 4.1.

TABLE 4.1 – Description des variables

	Code variable	Unité	Bref description
1	PIB	en \$ Courant	Le produit intérieur brut
2	IDH	-	Indice de développement humain
3	FA	%	Part espace couverte par la forêt
4	GES	kt	Émissions de gaz à effet de serre
5	ENRC	%	Part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie
6	EA	%	Taux d'accès à l'électricité de la population
7	CCE	%	Part de la population ayant accès à une énergie propre pour la cuisson
8	CCE_U	%	CCE de la population urbaine
9	CCE_R	%	CCE de la population rurale
10	PEI	%	Intensité énergétique relative à l'énergie primaire consommée

4.3.1.2 Construction et analyse de l'indicateur synthétique représentant la vulnérabilité énergétique des îles

Pour la construction de l'indicateur, nous avons gardé la méthodologie développée dans les chapitres précédents. Nous avons obtenu l'évolution de l'indicateur pour les 7 îles.

L'évolution des indicateurs de vulnérabilité énergétique des sept îles étudiées donnent des résultats intéressants. En effet, nous pouvons remarquer en regardant le graphe 4.8 obtenu que les trois îles de référence que sont l'Australie, le Japon et l'Islande gardent les mêmes tendances qu'on a pu trouver dans nos précédents calculs. Ces îles sont décrites avec de forte valeur d'indicateur (Randriafero Rajonandrianina and Benard (2022)). L'Islande reprend les mêmes trajectoires qu'on avait estimées auparavant, on voit que dans les nouveaux indicateurs calculés, une amélioration est constatée autour de l'année 2005, cette année où l'île a mis en place une politique importante dans l'intégration de l'énergie renouvelable dans son mix électrique. On peut y voir aussi la tendance du Japon qui a connu un certain déclin suite aux événements qui ont eu un impact sur sa politique énergétique, notamment l'accident des centrales nucléaires, ces faits ont été bien développés dans les travaux précédents (dans le chapitre 3, paragraphe 3.3.3.2). On voit ainsi que les résultats obtenus restent similaires à ceux obtenus auparavant. Ce constat démontre la fidélité de la méthode dans la description synthétique des états des territoires étudiés et permet de la valider pour être un outil de description du système à étudier. En se focalisant sur les îles du sud-ouest maintenant, nous voyons que les évolutions de ces îles restent en dessous des évolutions des îles références qui ont été prises.

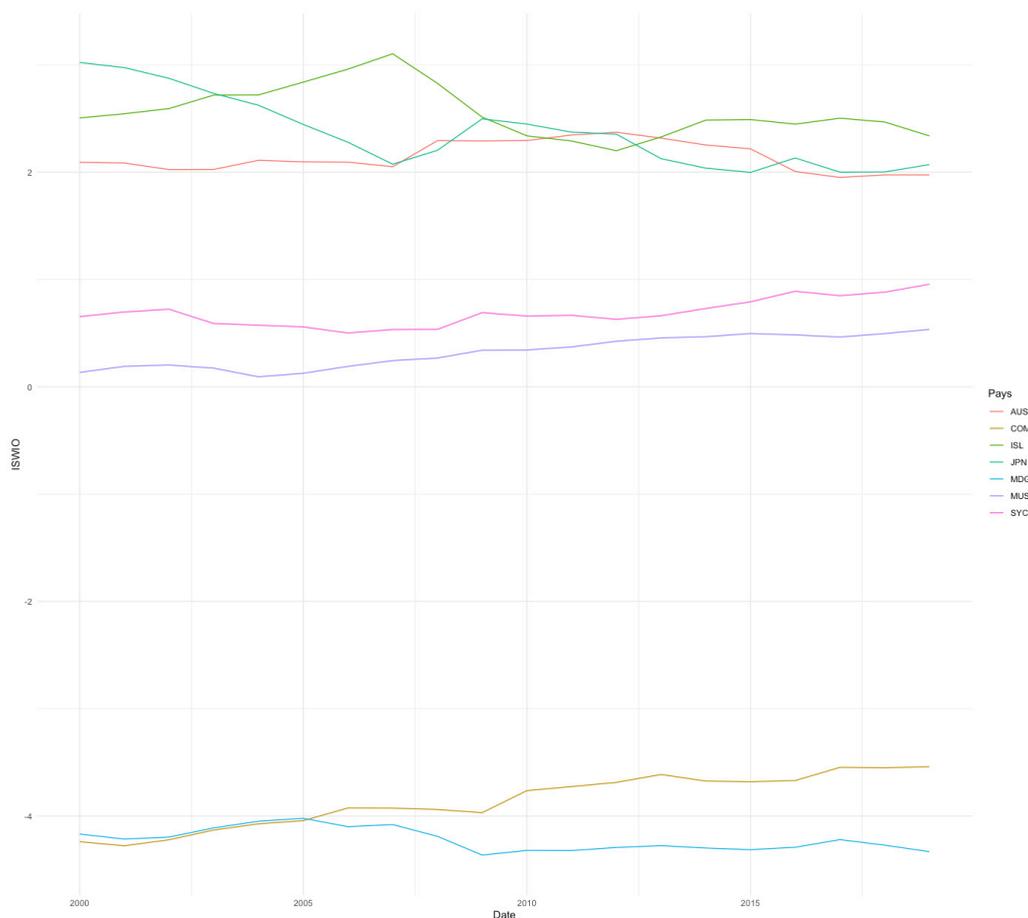


FIGURE 4.8 – Évolution de l'indicateur synthétique de vulnérabilité énergétique des îles pour la période entre 2000 et 2019

Madagascar. Madagascar obtient les évolutions les plus basses de l'indicateur IV (en valeur négative). Cela est bien justifié si on se réfère à sa situation énergétique actuelle. Madagascar a une consommation d'énergie par habitant ne représentant que 20 % de la moyenne mondiale. Seul 39,1 % de sa population urbaine ont accès à l'électricité, contre moins de 5 % en zone rurale. Le gouvernement de Madagascar a publié en 2002 une série de politiques visant au développement du secteur des énergies renouvelables, mais l'investissement étant limité en plus de l'instabilité politique persistante font que le développement du secteur n'en est encore qu'à ses débuts [Yu et al. \(2022\)](#). Si on fait un zoom sur son mix énergétique, Madagascar est à plus de 80 % dominés par les biomasses solides pour son approvisionnement en énergie (82,73 % en 2017 [de l'Energie et des Hydrocarbures et al. \(2017\)](#)). Ces biomasses sont principalement le bois et le charbon de bois et sont utilisés principalement pour la cuisson. La grande dépendance de Madagascar réside dans cette ressource non renouvelable et dont l'usage représente une grande menace pour l'ensemble du pays. En effet, cette utilisation massive accélère la déforestation. Une dégradation et déforestation des forêts naturelles ont été relevées entre 2005 et 2010 avec une réduction de la couverture passant de 9,4 millions d'ha à 9,2 millions d'ha, soit 4000 ha/an [M.E.H. \(2015\)](#). Une grande perte du capital naturel unique de la grande île, qui le rend da-

vantage vulnérable au changement climatique. De plus, l'exposition au quotidien à la fumée de la combustion de ces biomasses entraîne aussi des problèmes de santé, surtout aux femmes et aux enfants qui sont, en majorité, responsables des tâches ménagères. La majorité de la population ne dispose pas d'une énergie propre pour la cuisson. L'usage du Gaz est un luxe pour la plupart de la population à cause de son prix onéreux et son usage nécessitant aussi un niveau de connaissance élevé en lien avec la sophistication des appareils. Dans un premier temps, la vulnérabilité énergétique de Madagascar est donc causée principalement par cette forte dépendance en énergie de la biomasse. Une dépendance qui est corrélée par le faible taux d'accès à l'électricité jusqu'à présent. La production électrique, en 2017, représentait 2,19 % du mix énergétique, soit 170 ktep (une quantité très faible si on compare avec la production des autres pays, notamment des pays développés). Cela explique le retard d'industrialisation du pays, le faible PIB et la pauvreté généralisée. Le mix électrique de Madagascar dépend à 59 % de produits d'importations. Cette part est composée par 27 % de Fioul lourd, 6 % de charbon et 26 % de gazole, contre 40 % en hydroélectricité et seulement 1 % de biomasse. Cela montre que la production électrique de Madagascar est dépendante des énergies d'importations. Cette production sera influencée donc par la fluctuation du prix au niveau mondial de ces ressources fossiles, mais aussi par les risques de rupture d'approvisionnement. C'est une deuxième facette de la vulnérabilité du système énergétique du pays. Madagascar a un potentiel important d'énergie renouvelable, mais cela n'empêche pas que la consommation finale d'énergie par habitant dans l'île n'est encore que de 6 PJ contre 51 PJ dans le monde. Et plus encore, les consommateurs d'électricité souffrent de délestage et de récurrente coupure d'électricité sans précédent [Andriamanohiarisoamanana et al. \(2022\)](#) qui peuvent durer jusqu'à 4 h d'affilée, surtout en période estivale et aux heures de pointe (18 à 21 h). Dans la capitale d'Antananarivo, ces délestages ont pour origine l'ancienneté des équipements de distribution et les surcharges dues aux branchements illicites. Dans les provinces, c'est la capacité de production en elle-même qui est insuffisante et ne peut satisfaire la demande [Praene et al. \(2021b\)](#). Les valeurs d'IV très faible de Madagascar reflètent bien la réalité du pays.

Les Comores. En continuant l'analyse de l'évolution de l'IV, on voit que les Comores connaissent les mêmes tendances que Madagascar en détenant des indicateurs très faibles et négatifs. Son bouquet énergétique est constitué par 57 % en biomasse (bois), 2 % en électricité et 41 % de produits pétroliers. On voit de ce fait que les Comores est tout aussi dépendant des importations extérieures, mais aussi de la biomasse, tout comme Madagascar. L'essentiel de la biomasse est utilisé pour la cuisson auprès des ménages et dans le secteur de la restauration. Les indicateurs que Comores ont obtenus laissent apparaître une grande vulnérabilité énergétique de ce dernier. De plus, il a été relevé aussi que le système de production d'énergie électrique des Comores est tout aussi très fragilisé par un taux de perte énorme. Ces pertes ont été estimées à 48 % de l'électricité de ce qu'ils ont produit en 2015. En atteignant les 63 % de taux d'accès à l'électricité (chiffre de 2017), la distribution est perturbée par des délestages incessants alors qu'au niveau des prix, on enregistre déjà un prix très onéreux. Tout cela font et justifient les faibles indicateurs de vulnérabilité énergétique des Comores.

Maurice et Seychelles. Maurice et Seychelles ont des conditions plus améliorées que Comores et Madagascar. Leur taux d'accès à l'électricité est estimé à 100 % avec un accès à l'énergie propre au-dessus des 90 % déjà depuis l'an 2000. Les deux pays ont aussi un niveau élevé en termes d'indice de Développement Humain supérieur à 0,6. Elles détiennent cependant

des indicateurs qui restent encore inférieurs aux indicateurs obtenus des îles de référence. Les valeurs des indicateurs obtenus sont assez faibles même en étant positif, cela révèle des formes de fragilité qui vont à l'encontre de leur bonne santé économique et leur mettent dans une situation de vulnérabilité énergétique. En effet, si on prend l'exemple de Maurice, l'île dépend fortement des combustibles fossiles importés pour la production de l'électricité, le transport, mais aussi pour faire tourner ses industries. Vers 2015, autour de 85 % de sa demande énergétique a été pourvu par les combustibles fossiles (besoins totaux en énergie primaire), représentant 12,8 % de ses coûts d'importation [Bundhoo \(2018\)](#), [Edoo and Ah King \(2020\)](#). Ces besoins énergétiques n'ont cessé d'augmenter au cours de ces dernières années, à un rythme annuel de 5 % répondant à la demande de la population [Khoodaruth et al. \(2017\)](#). La croissance combinée de la population et du produit intérieur brut entraîne inévitablement une augmentation générale du besoin en énergie primaire, qui est passé de 1428 ktep en 2012 à 1550 ktep en 2016. Pour répondre à cette demande croissante, le pays devient encore de plus en plus dépendant aux produits fossiles, ce qui, pour le pays, représente une vulnérabilité, car le pays sera dès lors sensible à un large éventail de complications liées à l'approvisionnement, tels que la volatilité des prix des combustibles fossiles, les problèmes de chaîne d'approvisionnement, de transports, mais aussi des chocs pétroliers [Neehaul et al. \(2020\)](#). Même si Maurice et les Seychelles ont atteint leur taux d'électrification et que 100 % de leur population y ont accès, leur vulnérabilité réside dans la production de cette énergie qui dépend des énergies primaires importées.

Réunion et Mayotte. Pour La Réunion et Mayotte, nous n'avons pas eu assez de données pour pouvoir construire les indicateurs relatifs à leurs situations. Nous pouvons quand bien même émettre l'hypothèse que les deux pays auront les mêmes tendances de Seychelles et Maurice. Déjà, elles ont à peu près la même taille. Pour Mayotte, la production d'électricité repose essentiellement sur les moyens fossiles à hauteur de 95 % (en 2018), contre 71,8 % pour la Réunion au même date. Cela démontre le fait que les deux îles sont tout aussi dépendantes de cette énergie d'importation pour la production de son électricité. Pour le cas de la Réunion en particulier, cette dépendance a pris de l'ampleur à partir des années 1980 où la pression des évolutions démographiques, économiques et sociologiques de l'époque grâce à la redynamisation de son économie a poussé le pays à s'approvisionner en énergie fossile, passant d'une totale indépendance à 99 % de production locale (assuré par l'hydroélectricité) à 36 % en 1982. En 2015, cette dépendance représentait 86,1 % de la consommation d'énergie primaire (du bouquet énergétique), et 64 % du mix électrique) [Selosse et al. \(2018\)](#). La Réunion et Mayotte ont aussi atteint leur électrification. Leur vulnérabilité réside dans leur taux de dépendance énergétique qui est encore très élevé. Cela nous permet de supposer que la Réunion et Mayotte auront donc les mêmes profils de vulnérabilité énergétique que Maurice et les Seychelles.

4.3.1.3 Construction du portrait de phase des îles et identification des attracteurs de vulnérabilité énergétique de la région

La construction du portrait de phase a été fait avec les valeurs des indicateurs obtenus, ainsi que de leur dérivée. Elle a été faite dans le même principe que la méthodologie développée et largement exposée dans le chapitre 3 de ce travail. Le graphe 4.9 nous donne un aperçu de ce portrait de phase.

Les différentes positions qui constituent dans son ensemble la trajectoire de chaque pays ont été représentés par des points dont la couleur varie selon le pays (dans le graphe : rouge pour

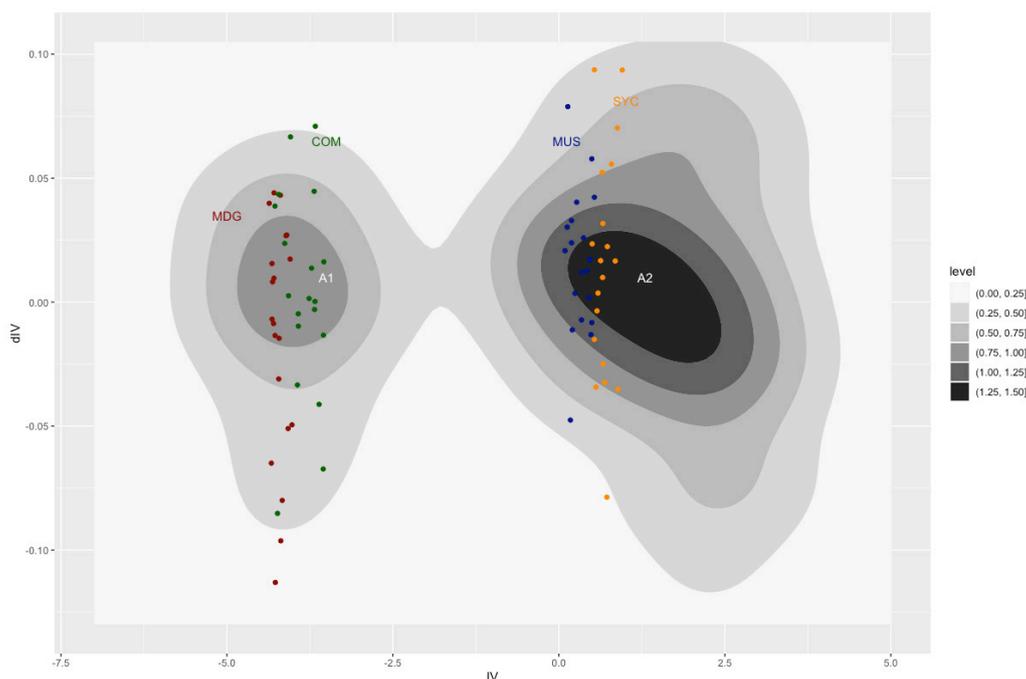


FIGURE 4.9 – Portrait de phase des îles de l’Océan Indien

Madagascar, vert pour Comores, Orange pour Seychelles et bleu pour Maurice). Le portrait de phase met en relief les similitudes qu’on peut observer dans la dynamique des îles. Le portrait de phase présente un paysage de stabilité avec deux bassins d’attraction. Sur la figure 4.9, nous les avons nommées A1 et A2. La zone A1, représente la tendance des pays les plus pauvres de la zone, comme on peut voir sur la figure : ce sont Madagascar et Comores. Le système énergétique s’est stabilisé sur un équilibre précaire. L’analyse de l’évolution des indicateurs de vulnérabilité énergétique de ces deux îles précédemment révèle la similitude de ces deux pays par rapport à leur situation énergétique. Ces deux pays sont dans une grande vulnérabilité énergétique : toutes les formes de vulnérabilité énergétique existent sur leur territoire. Ils ont une dépendance énergétique vis-à-vis des produits d’importation des énergies fossiles, car ils ont un mix électrique dépendant à plus de 50 % aux ressources fossiles importées. En plus de cela, la population de ces pays est aussi en très grande précarité énergétique. Cette précarité se présente sous plusieurs formes, comprenant des problèmes tels que l’indisponibilité d’accès à l’électricité. Dans les cas où un accès est possible, c’est la distribution qui aura une qualité médiocre. En plus de cela, le prix de l’électricité reste très élevé et l’accès à des sources d’énergie propre pour les besoins de cuisson ne sont accessibles qu’à une minorité de la population. Enfin, une insécurité énergétique liée au risque de rupture de l’approvisionnement d’énergie, ce dernier lié aux différentes failles dans le transport et distribution de l’électricité (état des infrastructures, des routes, vieillissement des machines, etc.). Dans la deuxième zone A2 par contre, on retrouve les deux autres îles : Maurice et Seychelles qui ne sont pas dans cet état de vulnérabilité extrême. Dans ce second état, la stabilité du territoire est l’équilibre de son système à l’usage intensif de l’énergie fossile, ce qui est le cas du système mondial actuel. Cette zone regroupe Maurice et Seychelles. Ils forment un groupe de pays, où le développement est à son essor. Ils sont tout au moins vulnérables et cette vulnérabilité se situe dans leur forte dépendance énergétique vis-à-vis de l’extérieur. Ils sont à plus de 80 % de dépendance aux importations. Si nous avons

eu des données de Mayotte et La Réunion, on aura pu obtenir des résultats similaires à ceux de Maurice et Seychelles et que les deux îles françaises auraient été aussi identifiées dans cette zone.

4.4 Implication politique

La politique énergétique est définie selon Percebois comme l'ensemble des *"objectifs retenus par la puissance publique pour assurer l'approvisionnement énergétique du pays dans les meilleures conditions de coût et de sécurité, et des moyens réglementaires et incitatifs mis en œuvre pour l'obtention de ces objectifs, objectifs et moyens étant coordonnées dans le respect des choix prioritaires fixés par la collectivité et sous la limitation des contraintes physiques, environnementales, économiques et sociales existantes"* Fléty (2014). La politique énergétique d'un territoire peut être de ce fait un facteur positif dans la réduction de la vulnérabilité du territoire, ou au contraire un facteur négatif contribuant à l'accroissement de ce dernier. Il est donc important que le territoire mette en place une stratégie qui lui permet de gérer son système énergétique (l'approvisionnement, la production, le transport et la distribution).

La politique énergétique mondiale est issue de deux sommets importants : le sommet de la Terre à Rio en 1992, et l'Accord de Paris de 2015. Elle se base sur la volonté de réduire les émissions de GES sous la bannière d'une politique générale : "Net Zéro 2050". La transition énergétique vers les ressources vertes et renouvelables est le voeu pieux de cette politique mondiale, une transition qui implique de se tourner vers un équilibre économique non plus basé sur l'usage du pétrole, mais d'une autre source d'énergie, moins polluante et plus respectueuse de l'environnement. La réponse des gouvernements nationaux à ce défi ambitieux reste très variable. La plupart ont relevé le défi en commençant à intégrer l'idée dans leur volonté politique, mais pour ce qui est de la mettre en application, l'étape n'est pas encore passée dans la majorité. Le constat est clair, le Protocole de Kyoto a été signé en 1997, les émissions mondiales de CO₂ ont continué d'augmenter, quelques fois atténué par des événements temporaires comme le krach financier de 2008, la pandémie de la covid en 2019. Le fait est que les efforts déployés pour réduire les émissions ne sont pas jusqu'ici palpables, et qu'au contraire, les émissions augmentent toujours Mearns and Sornette (2023). Les îles du sud-ouest de l'Océan Indien font face à des enjeux communs malgré leurs différences de développement. Ils ont adopté chacun des politiques énergétiques relatives à leurs situations et leurs besoins respectifs, ils ont commencé à intégrer ou ont déjà intégré dans leur politique les objectifs de développement durable en matière énergétique mondiaux qu'on a vu précédemment en voulant réussir la transition énergétique au net zéro.

La Réunion et Mayotte. Pour le cas des territoires français par exemple, la PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Énergie) qui constitue le volet opérationnel "Énergie" de leur SRCAE (Schéma Régional Climat Air Énergie) en application des lois de Grenelle de 2010 et 2012 devait être élaborée pour la France et pour chaque zone non interconnectée au réseau électrique métropolitain (continental) dont La Réunion et Mayotte. Ce programme est institué par la LTECV (Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte) du 17 août 2015. C'est

ce programme qui définit ainsi la planification énergétique dans ces deux îles. Le projet vise à tendre vers l'autonomie énergétique par la maîtrise de la demande en énergie et le développement des énergies renouvelables. C'est la politique du gouvernement français pour ses territoires non métropolitains : les ZNI (Zones Non Interconnectées).

Si on se focalise sur le cas de la Réunion, le PPE a été mis en place pour 2016-2023, avec une révision en 2019 pour être valide sur les prochaines années, c'est-à-dire entre 2019-2028. Le département ambitionne d'atteindre l'objectif de s'approvisionner à 100 % en énergies renouvelables dans le mix électrique à l'horizon 2030. Cet objectif se répartit sur quatre actions majeures :

- réduction de la consommation énergétique,
- augmentation de la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité,
- amplification des capacités de stockage de l'énergie,
- action sur le mode et moyen de transport

Ce programme pilote le système énergétique de l'île en tenant compte les évolutions technologiques, du contexte économique, des enjeux sociaux et environnement locaux existants. La PPE assure donc l'opérationnalisation de la marche vers la transition énergétique si on parle du volet énergie. Elle prend progressivement place au sein des documents d'aménagement du territoire. Des projets concrets ont été déjà entrepris pour concrétiser ses actions. On peut citer par exemple l'installation de centrales photovoltaïques individuelles qui se mettaient en place chaque année, la mise en œuvre de l'unité de méthanisation sur un lycée agricole de l'île (Lycée de Saint - Joseph), l'unité de gazéification du CFPPA de Saint-Leu, la mise en place du dispositif "écosolidaire" qui permet d'équiper les foyers réunionnais les plus modestes en chauffe-eau solaire, de l'aide aux bailleurs sociaux pour les logements locatifs, la mise en place d'éclairages publics performants (8000 points lumineux améliorés pour l'année 2019), la poursuite de la mise en œuvre du service local d'intervention pour la maîtrise de l'Énergie pour un diagnostic énergétique et conseil en 3 étapes : repérer les familles en précarité, diagnostiquer lors des visites à domicile et apporter des solutions adaptées telles que des remplacements d'équipements ou des travaux. Les politiques énergétiques de la Réunion sont déjà construites afin d'assurer la transition énergétique, l'intégration de l'énergie renouvelable dans le mix électrique et la réduction de l'émission de GES par les actions à mener sur le transport, notamment par le passage vers le tout électrique. Les documents de planification existant à la Réunion à différentes échelles³ ont été révisés. Pour le PLU par exemple, la progression est en cours, la figure 4.10 montre que 66 % des communes disposent aujourd'hui d'un PLU élaboré et approuvé.

Cependant, les actions et politiques qui ont été menées n'ont pas encore de grand effet sur les indicateurs qui peuvent mettre en lumière la démarche de transition énergétique et qui permettrait de diminuer la vulnérabilité énergétique du territoire. En effet, le rapport de l'observatoire énergétique de la Réunion démontre par exemple que le taux de dépendance énergétique est encore estimé à 88,20 % en 2021, et contrairement à l'objectif attendu des lois créées en 2015, la tendance n'a cessé de croître pour le moment, comme nous pouvons voir sur la figure 4.11 le taux a connu une augmentation de l'ordre de 2 % entre 2015 et 2021. Ce constat montre que

3. Les documents de planification en vigueur à la Réunion sont le SAR (Schéma d'aménagement Régional) à l'échelle du territoire, le SCot (Schéma de Cohésion Territoriale) à l'intercommunalité, et enfin le PLU au niveau de la commune

Pour Mayotte, les éléments clefs de sa PPE sont notamment la réduction de la consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à la référence de 2012, avec un objectif intermédiaire de 20 % pour 2030, la réduction aussi de la consommation énergétique primaire des énergies fossiles de 30 % en 2030 par rapport à la référence de 2012, la réduction de 40 % des émissions de GES en 2030 par rapport aux références de 1990, et enfin l'augmentation de la part des énergies renouvelables à 32 % de la consommation finale d'énergie pour 2030 et à 40 % dans le mix énergétique [Mayotte \(2017b\)](#). Les objectifs ont été posés, dans la réalisation, les mêmes observations que la Réunion ont été constatés. Le bilan du premier quinquennat de la PPE 2016-2018, révisée pour 2019-2023, montre que de nombreuses actions n'ont pas pu aboutir à horizon 2018 pour diverses raisons, notamment le besoin en études complémentaires. La prochaine PPE devrait, selon les suggestions, refléter une volonté plus poussée dans la politique et stratégie de planification du territoire en matière de gestion des différentes énergies en ciblant des actions réalistes et pertinentes sur une période de 5 ans. Le bilan de la précédente PPE expose la nécessité de monter un comité de suivi rapproché des actions qui seront décidées ainsi que la mise en place d'un observatoire de l'énergie, afin de disposer de données fiables et actualisées. Une des contraintes auxquelles doivent faire face le pays est de pouvoir maîtriser la croissance de la population afin de stabiliser l'augmentation de la demande énergétique du territoire. C'est une situation qui devrait mettre encore plus de pression aux décideurs et institutions politiques pour s'engager vers de véritables actions qui garantiraient la sécurité énergétique de la population et ainsi, d'engager concrètement l'île dans une transition énergétique [Mayotte \(2017a\)](#).

Madagascar. Pour Madagascar, la transition énergétique est dans une marche lente selon un rapport sur le sujet [Rafitoson \(2017\)](#). Les organismes responsables de la gestion du secteur de l'énergie à Madagascar sont composés du ministère de l'Énergie et des Hydrocarbures ainsi que des diverses entités qui en relèvent, notamment la [JIRAMA \(Jiro sy RAno MALagasy\)](#). La JIRAMA est la compagnie nationale d'eau et d'électricité de Madagascar. Elle assume un rôle crucial en gérant une grande partie de la production et de la distribution d'électricité à travers le pays. Parallèlement, l'[OMH \(Office Malgache des Hydrocarbure\)](#), en tant qu'établissement public à caractère industriel et commercial, joue un rôle essentiel dans l'établissement des normes pour le secteur aval du pétrole sur tout le territoire et de la collecte des données statistiques et la prise en compte les doléances des consommateurs. L'[ORE \(Office de Régulation de l'Électricité\)](#) est un établissement public mais de nature administrative et technique qui exerce la supervision du sous-secteur de l'électricité, régule les prix de l'électricité pour les consommateurs et qui surveille les normes de qualité de service. Enfin, l'[ADER \(Agence de Développement de l'Électrification Rurale\)](#) qui est aussi un établissement public de caractère administratif mais qui pour mission cette fois de favoriser et d'encourager la présentation de projets liés à l'électrification rurale.

Une stratégie de planification a été mise en place en 2015 à Madagascar : la [NPE \(Nouvelle Politique de l'Énergie\)](#) qui s'inscrivait dans la mise en œuvre du [Plan National de Développement \(PND 2015-2019\)](#) élaborée avec l'assistance de l'UE à travers le programme EUEI-PDF. Cette politique avait pris comme grand d'axe d'agir sur l'usage de la biomasse, les hydrocarbures et l'électricité et sont fixés comme objectifs : de passer de 4 % (2015) à 70 % (2030) le taux d'adoption de foyers économes par les ménages, la couverture de 50 % des besoins en bois par des ressources forestières licites et durables, et l'application de techniques de transformations performantes. Pour ce premier volet, les orientations visaient à réduire l'utilisation non

durable de la biomasse et bois pour la cuisson. Ensuite, la NPE prévoyait d'atteindre un taux d'électrification de 70 en 2030 avec un mix électrique à 85 % en Énergie renouvelable. Dans son ensemble, les axes prioritaires de la NPE visaient à [M.E.H. \(2015\)](#) :

- La valorisation du capital naturel et la préservation de l'environnement à travers un appui à la gestion durable de la filière bois-énergie, en y associant une meilleure réglementation (dans la commercialisation, la promotion des énergies de substitution au bois-énergie).
- L'accès à l'énergie durable pour tous, grâce au développement d'un plan d'électrification des communautés rurales, périurbaines et urbaines par la création de réseaux et expansion des réseaux existant dans toutes les régions et création à terme d'un réseau interconnecté.
- L'assurance d'une sécurité et indépendance énergétique du pays par la diversification du mix énergétique et l'exploitation des ressources locales au détriment des importations fossiles.
- L'adaptation et le renforcement du cadre règlementaire, institutionnel et de l'environnement des affaires
- Enfin, le financement pérenne des besoins énergétiques dans un partenariat financier public/privé.

Le pays a vu l'élection d'un nouveau Président de la République en 2019. Ce dernier a instauré une nouvelle politique, en ayant apporté sa vision transcrite dans son Plan Émergence de Madagascar qui se base sur 13 engagements dont l'Énergie pour tous avec un objectif d'atteindre 50 % d'accès à l'électricité pour l'ensemble de la population d'ici à 2023 et atteindre les seuils des 70 % pour 2030. Le rapport de Madagascar pour l'examen national sur les objectifs de développement durable de 2021 permet d'avoir un premier bilan des efforts fournis : le taux d'accès à l'électricité est à 16,4% en 2020 [M.E.F. \(2021\)](#). Un taux qui est encore inégalement réparti pour ses régions si on se réfère à la figure ci-après [4.12](#).

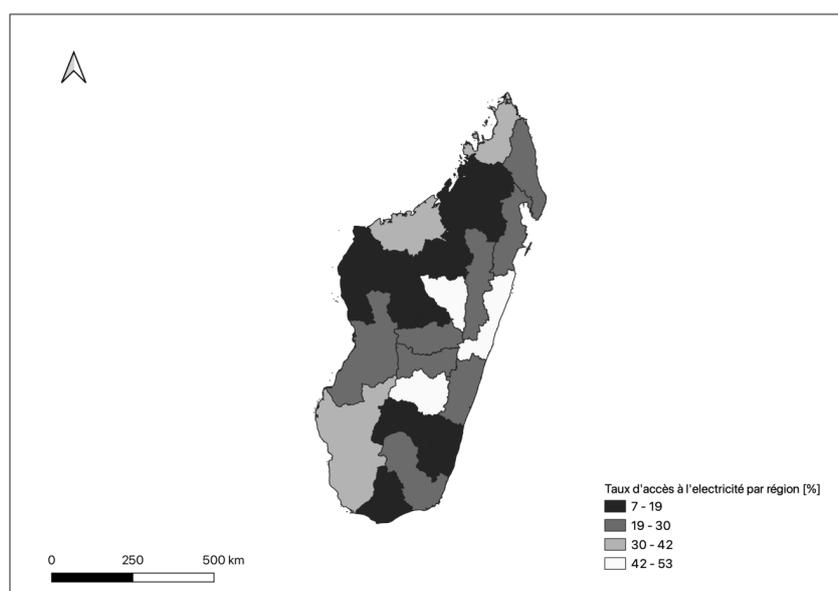


FIGURE 4.12 – Taux d'accès à l'électricité des régions de Madagascar en 2020. [M.E.F. \(2021\)](#)

On y voit clairement qu'il existe encore des régions où le taux d'accès à l'électricité de l'ensemble de la population reste bien au-dessous des 10 % comme dans la région d'Androy au sud de l'île. On voit aussi que les régions les mieux servies, avec un taux avoisinant les 50 % restent les grands pôles urbains où on a les infrastructures portuaires (par la région Atsinana avec le port de Tamatave), la région d'Analamanga qui reste la porte centrale du pays avec son aéroport international à Ivato. Dans ces constats, le pays a réussi à accroître de 1 % son taux d'accès à l'électricité en 4 ans, et il faudrait fournir en deux ans 34 fois plus d'efforts qu'il a faits en 4 ans pour atteindre dans un premier pas les 50 % visé. Bien que le taux actuel reflète uniquement l'accès au réseau électrique et ne prenne pas en considération les kits solaires distribués ou acquis directement par les utilisateurs, les perspectives émergentes des kits solaires commencent à gagner en importance dans le pays. Toutefois, atteindre les objectifs établis par les politiques énergétiques en vigueur reste un défi extrêmement complexe pour Madagascar.

Au constat, Madagascar ne connaît que des modifications et des propositions de documents de planification, de politique énergétique, mais l'exécution et le passage à l'action restent encore très mitigés.

Les Comores. Pour le cas de l'Union des Comores, une stratégie de planification énergétique existe depuis 2013 à travers le projet d'appui au secteur de l'énergie aux Comores ([PASEC](#)) financé par le [FAD \(Fonds africain de Développement\)](#) et la [FEF \(Facilité pour les États Fragiles\)](#). Ce projet visait à accompagner les priorités du gouvernement du pays à l'époque qui est la [Stratégie Nationale de Croissance et de Réduction de la Pauvreté](#) (SCRP, 2009-2014) et qui avait pour objectif de stabiliser la situation macroéconomique et la gouvernance du pays. Ce projet met en œuvre aussi les priorités du gouvernement énoncées dans l'[Initiative Nationale de Développement Social](#) (INDS, 2011-2015) qui cadre la promotion de la croissance, de la compétitivité et de l'emploi en ciblant notamment les secteurs de l'énergie, des infrastructures et surtout le renforcement du secteur privé par l'amélioration du facteur de production clé qui est l'électricité. Enfin, le projet complète la stratégie de la Vice-présidence de l'Union des Comores en charge de l'Énergie, qui a défini des stratégies de mise en œuvre de la politique de développement de l'électricité et du secteur des produits pétroliers afin d'augmenter le taux d'accès à l'électricité de la population, et aussi de réduire le coût de production de l'électricité qui est onéreuse [Kone et al. \(2013\)](#). Le projet avait pour objectif d'apporter une assistance technique et un renforcement de capacité des sociétés d'électricité, la réhabilitation des moyens de production pour assurer une production fiable ainsi que les réseaux de transport et de distribution afin d'éliminer les pertes qui y sont liées, le développement de la maîtrise de l'énergie et enfin le développement des énergies renouvelables pour l'amélioration du mix-énergétique du pays. Le projet a été mis en œuvre en 2013, et a été prolongé en 2016, accompagnant dans un même temps la nouvelle politique de [Stratégie de Croissance Accélérée et de Développement Durable](#) (SCA2D 2015-2019) que le pays a adopté en 2015. Dans son ensemble, le projet a permis de rétablir et d'améliorer le fonctionnement du réseau électrique dans le pays par la réhabilitation de trois centrales hydrauliques et de trois centrales thermiques (trois centrales sur les quatre prévues), avec la mise en place de nouvelles fermes photovoltaïques d'une puissance totale de 7,5 MW. Trois nouveaux groupes électrogènes ont été aussi acquis en 2015. 72 km de lignes moyenne tension ont pu être réhabilitées et une capacité additionnelle de stockage de carburant de 700 m³ a pu être apporté. Le projet a permis au gouvernement d'engager les réformes qu'il envisageait dans le secteur de l'énergie [BAD \(2016\)](#). En 2017, le taux d'accès à l'électricité aux Comores a été estimé à 63 %, au-dessus des 50 % qui était le taux avant le projet

PASEC. Ce taux d'accès n'est pas encore le même pour chaque région du pays, comme ce que nous montre la figure 4.13 ci-après. On s'aperçoit que c'est la Grande Comores qui détient le taux d'accès le plus élevé avec 80 %, et pour les deux autres régions, c'est encore aux environs des 50 % et 52,9 % pour Mohéli et 43,7 % pour Anjouan) RDGE (2019). L'union des Comores ambitionne la transition énergétique en l'ayant intégré dans leur vision nationale de développement "Plan Comores émergent 2030" dans la diversification de leur mix énergétique par l'intégration de l'énergie renouvelable reposant sur l'exploitation de leur potentiel géothermique représentant 10 MW CEA (2018).

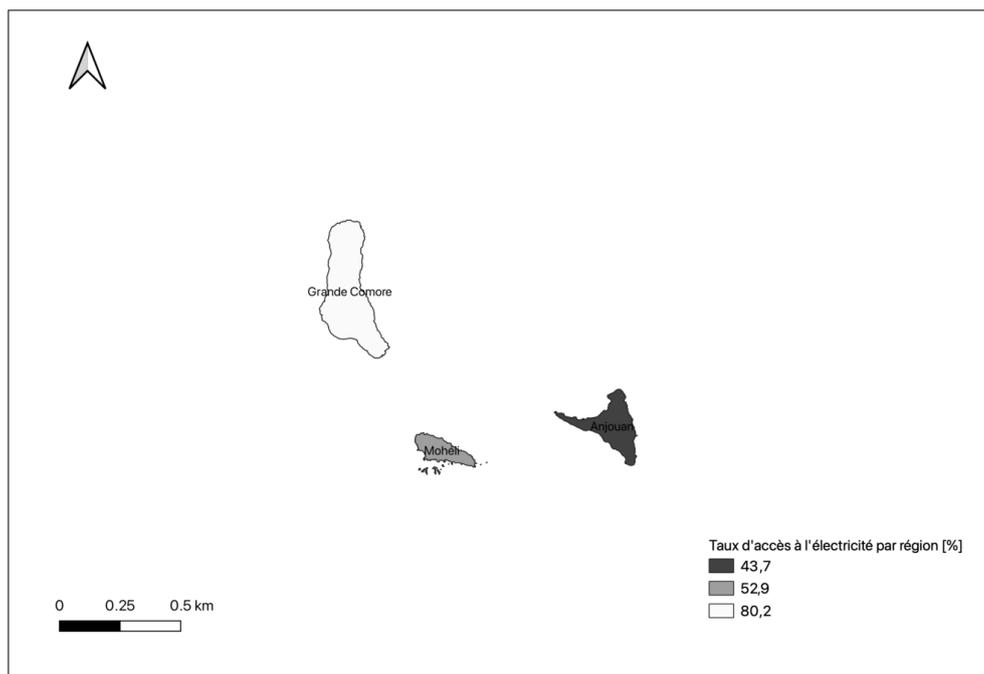


FIGURE 4.13 – Taux d'accès à l'électricité des régions de Comores en 2017. RDGE (2019)

Maurice. Pour le cas de Maurice, le pays ne disposant d'aucune ressource énergétique est totalement dépendant des importations extérieures. L'accroissement de sa demande énergétique corrélé positivement avec la croissance de la population le pousse à importer encore plus pour satisfaire une croissance équivalente à 5 % annuel. L'implication politique du pays dans la planification énergétique a été initiée depuis 2007. Le pays a fixé à cette époque les principaux objectifs suivant pour sa politique énergétique :

- Limiter la vulnérabilité de l'île aux importations de combustibles fossiles et à la volatilité de leurs prix
- Promouvoir la croissance économique et la création d'emplois
- Démocratiser l'approvisionnement en énergie
- Garantir une énergie abordable aux consommateurs
- Et enfin, assurer la viabilité financière de la compagnie d'électricité

Ces objectifs ont nécessité la prise en considération de l'évaluation de la demande en électricité, une réforme économique, l'attraction d'investisseurs dans le secteur de l'énergie pour le pays, une réforme dans le secteur de production de la bagasse pour sa conversion en électricité et puis, le développement d'autres politiques liées à l'utilisation de l'énergie. En 2009, une politique énergétique à long terme a été produite, dont l'objectif est l'intégration de l'usage des énergies renouvelables à hauteur de 60 % de son mix électrique pour 2025. Depuis, Maurice a montré dans sa politique énergétique cette volonté de transition. Lors de la [COP 21](#), le gouvernement s'est engagé dans sa contribution au niveau national à réduire ses émissions de GES de 30 % d'ici à 2023 et pour l'atteindre a mis en place des politiques qui propose l'expansion de la production d'énergie solaire, éolienne et de biomasse massivement. Les Mauriciens misent beaucoup aussi sur les efficacités énergétiques des bâtiments et du process industriel et ont développé beaucoup d'expertise dans le domaine. En 2015, Le pays a présenté avec le soutien du [PNUD \(Programme des Nations Unies pour le Développement\)](#) le projet : "Accelerating the Transformational Shift to a Low-Carbon Economy" au Fond vert pour le climat et le projet a été approuvé l'année précédente. Maurice a fait ainsi partie du premier lot de pays à recevoir une subvention à hauteur de 28 Millions de dollars qui allait l'aider à atteindre son objectif d'atteindre les 35 % d'énergie renouvelable d'ici à 2025. Le gouvernement a instauré des incitations fiscales, simplifié les procédures pour l'approbation des projets d'énergies renouvelables. En 4 ans et demi, un parc éolien et huit parcs solaires sont opérationnels, plus de 500 systèmes solaires ont été installés sur les toits de grand bâtiment commerciaux, d'immeubles résidentiels, des batteries de stockage ont été installées afin d'accroître l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau. De grands projets ont été déjà en gestation [of Mauritius \(2019\)](#). Des ajustements ont été apportés au document en 2022, dont les majeurs sont d'atteindre un mix électrique à 60 % d'énergie renouvelable pour 2030. Le constat est ceci : en 2020, la part d'énergie renouvelable dans le mix énergétique du Maurice est de 24 % (21,7 % en 2019). Il y a une évolution, mais beaucoup reste à faire pour atteindre les objectifs fixés.

Seychelles. Enfin, si nous prenons le cas de Seychelles, comme toutes les autres îles, il est tout aussi conscient de sa vulnérabilité vis-à-vis de sa grande dépendance aux énergies fossiles et a déjà depuis 2010 une politique nationale qui vise essentiellement à réduire cette dépendance par une efficacité énergétique accrue et la promotion des énergies renouvelables avec les objectifs d'atteindre un mix électrique à 15 % renouvelable pour 2030. Les Seychelles, comme les autres îles, cherchent ainsi à se tourner vers un système énergétique moins polluant à faible émission de carbone grâce à l'introduction de centrales photovoltaïques solaires, parcs éoliens offshore à grande échelle, installation biomasses, la production décentralisée, les technologies de stabilisation de réseau par stockage en batterie et par pompe, introduction de réseaux et de compteurs intelligents et bien d'autres. Seychelles a aussi bénéficié de l'appui des Nations Unies dans l'atteinte de ses objectifs grâce à l'octroi de subvention, ils ont aussi pu bénéficier des investissements d'autres institutions ou pays comme l'UE, la Chine, la Corée du Sud, Abou Dhabi.

4.5 Conclusion du chapitre

L'analyse de la vulnérabilité énergétique des îles du sud-ouest de l'Océan Indien a été le centre d'intérêt de ce chapitre. Les résultats obtenus ont permis de mettre en lumière que ces territoires isolés et déjà vulnérables à cause de leur insularité sont tous autant vulnérables énergétiquement. La construction d'indicateurs de vulnérabilité énergétique pour quatre d'entre eux, notamment Madagascar, Comores, Maurice et Seychelles, ont démontré le comportement des îles qui évolue dans une croissance assez monotone et lente.

Le portrait de phase obtenu des indicateurs classe la dynamique des îles en deux attracteurs distincts A1 et A2. Le premier regroupe les îles les plus vulnérables de la zone (Madagascar et Comores, attracteur A1) qui ont des contraintes fortes liées à la fois à une grande précarité énergétique de la population et une dépendance énergétique à l'énergie fossile, en plus de l'insécurité énergétique liée aux risques dans l'approvisionnement en tenant compte des aléas qui peuvent se passer dans le transport et approvisionnement au niveau du territoire, mais aussi auprès des ménages, car les infrastructures sont vétustes, mal entretenues et sujettes à de nombreuses pannes. Pour les territoires situés dans l'attracteur A2 (Maurice, Seychelles et probablement la Réunion et Mayotte), leur vulnérabilité réside dans leur dépendance à l'énergie fossile. Les résultats apportent ainsi des lumières sur la transition énergétique à entamer pour les îles du sud-ouest de l'océan Indien. Cette transition sera différente en fonction des similitudes et des différences que les îles détiennent. Le défi de la transition est plus complexe et onéreux à mettre en place pour Madagascar et Comores, car pour assurer une durabilité dans leur développement, elles devraient dans leur démarche intégrer une vision verte dans la production électrique. Malgré leur pauvreté, notamment au retard de leur industrialisation, le développement de leur économie, ils devront fournir plus d'effort que leurs îles voisines car ils devront investir leur essor en y intégrant la durabilité, contraint de considérer l'impact environnemental.

Les études sur les territoires solitaires du sud-ouest de l'Océan Indien sont encore à ses débuts. La non-disponibilité des données présentait un obstacle majeur de ce chapitre. Le travail qu'on a effectué a été d'exploiter au maximum les données qu'on a pu rassembler pour les îles afin de constituer un fond documentaire pour les nombreux travaux qui méritent d'être poursuivie dans la recherche sur les îles. Ce travail est donc une première exploration.

L'analyse de la politique énergétique des îles font ressortir que les institutions sont sensibilisées sur les vulnérabilités de leur territoire. Les changements restent cependant encore mis à l'écrit sous forme de décret et lois, de programme, mais leur réalisation doit maintenant être prioritaire. D'autant plus que les îles du sud-ouest de l'Océan Indien font face à un grand challenge dans la maîtrise de la demande énergétique, car les îles connaissent encore de forte croissance démographique. Les pays de l'Océan Indien disposent d'un fort potentiel dans la plupart des filières renouvelables, que ce soit l'éolien, le solaire. Ces ressources renouvelables sont pour l'instant largement sous-exploitées dans la zone.

L'indépendance énergétique est un défi commun aux économies insulaires qui s'appuient encore sur d'onéreux moyens de production fossile. Si Maurice et les Seychelles ont engagé de véritables dynamiques dans le domaine des énergies renouvelables, grâce à la mise en place d'incitations à l'investissement et à la présence d'un climat d'affaire favorable, les développements semblent plus lents à Madagascar et aux Comores. Les secteurs électriques de ces deux derniers pays font face à des enjeux de financement, de gestion et de gouvernance qui entravent le développement des énergies renouvelables malgré un fort potentiel, notamment en ce qui concerne l'électrification rurale. Des progrès sont à attendre dans toute la zone, à divers de-

grés selon les pays, en matière de développement d'un cadre règlementaire adapté et de mise en œuvre d'innovations technologiques. Afin de compléter cette analyse, il serait utile pour la réussite de cette transition de disposer d'une cartographie des potentiels énergétiques des îles concernées à jour, ce qui pourrait être un travail supplémentaire et complémentaire intéressant à entreprendre dans ce travail.

Conclusion

Il n'existe aucune théorie unifiée adaptée à la compréhension et à l'évaluation de la vulnérabilité énergétique d'un territoire. Ce phénomène qui représente la sensibilité du territoire à un choc ou à une situation d'adversité, ou encore la fragilité intrinsèque d'un territoire qui le rend fragile face à un éventuel aléa, a un caractère multidimensionnel et très complexe. Son analyse est guidée par les trois dimensions qui définissent globalement le territoire : la dimension économique (monétaire ou pas), sociale et environnementale. L'objectif est ainsi de proposer une approche qui soit la plus complète possible, en englobant l'ensemble des conditions d'existence du territoire en soi. Au terme de ce travail, nous disposons désormais de plusieurs approches pour caractériser la vulnérabilité énergétique d'un territoire. D'abord, une approche sémantique qui permet au chercheur de disposer d'un panel de théories permettant une première prise en main des termes liés à la vulnérabilité énergétique comme la vulnérabilité, la résilience, l'énergie, pour finalement rendre compte des nombreuses formes de la vulnérabilité énergétique du territoire, selon l'échelle d'application, l'enjeu et les facteurs mis en jeu. Ensuite, une approche multidimensionnelle qui se base sur la construction d'un indicateur à partir des variables qui décrivent l'état du territoire étudié, comme son taux d'accès à l'électricité, la part de l'énergie renouvelable dans son mix énergétique et bien d'autres, qui permet d'avoir une photographie du territoire à un instant t donné, et qui rend compte de son état en donnant la possibilité de faire une classification et comparaison avec d'autres territoires. Enfin, une approche qui emprunte des outils issus de la dynamique des systèmes, qui prend en compte le territoire ou l'ensemble des territoires étudiés comme un système et qui permet d'étudier la dynamique du territoire à travers l'évaluation de sa vulnérabilité énergétique.

Les issues majeures déduites de ces approches ont apporté de nouveaux éléments qui vont contribuer à la caractérisation de la vulnérabilité énergétique du territoire. Partant de la conceptualisation de la vulnérabilité énergétique, on a identifié plusieurs formes de cette dernière :

- la dépendance énergétique qui est causée par un approvisionnement énergétique très fortement dominé par des produits d'importation souvent sujets à la fluctuation des prix, aux problèmes d'approvisionnements et de transports,
- la précarité énergétique qui se définit par l'incapacité des ménages à atteindre un niveau de services énergétiques domestiques socialement et matériellement nécessaires
- l'insécurité énergétique dû à un risque d'incapacité approvisionnement en énergie du territoire.

Les analyses multidimensionnelles et analogie à la dynamique des systèmes quant à eux ont mis en évidence plusieurs faits. Le monde actuel est en globalité dans une vulnérabilité énergétique.

En effet, l'économie mondiale a fondé son équilibre autour de l'énergie fossile, le développement des pays ont été actionnés et maintenus grâce à cette énergie et le maintien de cet équilibre est désormais régi par l'usage massif de cette ressource qui est épuisable et non renouvelable. La guerre en Ukraine a mis en évidence cette fragilité, la situation des pays d'Europe qui sont maintenant contraintes de trouver une solution immédiate pour remédier à leur vulnérabilité énergétique causée essentiellement par leur dépendance énergétique envers la Russie valide ce constat. Ainsi, la transition énergétique représente une bifurcation pour le système que forment les territoires du monde entier afin de retrouver un nouvel état d'équilibre, elle est une impérative à cause des dégradations observées liées au dérèglement climatique, mais devrait maintenant être primordiale, car c'est une réponse et un moyen pour renforcer la résilience du territoire face à la vulnérabilité énergétique. Un contraste nord/ sud a été constaté de manière récurrente dans toutes les analyses effectuées : un nord, composé majoritairement par des pays développés, dont l'objet de vulnérabilité énergétique est causé par leur dépendance énergétique, contre un sud, qui rassemble des profils de pays en développement et qui connaissent des contraintes énergétiques liées encore à un problème de non-accès et de précarité. Autrement dit, deux profils se démarquent : les pays développés où les défis sont la maîtrise de la demande énergétique exorbitante qui les contraint à une grande dépendance aux énergies fossiles d'un côté, et les pays en crise énergétique où le défi principal est en premier lieu une électrification onéreuse, forcée par les contraintes écologiques actuelles de se tourner tout de suite vers les énergies renouvelables qui nécessitent un grand investissement et une technologie de pointe. Pour le cas particulier des pays du sud-ouest de l'Océan Indien, ils sont vulnérables énergétiquement, renforçant le fait que l'insularité est un facteur prépondérant de vulnérabilité. L'analyse de leur politique énergétique a permis de constater que des implications politiques existent déjà au sein de ces îles pour palier à leur vulnérabilité, notamment par la transition vers l'énergie renouvelable, mais leur impact ne sont pas encore mesurables. Les idées et directives commencent à être incluses dans les lois et politique énergétique des îles, leur concrétisation serait sûrement visible après plus d'un siècle révolu, si on se réfère à la transition énergétique que le monde a déjà vécue jusqu'à présent (de la découverte du feu jusqu'à maintenant). Enfin, nous disposons désormais d'un élément important concernant la dynamique du territoire : le comportement dynamique du territoire est définie comme étant quasi stationnaire, excluant l'hypothèse d'une dynamique chaotique. En effet, les changements observés à l'échelle d'un territoire sont très lents et ne sont palpables qu'au-delà d'une période plus grande, bien supérieur à 20 ans, la période maximale qui a été la base de ce travail.

Perspectives de recherches

Nos travaux constituent une première analyse de la vulnérabilité énergétique d'un territoire par l'emprunt d'outils issus de la dynamique du système. Nous avons tenté d'apporter une définition mathématique à la vulnérabilité énergétique par la construction du portrait de phase des territoires étudiés. Cette analyse est cependant incomplète et souffre d'un défaut incontestable : la précision ou la non-disponibilité des données qui ont été un frein majeur dans les recherches entreprises, surtout pour l'application dans le cas des îles du sud-ouest de l'Océan Indien. Les résultats obtenus permettent cependant d'avancer d'autres hypothèses et perspectives de recherches.

Une prospection d'équation par analogie à la thermodynamique en sciences physiques Dans la science physique, et plus particulièrement en thermodynamique, il existe une équation qui traduit la loi des gaz parfaits. C'est une équation d'état de la forme $PV = nRT$ qui met en relation les états d'un gaz par P qui représente sa pression, V son volume, n le nombre de moles et enfin T la température à un instant donné. Cette équation d'état décrit le comportement des gaz parfaits : elle permet de relier la pression, le volume, la quantité de matière et la température du gaz. L'ensemble des travaux entrepris dans ce rapport montre que la vulnérabilité énergétique est un état : elle peut se définir comme un état défavorable pour un territoire. Elle est fonction des différentes autres variables d'état qui régissent et interagissent dans le territoire (variables économiques, sociales et environnementales). Mettre en relation tous ces états pourrait donc être possible en s'inspirant de l'équation d'état des gaz parfaits afin d'obtenir une équation de définition de la vulnérabilité énergétique. Autrement dit, il pourrait être intéressant de faire l'analogie de l'équation d'état des gaz parfait avec la vulnérabilité énergétique et de construire une relation similaire qui permettrait ainsi de proposer un moyen d'évaluation dynamique de la vulnérabilité énergétique. En effet, disposant d'une équation qui définit la vulnérabilité énergétique, on pourrait pousser la recherche par la suite en explorant les transformations qui existent dans la thermodynamique. Les transformations en thermodynamique impliquent des états intermédiaires du système au fil de la progression entre des états spécifiquement définis, ces états intermédiaires étant souvent caractérisés par une proximité avec des états d'équilibre. On pourrait ainsi, par cette analogie, étudier le comportement des systèmes de territoire par investigation approfondie des lois qui régissent les transformations en thermodynamique, permet de mieux appréhender les mécanismes sous-jacents à ces processus et enfin de dévoiler comment les systèmes évoluent entre des conditions initiales et finales, en prenant en compte la manière dont ils se rapprochent de l'équilibre tout au long de ces transitions. En thermodynamique, on peut faire l'étude de ces transformations, des déséquilibres des variables d'états qui sont responsables des transformations même infiniment petites. Il serait alors intéressant dans le cadre de ce travail d'explorer cette piste parce qu'on a pu voir de nos résultats que notre système a un comportement dynamique quasi-statique et donc se rapproche des transformations infiniment petites.

Modélisation dynamique à partir du métabolisme territorial La vulnérabilité énergétique est un phénomène résultant d'interaction entre l'homme, ses activités et son environnement. Définir la vulnérabilité énergétique par l'étude du métabolisme territorial s'avère donc être une option intéressante aussi dans l'analyse du phénomène. En effet, le métabolisme territorial qui repose sur une métaphore organiciste consiste à comparer les territoires à des corps : pour assurer leurs fonctions vitales, ils ont besoin de puiser des matières et de l'énergie qu'ils consomment, transforment et excrètent. Le métabolisme territorial permet de faire une analyse de l'état de santé d'un territoire, et la vulnérabilité énergétique représentent une maladie, un dysfonctionnement pour le territoire. L'analyse du métabolisme territorial, qui consiste à faire une approche quantitative des échanges de flux sur un temps et un territoire donné, pourrait répondre à la quête d'une définition de ce qui contribue à la vulnérabilité énergétique du territoire, qui serait représenté comme un déséquilibre entre les flux entrants et sortants du territoire. L'application de cette méthode sur le cas des pays insulaires serait tout aussi intéressante dans le sens où le milieu insulaire présente un intérêt particulier pour des études de métabolisme territorial, car leur position et éloignement imposent certaines limitations des flux de matières et d'énergie. Cela pourrait apporter par la suite de nouvelles informations sur l'effet immédiat

ou à long terme de la distance, de l'isolement sur la vulnérabilité énergétique.

Analyse prospective et construction de scénario afin d'étudier la possibilité de mettre en place une politique énergétique commune dans la région du sud-ouest de l'Océan Indien Les îles du sud-ouest de l'Océan Indien sont toutes touchées par la vulnérabilité énergétique. Un des facteurs prépondérant à ce constat est leur isolement. Pour renforcer leur résilience face à cette vulnérabilité, il pourrait être intéressant pour les États de cette région d'adopter une politique commune en matière énergétique en mettant en place dans un premier temps un réseau interconnecté par câble sous-marin. Les îles sont aussi confrontées à l'impératif de la transition énergétique et doivent tout faire pour la mettre en marche, mais pour l'énergie solaire par exemple, ils devront disposer d'espaces qui permettraient de mettre en place les parcs solaires. S'ils adoptent un système énergétique connecté et une politique commune, Madagascar, qui dispose encore d'une vaste étendue de terre avec sa capacité d'irradiation très élevée, pourrait être l'hôte des parcs solaires par exemples. Une situation qui réconforterait sûrement les îles sœurs qui par leur petite taille font face à un manque d'espace, surtout qu'ils doivent encore gérer la croissance démographique qui représente déjà une contrainte foncière pour eux. Construire des modèles prospectifs se basant sur divers scénarii de ce genre peut être un apport de connaissance qui contribuerait à diminuer la vulnérabilité énergétique des îles du sud-ouest de l'Océan Indien.

Finalement, les perspectives de recherches énoncées ci-dessus montrent que les travaux qu'on a effectués jusqu'ici représentent de nouveau un départ pour d'autres pistes de recherches qui sont à développer pour affiner la caractérisation de la vulnérabilité énergétique d'un territoire.

Annexes

A Exemples de travaux de définitions de vulnérabilité énergétique

A.1 Une approche multicritère de la vulnérabilité énergétique. d'Artigues (2012)

Dans cet article, les auteurs tendent à définir la vulnérabilité énergétique par trois étapes bien distinctes : d'abord par une synthèse bibliographique des indicateurs existants de la vulnérabilité, ensuite par une méthodologie d'analyse multicritère : ELECTRE TRI, et enfin par une approche systémique. Le tableau ci-après résume les indicateurs permettant la mesure de la vulnérabilité énergétique recueillis dans la littérature.

Indicateurs simples	Estimations des ressources disponibles
	Ratio réserves sur production
	Dépendance aux importations
	Stabilité politique
	Prix de l'énergie
	Diversité
Indicateurs composés	Indicateur de Shannon étendu
	Indice offre / demande
	Indice de sécurité énergétique de l'IEA
	Indice de vulnérabilité au pétrole

Ensuite, la méthode utilisée pour faire l'analyse dans la deuxième partie du travail fut la méthode ELECTRE TRI. C'est une méthode d'agrégation partielle qui consiste à attribuer les pays dans quatre catégories : très peu vulnérable, peu vulnérable, assez vulnérable et enfin vulnérable. Les critères utilisés pour définir la vulnérabilité ont été : la diversité (diversité des sources et diversité compte tenu de la dissemblance entre les énergies), la dépendance énergétique, l'indice de raréfaction des ressources, les émissions atmosphériques, l'intensité énergétique, la consommation par tête, le coût (indice de prix de l'électricité), indice de risque lié à l'accidentologie (survenue dans le secteur énergétique que ce soit de source naturelle ou technologique). Les critères ont été pondérés (dont la somme équivaut à 100 %) grâce à une simple classement, rectifié par la suite par une analyse de sensibilité. Ils ont ensuite proposé différents scénarios, en fonctions des différents indices de diversité retenus et des données disponibles pour chaque pays. Et enfin, une approche systémique a été faite en dernière partie dont l'objectif est de transposer la vulnérabilité systémique au problème de sécurité énergétique. Pour cela, les auteurs ont établi un indicateur basé sur trois éléments : l'exposition, l'adaptabilité et la sensibilité. L'exposition se rattache à la fréquence, degré et durée de toutes perturbations qui peuvent mener à la vulnérabilité énergétique du territoire. L'exposition a été exprimée par l'indice de diversité, en s'appuyant sur l'idée qu'une forte diversité des sources d'énergies garantie une faible degré d'exposition à une insécurité. Ensuite, la sensibilité quant à elle mesure le degré auquel le système peut être modifié ou affecté par les chocs. Cette sensibilité a été intuitivement rattachée à la consommation. Et enfin, l'adaptabilité définit la capacité du système à s'ajuster aux perturbations, à modérer les dommages potentiels, à profiter des opportunités occasionnées, et à endiguer les conséquences relatives aux transformations qui apparaissent. L'adaptabilité a été caractérisée par deux contributeurs aux changements technologiques : l'apprentissage et

la recherche et développement. L'indicateur de vulnérabilité systémique a été obtenu selon la formulation suivante :

$$Vulnerabilite = Exposition \times \frac{Sensibilite}{Adaptabilite} \quad (1)$$

A.2 Définition d'indicateurs de vulnérabilité énergétique. Une analyse comparée des pays de l'Europe des 15. Artigues (2008)

La vulnérabilité est définie dans le travail d'Artigues à travers une étude comparée sur 15 pays de l'Europe (l'Europe des 15 : Finlande, Allemagne, Belgique, Espagne, France, Danemark, Royaume-Uni, Suède, Autriche, Pays-Bas, Portugal, Italie, Grèce, Irlande, Luxembourg) selon trois concepts bien distincts : la diversité, l'efficacité et enfin la soutenabilité énergétique. Pour ce faire, l'auteur a établi des calculs qui permettent de représenter des indicateurs de vulnérabilité énergétique de ces trois concepts.

Tout en sachant que ces notions : diversité, soutenabilité et efficacité forment un lien indéniable. En effet, il est reconnu qu'une politique ou une situation énergétique est qualifiée de soutenable si elle est efficace et diversifiée. Pour illustration, l'amélioration de l'efficacité énergétique par la diminution de la consommation vise en priorité la réduction des émissions polluantes, qui est un facteur de soutenabilité. En associant des indicateurs appropriés à ces trois notions, l'auteur a proposé un moyen de mesurer la vulnérabilité. L'idée de lier la diversité énergétique à la vulnérabilité énergétique est basée sur la notion de sécurité énergétique dans l'approvisionnement. En effet, la diversification de la fourniture d'énergie est censée réduire le risque de rupture d'approvisionnement et donc d'assurer une sécurité énergétique. L'indicateur de diversité de base utilisé dans le rapport est l'indice de Shannon-Wiener. Cet indicateur permet de mesurer la diversité des sources d'énergies primaires d'un pays. Cet indice est également utilisé pour tenir compte de la diversité des régions d'origine des importations, à la fois pour le pétrole, le gaz naturel et les combustibles solides. Et un autre indicateur qui permet de calculer l'indice de diversité par type d'énergie en intégrant la part de la production intérieure, qui modifie l'importance à accorder à la seule diversité des pays fournisseurs. La soutenabilité énergétique est la deuxième composante servant à définir la vulnérabilité. Elle a été calculée selon trois dimensions. D'une part, à partir de l'indice de base de Shannon-Wiener, l'auteur a intégré, dans un indicateur synthétique, la diversité des sources d'énergie, celle des pays d'origine des importations, le niveau de production intérieure, en ajoutant deux éléments distincts : la stabilité politique des régions d'origine des importations (mesurée par le niveau de PIB) et la raréfaction des ressources en énergies primaires (ratio R/P). D'autre part, la soutenabilité a été mesurée à partir du taux d'interconnexion, correspondant au rapport entre la capacité totale d'échanges et la capacité de production installée d'un pays. Lorsqu'il est élevé, le taux d'interconnexion est significatif de la possibilité pour un pays d'une part d'augmenter l'efficacité de sa production énergétique (économies d'échelle), d'autre part d'accroître sa sécurité d'approvisionnement s'il est faiblement doté en ressources énergétiques. Enfin, la soutenabilité fait référence au caractère durable des choix énergétiques. Sur ce point, de nombreux indicateurs peuvent être calculés, mais deux ont été retenus, jugés être les plus représentatifs de cette dimension de durabilité énergétique : la consommation énergétique par tête, qui permet de mesurer l'évolution des comportements de consommation énergétique dans le temps et les émissions de CO_2 par habitant, qui montrent l'évolution également dans le temps des comportements de rejet d'émissions polluantes des populations. Enfin, l'efficacité énergétique qui a été prise comme la troisième composante de

la vulnérabilité a été mesurée d'une part par le niveau de la consommation finale par secteur des pays, d'autre part par l'intensité énergétique. Dans le premier, l'efficacité énergétique est associée à la maîtrise de la consommation, notamment par type de secteur dans l'économie, les calculs se sont basés sur la consommation finale d'énergie pour le secteur industriel, celui des transports, le secteur résidentiel, tertiaire et agricole. Dans la seconde, le calcul de l'intensité énergétique a été utilisé dans le but de soutenir une indication de l'efficacité d'utilisation de l'énergie pour produire de la valeur ajoutée, en notant qu'une baisse de l'intensité énergétique est synonyme de plus grande efficacité. Une étude comparée des 15 pays d'Europe à partir de ces indicateurs a été établie. La conclusion à tirer est que la diversification des énergies et des pays fournisseurs d'énergie réduit la vulnérabilité énergétique d'un pays et donc sont des moyens de la contourner, surtout aux pays qui sont moins dotés en ressources naturelles.

A.3

Lowering energy vulnerability in Sao Paulo by increasing the use of Gas. [Antonio et al. \(2019\)](#) Dans cet article, la définition de la vulnérabilité énergétique est obtenue à l'aide d'une analyse cartographique. Les auteurs ont établi quatre classes de vulnérabilité énergétique : très élevée, élevée, moyenne et faible à partir de cinq indicateurs qui sont :

- La dimension de la zone desservie par une seule sous-station : plus la zone desservie par une seule sous-station électrique est étendue, plus elle est vulnérable,
- La disponibilité d'une source différente ou complémentaire : plus la source d'énergie est diversifiée, plus la vulnérabilité est faible.
- La distance par rapport aux voies principales : plus les avenues et autres voies de circulation principales sont proches, plus la vulnérabilité énergétique est faible.
- La proximité des zones prioritaires : plus les sites prioritaires sont proches, plus la vulnérabilité énergétique est faible.
- Et enfin la densité des arbres le long des chemins : plus la densité des arbres est faible, plus la vulnérabilité énergétique est faible.

Ensuite, ils ont cartographié toutes les zones résidentielles en fonction de ces classes. Pour l'analyse, ils ont modifié la variable 2 en augmentant artificiellement l'utilisation du gaz pour dessiner un scénario où l'électricité et le gaz sont utilisés équitablement. L'étude a été délimitée aux seules zones résidentielles selon la carte d'occupation des sols de la ville de São Paulo. Les auteurs ont montré que la méthode de cartographie employée a démontré que l'augmentation de l'utilisation du gaz et donc de la diversification du bouquet énergétique, a potentiellement diminuer la vulnérabilité énergétique résidentielle dans la ville de São Paulo.

B Base théorique de la méthode ACP

B.1 Présentation de la méthode d'ACP

Les grands ensembles de données sont de plus en plus courants et souvent difficiles à traiter et à analyser. Pour arriver à l'interprétation de ces données, des outils sont nécessaires. Une méthode bien connue est l'ACP ([Analyse en Composantes Principales](#)). L'ACP, ou principal component analysis (PCA) en anglais, est une méthode statistique qui permet la visualisation et l'analyse d'un jeu de données multivariées ou multidimensionnelles (contenant des individus décrits par plusieurs variables quantitatives). Son principe repose sur la réduction de la dimensionnalité de l'ensemble des données, et cela, en préservant autant de « variabilité », c'est-à-dire d'informations statistiques que possible [Jolliffe and Cadima \(2016\)](#). Chaque variable dans le jeu de données est considérée comme une dimension. Si on dispose par exemple de trois variables, on aura à faire face à trois dimensions qui pourraient être difficiles à voir graphiquement, comme la visualisation de données de plus de deux dimensions est déjà assez complexe. L'ACP offre la possibilité de faire une synthèse des informations contenues dans le jeu de données en seulement quelques nouvelles variables appelées composantes principales [STHDA \(2021\)](#). Ces nouvelles variables sont une combinaison linéaire des variables de départ. L'ACP est généralement utilisé dans cet objectif : réduire le nombre de variables à un ensemble plus petit qui représente la plupart des variances des variables [Praene et al. \(2018\)](#) (qui conserve le plus d'informations). L'ACP s'utilise pour réduire les dimensions d'une donnée multivariée à deux ou trois composantes principales, qui peuvent être visualisées graphiquement, en assurant la garde du maximum d'information possible du jeu de données de départ. Pour d'autres cas, cela peut réduire à plus de trois, mais le nombre de composantes principales reste toujours inférieur ou égal au nombre de variables d'origine [Jolliffe and Cadima \(2016\)](#). Techniquement, l'ACP analyse la corrélation entre les variables originales et détermine le nombre de dimensions sous-jacentes (les composantes principales). Dans ce sens, elle permet d'expliquer la variance des données vers l'indice (la composante créée) [Gasser \(2020\)](#). L'information contenue dans un jeu de données correspond à la variance ou l'inertie totale qu'il contient. On peut dire aussi que l'objectif de l'ACP est ainsi d'identifier les directions : les axes principaux ou composantes principales le long desquels la variation des données est maximale. Cette capacité, inhérente à identifier les multicolinéarités, est l'une des forces de l'ACP [Ndiaye and Gabriel \(2011\)](#). Enfin, les données disponibles en sciences sociales résultent généralement de procédés de collecte susceptibles d'introduire des résultats d'observation (contrairement à d'autres sciences comme en expérimentation où il est plus facile de contrôler les facteurs perturbateurs pour s'assurer de la validité et fidélité des instruments de mesure). Dans ce constat, l'ACP n'est pas juste un moyen de réduire les données pour une économie d'information, mais est aussi utile pour séparer les informations pertinentes des informations parasites ou bruits méthodologiques liés à des erreurs d'observations [Loriaux and Remy \(2005\)](#).

B.2 Principe de la méthode d'ACP

Les données d'un ACP sont représentées par un tableau rectangulaire qui contient p variables quantitatives observées pour n individus. On l'assimile à une matrice $X_{i,j}$ d'ordre $(n \times p)$, tels que les variables sont représentées par les colonnes de 1 à n et les individus les lignes de 1 à p .

Chaque ligne peut être représentée par un vecteur unité u_i de R^p et de façon analogue,

analyses qui vont être entreprises par l'ACP.

B.3.1 Calcul d'une distance

Le calcul d'une distance entre deux points de l'espace est un point clé de la représentation de l'ACP. En effet, comme l'objectif est de représenter les individus dans de nouveaux plans, il est nécessaire de savoir calculer les distances entre les individus ou variables, pour pouvoir après assurer leur projection vers les nouveaux axes (une méthode qui demande encore la notion de distance). La distance utilisée par l'ACP dans l'espace où sont représentées les unités (individus) est la distance euclidienne classique. Cette distance est obtenue par la formule :

$$d^2(u_i, u_{i'}) = \sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{i'j})^2 \quad (2)$$

Sachant qu'avec cette distance, toutes les variables jouent le même rôle et les axes définis par les variables constituent une base orthogonale. Le produit scalaire associé à cette distance est un produit scalaire entre deux vecteurs tels que :

$$\langle \vec{o\bar{u}}_i, \vec{o\bar{u}}_{i'} \rangle = \sum_{j=1}^p (x_{ij}x_{i'j}) = [t]U_iU_{i'} \quad (3)$$

Et la norme

$$\|\vec{o\bar{u}}_i\|^2 = \sum_{j=1}^p (x_{ij}^2) = [t]U_iU_i \quad (4)$$

Qui permet de définir, au final, l'angle α entre deux vecteurs par son cosinus tels que :

$$\cos \frac{\langle \vec{o\bar{u}}_i, \vec{o\bar{u}}_{i'} \rangle}{\|\vec{o\bar{u}}_i\| \|\vec{o\bar{u}}_{i'}\|} = \frac{\sum_{j=1}^p (x_{ij}x_{i'j})}{\sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{ij}^2) \sum_{j=1}^p (x_{i'j}^2)}} \quad (5)$$

Calcul coordonné à l'origine Pour le cas des nuages de points formés par les individus par exemple, il est intéressant de choisir une origine liée au nuage de point lui-même au lieu de prendre un point o correspondant au vecteur de coordonnées nulles. Cette nouvelle origine est définie par le centre de gravité du nuage, et pour ce faire, il faut choisir un système de pondération des individus. Pour $\forall i, \dots, n$ le poids $p_i =$ poids des individus ou $\sum_i p_i = 1$, le centre de gravité est défini selon la formule suivante :

$$\sum_{i=1}^n (p_i G \vec{U}_i) = \vec{0} \quad (6)$$

Pour l'ACP, on choisit de donner le même poids $\frac{1}{n}$ à tous les individus et alors, le centre de gravité G du nuage des individus devient alors le point dont les coordonnées sont les valeurs moyennes des variables. Et de ce fait, on revient à travailler sur un tableau de données centrées si on prend G le centre de gravité des nuages comme origine. La même procédure est à appliquer pour les nuages des points des variables pour avoir aussi, les coordonnées centrées des variables.

Moments d'inertie

- Inertie totale du nuage des individus :

L'inertie totale ou I_G mesure la dispersion du nuage des individus par rapport à son centre de gravité. Plus il est grand et plus le nuage est très dispersé, tandis que dans le cas contraire, lorsqu'il est petit, le nuage est alors concentré sur son centre de gravité. Ce moment d'inertie peut être obtenu par la formule suivante :

$$I_G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d^2(G, u_i)) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (x_{i,j} - x_j)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ([t]U_{ci}U_{ci}) \quad (7)$$

Cette formule peut s'écrire sous la forme suivante :

$$I_G = \sum_{j=1}^p \left(\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((x_{i,j} - x_j)^2) \right] \right) = \sum_{j=1}^p (Var(v_j)) \quad (8)$$

Où $Var(v_j)$ est la variance empirique de la variable v_j .

- Inertie du nuage des individus par rapport à un axe passant par G

L'inertie du nuage des individus par rapport à un axe passant par G équivaut à la somme des carrés des distances des individus au centre de gravité. Elle mesure la dispersion du nuage de point et ainsi, mesure la proximité du nuage des individus par rapport à l'axe, de ce fait la dispersion ou variance. Par définition à :

$$I_{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d^2(h_{\Delta i} - u_i) \quad (9)$$

Où $h_{\Delta i}$ est la projection orthogonale de u_i sur l'axe Δ .

- Inertie du nuage des individus par rapport à un sous-espace vectoriel V passant par G

Cette inertie est par définition égale à :

$$I_V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d^2(h_{Vi} - u_i) \quad (10)$$

Où H_{vi} est la projection orthogonale de u_i sur le sous-espace V .

Construction de nouveaux axes principaux Pour la construction de nouveau axe, l'axe à chercher est l'axe Δ_1 passant par le centre de gravité G du nuage de points et d'inertie I_{Δ_1} minimum, car c'est l'axe le plus proche de l'ensemble des points du nuage des individus, et donc, si l'on doit projeter le nuage sur cet axe, c'est lui qui donnera l'image la moins déformée du nuage. Cette recherche se base sur la relation entre les inerties données précédemment : rechercher Δ_i tel qu' I_{Δ_i} est minimum, est équivalent à chercher Δ_i tels qu' $I_{\Delta_i^*}$ (le complémentaire orthogonal d' I) est maximum. Autrement dit, trouver le nouvel axe, c'est trouver l'axe Δ_1 qui devrait être ajusté au mieux que possible au nuage de points des individus. La somme des carrés des distances des individus à cet axe doit être minimale et donc le nuage projeté dans le plan de cet axe est d'inertie (dispersion) maximale.

L'axe Δ_1 est défini par son vecteur directeur unitaire \vec{G}_{a1} La recherche de cet axe conduit, après calcul, que le vecteur directeur unitaire de l'axe Δ_i n'est autre que le vecteur propre associé à la plus grande valeur propre de la matrice de covariance (Σ).

Ensuite, il y aura à chercher les axes suivants. Le deuxième axe Δ_2 : orthogonal au premier et d'inertie minimum. Comme dans la recherche de l'axe Δ_1 , l'axe Δ_2 doit passer par G par son vecteur directeur unitaire a_2 . On retrouve que a_2 est le vecteur propre de la matrice de covariance à la deuxième plus grande valeur propre. On peut montrer que le plan défini par les axes Δ_1 et Δ_2 est le sous-espace de dimension 2 qui porte l'inertie maximum.

La recherche de nouveaux axes poursuit la même procédure. Les nouveaux axes sont tous vecteurs propres de la matrice de covariance correspondant aux valeurs propres ordonnées. La matrice de covariance est une matrice symétrique réelle, qui possède p vecteurs propres réels, formant une base orthogonale de \mathbb{R}^p .

Ainsi, on est passé d'une base orthogonale initiale centrée à une nouvelle base orthogonale des vecteurs propres de la matrice de covariance formée par les nouveaux axes appelés axes principaux.

En pratique, il est recommandé de procéder à la normalisation des données avant de faire les calculs relatifs aux axes principaux. En effet, dans un ACP centré, les variables sont traitées de façon symétrique et les nouveaux axes sont issus de la matrice de covariance empirique des variables. Ce qui pose parfois des problèmes du fait que les variables peuvent être hétérogènes, comme des poids, tailles, âges. Des variables qui ont différentes unités qui pourraient fausser les calculs de variance, et changer complètement les résultats de l'ACP. Il faudrait alors normaliser les variables et travailler sur des jeux de données sans dimension. Cela consiste à diviser les valeurs des variables par leur écart-type : on aura ainsi des variables centrées et réduites. La matrice de covariance devient de ce fait à partir des variables centrées réduites la matrice de corrélation qui n'a que du 1 sur sa diagonale principale. Ainsi, l'inertie totale du nuage des individus dans \mathbb{R}^p est donc toujours égale à p dans tout ACP normée. Cela permet de soutirer des particularités dans le choix du nombre d'axes à garder pour l'interprétation de l'ACP.

On a p valeurs propres dont la somme vaut p (comme l'inertie totale est aussi égale à la somme des valeurs propres). Il est à considérer alors comme significatives que les valeurs propres dont la valeur est supérieure à 1, puisque la valeur moyenne des valeurs propres vaut 1 et leur somme vaut p .

B.3.2 Aide à l'interprétation d'un ACP : notions de base

Contributions

- Contributions des axes à l'inertie totale : La contribution absolue de l'axe Δ_k à l'inertie totale du nuage des individus est égale à la valeur propre qui lui est associée : $Ctra(\Delta_k/I_G) = \lambda_k$ La contribution relative qui est souvent exprimée par le pourcentage d'inertie de k quant à elle est : $Ctrr(\Delta_k/I_G) = \lambda_k/(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k)$. Ces pourcentages d'inertie sont des indicateurs qui permettent de voir la part de variabilité du nuage des individus expliquée par ces sous-espaces. La variable expliquée par les axes est négligeable si la valeur propre qui y est liée est faible.

- Contributions d'un individu à un axe :

Contribution absolue : un individu contribue plus à la confection d'un axe, si sa projection sur cet axe est éloignée du centre de gravité du nuage. Et inversement, un individu dont la projection sur un axe sera proche du centre de gravité contribuera faiblement à l'inertie portée par cet axe. La contribution des individus sert à l'interprétation des nouveaux axes de l'ACP en fonction des individus. Contribution relative : cette contribution est utile pour un individu particulier u_i pour donner sa contribution relative à l'inertie portée par cet

axe. L'examen de ces contributions relatives permet d'interpréter les axes principaux avec les individus.

Qualité de représentations

- Qualité de représentations des individus : Pour s'assurer que les individus sont bien représentés sur un axe (ou sur un plan, ou un sous-espace), il faut que l'angle entre le vecteur \vec{GU}_i et l'axe (ou le plan, ou le sous-espace) soit petit. Pour ce faire, on calcule le cosinus de cet angle, si le résultat est proche de 1, alors on pourra dire que l'individu u_i est bien représenté par sa projection sur l'axe (ou plan, ou sous-espace). Et si deux individus sont bien représentés en projection sur un axe (ou plan ou sous-espace) et ont des projections proches, alors on pourra dire que ces deux individus sont proches dans l'espace.
- Qualité de représentations des variables : La représentation des variables peut être prise de façon complètement symétrique à celui des individus. Les raisonnements se font dans \mathbb{R}^n au lieu de \mathbb{R}^p . Par contre, dans l'ACP, au-delà de cette symétrie formelle, on doit utiliser la dissymétrie liée à la sémantique, car l'objectif de l'ACP n'est pas le même pour les individus et les variables. Avec les individus, on cherche à trouver des ressemblances entre eux, tandis qu'avec les variables, c'est plutôt la liaison ou corrélation entre variables qui intéresse. On peut alors faire le raisonnement suivant : on a représenté les individus dans l'espace des anciennes variables, et on a fait un changement de base dans cet espace. Les nouveaux axes sont des combinaisons linéaires des anciens axes et peuvent donc être considérés comme de nouvelles variables obtenues d'une combinaison linéaire des anciennes. On appelle ces nouvelles variables : les composantes principales. Voir comment les anciennes variables sont liées aux nouvelles devient alors intéressante. On peut le calculer en trouvant les corrélations des anciennes variables avec les nouvelles. Et la représentation des anciennes variables se fera en prenant comme coordonnées des anciennes variables leurs coefficients de corrélations avec les nouvelles variables. On obtient ainsi le cercle de corrélations. Cette dénomination vient du fait qu'un coefficient de corrélation variant de -1 et $+1$, les représentations des variables de départ sont des points qui se trouvent à l'intérieur d'un cercle de rayon 1 si on fait la représentation sur un plan. La matrice de covariance des composantes principales est égale à la matrice diagonale des valeurs propres. Comme la variance empirique d'une variable est égale au carré de la norme du vecteur qui la représente dans la géométrie euclidienne choisie et que le coefficient de corrélation empirique de deux variables est égal au produit scalaire des deux vecteurs qui les représentent, on pourra interpréter les angles des vecteurs comme des corrélations. Pour ce qui est de la qualité de représentations des variables, une variable sera d'autant mieux représentée sur un axe que sa corrélation avec la composante principale correspondante est en valeur absolue proche de 1. Une variable sera bien représentée sur un plan si elle est proche du bord du cercle des corrélations, car cela signifie que le cosinus de l'angle du vecteur joignant l'origine au point représentant la variable avec le plan est, en valeur absolue, proche de 1. Et enfin, sur le graphique du cercle de corrélations, on peut aussi interpréter les positions des anciennes variables les unes par rapport aux autres en termes de corrélations. Deux points très proches du cercle de corrélations, donc bien représentées dans le plan, seront très corrélés positivement entre elles. Si elles sont proches du cercle, mais dans des positions symétriques, par rapport à l'origine, elles seront très corrélées négativement. Deux variables proches du cercle de corrélations et dont les vecteurs qui

les joignent à l'origine forment un angle droit, ne seront pas corrélées entre elles. Il faut, pour interpréter correctement ces graphiques des cercles de corrélation, se souvenir qu'un coefficient de corrélation est une mesure de liaison linéaire entre deux variables, et qu'il peut arriver que deux variables très fortement liées aient un coefficient de corrélations nul ou très faible, si leur liaison n'est pas linéaire.

Choix du nombre d'axes à retenir Le choix du nombre de composantes principales retenues ou axes principales est un point clé de l'ACP. Ces axes représenteront la qualité des estimations auxquelles conduit l'ACP et ont pour rôle de reconstituer les données. Des critères sont proposés pour faire le choix :

- Règle de Kaiser : La règle de Kaiser implique de retenir comme axes principaux, ceux dont les valeurs propres sont supérieures à 1 dans le cas d'un ACP normé réduit.
- Éboulis ou règle du coude Le principe consiste à rechercher le coude dans le graphique présentant la décroissance des valeurs propres pour chaque axe et de ne garder que les valeurs propres avant le coude.

C La dynamique des systèmes en sciences sociales

C.1 Comment la dynamique des systèmes a pris sa place en science sociale : cas dans l'urbanisme

L'introduction de la dynamique des systèmes dans l'urbanisme, a été abordé par Michael Batty avec une synthèse chronologique qui représente l'histoire de la modélisation urbaine des 50 dernières années passées [Batty \(2008\)](#). La modélisation était devenue une quête d'autant que les gestions urbaines ont été poussées par le besoin indéniable de planifier et gérer. La modélisation qui se fondait à cette époque sur des idées théoriques remontant aux racines des sciences sociales modernes a subi l'influence de la physique et des mathématiques depuis l'époque des Lumières. À la fin du XIX^e siècle par exemple, les modèles urbains sur la localisation des personnes commencent à jaillir avec une analogie au comportement des particules en physique, empruntant la loi de la gravitation [Batty \(1979\)](#). Ainsi, cette nouvelle tendance, qui est de la physique sociale⁵ a fourni la justification des modèles gravitationnels qui ont été utilisés pour simuler toutes sortes de flux de transport. Par la suite, les théories microéconomiques dans lesquelles la localisation des individus et des entreprises pouvant être simulé à l'intérieur des villes en fonction de leur demande d'espace, de leurs revenus et de leurs coûts de transport ont été rapidement développées. Mais ces époques ont considéré le système urbain inerte [Andersson \(2008\)](#), et les modèles de systèmes urbains qui y sont issus tels que la théorie de la place centrale, les modèles de villes mono-centriques, les modèles de systèmes de villes, les modèles d'entropie, les modèles d'interaction spatiale et la théorie de la localisation industrielle ont été formés autour des outils qui étaient disponibles à l'époque [Alonso \(1964\)](#), [Berry et al. \(1967\)](#), [Henderson \(1974\)](#), [Wilson \(1970\)](#), [Weber \(1997\)](#). En résumé, les modèles construits ont été centrés plus sur les modèles d'usage des sols et de transports qui ont été très répandus à des échelles macro-statique. La modélisation s'est intégrée très vite dans l'urbanisme. Ses applications y sont prépondérantes surtout autour de la théorie de la localisation et de l'analyse spatiale dans des contextes de décision commerciale et publique. Premièrement, ces modèles aident à affiner et à expérimenter des hypothèses sur la structure de la ville, constituant ainsi une partie importante du développement de la théorie dans la recherche urbaine. Deuxièmement, ces modèles urbains aident à fournir des méthodes d'éducation des urbanistes en matière de théorie urbaine. Et troisièmement, ces modèles urbains peuvent être utilisés dans des études pratiques de planification et, de ce fait, à des fins de simulation pour aider à prédire les conséquences probables de la planification ou de la non-planification de l'avenir des villes [Batty \(1971\)](#). On peut énoncer par exemple la planification et l'aménagement du territoire à travers la mobilité : transport, gestion de transport, le trafic, la résolution des problèmes liés aux transports, dans l'utilisation des terres, construction de bâtiments, logements, ville et les problèmes qui y sont liés [Batty \(2009\)](#). Et même qu'elles s'étendent de plus en plus à d'autres géographies sociales et humaines construites. Cependant, une quête de dynamique s'est largement fait sentir depuis le début des années 60. En effet, les efforts ont été faits pour ajouter de la dynamique en répétant la logique transversale à différents moments, mais le problème des données et la nécessité de

5. Physique sociale : terme utilisé pour aborder l'application des idées de la physique classique "newtonienne" dans les systèmes sociaux, sous la forme d'analogies avec les lois du mouvement de Newton, se référant entre autres aux concepts d'énergie potentielle et de force gravitationnelle. Cela est au cœur de la modélisation des interactions spatiales, mais plus récemment, cette physique a été étendue pour englober les notions de complexité telles qu'elles se reflètent dans l'échelle, l'autoorganisation et la dynamique des systèmes loin de l'équilibre.

produire des prévisions d'équilibre n'ont pas fait passer cette préoccupation au premier plan [Batty \(2008\)](#). Ce fut Jay Forrester, qui en 1969 a percé le chemin de l'utilisation de la dynamique des systèmes à partir des idées qu'il a su tirer de ses expériences dans la dynamique des machines à l'entreprise sous forme de dynamique industrielle initiée en 1961. Cette modélisation a été appliquée à la dynamique de la ville à part entière, basée sur une logique de rétroaction⁶ tenant en compte une variation dans le temps, mais qui été encore dépourvu de toute variation spatiale [Forrester \(1969\)](#). L'application des premiers modèles de dynamiques des systèmes a été bien évidemment percé par le modèle dynamique urbain de Forrester [Forrester \(1969\)](#). Le modèle est destiné à la simulation du développement à très long terme d'une grande ville et à chercher les conséquences lointaines de politiques urbaines entreprises. Le modèle est basé sur des concepts de dynamique industrielle et simule les processus de changement dans une ville hypothétique par intervalles de 5 ans sur une période de 250 ans ; l'auteur montre à travers son modèle que les politiques classiques de planification se vouent souvent à l'échec et même que ce sont des facteurs qui aggravent encore plus la situation initiale. Ce modèle pionnier a suscité de nombreuses critiques à cause de son non pris en charge de la dimension spatiale alors qu'il se voue être dynamique, aussi pour son temps de réponse très large (250 ans). Malgré ces faiblesses, nombreux chercheurs se sont basés sur ce modèle. On pourrait citer par exemple l'évolution dynamique alpin qui a été simulé avec le modèle AMORAL [Chamussy et al. \(1984\)](#), [Chamussy \(1989\)](#). Ce modèle avait comme objectif de modéliser le fonctionnement de l'espace (ou d'un espace de référence) des Préalpes françaises du sud et de simuler des interventions volontaristes, afin de voir quelle pouvaient être les actions les plus efficaces pour briser, et éventuellement renverser la dynamique d'abandon observée. C'est un modèle construit par un ensemble d'équations de stocks et de flux inspiré des travaux de Forrester, formalisé en langage Dynamo, élaboré et diffusé par les DUPONT grenoblois, Joël Charre, Geneviève Durant, Pierre Dumolard, Henri Chamussy, Maryvone Le Berre, Yves Uvietta. Ce même groupe de chercheurs, a construit un modèle Paca pour simuler le comportement écoénergétique de la région de Nice avec ce même concept [Dauphiné \(2018\)](#). Toujours en s'inspirant du modèle de Forrester, Damienne Provitolo se base sur cette forme de modélisation pour sa thèse sur le risque d'inondation dans la modélisation et simulation des catastrophes par le couplage de l'aléa, du risque et de la vulnérabilité [Provitolo \(2003\)](#), [Provitolo \(2006\)](#), [Provitolo and Antipolis \(2009\)](#). Une revue de littérature proposée par David C. Lane [Lane \(1998\)](#) cherche l'application de la dynamique des systèmes en explorant sa pratique dans certaines théories des sciences sociales. Il a pu mettre en évidence en conclusion que les idées de Forrester opèrent au niveau de la méthode et non de la théorie sociale. White a également soumis un article soulevant les principes de simulation en géographie humaine en y rapportant plusieurs références de travaux sur l'application de la dynamique des systèmes [White \(1984\)](#). Toujours dans cette recherche de dynamique, nombreux modèles ont été par la suite trouvés, en utilisant différente méthode comme la théorie des catastrophes empruntée des mathématiciens, des modèles qui s'appuient sur des fonctions logistiques non linéaires [Pumain et al. \(1984\)](#), des modèles développés sur une dynamique construite autour d'équations non linéaires couplées de la forme utilisée dans les modèles prédateurs-proie générant divers modèles évolutifs du système urbain à différentes

6. La logique de rétroaction. Un système complexe se définit par des variables qui sont liés de façon non linéaire. Il existe de nombreuses boucles de rétroaction entre les variables, ces boucles constituent des chaînes fermées de relations causales. La polarité de ces boucles peut être de deux types : négative ou positive. Dans la logique de rétroaction de Forrester, les boucles à rétroaction négative ont une fonction stabilisatrice au système tandis que les boucles à rétroaction positive joue le rôle d'amplificateur.

échelles (Hoarau et Zimnovitch 2013). Vers 1980, la théorie du chaos et sa relation avec la géométrie fractale fait également irruption dans la modélisation [Murphy \(2011\)](#). Malgré tout cet enthousiasme et tentative de modèle dynamique, les actions menés sont restés théoriques avec très peu de tentatives dans leur mise en pratique bien que les idées aient probablement eu un impact dans la mesure où elles ont alerté le terrain sur l'importance de la dynamique dans la modélisation urbaine [Batty \(2008\)](#). Le développement de l'informatique, la mise à disposition de nouveaux ensembles de données à échelle plus fine, de nouvelles technologies telles que les SIG (Système d'Information Géographique) ont permis par la suite à la formulation de nouveaux modèles, se rapprochant de plus en plus de la petite échelle par la représentation et simulation d'agents individuels en fonction de leurs préférences et de leurs schémas de mouvement et ont donné un vrai rebond à la dynamique des systèmes dans la recherche urbaine et sociale. Désormais, les modèles à base d'agents [Bousquet and Le Page \(2004\)](#), [Sanders \(2006\)](#), [Ferber \(1997\)](#) et les automates cellulaires [Torrens and O'Sullivan \(2001\)](#), [Clarke and Hoppen \(1997\)](#), [Vancheri et al. \(2008\)](#) pour une simulation de niveau plus individualiste ont gagné leur place. Par exemple, un modèle de dynamique des systèmes à base d'agents développé par des chercheurs italiens du Laboratoire de la Fisica della Città de l'Université de Bologne [Armando et al. \(2008\)](#) a permis de simuler la mobilité des citoyens dans un espace urbain. Cela a permis de vérifier que les effets de la congestion à volume fini sont palpables dans les transports privés et dans la capacité finie des moyens publics. Aussi, la surpopulation dans les zones chronotopes⁷ provoque l'allongement du temps que l'on est obligé d'y passer par conséquent. Une simulation sur le campus de l'université de Milan Bicocca a été faite pour ce modèle. La thèse soutenue par Nils Ferrand sous-tend les modèles multiagents pour l'aide à la décision et la négociation en Aménagement du Territoire [Ferrand \(1997\)](#) démontre l'application des systèmes multiagents comme outil d'aide à la décision. De nombreuses expériences ont montré que les systèmes multiagents sont aussi bien adaptés à la simulation dans le domaine de la gestion des ressources [Page et al. \(2010\)](#). Nombreux travaux sur les modèles à base d'Automate Cellulaire (AC) sont aussi répertoriés. Par exemple, Engelen et white utilise les techniques des AC pour développer un modèle de la dynamique de l'occupation des sols urbains avec une haute résolution spatiale [White and Engelen \(1993\)](#). Ainsi, un AC est développé pour modéliser la structure spatiale de l'utilisation des terres urbaines au fil du temps. En y insérant des paramètres s'approchant de la réalité, le modèle produit des structures fractales ou bifractales d'utilisation des terres pour la zone urbanisée et pour chaque type d'utilisation des terres. Des données relatives à un ensemble de villes américaines ont montré des vraisemblances avec les dimensions fractales obtenues. Les AC sont de puissants outils de simulation. En aménagement du territoire, elles sont très prisées pour les simulations de la croissance urbaine, que ce soit au niveau local ou régional, car ces simulations sont très utiles aux planificateurs urbains et régionaux pour mesurer les impacts futurs des actions et des politiques entreprises. Dans cette voie, une application d'une AC urbaine dans la ville de Dublin a été proposée par José I. Barredo, Marjo Kasanko, Niall McCormick et Carlo Lavallo [Barredo et al. \(2003\)](#). Une simulation sur 30 ans a été réalisée à l'aide d'un prototype de logiciel CA. Les résultats du modèle ont été testés au moyen de la dimension fractale et des méthodes de la matrice de comparaison. Ce qui leur a permis de juger l'efficacité de l'approche d'AC urbaine proposée à travers les résultats de la simulation réalistes et relativement précis. D'autres travaux similaires ont été entrepris par les membres du groupe DUPONT qui ont élaboré un modèle d'automates pour illustrer la croissance du

7. Les auteurs ont défini le terme "Chronotope" pour désigner les zones urbaines à activités dépendantes du temps comme les arrêts de bus, les restaurants, ...

bâti sur la Côte d'Azur. Enrichie par Eric Bailly en faisant une comparaison de la croissance de villes méditerranéennes à l'aide d'une simulation fractale et celui de Jean-Luc Bonnefoy qui développa des applications à l'aide du logiciel [NetLogo Dauphiné \(2018\)](#). Le lecteur peut voir d'autres ouvrages qui se rapportent aux nombreuses applications de la dynamique des systèmes en se référant par exemple à ce qui suit [Bertelle et al. \(2009\)](#), [Albeverio et al. \(2007\)](#), [Guan et al. \(2011\)](#), [Daudé \(2004\)](#), [Vanbergue and Drogoul \(2002\)](#), [Pumain et al. \(2006\)](#).

L'introduction de la dynamique des systèmes dans les sciences sociales a permis d'aborder les questions de recherches existant dans le domaine en prenant l'objet d'étude en tant que système. Ce qui a conduit aux réflexions sur les systèmes de plus en plus complexes, et ont fait gagner du terrain les notions de seuils critiques et de systèmes éloignés de l'équilibre [Armatte and Dalmedico \(2004\)](#). Le système complexe est considéré comme évolutif, l'état général d'un ensemble d'entités en interaction du système peut converger vers des attracteurs, peut être en désordre, ou changer d'organisation [Bousquet and Le Page \(2004\)](#). Les systèmes peuvent avoir des trajectoires stables, des moments instables, durant lesquels son état peut évoluer vers différentes formes d'organisation, de manière imprévisible, selon des bifurcations [Pumain \(2003\)](#). Bifurcations et les transitions de phase qui sont des phénomènes typiques des systèmes complexes [Vancheri et al. \(2008\)](#). La modélisation urbaine s'empare d'une nouvelle vision qui est la théorie de la complexité et fait passer la préoccupation de longue date pour l'étude de la ville à partir de son comportement et non plus de sa structure.

C.2 Apports et limites de l'utilisation de la dynamique des systèmes en Urbanisme

L'ère du déterminisme et des sciences du réel sont bel et bien effacés en faisant place à l'étude abstraite du monde dans sa globalité et sa complexité dans une nouvelle approche qui est la systémique [Chamussy et al. \(1984\)](#). Il a été prouvé que les modèles dynamiques de simulation semblent être plus pertinents pour la recherche et étude des systèmes complexes. Ce fut justifié par la quête de dynamisme dans la recherche dans tous les domaines de la science et même que cela a touché les sciences sociales dans ses diverses disciplines comme en géographie, en économie, urbanisme, en psychologie, etc. Bien que les modèles soient des abstractions très simplifiées de la réalité, cela a permis d'apporter une meilleure compréhension de la structure des villes en utilisant une approche dynamique plutôt que statique de la modélisation [Batty \(1971\)](#). En effet, les modèles de simulation urbaine sont des versions abstraites et simplifiées d'objets du monde réel et des phénomènes qui peuvent servir de laboratoires pour explorer des idées sur le fonctionnement et l'évolution des villes au fil du temps [Torrens and O'Sullivan \(2001\)](#). Depuis plus d'un demi-siècle maintenant, les chercheurs urbains tentent de décrire la structure des villes au moyen de modèles. Stimulés par l'avancée technologique et les progrès de l'informatique, ces développements ont permis une transformation plus large de la méthodologie des sciences sociales dans le développement d'approches plus systématiques en utilisant des analogies des sciences naturelles et le langage de la théorie générale des systèmes dont les perspectives d'utilisation représentant un grand intérêt dans l'avenir physique, économique et social des villes, des régions et des nations [Batty \(1971\)](#). On peut dire que la dynamique des systèmes a permis d'avancer les recherches là où les sciences rudimentaires ont échoué. En effet, les modèles à base d'agent par exemple qui permettent d'étudier par simulation des systèmes complexes qui sont impossibles à formaliser analytiquement. En plus, ils permettent d'analyser les interactions entre les différents agents ou les différents systèmes et plus encore, entre les agents et les systèmes [Garabedian](#)

(2007). De plus, ces outils sont particulièrement bien adaptés à l'étude de l'émergence de comportements collectifs à partir d'interactions individuelles. Ils peuvent être également utilisés pour l'étude de la mise en place et de l'évolution de certains types d'organisation. Ils peuvent être assimilés à des outils pédagogiques entrant dans le processus de prise de décisions comme support au dialogue comme Nils Ferrand et François Bousquet ont présenté dans leurs travaux respectifs [Garabedian \(2007\)](#). Ainsi, le rôle des systèmes dynamiques non linéaires (de leurs attracteurs, de leurs propriétés de stabilité structurelle et de leurs bifurcations), des théories du chaos, des fractales, de la physique statistique, de l'entropie, de la criticité autoorganisée, de la complexité algorithmique, des algorithmes génétiques, des automates cellulaires et de tout ce qui fait la dynamique des systèmes est ainsi devenu central dans la compréhension des systèmes complexes [Petitot \(1998\)](#). Les notions d'équilibre dynamique, de changement de structure, de discontinuité liée à une évolution connues depuis longtemps peuvent être jadis en langage mathématique et être simulé grâce aux modèles qu'offre le dynamique des systèmes [Pumain et al. \(2006\)](#). De ce fait, l'introduction de la dynamique des systèmes a été bénéfique aux sciences sociales, car la modélisation qui a servi à des simulations, a permis de tester des hypothèses, pour établir des scénarios. C'est en ce sens que la simulation est considérée comme un substitut à l'expérimentation, avec cependant des difficultés à bien s'assurer de la validation de leurs modèles [Pumain and Robic \(2002\)](#). Les modèles de simulation permettent aujourd'hui une approche renouvelée pour la prise en compte des systèmes et des processus complexes des sciences sociales qui s'appuient généralement sur la théorie de la complexité, qui leur fournit un cadre théorique relativement neuf [Antoni and Pierre \(2008\)](#) que le recours à la modélisation est devenu aujourd'hui un élément incontournable pour évaluer la durabilité des territoires [Hély and Antoni \(2015\)](#). Les limites des modèles qui ont été appliqués à travers les efforts de modélisation ont permis de faire avancer la recherche dans le domaine. En effet, si l'on prend par exemple le modèle de dynamique des systèmes de Jay Forrester, le premier à faire son entrée dans la modélisation urbaine, et qui a été tout de suite largement critiquée. L'horizon de son modèle a été jugé trop long. La méthodologie sur laquelle repose son travail de conception a été contestée, tout comme les relations causales mal identifiées, des paramètres arbitraires sans correspondance avec la réalité, l'absence de considération des problèmes de l'espace intra-urbain, ou encore la simplification presque caricaturale des rapports sociaux dans la ville [Cambien \(2008\)](#). Cependant, cela a permis d'améliorer le modèle en essayant de contourner ces faiblesses. Ainsi, la connaissance des problèmes liés à la manipulation du modèle a permis d'améliorer l'existant, ou encore mieux de chercher de nouveaux modèles plus performants. C'est dans cette optique que She Ty-Yan et ses collègues ont tenté par exemple de contourner les faiblesses du modèle dynamique de Forrester avec les avantages qu'ils soutirent des modèles d'automates cellulaires. Ainsi, ils ont écrit un article qui tente d'intégrer la dimension factorielle et la dimension spatiale, et d'établir un système spatio-temporel de modèles dynamiques de la croissance urbaine qu'ils ont appliquée à l'aire urbaine de Beijing. Ils ont découvert que le modèle dynamique du système spatio-temporel peut simuler le processus de croissance urbaine, en tenant compte du scénario futur, et donc peut prédire la direction et le processus de la croissance urbaine future qui est innovant dans cette recherche [Ti-yan et al. \(2008\)](#). Comme le disait Paelick dans son étude critique des modèles urbains, la dynamique urbaine de Forrester représente certes un challenge pour les analystes urbains [Paelinck \(1972\)](#). Ce qui en fut vraiment le cas. Même si la dynamique des systèmes a été jugée de science immature, elle a été bénéfique surtout pour la science sociale, car elle permet jusqu'à aujourd'hui un essor considérable des recherches menées dans cette quête de cerner la dynamique et la complexité. L'innovation n'est pas à son apogée,

les chercheurs continuent d'innover, notamment en modélisant et en approfondissant les théories des systèmes complexes multi-échelles avec les approches fractales, tout en bénéficiant des nombreux travaux effectués dans les disciplines voisines [Dauphiné \(2018\)](#). Les publications des recherches soutenues par l'existence de plateformes de vulgarisation de ces recherches font que la science va progresser, par un approfondissement continu des théories et des modèles partagés par la communauté scientifique. Les applications augmenteront sans doute, mais ces modèles seront-ils vraiment prédits le futur des systèmes qu'ils étudient ou que cela va rester dans la limite qu'on connaît jusqu'à présent à des fins d'information, de simulation et de définitions ? Comme la question Batty se posait dans une revue : dans quelle mesure peut-on construire des modèles formels qui fourniront des prévisions suffisamment solides pour une véritable analyse politique ? Sachant que ces nouvelles approches que l'on dispose jusqu'à présent ne fournissent qu'une partie de cette réponse [Batty \(2005\)](#). Dans ce cas, Damien Provitolo a eu raison de dire que les modèles de simulation sont une représentation de la réalité et non la représentation de la réalité [Provitolo \(2003\)](#). À l'avenir, les modèles de dynamique de systèmes seront très utiles dans l'appréhension des systèmes et prévoir de nombreux futurs issus des données relatifs du passé, mais ne peut en aucun cas prédire le futur.

Bibliographie

- Abis, S. 2009. Italie : Le grand bond en arrière ? *Confluences Méditerranée*, N°68(1) : 9.
- Abson, D. J., Dougill, A. J., and Stringer, L. C. 2012. Using Principal Component Analysis for information-rich socio-ecological vulnerability mapping in Southern Africa. *Applied Geography*, 35(1-2) : 515–524.
- Adger, W. N. 1996. Approaches to vulnerability to climate change. Technical Report GEC 96-05, Centre for Social and Economic Research on the Global Environment, Eglond.
- Adger, W. N. 1999. Social Vulnerability to Climate Change and Extremes in Coastal Vietnam. *World Development*, 27(2) : 249–269.
- Adger, W. N. 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3) : 268–281.
- Adger, W. N. and Agnew, M. 2004. *New indicators of vulnerability and adaptive capacity*, volume 122. Tyndall Centre for Climate Change Research Norwich.
- AIEA. 2008. *Indicateurs énergétiques du développement durable : lignes directrices et méthodologies*. Agence internationale de l'énergie atomique.
- Albeverio, S., Andrey, D., Giordano, P., and Vancheri, A.(Eds.). 2007. *The dynamics of complex urban systems*. Physica-Verlag HD.
- Alonso, W. 1964. Location and Land Use. *Harvard University Press*.
- Andersson, C. 2008. Ontogeny and Ontology in Complex Systems Modeling. In Albeverio, S., Vancheri, D., Andrey, P., and Giordano, A.(Eds.), *The Dynamics of Complex Urban Systems. An Interdisciplinary Approach*, 43–58. Physica-Verlag HD, physica ve edition.
- Andriamanohiarisoamanana, F. J., Randrianantoandro, T. N., Ranaivoarisoa, H. F., Kono, H., Yoshida, G., Ihara, I., and Umetsu, K. 2022. Integration of biogas technology into livestock farming : Study on farmers' willingness to pay for biodigesters in Madagascar. *Biomass and Bioenergy*, 164 : 106557.
- Ang, B. W., Choong, W. L., and Ng, T. S. 2015a. Energy security : Definitions, dimensions and indexes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42 : 1077–1093.
- Ang, B. W., Choong, W. L., and Ng, T. S. 2015b. A framework for evaluating Singapore's energy security. *Applied Energy*, 148 : 314–325.

- Antoni, J.-P. and Pierre, F. 2008. Modéliser différentes dynamiques à différentes échelles pour simuler la complexité des mobilités urbaines. L'exemple de MobiSim. *Rheologica Acta*, 7(3) : 260–265.
- Antonio, L., Venturi, B., Melo, A. V. F. D., Shiling, D., Yale, G., Paulo, P., Silva, F., Ferraz, F., José, G., Azevedo, M., and Moutinho, E. 2019. Lowering energy vulnerability in São Paulo by increasing the use of gas. *International Journal of Development and Sustainability*, 8(4) : 284–295.
- Aracyl, J. 1984. Introduction à la dynamique des systèmes. *Presses Universitaires de Lyon*.
- Armando, B., Massimiliano, C., Bruno, G., Giuseppina, M., Sandro, R., Graziano, S., and Giorgio, T. 2008. A Model for Asystematic Mobility in Urban Space. In Albeverio, S., Vancheri, D., Andrey, P., and Giordano, A.(Eds.), *The Dynamics of Complex Urban Systems. An Interdisciplinary Approach*, 1–30. Springer company, physica ve edition.
- Armatte, M. and Dalmedico, A. D. 2004. Modèles et modélisations , 1950-2000 : Nouvelles pratiques , nouveaux enjeux. *Revue d'histoire des sciences*, 57(2) : 243–303.
- Arrowsmith, D. K. and Place, C. M. 2001. *An introduction to dynamical systems*. Cambridge : Cambridge University Press, transf. to dig. pr edition.
- Artigues, A. 2008. Définition d'indicateurs de vulnérabilité énergétique : une analyse comparée des pays de leurope des 15.
- Augutis, J., Krikstolaitis, R., Martisauskas, L., and Peciulyte, S. 2011. Energy security level assessment technology. *Applied Energy*, 97 : 143–149.
- BAD 2016. Document de stratégie pays 2016-2020.
- Baglio, J. 2007. Notes de cours de physique non-linéaire.
- Barredo, J. I., Kasanko, M., McCormick, N., and Lavalle, C. 2003. Modelling dynamic spatial processes : Simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 64(3) : 145–160.
- Barreira, L. M. and Valls, C. 2012. *Ordinary differential equations : qualitative theory*. Number v. 137 in Graduate studies in mathematics. Providence : American mathematical society.
- Barroca, B., DiNardo, M., and Mboumoua, I. 2013a. De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ? *EchoGéo*, 24(24) : 0–18.
- Barroca, B., DiNardo, M., and Mboumoua, I. 2013b. De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ? *EchoGéo*, 24(24) : 0–18.
- Barroca, B., Hubert, G., and Diab, Y. 2006. Vulnérabilité : une clé de lecture du risque inondation. In *Journées Scientifiques de l'Environnement 2006*, volume 2006.

- Barroca, B., POTTIER, N., and LEFORT, E. 2005. Analyse Et Évaluation De La Vulnérabilité Aux Inondations Du Bassin De L'Orge Aval. In *Septièmes Rencontres de Théo Quant*.
- Bassett, T. J. and Fogelman, C. 2013. Déjà vu or something new? The adaptation concept in the climate change literature. *Geoforum*, 48 : 42–53.
- Batty, M. 1971. Modelling cities as dynamic systems. *Nature*, 231(5303) : 425–428.
- Batty, M. 1979. Progress, success and failure in urban modelling. *Environment and Planning A*, 11(8) : 863–878.
- Batty, M. 2005. Agents , cells , and cities : new representational models for simulating multiscale urban dynamics. *Environment and Planning A : Economy and Space*, 37(8) : 1373–1394.
- Batty, M. 2008. Fifty Years of Urban Modeling : Macro-Statics to Micro-Dynamics. In Alberverio, S., Vancheri, D., Andrey, P., and Giordano, A.(Eds.), *The Dynamics of Complex Urban Systems. An Interdisciplinary Approach*, 1–20. Springer company, physica ve edition.
- Batty, M. 2009. Urban Modeling. *International Encyclopedia of Human Geography*, 51–58.
- Baumol, W. J. and Benhabib, J. 1989. Chaos : Significance, Mechanism, and Economic Applications. *Journal of Economic Perspectives*, 3(1) : 77–105.
- Becerra, S. 2012. Vulnérabilité, risques et environnement : l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain. *Vertigo*, 12(1) : 23.
- Beers, M. 2012. Réduire la dépendance énergétique. Le programme d'utilisation rationnelle de l'énergie au sein de la Communauté européenne dans les années 1970. *Annales historiques de l'électricité*, 10.
- Benard, F. 2022. Transition énergétique et dynamiques territoriales. Habilitation à diriger des recherches, Université de la Réunion .
- Bénard, F. and Praene, J. P. 2016. Territorial analysis of energy consumption of a small remote island : Proposal for classification and highlighting consumption profiles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59 : 636–648.
- Bénard, Fiona ; Praene, J. P. 2017. Les Petits Etats Insulaires en Développement face au défi de la transition énergétique : entre forces et faiblesses, étude de leur vulnérabilité. In *Les défis de développement pour les villes et les régions dans une Europe en mutation*, Athènes, Grèce.
- Bérard, C. 2007. Dynamique des systèmes et modélisation en groupe : analyse des cadres opératoires. In *AIMS, Montréal, Canada*, 1–26.
- Berk, I. and Volkan, S. E. 2018. A historical assessment of turkey's natural gas import vulnerability. *Energy*, 145 : 540–547.

- Berrouet, L. M., Machado, J., and Villegas-Palacio, C. 2018. Vulnerability of socio—ecological systems : A conceptual Framework. *Ecological Indicators*, 84(July 2017) : 632–647.
- Berry, B. J. I., Baskin, C. W., and Christaller, W. 1967. Central places in southern germany. *Economic Geography*, 43(3) : 275.
- Bertalanffy, L. V. 1972. The History and Status of General Systems Theory. *Academy of Management Journal*, 15(4) : 407–426.
- Bertelle, C., Duchamp, G. H., and Kadri-Dahmani, H.(Eds.). 2009. *Complex Systems and Self-organization Modelling*. Springer.
- Bertrand, F., Rocher, L., and Melé, P. 2007. Le changement climatique, révélateur des vulnérabilités territoriales? PhD thesis, UMR CITERES ; Université François Rabelais-Tours ; programme «Politiques
- Birkoff, D. 1912. Quelques théorèmes sur le mouvement des systèmes dynamiques. *Bulletin de la S M F*, 2(40) : 305–323.
- Boi, L. and Bois, E. 2009. Mathématiques créatives, physiques significatives et le livre ouvert de la nature : quelques remarques sur les systèmes dynamiques, le chaos, le déterminisme et la nature du temps. *Eikasia : revista de filosofía*, 26(27) : 215–247.
- Bollen, J. 2008. Energy security , air pollution , and climate change : an integrated cost-benefit approach. *Milieu en Natuur Planbureau*.
- Bonnefoy, O. 2021. Systèmes dynamiques et instabilités hydrodynamiques.
- Bonnet, S. 2008. Approches numériques pour la commande des systèmes dynamiques. PhD thesis, Université de Technologie Compiègne.
- Borderon, M. and Oliveau, S. 2016. Vulnérabilités sociales et changement d'échelle. *Open Edition*, 3(2016/3) : 1–12.
- Bost, F. 2017. Introduction : La désindustrialisation, objet géographique. *Revue Géographique de l'Est*, 57(1-2).
- Bouchard, C. 2004. Transition énergétique dans le contexte des petits États et territoires insulaires. In *Actes de la 15e Journée Sciences et Savoirs*.
- Bourguignon, F., Pleskovic, B., and Van der Gaag, J. 2006. Securing Development in Unstable World. In *Annual world bank conference on development economics Europe*.
- Bousquet, F. and Le Page, C. 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management : a review. *Ecological Modelling*, 176 : 313–332.
- Bouzarovski, S. and Thomson, H. 2017. Energy vulnerability in the grain of the City : toward neighborhood typologies of material deprivation. *Annals of the American Association of Geographers*, 108(3) : 695–717.
- BP 2020. BP Statistical Review of World Energy 2020 : les chiffres clés de l'énergie dans le monde | Connaissances des énergies.

- Briguglio, L., Cordina, G., Farrugia, N., and Vella, S. 2008. Economic Vulnerability and Resilience : Concepts and Measurements. *WIDER Research Paper*, 55(3) : 229–247.
- Brisepierre, G. 2012. La vulnérabilité énergétique des territoires périurbains. *Observatoire national de la précarité énergétique*, 5 : 1–5.
- Brodiez-dolino, A. 2016. Le concept de vulnérabilité.
- Brooks, N. 2003. Vulnerability, risk and adaptation : A conceptual framework. *Tyndall Centre for climate change research working paper*, 38(38) : 1–16.
- Bundhoo, Z. M. 2018. Renewable energy exploitation in the small island developing state of Mauritius : Current practice and future potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(January 2017) : 2029–2038.
- Cambien, A. 2008. Une introduction à l’approche systémique : appréhender la complexité. PhD thesis, Centre d’études sur les réseaux, les transports, l’urbanisme et les constructions publiques.
- Campbell, D. J. 1999. Response to Drought Among Farmers and Herders in Southern Kajiado District, Kenya : A Comparison of 1972-1976 and 1994-1995. *Human Ecology*, 17(3) : 40.
- Carbonnier, G. and Grinevald, J. 2011. Energie et développement. *Revue internationale de politique de développement*, 2(2) : 9–28.
- Cardona, O. D. 2003. The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective : A Necessary Review and Criticism for Effective risk management. In Hilhorst, D., Bankoff, G., and Frerks, G.(Eds.), *Mapping Vulnerability : disasters, development and people*. Earthscan.
- Carré, M.-N. 2013. Vulnérabilités énergétiques urbaines dans les Amériques. *Revue franco-brésilienne de Géographie*, 18(18) : 1–10.
- Cassel-gintz, M. 2007. An Overview of Different Vulnerability Approaches and Definitions. *Norh-South dialogue*, 8.
- Castaño-rosa, R., Solís-guzmán, J., Rubio-bellido, C., and Marrero, M. 2019. Towards a multiple-indicator approach to energy poverty in the european union : A review. *Energy & Buildings*, 193 : 36–48.
- CEA 2018. Développement des statistiques du bilan énergétique et d’un modèle de système énergétique pour l’Union des Comores. Technical report, Commissions économique des Nations Unis pour l’Afrique.
- CETE 2011. Vulnérabilité énergétique, précarité énergétique.
- Chamussy, H. 1989. La modelélisation des systèmes dynamiques en Géographie. Problèmes théoriques et méthodologiques. Lecture, Université Joseph Fourier, Institut de Géographie Alpine.

- Chamussy, H., Guérin, J.-p., Berre, M. L., and Uvietta, P. 1984. La dynamique de systèmes : une méthode de modélisation des unités spatiales. *L'espace géographique*, 13(2) : 81–93.
- Chervalier, B. 2009. Une économie malmenée mais insérée dans la mondialisation. *Revue internationale et stratégique*, 74(2) : 128–142.
- Chevillot-Miot, E. 2017. La résilience des territoires littoraux face au risque de submersion marine. Application sur les territoires de la Charente-Maritime et de la Somme. PhD thesis, Université de Nantes.
- Chevillot-Miot, E. 2020. Les résiliogrammes pour représenter la résilience : cas des territoires de la Charente-Maritime et de la Somme face au risque de submersion marine. *Vertigo*, 20(1).
- Christie, E. 2009. Energy Vulnerability and EU-Russia Energy Relations. *JCER*, 5(2) : 274–292.
- Claeys, C., Giuliano, J., Megnifo, H. T., Fissier, L., Lizée, C., Geneys, C., Claeys, C., Giuliano, J., Megnifo, H. T., and Fissier, L. 2017. Une analyse interdisciplinaire des vulnérabilités socioenvironnementales : le cas de falaises côtières urbanisées en Méditerranée. *Natures Sciences Sociétés*, 25(3) : 241–254.
- Clarke, K. C. and Hoppen, S. 1997. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B-Planning & Design*, 24(2) : 247–261.
- Cohen, G., Joutz, F., and Loungani, P. 2011. Measuring energy security : Trends in the diversification of oil and natural gas supplies. *Energy Policy*, 39(9) : 4860–4869.
- Coste, C. 2011. Introduction à la Physique Non Linéaire.
- Courteille, M., Jeanson, M., Collin, A., James, D., Claverie, T., Charpentier, M., Gairin, E., Trouillefou, M., Giraud-Renard, E., Dolique, F., and Lecchini, D. 2022. Characterisation of long-term evolution (1950–2016) and vulnerability of Mayotte's shoreline using aerial photographs and a multidisciplinary vulnerability index. *Regional Studies in Marine Science*, 55 : 102537.
- Criqui, P. 2009. Vers une rupture profonde du modèle énergétique mondial. *Questions internationales*, (38) : pp. 67–78.
- Crnčec, D. 2011. Les Slovènes et le « grand jeu » gazier. *Outre-Terre*, 27(1) : 131–141.
- Cuevas, S. C. 2010. Climate change , vulnerability , and risk linkages. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 3(1) : 29–60.
- Cutter, S. L. 1996. Vulnerability to hazards. *Progress in Human Geography*, 20(4) : 529–539.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., and Shirley, W. L. 2003. Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2) : 243–257.

- Dantas, M. and Point, P. 2009. La dynamique des systèmes comme outil d'aide à la gestion du sol urbain. In *41^{èmes} Journées de statistiques*.
- d'Artigues, Agnès ; Vignolo, T. 2012. Une approche multicritère de la vulnérabilité énergétique. Technical report, Université Montpellier 1.
- Daudé, E. 2004. Apports de la simulation multi-agents à l'étude des processus de diffusion. *CyberGeo*, 2004(255).
- Dauphiné, A. 2003. *Les théories de la complexité chez les géographes*. Economica, anthropos edition.
- Dauphiné, A. 2018. Dupont et les modèles systémiques. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 95(3) : 361–370.
- Dauphiné, A. and Provitolo, D. 2007. La résilience : un concept pour la gestion des risques. *Annales de géographie*, 2(654) : 115–125.
- Dauphiné, A. and Provitolo, D. 2013. *Risques et catastrophes : observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Armand Colin.
- De Jong, S. 2011. Vers une gouvernance mondiale de l'énergie : comment compléter le puzzle. *Revue internationale de politique de développement*, 2(2) : 29–54.
- de l'Energie et des Hydrocarbures, M., GIZ-Madagascar, and IED 2017. Bilan énergétique national 2017. Technical report, Ministère de l'Energie et des Hydrocarbures.
- Delaître, M., Di Nardo, M., Gonzva, M., Barroca, B., and Diab, Y. 2016. Échelles spatiales et approches méthodologiques pour l'analyse de la vulnérabilité. *Espace populations sociétés*, 1–17.
- Delcroix, C. 2012. Cogiter la vulnérabilité. *OpenEdition*.
- Delor, F. and Hubert, M. 2000. Revisiting the concept of 'vulnerability'. *Social science & Medicine*, 50(11) : 1557–1570.
- Demoraes, F. 2009. De l'intérêt d'une étude sur la vulnérabilité des réseaux routiers et de transport pour la compréhension des vulnérabilités territoriales – Le cas du District Métropolitain de Quito (Équateur). *CyberGeo*, 1–17.
- Demski, C., Poortinga, W., Whitmarsh, L., Böhm, G., and Fisher, S. 2018. National context is a key determinant of energy security concerns across Europe. *Nature energy*, 3(1) : 882–888.
- Derdevet, M. 2013. La précarité énergétique, un chantier européen prioritaire. *Géoéconomie*, 3(66) : 37–50.
- Deshaies, M. 2007. Énergie et environnement en Allemagne. *Revue Géographique de l'Est*, 47(1).
- Devalière, I. 2010. La précarité énergétique, retour sur la genèse d'une préoccupation. *Métropolitiques*, 6–8.

- Devalière, Isolde; Teissier, O. 2014. Les indicateurs de la précarité énergétique et l'impact de deux dispositifs nationaux sur le phénomène. *cairn*, n°184(4) : 115–124.
- Djament-tran, G., Blanc, A. L., Lhomme, S., Rufat, S., Djament-tran, G., Blanc, A. L., Lhomme, S., Rufat, S., and Reghezza-Zitt, M. 2011. Ce que la résilience n'est pas , ce qu'on veut lui faire dire. *Hal*.
- Doire, M.-F. 2004. ALENA : panorama général des impacts sur le Mexique. *Centre d'études inter Américaines*, 5.
- Downing, T. E. 1991. Vulnerability to hunger in Africa A climate change perspective. *Global Environmental Change*, 365–380.
- Duby, C. and Robin, S. 1998. Analyse en Composantes Principales. techreport, INAPG, Paris, France.
- Dulvy, N. K., Sadovy, Y., and Reynolds, J. D. 2003. Extinction vulnerability in marine populations. *Fish and fisheries*, 4(1) : 25–64.
- Dumortier, F., Llibre, J., and Artés, J. C. 2006. *Qualitative theory of planar differential systems : with 10 tables*. Universitext. Berlin Heidelberg : Springer.
- Eakin, H. and Luers, A. L. 2006. Assessing the vulnerability of social-environmental systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 31(1) : 365–394.
- Eckmann, J.-P. and Ruelle, D. 1985. Ergodic theory of chaos and strange attractors. In *The Theory of Chaotic Attractors*, 273–312. Springer New York.
- Edoo, M. N. and Ah King, R. T. F. 2020. New insights into the technical challenges of the Mauritius long term energy strategy. *Energy*, 195 : 116975.
- Eka Prasetya, T. A., Devi, R. M., Fitrahanjani, C., Wahyuningtyas, T., and Muna, S. 2022. Systematic assessment of the warming trend in Madagascar's mainland daytime land surface temperature from 2000 to 2019. *Journal of African Earth Sciences*, 189 : 104502.
- Ercole, R., Thouret, J.-c., Dollfus, O., Asté, J.-p., Ercole, R., Thouret, J.-c., Dollfus, O., and Les, J.-p. A. 1994. Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts , typologie , modes d'analyse. *Revue de Géographie alpine*, 82(4) : 87–96.
- Etongo, D., Bandara, A., Murugaiyan, A., Bristol, U., Nancy, K., Petrousse, B., and Sinon, S. 2022. Risk perceptions, vulnerability and adaptation to climate change at farm level across four agricultural zones in Seychelles. *World Development Sustainability*, 1 : 100025.
- Favennec, J.-P. 2009. L'énergie au coeur de l'évolution des civilisations. *Géoéconomie*, 4(51) : 49–62.
- Fekete, A. 2009. Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in Germany. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(2) : 393–403.
- Ferber, J. 1997. Les systèmes multi-agents : un aperçu général. *Technique et Science Informatiques*, 16(8) : 979–1012.

- Ferrand, N. 1997. Modèles Multi-Agents pour l'aide à la décision et la négociation en aménagement du territoire. PhD thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- Ferret, J.-P. and Levasseur, S. 2018. Un ménage néo-aquitain sur sept en situation de vulnérabilité énergétique liée au logement. *Insee*, 69.
- Flanagan, B. E., Gregory, E. W., Hallisey, E. J., Heitgerd, J. L., and Lewis, B. 2011. A Social Vulnerability Index for Disaster Management. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 8(1).
- Fléty, Y. 2014. Vers une mise en observation des systèmes énergétiques territoriaux. Une approche géographique pour territorialiser l'énergie. PhD thesis, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- Forrester, J. W. 1969. Urban dynamics. *MIT Press, Cambridge, MA*.
- Forrester, J. W. 1989. The beginning of system dynamics.
- Fussler, H.-m. 2006. Vulnerability : A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*, 17(2) : 155–167.
- Gallopín, G. C. 2006. Linkages between vulnerability , resilience , and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 16(3) : 293–303.
- Garabedian, S. 2007. Modélisations et simulations multi-agents de systèmes complexes pour les Sciences de l'homme et de la société : principes et méthodes de conception et d'usage. *Nature Science Sociétés*, 15 : 313–315.
- Garabedian, S. and Hoarau, J.-f. 2011. Un indicateur de développement humain soutenable pour les petits espaces insulaires en développement. *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, 4 : 651–680.
- Garabedian, S. and Ricci, O. 2018. Les territoires ultramarins face à la transition énergétique : les apports d'un MEGC pour la Réunion. *hal*.
- García-verdugo, J., San-martín, E., and Mu, B. 2015. Quantifying the geopolitical dimension of energy risks : A tool for energy modelling and planning. *Energy*, 82 : 479–500.
- Gasser, P. 2020. A review on energy security indices to compare country performances. *Energy Policy*, 139(August 2019) : 111339.
- Gatto, A. and Busato, F. 2019. Energy vulnerability around the world : The global energy vulnerability index (GEVI). *Journal of Cleaner Production*, 253 : 118691.
- Ge, Z.-M. and Li, S.-Y. 2010. Yang and Yin parameters in the Lorenz system. *Nonlinear Dynamics*, 62(1-2) : 105–117.
- Genave, A. 2019. Energy vulnerability in the Southwest Indian Ocean islands. *Journal of the Indian Ocean Region*, 15(1) : 40–57.
- Genave, A., Blancard, S., and Garabedian, S. 2020. An assessment of energy vulnerability in Small Island Developing States. *Ecological Economics*, 171(February) : 106595.

- Ghys, É. 2010. L'attracteur de Lorenz : paradigme du chaos. *Séminaire Poincaré*, 14 : 1–42.
- Gié, H. and Sarmant, J. P. 1992. Le portrait de phase des oscillateurs. *Bulletin de l'union des physiciens*, 86(744) : 719–753.
- Ginoux, J.-M. 2005. Stabilité de Systèmes Dynamiques Chaotiques et Variétés Singulières. *hal*, 176.
- Giupponi, C. and Biscaro, C. 2015. Vulnerabilities : bibliometric analysis and literature review of evolving concepts Vulnerabi. *Environmental Research Letters*.
- Glachant, J.-m. 2019. *A Comparative Study of Renewable Energy and Electricity Access Policies and Regulatory Frameworks in the Indian Ocean Islands*. Publications Office.
- Gleyze, J.-f. 2005. La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques. PhD thesis, Université Paris-Diderot Paris VII.
- Gleyze, J.-f. and Reghezza, M. 2007. La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement. *Géocarrefour*, 82(1-2) : 1–14.
- Goavec, C. and Hoarau, J.-f. 2015. Vulnérabilité économique structurelle et dépendance touristique : quels enseignements pour les petites économies insulaires en développement. *Région et Développement*, 42.
- Goncalves da Silva, E. 2004. Introduction aux systèmes dynamiques et chaos. *Engineering school*, 23.
- Gouveia, J. P., Palma, P., and Simoes, S. G. 2019. Energy poverty vulnerability index : A multidimensional tool to identify hotspots for local action. *Energy Reports*, 5 : 187–201.
- Guan, D., Gao, W., Su, W., Li, H., and Hokao, K. 2011. Modeling and dynamic assessment of urban economy – resource – environment system with a coupled system dynamics – geographic information system model. *Ecological Indicators*, 11(5) : 1333–1344.
- Guillopé, L. 2020. Systèmes dynamiques.
- Guyet, R. 2014. La précarité énergétique en Europe : approche comparative. *La documentation Française*.
- Hammar, L., Ehnberg, J., Mavume, A., Cuamba, B. C., and Molander, S. 2012. Renewable ocean energy in the Western Indian Ocean. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7) : 4938–4950.
- Hély, V. and Antoni, J.-p. 2015. Penser la ville durable : positionner la modélisation et l'évaluation des territoires dans les processus de décision. In *12^{eme} Rencontre de Théo Quant*. Unpublished.
- Henderson, J. V. 1974. The sizes and types of cities. *The American Economic Review*, 64(4) : 640–656.

- Hizbaron, D. R., Hadmoko, D. S., Mei, E. T., Murti, S. H., Laksani, M. R., Tiyansyah, A. F., Siswanti, E., and Tampubolon, I. E. 2018. Towards measurable resilience : Mapping the vulnerability of at-risk community at Kelud Volcano, Indonesia. *Applied Geography*, 97(June) : 212–227.
- Holling, C. S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual review Ecol Syst*, 4(1).
- Hufschmidt, G. 2011. A comparative analysis of several vulnerability concepts. *Nat Hazards*, 58(2) : 621–643.
- Hugon, P. 2015. L'intégration régionale et les trappes à la vulnérabilité. *Revue Tiers Monde*, 2(222) : 123–140.
- Insee 2013. Les territoires à forte vulnérabilité énergétique ont les croissances de population les plus marquées. *Insee Centre INFO*, 185.
- INSTAT 2022. Institut national de la statistique.
- International Conference on Computer Science and Information Technologies, Natalya, S.(Ed.). 2017. *Advances in Intelligent Systems and Computing Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2016, September 6-10 Lviv, Ukraine*, volume 512 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer.
- IOC 2021. Presentation of Indian Ocean Commission.
- Ionescu, C., Klein, R. J. T., Hinkel, J., Kumar, K. S. K., and Klein, R. 2008. Towards a Formal Framework of Vulnerability to Climate Change. *Environ Model Assess*, 14(1) : 1–16.
- Jancovici, J.-M. 2004. L'homme et l'énergie, des amants terribles. *Energie et Environnement*, 7.
- Janssen, M. A., Schoon, M. L., Ke, W., and Borner, K. 2006. Scholarly networks on resilience , vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change. *Global Environmental Change*, 16(3) : 240–252.
- Joint Research Center of the European Commission. 2008. *Handbook on constructing composite indicators. Methodology and user guide*. OECD.
- Jolliffe, I. T. and Cadima, J. 2016. Principal component analysis : a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065) : 20150202.
- Joy, L. 2010. Images des mathématiques.
- Kelly, P. M. and Adger, W. N. 2000. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. *Climatic change*, 47(4) : 325–352.
- Khoodaruth, A., Oree, V., Elahee, M. K., and Clark, W. W. 2017. Exploring options for a 100% renewable energy system in Mauritius by 2050. *Utilities Policy*, 44 : 38–49.

- Kiriyama, E. and Kajikawa, Y. 2014. A multilayered analysis of energy security research and the energy supply process. *Applied Energy*, 123 : 415–423.
- Klimenko, V. V., Fedotova, E. V., and Tereshin, A. G. 2018. Vulnerability of the Russian power industry to the climate change. *Energy*, 142 : 1010–1022.
- Kone, S., Cheikhrouhou, H., and Negash, E. 2013. Projet d'appui au secteur de l'énergie - Rapport d'évaluation - Union des comores. Technical report, Groupe de la Banque Africaine de Développement.
- Kosai, S. 2019. Dynamic vulnerability in standalone hybrid renewable energy system. *Energy Conversion and Management*, 180(November 2018) : 258–268.
- Kruyt, B., Vuuren, D. P. V., Vries, H. J. M. D., and Groenenberg, H. 2009. Indicators for energy security. *Energy Policy*, 37(6) : 2166–2181.
- Kuang, Y., Zhang, Y., Zhou, B., Li, C., Cao, Y., Li, L., and Zeng, L. 2016. A review of renewable energy utilization in islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59 : 504–513.
- Kvon, G. M., Prokopyev, A. I., Shestak, V. A., Ivanova, S. A., and Vondenko, K. V. 2018. Energy saving projects as energy security factors. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 8(6) : 155–160.
- Laldjebaev, M., Morreale, S. J., Sovacool, B. K., and Kassam, K.-a. S. 2018. Rethinking energy security and services in practice : National vulnerability and three energy pathways in Tajikistan. *Energy Policy*, 114(April 2017) : 39–50.
- Lallau, B. 2011. La résilience , moyen et fin d'un développement durable? *Étique et économique*, 8(1).
- Lamy, J. 2006. D un G8 à l'autre : sécurité énergétique et changement climatique. *cairn*, Printemps(1) : 131–144.
- Lane, D. C. 1998. Social theory and system dynamics practice. *European Journal of Operational Research*, 113(3) : 501–527.
- Laville, M. M., Leneveu, J., and Cadet, B. 2014. La transition énergétique : analyse d'un point de vue psychologique. *Vertigo*, 14(Volume 14 Numéro 3).
- Le Coq, C. and Paltseva, E. 2009. Measuring the security of external energy supply in the european union. *Energy Policy*, 37(11) : 4474–4481.
- Lee, Y. J. 2014. Social vulnerability indicators as a sustainable planning tool. *Environmental Impact Assessment Review*, 44 : 31–42.
- Lejoux, P. and Ortar, N. 2014. La transition énergétique : vrais enjeux , faux départs? *SHS Web of conferences*, 9 : 01001.
- Leone, F. and Vinet, F. 2006. La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. *Analyses géographiques. Coll. «Géorisques*, 1 : 1–71.

- Lepanoy, B. 1985. *Economie et énergie : quels avenir pour le tiers monde ? Une approche modélisée*. Technip.
- Letellier, C. and Maquet, J. 2006. Analyse de dynamiques chaotiques : une nouvelle approche de l'activité solaire. *Bulletin de la Société Française de Physique*, (154) : 10–13.
- Lhomme, S. 2012. Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain - Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine. Theses, Université Paris-Diderot - Paris VII.
- Li, C., Shen, Y., Ge, H., Zhang, Y., and Liu, T. 2018. Spontaneous imbibition in fractal tortuous micro-nano pores considering dynamic contact angle and slip effect : phase portrait analysis and analytical solutions. *Scientific Reports*, 8(1).
- Lipietz, A. 2001. Vers la deuxième révolution énergétique , réponse au changement climatique. *Revue des Deux Mondes*, 52–58.
- Liu, G. 2014. Development of a general sustainability indicator for renewable energy systems : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31 : 611–621.
- López G., J. 2012. L'essor et le déclin de la stratégie économique keynésienne – structuraliste au Mexique. *Revue de la régulation. Capitalisme, institutions, pouvoirs*, (11).
- Lorenz, H.-W. 1993. *Nonlinear dynamical economics and chaotic motion*, volume 334. Springer.
- Loriaux, M. and Remy, D. 2005. *Chapitre 3. Opérationnalisation et mesures empiriques : la construction des indices synthétiques*. De Boeck Supérieur.
- Loye, D. and Eisler, R. 1987. Chaos and transformation : Implications of nonequilibrium theory for social science and society. *Behavioral Science*, 32(1) : 53–65.
- Luers, A. 2005. The surface of vulnerability : An analytical framework for examining environmental change. *Global Environmental Change*, 15(3) : 214–223.
- Magnin, G. 2013. La transition énergétique pour quelle société ? In *Internationa conférence of territorial intelligenece*.
- María Marín-Quemada, J. and Muñoz-Delgado, B. 2011. Affinity and rivalry : Energy relations of the EU. *International Journal of Energy Sector Management*, 5(1) : 11–38.
- Marignac, Y. and Legrand, V. 2003. Énergie non distribuée (END). Technical Report 8D/2169, CNRS.
- Martchamadol, J. and Kumar, S. 2012a. An aggregated energy security performance indicator. *Applied Energy*, 103 : 653–670.
- Martchamadol, J. and Kumar, S. 2012b. Thailand's energy security indicators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8) : 6103–6122.
- Martin, C. 2013. Penser la vulnérabilité . Les apports de Robert Castel. *European Journal of Disability Research*, 7(4) : 293–298.

- Masudi, J. K., Kabungulu, C. M., Byaombe, D., and Félix, K. 2021. Sur les systèmes dynamiques : Ordre, fractales et chaos. *hal*, 17.
- Maury, S. and Gilbert, A. 2015. La vulnérabilité énergétique plus répandue dans les territoires ruraux. *Insee*, 42.
- Mayotte, D. 2017a. Bilan de la 1ère Programmation Pluriannuelle de l'Énergie de Mayotte 2017-2018. Technical report, Département Mayotte.
- Mayotte, D. 2017b. Programmation pluriannuelle de l'énergie de Mayotte. Technical report, Département Mayotte.
- Mazzucchi, N. 2015. Différenciations territoriales et insertion dans la mondialisation : le cas de l'énergie en Inde. *EchoGéo*, (32).
- Mearns, E. and Sornette, D. 2023. Are 2050 energy transition plans viable? A detailed analysis of projected Swiss electricity supply and demand in 2050. *Energy Policy*, 175 : 113347.
- M.E.F. 2021. Deuxième rapport de Madagascar pour l'examen national volontaire sur les objectifs de développement durable 2021 - Forum politique de haut niveau. Technical report, Ministère de l'économie et des finances, Madagascar.
- M.E.H. 2015. Lettre de Politique énergétique de Madagascar 2015-2030. Technical report, Ministère de l'Énergie et des Hydrocarbures, Madagascar.
- Metzger, P. and d'Ercole, R. 2008. Enjeux territoriaux et vulnérabilité : une approche opérationnelle. In *Colloque interdisciplinaire*.
- Moine, A. 2004. Comprendre et observer les territoires-l'indispensable apport de la systémique. PhD thesis, Université de Franche-Comté.
- Moine, A. 2006. Le territoire comme un système complexe.
- Moine, A. 2007. *Le territoire : comment observer un système complexe*. Number 1 in Itinéraires géographiques. Paris : Harmattan.
- Morduch, J. 1994. Poverty and Vulnerability. *The American Economic Review*, 84(2) : 221–225.
- Mori, M. 2021. Crisis narratives and (dis)placement : Space, time and earthquakes in Mayotte. *Ampersand*, 8 : 100078.
- Multon, B., Robin, G., Ruellan, M., Ahmed, H. B., Multon, B., Robin, G., Ruellan, M., Ben, H., Situation, A., Revue, L., Offertes, P. E., Les, P. A. R., Multon, B., Robin, G., Ruellan, M., and Ahmed, H. B. E. N. 2004. Situation énergétique mondiale à l'aube du 3ème millénaire . Perspectives offertes par les ressources renouvelables. *La Revue 3 E I, Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication*, 20–33.
- Murias, P., Valcarcel-Aguiar, B., and Regueiro-Ferreira, M. 2020. A Territorial Estimate for Household Energy Vulnerability : An Application for Spain. *Sustainability*, 12(15) : 5904.

- Murphy, D. 2011. Chaos rules revisited. *International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 12(3) : 116–134.
- Mutani, G. and Todeschi, V. 2018. Energy Resilience , Vulnerability and Risk in Urban Spaces. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 6(4) : 694–709.
- Mérenne-Schoumaker, B. 2013. Les territoires face à la transition énergétique - des opportunités mais aussi des contraintes.
- Naiwert, L. and Spindler, K. 2020. Phase portraits, Lyapunov functions, and projective geometry : Lessons learned from a differential equations class and its aftermath. *Mathematik in der lehre*, 68(1) : 143–161.
- Narula, K. and Reddy, B. S. 2015. Three blind men and an elephant : The case of energy indices to measure energy security and energy sustainability. *Energy*, 80 : 148–158.
- Nasution, B. I., Kurniawan, R., Siagian, T. H., and Fudholi, A. 2020. Revisiting social vulnerability analysis in Indonesia : An optimized spatial fuzzy clustering approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 51 : 101801.
- Nativel, C. 2012. La pauvreté post-industrielle au Royaume-Uni.
- Naylor, A., Ford, J., Pearce, T., and Van Alstine, J. 2020. Conceptualizing Climate Vulnerability in Complex Adaptive Systems. *One Earth*, 2(5) : 444–454.
- Ncipha, X., Sivakumar, V., Rakotondraompiana, S., and Bencherif, H. 2016. Comparison of summer and spring carbon dioxide vertical and spatial distribution over the southwest indian ocean islands using tes data. In *32nd Annual conference of South African Society for Atmospheric Sciences*.
- Ndiaye, D. and Gabriel, K. 2011. Principal component analysis of the electricity consumption in residential dwellings. *Energy & Buildings*, 43(446-453) : 446–453.
- Neehaul, N., Jeetah, P., and Deenapanray, P. 2020. Energy recovery from municipal solid waste in Mauritius : Opportunities and challenges. *Environmental Development*, 33 : 100489.
- Neiladger, W. 2000. Institutional Adaptation to Environmental Risk under the Transition in Vietnam. *Association of American geographers*, 90(4) : 738–758.
- Nematchoua, M. K., Yvon, A., Kalameu, O., Asadi, S., Choudhary, R., and Reiter, S. 2019. Impact of climate change on demands for heating and cooling energy in hospitals : An in-depth case study of six islands located in the Indian Ocean region. *Sustainable Cities and Society*, 44 : 629–645.
- Neves, A. R. and Leal, V. 2010. Energy sustainability indicators for local energy planning : Review of current practices and derivation of a new framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9) : 2723–2735.
- Ngô, C. 2008. *L'énergie : ressources, technologies et environnement*. UniverSciences. Paris : Dunod, 3e éd edition.

- Noel, P. 1999. Indépendance énergétique versus marché mondial.
- Notteboom, T. and Vonck, I. 2009. Logistique et Transport des Vrac. *Les collection océaniques*, 505–519.
- Novikau, A. 2019. Conceptualizing and achieving energy security : The case of Belarus. *Energy Strategy Reviews*, 26 : 100408.
- O'Brien, K., Eriksen, S. E., Schjolden, A., and Nygaard, L. P. 2004. What's in a word? conflicting interpretations of vulnerability in climate change research. *CICERO Working Paper*.
- Oestreicher, C. 2007. A history of chaos theory. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 9(3) : 279–289.
- of Mauritius, R. 2019. Renewable energy roadmap 2030 for the electricity sector. Technical report, Ministry of Energy.
- Paelinck, J. 1972. Modèles urbains dynamiques : Etude critique. *Revue éco*, 23(6) : 931–951.
- Page, C. L., Abrami, G., Barreteau, O., Becu, N., Botta, A., Dray, A., and Monteil, C. 2010. Des modèles pour partager des représentations. In *Modélisation d'accompagnement*, 71–101. Éditions Quae.
- Palanichamy, C., Sundar Babu, N., and Nadarajan, C. 2004. Renewable energy investment opportunities in Mauritius—an investor's perspective. *Renewable Energy*, 29(5) : 703–716.
- Papada, L. and Kaliampakos, D. 2019. Development of vulnerability index for energy poverty. *Energy and Buildings*, 183 : 761–771.
- Petitot, J. 1998. Nature et enjeux de la modélisation en sciences sociales. *Le seuil*, 1(33) : 75–102.
- Pezard, L. and Nandrino, J. L. 2001. Paradigme dynamique en psychopathologie : La « théorie du chaos », de la physique à la psychiatrie. *Encephale*, 27(3) : 260–268.
- Philippou, P. and Strickland, R. 1997. Vector field analysis and synthesis using three-dimensional phase portrait. *Graphical Models and Image Processing*, 59(6) : 446–462.
- Picard, G. 2019. Equations différentielles.
- Pigeon, P. 1995. Géographie critique des risques. *Economica, Paris*.
- Porcheron, E. 2015. Analyse systémique de la démarche " Territoires à Énergie Positive " à l'heure des réflexions post-carbone : étude comparée entre le Trièves et le Sud Grésivaudan. *hal*.
- Poti, M., Hugé, J., Shanker, K., Koedam, N., and Dahdouh-Guebas, F. 2022. Learning from small islands in the Western Indian Ocean (WIO) : A systematic review of responses to environmental change. *Ocean & Coastal Management*, 227 : 106268.

- Praene, J. P., Fakra, D. A. H., Benard, F., and Ayagapin, L. 2021a. Comoros's energy review for promoting renewable energy sources. *Renewable Energy*, 169 : 885–893.
- Praene, J. P., Payet, M., and Bénard-Sora, F. 2018. Sustainable transition in small island developing states : Assessing the current situation. *Utilities Policy*, 54 : 86–91.
- Praene, J. P., Rasamoelina, R. M., and Ayagapin, L. 2021b. Past and prospective electricity scenarios in Madagascar : The role of government energy policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149 : 111321.
- Prasad, R. D., Bansal, R. C., and Raturi, A. 2014. Multi-faceted energy planning : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38 : 686–699.
- Provitolo, D. 2003. Modélisation et simulation de catastrophe urbaine : le couplage de l'aléa et de la vulnérabilité. In *Prévention des risques naturels*, volume 400, 232–268.
- Provitolo, D. 2006. Structural and dynamic complexities of risk and catastrophe systems : An approach by system dynamics modelling. *ESM 2006 - 2006 European Simulation and Modelling Conference : Modelling and Simulation 2006*, 430–434.
- Provitolo, D. 2007. Vulnérabilité aux inondations méditerranéennes en milieu urbain : une nouvelle démarche géographique. *Annales de géographie*, 653(1) : 23–40.
- Provitolo, D. 2019. Des modèles multiples pour l'étude des risques et catastrophes. Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d'Azur.
- Provitolo, D. and Antipolis, S. 2009. Vulnérabilité et résilience : géométrie variable des deux concepts Le domaine des risques et catastrophes. In *Séminaire de résilience*.
- Pryor, R. G. and Bright, J. E. 2007. Applying Chaos Theory to Careers : Attraction and attractors. *Journal of Vocational Behavior*, 71(3) : 375–400.
- Pumain, D. 2003. Une approche de la complexité en Géographie. *Géocarrefour*, 78(1) : 25–31.
- Pumain, D., Bretagnolle, A., and Glisse, B. 2006. Modelling the future of cities. In *European Conference on Complex systems*, volume 2006, 1–12.
- Pumain, D. and Robic, M.-C. 2002. Le rôle des mathématiques dans une « révolution » théorique et quantitative : la géographie française depuis les années 1970. *Revue d'Histoire des Sciences Humaines*, 6(1) : 123–144.
- Pumain, D., Saint-julien, T., and Sanders, L. 1984. Vers une modélisation de la dynamique intra urbaine. *L'espace géographique*, 13(2) : 125–135.
- Rabemalanto, N. 2018. Vulnérabilité résidentielle des ménages et trappes à pauvreté en milieu urbain. Les "bas-quartiers" d'Antananarivo. PhD thesis, Université Paris-Saclay.
- Rafitson, K. 2017. La lente marche vers la transition énergétique à madagascar : état des lieux et perspectives. techreport, Friedrich Ebert Stiftung.
- Rakotoson, V. 2019. Intégration de l'analyse de cycle de vie dans l'étude de la production électrique en milieux insulaires. PhD thesis, Université de La Réunion.

- Randriafero Rajonandrianina, L. and Benard, F. 2022. La vulnérabilité des territoires insulaires, proposition d'une approche dynamique. In *Transition, gouvernance territoriale et solidarités*, Rennes.
- Rapoport, A. and Carisse, C. 1970. La théorie moderne des systèmes : un guide pour faire face aux changements. *Revue française de sociologie*, 11(1) : 23–46.
- RDGE 2019. Projet d'appui au secteur de l'énergie de Comores - Union des comores. Technical report, Fonds Africain de Développement.
- Reghezza, M. 2006. Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine : la métropole parisienne face au risque de crue centennale. PhD thesis, Université de Nanterre Paris X.
- Renard, F. and Soto, D. 2015. Une représentation du risque à l'intersection de l'aléa et de la vulnérabilité : Cartographies des Inondations Lyonnaises. *Geographica Helvetica*, 70(4) : 333–348.
- Rey, S. 2010. La vulnérabilité des pays méditerranéens aux chocs des prix des matières premières. *hal*.
- Ricardo, H. J. 2009. *A modern introduction to differential equations*. Amsterdam Heidelberg : Elsevier Academic Press, 2nd ed edition.
- Robinson, C. and Mattioli, G. 2020. Double energy vulnerability : Spatial intersections of domestic and transport energy poverty in England. *Energy Research & Social Science*, 70(August) : 101699.
- Rosalie, M. W. and Campling, L. 2020. Socioeconomic development in Seychelles : an overview. *NeuroToxicology*, 81 : 224–229.
- Rousseau, J.-C. 2015. L'énergie nucléaire : une brève histoire.
- Rousseau, S. 2007. Vulnérabilité et résilience, analyse des entrées et sorties de la pauvreté : le cas de Manjakandriana à Madagascar. *Mondes en développement*, 140(4) : 25–44.
- Rufat, S. 2008. Transition post socialiste et vulnérabilité urbaine à Bucarest Samuel Rufat. PhD thesis, Ecole Normale Supérieure Lettres et Sciences Humaines.
- Sabine, G., Avotra, N., Olivia, R., and Sandrine, S. 2020. A macroeconomic evaluation of a carbon tax in overseas territories : A CGE model for Reunion Island. *Energy Policy*, 147 : 111738.
- Safi, A. S., Smith, W. J., and Liu, Z. 2012. Rural Nevada and Climate Change : Vulnerability , Beliefs , and Risk Perception. *Risk Analysis*, 32(6) : 1041–1059.
- Sanders, L. 2006. Les modèles agent en géographie urbaine. *Application pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, 151–168.
- Sanseverino-Godfrin, V. 2009. Risques naturels, vulnérabilité, résilience et droit dans un contexte de développement durable. In *20 ans JSE*. hal.

- Saujot, M. 2012. La mobilité, l'autre vulnérabilité énergétique. *Policy Brief Fabrique Urbaine*, 12(5) : 1–6.
- Schmidtlein, M. C., Deutsch, R. C., Piegorsch, W. W., and Cutter, S. L. 2008. A sensitivity analysis of the social vulnerability index. *Risk Analysis*, 28(4) : 1099–1114.
- Selosse, S., Ricci, O., Garabedian, S., and Maïzi, N. 2018. Exploring sustainable energy future in Reunion Island. *Utilities Policy*, 55(March) : 158–166.
- Selvakkumaran, S. and Limmeechokchai, B. 2013. Energy security and co-benefits of energy efficiency improvement in three Asian countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20 : 491–503.
- Shah, K. U., Bansha, H., Johnson, C., and Baptiste, A. 2013. Understanding livelihood vulnerability to climate change : Applying the livelihood vulnerability index in Trinidad and Tobago. *Geoforum*, 47 : 125–137.
- Shakhovska, N., Nych, L., and Kaminskyj, R. 2017. The identification of the operator's systems images using the method of the phase portrait. *Springer International Publishing*, 241–253.
- Smit, B. and Wandel, J. 2006. Adaptation , adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3) : 282–292.
- Soto, D., Renard, F., and Magnon, A. 2014. Evaluation de la vulnérabilité territoriale des enjeux environnementaux du Grand Lyon aux aléas technologiques. *Actes du séminaire Inforsid 2014*, 231–244.
- Sovacool, B. K. 2013. An international assessment of energy security performance. *Ecological Economics*, 88 : 148–158.
- Sovacool, B. K., Mukherjee, I., Drupady, I. M., and D'Agostino, A. L. 2011. Evaluating energy security performance from 1990 to 2010 for eighteen countries. *Energy*, 36(10) : 5846–5853.
- STHDA 2021. ACP - Analyse en composantes principales.
- Surroop, D. and Raghoo, P. 2017. Energy landscape in Mauritius. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73(November 2016) : 688–694.
- Tanner, J. and Mechanic, D. 2007. Vulnerable People, Groups, And Populations : Societal View. *Health affairs*, 26(5) : 1220–1230.
- Tao, L., Hongchao, Z., Chris, Y., Zhichao, L., and Changcheng, F. 2012. A PCA-based method for construction of composite sustainability indicators. *Springer-Verlag*, 17(5) : 593–603.
- Tapolczai, K., Bouchez, A., Stenger-Kovács, C., Padisák, J., and Rimet, F. 2017. Taxonomy- or trait-based ecological assessment for tropical rivers? Case study on benthic diatoms in Mayotte island (France, Indian Ocean). *Science of The Total Environment*, 607-608 : 1293–1303.

- Tapsell, S., McCarthy, S., Faulkner, H., Alexander, M., et al. 2010. Social vulnerability to natural hazards. *State of the art report from CapHaz-Net's WP4. London.*
- Ti-yan, S., Wei-dong, W., Min, H. O. U., Zhao-cheng, G. U. O., Ling, X. U. E., and Kai-zhong, Y. 2008. Study on spatio-temporal system dynamic models of urban growth. *Systems Engineering- Theory & Practice*, 27(1) : 10–17.
- Timmerman, P. 1981. Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society. *Environmental monograph*, 1.
- Torrens, P. M. and O'Sullivan, D. 2001. Cellular Automata and Urban Simulation : Where Do We Go from Here? *Environment and Planning B : Planning and Design*, 28(2) : 163–168.
- Toubin, M., Lhomme, S., Diab, Y., and Serre, D. 2012. La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine? *Développements durables et territoires ,Presses universitaires du Septentrion*, 3(1) : 0–18.
- Tsonis, R. b. A. A. and Ditto., W. L. 1994. Chaos : From Theory to Applications. *American Journal of Physics*, 62(2) : 190–191.
- Tuffillaro, N. B., Abbot, T., Reilly, J., and Hickey, F. R. 1992. An Experimental Approach to Nonlinear Dynamics and Chaos. *American Journal of Physics*, 1(0b) : 958–959.
- Vanbergue, D. and Drogoul, A. 2002. Approche multi-agent pour la simulation urbaine. In *Actes des 6èmes Journées CASSINI*, 95–112.
- Vancheri, A., Giordano, P., Andrey, D., and Albeverio, S. 2008. Urban growth processes joining cellular automata and multiagent systems. Part 1 : Theory and models. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 35(4) : 723–739.
- Veyret, Yvette; Reghezza, M. 2006. L'approche récente de la vulnérabilité. *Responsabilité et environnement*, 43 : 9–13.
- Viana, M. 2000. What's new on Lorenz strange attractors. *The mathematical intelligen- cer*, 22(3) : 6–19.
- Villar, C. and David, M. 2014. La résilience, un outil pour les territoires? *Séminaire IT-GO Rosko*, 22–23.
- Vlado, V. 2009. Diversification of oil import sources and energy security : A key strategy or an elusive objective? *Energy Policy*, 37(11) : 4615–4623.
- Vojak, R. and Danech-Pajouh, M. 1994. Analyse du trafic routier par la théorie du chaos : premiers résultats. *Recherche, transports, sécurité*, (45) : 39–44.
- Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., and Rockström, J. 2004. Resilience thinking : Integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, 9(2).
- Weber, A. 1997. Theory of the Location of Industries. *Economic Geography*, 7(1) : 106.

- White, G. 1964. Choice of adjustment to flood.
- White, R. 1984. Principles of Simulation in Human Geography. *Spatial Statistics and Models*, 389–416.
- White, R. and Engelen, G. 1993. Cellular automata and fractal urban form : a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment & Planning A*, 25(8) : 1175–1199.
- Wilson, A. 1970. Entropy in Urban and Regional Modeling. *Pion Ltd.*
- Winzer, C. 2012. Conceptualizing energy security. *Energy Policy*, 46 : 36–48.
- Wolf, F., Surroop, D., Singh, A., and Leal, W. 2016. Energy access and security strategies in Small Island Developing States. *Energy Policy*, 98 : 663–673.
- Woloszyn, P. 2018. Les structures évolutives de la résilience. *Risques, territoires et résilience*, Hors série(30) : 0–32.
- Woloszyn, P. and Quenault, B. 2013. Vulnérabilité territoriale et résiliences : résistances et capacités adaptatives face aux aléas climatiques. In *Internationa conférence of territorial intelligence*.
- World Energy Council 2020. Energy Trilemma Index.
- Yang, Y., Li, J., Sun, X., and Chen, J. 2014. Measuring external oil supply risk : A modified diversification index with country risk and potential oil exports. *Energy*, 68 : 930–938.
- Young, O. R., Berkhout, F., Gallopin, G. C., Janssen, M. A., Ostrom, E., and Leeuw, S. V. D. 2006. The globalization of socio-ecological systems : An agenda for scientific research. *Global Environmental Change*, 16(3) : 304–316.
- Yu, S., Lew, V., Ma, W., Bao, Z., and Hao, J. L. 2022. Unlocking key factors affecting utilization of biomass briquettes in Africa through SWOT and analytic hierarchy process : A case of Madagascar. *Fuel*, 323 : 124298.
- Zeng, S., Streimikiene, D., and Bale, T. 2017. Review of and comparative assessment of energy security in Baltic States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(January) : 185–192.
- Zinke, J., Reijmer, J. J. G., Thomassin, B. A., Dullo, W. C., Grootes, P. M., and Erlenkeuser, H. 2003. Postglacial flooding history of Mayotte Lagoon (Comoro Archipelago, southwest Indian Ocean). *Marine Geology*, 194(3) : 181–196.

Liste des figures

1	Évolution de la consommation énergétique mondiale de 1800 à l’an 2000 en Gtep (Source : BP (2020))	2
2	Objectif énergétique de l’Allemagne (source Mérenne-Schoumaker (2013))	4
3	Répartition des réserves mondiale en fossile (2019). Source BP (2020)	5
4	Production mondiale d’énergie renouvelable. Source : BP (2020)	6
1.1	Évolutions d’une notion vers une approche scientifique. Source : Réalisation propre	11
1.2	Schéma de synthèse des différentes typologies de vulnérabilité. Source : Réalisation propre	16
1.3	Schéma de synthèse de la vulnérabilité biophysique. Source : Réalisation propre	17
1.4	Schéma de synthèse de la vulnérabilité sociale. Source : Réalisation propre	19
1.5	Transdisciplinarité du terme de résilience. Source : Lhomme (2012)	21
1.6	Présentation de la chaîne énergétique d’un territoire. Source : Fléty (2014)	23
1.7	Système de vulnérabilité énergétique	32
1.8	Modèle pour caractériser la vulnérabilité énergétique d’un territoire. Source : Réalisation propre	32
2.1	Étape de construction d’indicateur et d’indice de vulnérabilité énergétique. Source : Réalisation propre	36
2.2	ETI de différents pays du monde. Source :World Energy Council (2020)	39
2.3	Modèle de base pour la construction de l’indicateur de vulnérabilité énergétique. Source : Réalisation propre	46
2.4	Cercle de corrélation du plan formé par les dimensions 1 et 2. Source : Réalisation propre	48
2.5	Graphe des individus du plan formé par les dimensions 1 et 2. Source : Réalisation propre	48
2.6	Cercle de corrélation du plan formé par les dimensions 3 et 4. Source : Réalisation propre	50
2.7	Graphes des individus du plan formé par les dimensions 3 et 4. Source : Réalisation propre	50
2.8	Classement des pays selon leur indicateur IVEN. Source : Réalisation propre	52
2.9	Cartographie de l’indicateur de vulnérabilité énergétique des pays étudiés pour l’année 2014. Source : Réalisation propre	53
2.10	Tendance générale des valeurs prises par les IVEN de l’ensemble des pays étudiés. Source : Réalisation propre	54
3.1	Paradigme de la systémique. Source : Moine (2007)	60

3.2	Un système dynamique continu : différents états d'une balle au cours de sa chute. source : Bonnet (2008)	62
3.3	Vocabulaire utile pour définir le portrait de phase. Source : Réalisation propre	64
3.4	Trajectoire de phase d'un pendule. Source : Chevillot-Miot (2017)	66
3.5	Attracteur d'un régime périodique à deux fréquences. Cas d'un pendule soumis à une force extérieure. Source : Vojak and Danech-Pajouh (1994)	66
3.6	Attracteur de Lorenz correspondant à un système dynamique à trois variables. Source : Tsonis and Ditto. (1994)	67
3.7	Paysage de stabilité tridimensionnel avec deux bassins d'attraction montrant, dans un bassin, la position actuelle du système et trois aspects de la résilience. Source : Provitolo (2019)	69
3.8	Représentation schématique des cellules de Bénard d'un mouvement de convec- tion. Source : Wikipédia	71
3.9	Évolution des variables x, y et z entre 1995 et 2014 pour quelques pays d'Europe	75
3.10	Évolution des variables x, y et z entre 1995 et 2014 pour des exemples de pays insulaires	76
3.11	Évolution des variables x, y et z entre 1995 et 2014 pour quelques pays du Moyent Orient	76
3.12	Évolution des variables x, y et z entre 1995 et 2014 pour des pays d'Amérique Latine	77
3.13	Résultats d'optimisations de l'équation de Lorenz pour l'Australie	78
3.14	Résultats d'optimisation de l'équation de Lorenz pour le Danemark	78
3.15	Résultats d'optimisations de l'équation de Lorenz pour le Brésil	79
3.16	Résultats d'optimisations de l'équation de Lorenz pour la Bolivie	79
3.17	Portrait de phase obtenu avec la variable PIB. Source : Réalisation propre	83
3.18	Portrait de phase obtenu avec la variable PIB avec la représentation en distri- bution de densité. Source : Réalisation propre	84
3.19	Portrait de phase obtenu avec la variable GES avec la représentation en distri- bution de densité. Source : Réalisation propre	85
3.20	Portrait de phase obtenu avec la variable IDH avec la représentation en distri- bution de densité. Source : Réalisation propre	85
3.21	Portrait de phase obtenu avec la variable CONSHAB avec la représentation en distribution de densité. Source : Réalisation propre	86
3.22	Valeur moyenne, médiane, maximum et minimum des indicateurs pour chaque pays	90
3.23	Portrait de phase du système de territoire (visualisation 2D avec l'estimation de densité de Kernel)	91
3.24	Vue en perspective du portrait de phase obtenu des fonctions de densité)	91
3.25	Évolution de l'indicateur IV entre 1995 et 2014 pour l'Inde	93
3.26	Trajectoire de phase de l'Inde	93
3.27	Position de l'Inde sur le portrait de phase	94
3.28	Évolution des indicateurs IV de l'Uruguay, le Guatemala et la Jamaïque. Source : Réalisation propre	94
3.29	Position des trajectoires de phase du Guatemala, Uruguay et Jamaïque dans le portrait de phase. Source : Réalisation propre)	95
3.30	Position de l'Allemagne sur le portrait de phase. Source : Réalisation propre	96

3.31	Position de la Grande-Bretagne sur le portrait de phase. Source : Réalisation propre	97
3.32	Position de l'Italie sur le portrait de phase	97
3.33	Position du Mexique sur le portrait de phase. Source : Réalisation propre	97
3.34	Évolution de l'indicateur IV pour l'Australie et leur résumé statistique	99
3.35	Position de l'Australie dans le portrait de phase	99
3.36	Position de la Corée du Sud dans le portrait de phase	100
3.37	Cartographie de la vulnérabilité énergétique des 45 pays étudiés pour l'année 1995	101
3.38	Cartographie de la vulnérabilité énergétique des 45 pays étudiés pour l'année 2005	102
3.39	Cartographie de la vulnérabilité énergétique des 45 pays étudiés pour l'année 2014	102
4.1	Localisation géographique des îles Madagascar, La Réunion, Seychelles, Comores, Mayotte et Maurice dans le monde et dans l'Océan Indien)	108
4.2	Densité de la population de Madagascar par régions en 2018. Source de données : INSTAT (2022)	112
4.3	Carte administrative de Maurice	113
4.4	Carte géographique de Seychelles	114
4.5	Densité dans les trois principales îles constituant de l'Archipel des Comores, année 2000. RDGE (2019)	116
4.6	Taux de pauvreté sur chaque commune de la Réunion en 2020. Source de données : Insee	117
4.7	Densité de la population dans les différentes communes de Mayotte	118
4.8	Évolution de l'indicateur synthétique de vulnérabilité énergétique des îles pour la période entre 2000 et 2019	120
4.9	Portrait de phase des îles de l'Océan Indien	123
4.10	État d'avancement du PLU pour chaque commune. Source : DEAL	126
4.11	Evolution du taux de dépendance énergétique de la Réunion de 2000 à 2021. Source : ORE	126
4.12	Taux d'accès à l'électricité des régions de Madagascar en 2020. M.E.F. (2021)	128
4.13	Taux d'accès à l'électricité des régions de Comores en 2017. RDGE (2019)	130
14	Représentation d'un jeu de données ACP sous forme matricielle	145

Liste des tableaux

1.1	Différentes approches du terme de vulnérabilité. Source : Eakin and Luers (2006)	29
1.2	Différentes approches du terme de vulnérabilité. Source : Eakin and Luers (2006)	31
2.1	Dimensions retenues pour définir la sécurité énergétique. Source : Sovacool (2013)	40
2.2	Liste des pays étudiés	43
3.1	Tableau des données utilisées pour la construction des variables composites.	74
3.2	Tableau des erreurs d'optimisation de l'analogie de Lorenz.	80
3.3	Liste des pays étudiés. Source : World data Bank	86
3.4	Présentation des variables utilisées	88
3.5	Évaluation qualitative de l'indicateur IV utilisées	101
4.1	Description des variables	119

