

**Faculté des sciences économiques,
sociales, politiques et de communication
École des sciences politiques et sociales (PSAD)**

Vulnérabilité et préparation à l'adaptation au changement climatique

Une comparaison internationale

**Auteur : Balolage Gloire Musimwa
Promoteur(s) : Bruno Masquelier
Lecteur(s) : Christine Schnor
Année académique : 2024 – 2025
Master en Méthodes Quantitatives en Sciences Sociales**

Déclaration de déontologie

Je déclare sur l'honneur que ce mémoire a été écrit de ma plume, sans avoir sollicité d'aide extérieure illicite, qu'il n'est pas la reprise d'un travail présenté dans une autre institution pour évaluation, et qu'il n'a jamais été publié, en tout ou en partie. Toutes les informations (idées, phrases, graphes, cartes, tableaux, ...) empruntées ou faisant référence à des sources primaires ou secondaires sont référencées adéquatement selon la méthode universitaire en vigueur. Je déclare avoir pris connaissance et adhérer au Code de déontologie pour les étudiant.e.s en matière d'emprunts, de citations et d'exploitation de sources diverses et savoir que le plagiat constitue une faute grave.

Balolage Gloire



Résumé

Cette étude vise à évaluer et comparer la vulnérabilité ainsi que la préparation à l'adaptation au changement climatique à l'échelle internationale. En s'inspirant des indicateurs de vulnérabilité et de préparation de Notre Dame Global Adaptation Initiative (ND-GAIN), deux nouveaux indicateurs ont été calculés à l'aide de l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Le premier évalue la vulnérabilité, tandis que le second évalue la préparation, réduisant ainsi la complexité des données et améliorant la compréhension des déterminants clés au niveau mondial. L'étude s'est appuyée sur des questions de recherche portant sur l'étendue de la vulnérabilité et de la préparation, les secteurs contribuant à ces aspects, ainsi que les divergences entre les classements obtenus par l'ACP et le ND-GAIN.

Sur un total de 192 pays analysés, 165 (86%) sont classés dans le même quadrant par les deux approches. Les résultats montrent également que 71 pays se trouvent dans une situation d'urgence, avec des vulnérabilités élevées et une faible préparation selon les deux approches, tandis que 66 pays présentent une meilleure préparation et une vulnérabilité faible. L'analyse met également en évidence des divergences dans les classements pour 27 pays. Les secteurs clés identifiés contribuant plus à la vulnérabilité incluent l'alimentation, l'habitat, la santé, les écosystèmes, les infrastructures, l'eau ; et ceux contribuant plus à la préparation incluent la gouvernance et le social.

L'étude confirme que les pays à revenu élevé comme la Corée du Sud, la Norvège, et la Suisse sont généralement mieux préparés et moins vulnérables, tandis que les pays à faible revenu, comme le Tchad, le Yémen, l'Érythrée, la Syrie, l'Afghanistan, et l'Haïti, sont plus vulnérables et moins préparés. Sur base de nos résultats, plusieurs recommandations sont proposées, notamment le renforcement des infrastructures essentielles, l'amélioration de la gouvernance, le renforcement de la résilience alimentaire, la promotion des technologies de l'information et de la communication, la protection des écosystèmes, les approches adaptées au contexte local et l'intégration des méthodes mixtes pour une évaluation plus complète.

Mots – clés : Changement climatique, Vulnérabilité, Préparation à l'adaptation, Analyse en composantes principales, Indice ND-GAIN

Abstact

This study aims to assess and compare climate change vulnerability and adaptation readiness on an international scale. Drawing on the vulnerability and readiness indicators from the Notre Dame Global Adaptation Initiative (ND-GAIN), two new vulnerability and readiness indicators were calculated using Principal Component Analysis (PCA), thereby reducing the complexity of the data and enhancing the understanding of key determinants at the global level. The study focused on research questions regarding the extent of vulnerability and readiness, the sectors contributing to these aspects, and the discrepancies between the rankings obtained through PCA and ND-GAIN.

Out of 192 countries analyzed, 165 (86%) are classified in the same quadrant by both approaches. The results also indicate that 71 countries are in a state of emergency, exhibiting high vulnerability and low readiness according to both approaches, while 66 countries demonstrate better readiness and lower vulnerability. The analysis further highlights discrepancies in the rankings for 27 countries. Key sectors identified as contributing most to vulnerability include food security, housing, health, ecosystems, infrastructure, and water; those contributing most to readiness are governance and social.

The study confirms that high-income countries such as South Korea, Norway, and Switzerland are generally better prepared and less vulnerable. In contrast, low-income countries, such as Chad, Yemen, Eritrea, Syria, Afghanistan, and Haiti, are more vulnerable and less ready. Our findings suggest several recommendations, including strengthening essential infrastructure, improving governance, enhancing food resilience, promoting information and communication technologies, protecting ecosystems, adopting context-specific approaches, and integrating mixed methods for a more comprehensive assessment.

Keywords: Climate change, Vulnerability, Adaptation readiness, Principal component analysis, ND-GAIN Index.

Remerciements

Avant tout, je rends gloire à Dieu Tout-Puissant, source de sagesse, d'inspiration et de force, pour m'avoir guidé tout au long de ce parcours académique. C'est par Sa grâce que j'ai pu surmonter les défis rencontrés et persévérer jusqu'à l'achèvement de ce mémoire. Que Son nom soit loué pour tout ce qu'Il a accompli dans ma vie.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mon superviseur de mémoire, le Professeur Bruno Masquelier, pour son accompagnement, sa disponibilité et ses conseils. Ses encouragements et sa rigueur académique m'ont permis de donner le meilleur de moi-même dans la réalisation de cette recherche.

Je suis reconnaissant aussi envers mes camarades de promotion, qui ont partagé avec moi des échanges fructueux et des moments d'entraide. Leur soutien tant moral qu'intellectuel a été d'une grande aide tout au long de ce parcours.

Enfin, un grand merci à ma famille et à mes amis pour leur soutien indéfectible, leur patience et leur encouragement tout au long de ce parcours académique. Leur présence a été une source constante de motivation.

Puisse ce mémoire être non seulement l'aboutissement de mes efforts, mais aussi un témoignage de la fidélité de Dieu dans chaque étape de ma vie.

Balolage Gloire

Sigles et abréviations

ACP	: Analyse en Composantes Principales
AR	: Adaptation Readiness
CRI	: Global Climate Risk Index
ECJRS	: European Commission Joint Research Centre
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
GES	: Gaz à Effet de Serre
GIEC	: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
INFORM	: INFORM Global Risk Index
IPCC	: Intergovernmental Panel On Climate Change
Max	: Maximum
Min	: Minimum
N	: Nombre d'observations
n/a	: Non Applicable
NAP-DRC	: National Adaptation Plan of the Democratic republic of Congo
ND-GAIN	: Notre Dame Global Adaptation Initiative
NIBS	: National Institute of Building Sciences
ODD	: Objectif de Développement Durable
Pol.	: Politique
TIC	: Technologie de l'Information et de Communication
UNFCCC	: United Nations Framework Convention on Climate Change
WRI	: World Risk Index

Table des matières

Déclaration de déontologie	i
Résumé	ii
Abstact	iii
Remerciements.....	iv
Sigles et abréviations.....	v
INTRODUCTION GENERALE	- 1 -
1. Problématique	- 1 -
2. Objectifs de la recherche.....	- 6 -
3. Questions de recherche	- 7 -
4. Structure du mémoire	- 7 -
CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	- 8 -
I.1. Changement climatique à l'échelle mondiale	- 8 -
I.2. Revue de la littérature théorique sur la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique.....	- 10 -
I.2.1. Vulnérabilité	- 10 -
I.2.2. L'adaptation au changement climatique	- 13 -
I.2.3. Cadre conceptuel et approches pour la vulnérabilité et la préparation à l'adaptation au changement climatique.....	- 15 -
I.2.4. Revue de la littérature empirique	- 23 -
CHAPITRE II. DONNEES ET METHODOLOGIE	- 27 -
II.1. Source des données	- 27 -
II.2. Méthodologie de calcul des scores du ND-GAIN : méthode d'origine.....	- 27 -
II.3. Calcul d'un nouvel indice à l'aide de l'analyse en composantes principales.....	- 30 -
II.3.1. Application de l'ACP dans cette étude.....	- 31 -
II.3.2. Comparaison avec les résultats de l'approche ND-GAIN.....	- 34 -
CHAPITRE III. RESULTATS.....	- 35 -

III.1. Statistiques descriptives des indicateurs de vulnérabilité et de préparation	35 -
III.2. Analyse en composantes principales	39 -
III.3. Comparaison des résultats des indicateurs ND-GAIN et de l'ACP	49 -
CHAPITRE IV. DISCUSSIONS	58
Limites de l'étude et pistes pour des recherches futures	60
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	61
BIBLIOGRAPHIE.....	65
ANNEXES.....	71

INTRODUCTION GENERALE

1. Problématique

Plusieurs études scientifiques démontrent un changement climatique à l'échelle mondiale avec une augmentation des événements climatiques dangereux, au moins depuis 1950 (Amegavi et al., 2021). Les impacts des événements extrêmes liés au climat tels que les vagues de chaleur, les inondations, les sécheresses, les incendies de forêt, les cyclones, etc., englobent des altérations des écosystèmes, des perturbations de l'approvisionnement en eau, des interruptions de la production alimentaire, des dommages aux établissements et aux infrastructures, ainsi qu'une augmentation de la morbidité et de la mortalité (IPCC, 2023). Ces conséquences néfastes surviennent en partie en raison d'un manque de préparation sociale, économique et gouvernementale pour faire face aux événements climatiques (Sarkodie & Strezov, 2019).

Alors que la plupart des pays à haut revenu ont intégré des plans et des politiques d'adaptation dans leur planification, les pays à bas et moyens revenus sont soit en train d'échafauder, soit n'ont pas encore lancé de politiques d'adaptation dans leur processus de développement. Pourtant, il y a un besoin pressant d'actions nationales concertées à l'échelle mondiale afin d'assurer une résilience équitable face aux défis climatiques, en particulier pour les pays à bas et moyens revenus qui sont souvent plus vulnérables aux multiples conséquences néfastes du changement climatique (Sarkodie & Strezov, 2019).

Malgré l'avancée rapide des connaissances dans le domaine de la *mitigation* pour réduire les émissions de gaz à effets de serre, notre connaissance de l'ampleur du défi de l'*adaptation* en est encore relativement à ses prémices. En particulier, les décideurs sont confrontés à d'importants obstacles, tels que l'accès limité aux données et les difficultés à incorporer efficacement les connaissances scientifiques dans leurs stratégies d'adaptation actuelles et futures (Chen et al., 2024).

De plus, on sait peu de choses sur la préparation des systèmes de gouvernance à l'adaptation (Nkhonjera, 2017 ; Ford & King, 2015). La majorité des évaluations de l'adaptation se sont principalement concentrées sur l'évaluation de l'exposition, de la sensibilité et de la

vulnérabilité aux impacts climatiques, en accordant moins d'attention aux études des résultats des actions d'adaptation (Sarkodie & Strezov, 2019).

Par conséquent, notre compréhension de la préparation d'un pays ou d'une région à faire face aux événements climatiques extrêmes reste limitée. Tilleard et Ford (2016) ainsi qu'Amegavi et al. (2021) soulignent que l'analyse de la *capacité* d'adaptation (l'évaluation des moyens disponibles pour s'adapter) seule peut être insuffisante pour comprendre pleinement la préparation d'un pays au changement climatique. Cela entrave la capacité des décideurs à reconnaître et à prioriser l'assistance nécessaire pour une adaptation réussie, y compris la détermination des mesures appropriées à mettre en œuvre, à surveiller et à évaluer les progrès des efforts d'adaptation (Ford & King, 2015).

Au vu de ce contexte, plusieurs chercheurs soutiennent que l'attention devrait être dirigée vers la *préparation à l'adaptation*, évaluant les mécanismes de soutien et les conditions nécessaires pour une adaptation climatique efficace (Ford & King, 2015 ; Tilleard & Ford, 2016 ; Sarkodie & Strezov, 2019; Amegavi et al., 2021; Chen et al., 2024). Qui plus est, peu d'efforts ont été déployés pour conceptualiser les déterminants de la préparation à l'adaptation ou pour identifier des indicateurs permettant de la mesurer et de la suivre au fil du temps. Cette lacune entrave notre capacité à déterminer et à hiérarchiser les besoins en matière de soutien à l'adaptation, à identifier ce qui doit être fait pour renforcer la capacité des systèmes humains à s'adapter, et à surveiller et évaluer les progrès de l'adaptation (Ford & King, 2015).

Ces derniers temps, le nombre d'indicateurs mondiaux de risques climatiques a augmenté. Dans le domaine scientifique, nous pouvons par exemple citer *World Risk Index* (WRI) (Welle & Birkmann, 2015), l'*INFORM Global Risk Index* (INFORM) (ECJRC, 2024), le *ND-GAIN Country Index* (ND-GAIN) (Chen et al., 2024), et le *Global Climate Risk Index* (CRI) (Eckstein et al., 2019).

Ces quatre indicateurs offrent chacun une perspective unique sur la manière de mesurer et de caractériser les risques multiples auxquels les pays sont confrontés face au changement climatique. Le WRI adopte une approche conceptuelle selon laquelle le risque résulte de l'exposition et de la vulnérabilité, tandis que l'INFORM intègre également la capacité d'adaptation à cette formule. Le ND-GAIN Index, quant à lui, évalue la préparation et la vulnérabilité. Enfin, le CRI se concentre spécifiquement sur les pertes humaines et économiques liées aux événements climatiques extrêmes. Le Tableau 1 ci-dessous, adapté de

Garschagen et al. (2021), présente les quatre indices et détaille leur couverture, leur composition et les processus qui ont mené à leur élaboration.

	World Risk Index (WRI)¹	INFORM Global Risk Index²	ND-GAIN Index³	Climate Risk Index (CRI)⁴
Conception de l'indice et composantes	Risque = Exposition * Vulnérabilité	Risque = Exposition * Vulnérabilité * (1 - Capacité d'adaptation)	ND-GAIN = (Préparation - Vulnérabilité + 1) * 50	Risque = pertes humaines + pertes économiques
	Vulnérabilité = Susceptibilité + (1 - Capacité de gestion) + (1 - Capacité d'adaptation)		Vulnérabilité = Exposition * Sensibilité * (1 - Capacité d'adaptation)	
Indicateurs et couverture	27 indicateurs	54 indicateurs	45 indicateurs	2 indicateurs
	171 pays	191 pays	175 pays	181 pays
Processus de construction de l'indicateur	Traitement des données manquantes sur la base de sources similaires pour une période allant jusqu'à 10 ans.	Traitement des données manquantes sur la base de sources similaires pour une période allant jusqu'à 5 ans.	Traitement des données manquantes par interpolation linéaire	n/a
Traitement des valeurs aberrantes	Aucune information fournie par les développeurs de l'indice	Processus itératif basé sur l'asymétrie (skewness) et l'aplatissement (kurtosis)	Suppression des indicateurs avec des valeurs concentrées dans les 10 % les plus faibles ou les 10 % les plus élevées (10e ou au 90e percentile).	n/a
Traitement de la multi colinéarité	Analyse de corrélation	Analyse de corrélation	n/a	n/a
Approche de normalisation	Normalisation maximale linéaire	Min-max linéaire [0-1] appliqué à tous les indicateurs	Min-max linéaire [0-1] appliqué à tous les indicateurs (en utilisant des seuils)	Classement (Ranking)
Pondération des indicateurs	Poids égaux	Poids égaux	Poids égaux	Poids différents

¹ <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S2345737615500037>

² <https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/inform-index/Portals/0/InfoRM/Publications/01%20Inform%202020%20ONLINE.pdf>

³ https://gain.nd.edu/assets/522870/nd_gain_countryindextechreport_2023_01.pdf

⁴ https://www.germanwatch.org/sites/default/files/20-2-01e%20Global%20Climate%20Risk%20Index%202020_14.pdf

Méthode d'agrégation	Moyenne des indicateurs de vulnérabilité ; agrégation multiplicative de l'exposition et de la vulnérabilité	Combinaison de moyennes arithmétiques et géométriques des scores des indicateurs	Moyenne arithmétique	Classement moyen pondéré
Approche de validation	Analyse de sensibilité	Analyse de sensibilité	n/a	n/a

Tableau 1 : Comparaisons entre quatre grands indices mondiaux de risques multiples
(Adapté de Garschagen et al., 2021)

En ce qui concerne les données de base, chaque indice utilise un ensemble différent d'indicateurs et couvre un nombre variable de pays dans son évaluation, avec des variations également dans le mode de traitement des données manquantes. Par exemple, le WRI utilise 27 indicateurs couvrant 171 pays, tandis que l'INFORM Global Risk Index utilise 54 indicateurs pour 191 pays. Le processus de construction des indicateurs varie également, avec des méthodes telles que l'interpolation linéaire pour combler les données manquantes et des approches de normalisation différentes avant agrégation des indicateurs, notamment la normalisation maximale linéaire, le min-max linéaire et le classement.

Les méthodes d'agrégation et de pondération des indicateurs diffèrent également entre les indices. Certains indices utilisent des poids égaux pour tous les indicateurs, tandis que d'autres attribuent des poids différents en fonction de leur importance perçue. De plus, les méthodes d'agrégation varient, allant de la simple moyenne arithmétique à des combinaisons de moyennes arithmétiques et géométriques des scores des indicateurs (Garschagen et al., 2021).

Enfin, en ce qui concerne la validation des résultats, les indices utilisent principalement des analyses de sensibilité pour évaluer la robustesse de leurs mesures. Toutefois, malgré de légères variations conceptuelles, les méthodes et les données utilisées par les différents indices, tous répondent à une ambition presque identique : ils cherchent à mesurer le niveau de risque climatique et de catastrophes dans les pays du monde entier, permettant ainsi un classement et une comparaison (Garschagen et al., 2021).

Garschagen et al. (2021) considèrent que les indicateurs de mesure de risque climatique sont importants pour trois raisons. Tout d'abord, contrairement aux données de pertes et de dommages, ils sont en mesure de saisir la nature latente et multidimensionnelle du risque.

Ceci est particulièrement important dans le contexte d'événements de basse fréquence mais à impact élevé (par exemple, les cyclones forts), où le risque doit être évalué et suivi indépendamment des données réelles de pertes et de dommages, se manifestant uniquement lors d'événements catastrophiques. Deuxièmement, les indices de risque composites sont capables de saisir et de compartimenter les différentes composantes du risque conformément aux cadres conceptuels standards, mettant en évidence notamment (a) les caractéristiques du ou des dangers, (b) l'exposition des êtres humains et des biens, (c) la vulnérabilité ou la sensibilité de ces derniers, et (d) la capacité à se préparer, faire face et se remettre de tels événements à court ou à long terme. Troisièmement, ils fournissent une mesure quantitative pouvant être suivie et comparée dans le temps et entre les pays.

Dans le cadre de ce mémoire, nous allons nous focaliser sur le ND-GAIN car il aborde mieux les questions de préparation à l'adaptation au changement climatique, comparativement aux trois autres indices. L'indice ND-GAIN vise à aider les entreprises et le secteur public à mieux prioriser les investissements en matière d'adaptation afin de réduire les vulnérabilités face à des défis mondiaux tels que les contraintes des ressources naturelles, la forte croissance de la population et le changement climatique (Chen et al., 2024). Le choix de cet indice est également motivé par un mémoire que j'ai réalisé précédemment dans le cadre d'un master en *Globalisation and Development* et qui m'a permis de me familiariser avec l'indice ND-GAIN (Gloire, 2023). Nous explorons dans le cadre de ce mémoire pour un *master en méthodes quantitatives en sciences sociales* les aspects relatifs à la construction statistique de cet indice.

L'indice ND-GAIN repose sur une méthodologie systématique pour évaluer la vulnérabilité et la capacité de préparation des pays au changement climatique, en combinant un ensemble diversifié d'indicateurs. Cette combinaison est structurée autour de deux axes principaux : la *vulnérabilité* et la *préparation*, chacun subdivisé en plusieurs dimensions (Chen et al., 2024). La vulnérabilité est analysée à travers les dimensions de *l'exposition, de la sensibilité et de la capacité d'adaptation*, et elle est mesurée à partir de trente-six variables réparties dans six secteurs vitaux : santé, alimentation, eau, infrastructure, services écosystémiques et habitat humain. Pour chaque secteur, une moyenne arithmétique des scores de ses indicateurs est calculée, tous pondérés également, pour déterminer le score de vulnérabilité sectorielle (Chen et al., 2024).

La préparation, quant à elle, est évaluée à travers les dimensions relative à *l'économie, à la gouvernance et aux aspects sociétaux*, en se basant sur neuf indicateurs. Comme pour la vulnérabilité, le score global de préparation est obtenu par la moyenne des scores de ses composantes. Les indicateurs de préparation indiquent la capacité d'un pays à mobiliser et absorber des investissements en adaptation (Chen et al., 2024).

Le score final ND-GAIN d'un pays est la différence entre ses scores de préparation et de vulnérabilité, normalisée sur une échelle de 0 à 100. Cette méthode assure une comparaison claire entre les pays (Chen et al., 2024).

Néanmoins, cette méthode pourrait simplifier les interdépendances entre les indicateurs. En d'autres termes, elle pourrait ne pas capturer pleinement les interactions complexes et les effets multidimensionnels entre les différents indicateurs et secteurs. En introduisant une Analyse en Composantes Principales (ACP), nous pourrions affiner cette approche en identifiant les axes principaux de variation et en réduisant le nombre d'indicateurs à ceux qui contribuent le plus significativement à la variance globale. L'ACP pourrait donc permettre une meilleure compréhension des dynamiques sous-jacentes, offrant une perspective plus nuancée et potentiellement plus précise sur les défis et capacités de chaque pays face au changement climatique.

Au vu de ce contexte, nous proposons dans le cadre de ce mémoire de calculer un nouvel indicateur de vulnérabilité et de préparation à l'adaptation au changement climatique, en nous inspirant du ND-GAIN et en exploitant les mêmes indicateurs, mais à l'aide de l'ACP. Par après, nous comparerons les classements des pays entre les deux indices.

2. Objectifs de la recherche

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer et comparer la vulnérabilité ainsi que la préparation à l'adaptation au changement climatique à l'échelle internationale. Plus précisément, l'étude cherche à atteindre les objectifs suivants :

- Identifier, à travers les résultats de l'ACP, les secteurs qui contribuent le plus à la vulnérabilité et à la préparation à l'adaptation, permettant ainsi une meilleure compréhension des mécanismes en jeu.

- Comparer les résultats obtenus avec l'ACP à ceux du ND-GAIN à l'échelle internationale ;
- Formuler des recommandations basées sur les résultats obtenus, visant à renforcer la capacité des pays à mieux se préparer aux défis climatiques pour faire face à leur vulnérabilité.

3. Questions de recherche

Pour répondre aux objectifs énoncés, les questions de recherche suivantes orientent cette étude :

- 1) Quels secteurs spécifiques émergent comme les principaux contributeurs à la vulnérabilité et à la préparation à l'adaptation au changement climatique à l'échelle internationale d'après les données quantitatives disponibles?
- 2) Quelle est l'étendue de la vulnérabilité et de la préparation au changement climatique et comment ces deux composantes varient-elles à l'échelle internationale ?
- 3) Les regroupements de pays obtenus à partir des deux approches (ND-GAIN et ACP) concordent-ils ou montrent-ils des divergences dans leurs classements ?
- 4) Quelles recommandations peuvent être formulées pour renforcer la capacité des pays à faire face à la vulnérabilité et aux défis climatiques de préparation, en se basant sur les résultats obtenus ?

4. Structure du mémoire

Après cette introduction, le premier chapitre exposera la revue de la littérature théorique et empirique, mettant en évidence le cadre théorique ainsi que les manques actuels dans la compréhension de la vulnérabilité et de la préparation à l'adaptation au changement climatique. Le deuxième chapitre détaillera la méthodologie, soulignant l'approche analytique basée sur l'ACP des indicateurs du ND-GAIN. Le troisième chapitre présentera les résultats du mémoire, analysant la vulnérabilité et la préparation à l'adaptation pour différents pays, et le dernier chapitre discutera des implications pratiques et proposera des recommandations pour l'action future. Une conclusion viendra clore ce mémoire.

CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre vise à approfondir notre compréhension de la vulnérabilité et de l'adaptation au changement climatique en rappelant d'abord quelques généralités sur le changement climatique. Nous présenterons ensuite une brève revue de la littérature relative aux théories qui concernent la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique. Nous concluerons ce chapitre par une revue empirique des recherches existantes sur la vulnérabilité et la préparation à l'adaptation.

I.1. Changement climatique à l'échelle mondiale

Le changement climatique se réfère aux modifications des températures et des schémas météorologiques sur le temps, pouvant être causées par des facteurs naturels tels que les variations dans l'activité solaire ou les éruptions volcaniques majeures. Cependant, depuis les années 1800, les activités humaines sont devenues la cause principale du changement climatique, notamment en raison de la combustion extensive des combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz (United Nations Environment Programme, 2009 ; United Nations, 2023).

L'émission de gaz à effet de serre (GES) résultant de cette combustion perturbe les échanges d'énergie entre l'espace, l'atmosphère et la surface de la terre. Ces gaz absorbent en effet davantage le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, que le rayonnement solaire, ce qui conduit à augmenter l'énergie reçue du soleil. En conséquence, les températures de l'océan et de l'air se réchauffent, provoquant une hausse du niveau des mers, une fonte des glaces, une perturbation des régimes de pluie, et des variations climatiques extrêmes. Le dioxyde de carbone et le méthane figurent parmi les gaz à effet de serre qui contribuent le plus à l'accélération du changement climatique. Leur libération est le résultat de diverses activités humaines, incluant l'utilisation de véhicules à essence et le chauffage au charbon. Les émissions de méthane sont essentiellement issues de l'agriculture et des secteurs pétrolier et gazier. Les domaines clés tels que l'énergie, l'industrie, le transport, les bâtiments, l'agriculture et la gestion des terres jouent un rôle prépondérant dans les émissions de gaz à effet de serre (United Nations Environment Programme, 2009 ; United Nations, 2023). Par ailleurs, les activités de déforestation et de défrichement contribuent également aux émissions de dioxyde de carbone et réduisent les capacités d'absorption des puits de carbone.

Aujourd'hui, en 2024, la température mondiale est environ 1.2 °C plus élevée que les températures de référence durant l'époque préindustrielles⁵. Le dernier rapport de synthèse du *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* (GIEC) souligne que les efforts actuels pour lutter contre le changement climatique, ainsi que les plans et politiques en place, sont gravement insuffisants. Pour limiter le réchauffement à 1,5 °C, les émissions mondiales de GES doivent atteindre leur pic d'ici 2025, suivies de réductions immédiates, rapides et substantielles. D'ici 2030, il faudra réduire les émissions de GES de près de 50 % par rapport à 2019 et qu'on parvienne à zéro émission nette d'ici 2050 (Carman, 2023).

Les effets du changement climatique sont également injustes, impactant de manière disproportionnée ceux qui y ont le moins contribué. Près de 50% de la population mondiale habite des zones très vulnérables au changement climatique. Au cours de la dernière décennie, ces régions ont enregistré un nombre de décès 15 fois supérieur à celui des régions moins vulnérables dus aux inondations, sécheresses et tempêtes (Carman, 2023).

Le dernier rapport du GIEC présente plusieurs scénarios sur l'évolution des températures mondiales en fonction des trajectoires actuelles et des politiques climatiques adoptées (Vial et al., 2024). Le scénario le plus optimiste, appelé "*Emprunter la voie verte*", prévoit un réchauffement global limité à 1,5 °C d'ici 2050, objectif qui permettrait d'atteindre les engagements de l'Accord de Paris. Cela nécessiterait une coopération internationale renforcée, visant un développement durable et inclusif, avec une réduction des inégalités, une consommation responsable et une faible croissance matérielle (Vial et al., 2024).

En revanche, le scénario "*Tendances actuelles*", laisse présager un réchauffement d'environ 2,7°C d'ici 2100. Ce scénario repose sur des dynamiques sociales, économiques et technologiques continues, mais inégales, avec des progrès limités dans la réalisation des Objectifs de Développement Durable (ODD). Malgré des efforts pour réduire l'impact environnemental, la dégradation des écosystèmes persisterait, et les vulnérabilités aux effets du changement climatique resteraient élevées (Vial et al., 2024).

Le scénario le plus pessimiste, "*Emprunter l'autoroute*", envisage un réchauffement de 4,4°C d'ici 2100, résultat d'une exploitation accrue des combustibles fossiles et d'un modèle

⁵ Voir <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>

économique intensif en énergie. Ce scénario présuppose une croissance rapide de l'économie mondiale, mais au prix d'une détérioration significative des systèmes écologiques et d'une incapacité à atteindre les ODD, malgré les investissements dans la géo-ingénierie et d'autres technologies (Vial et al., 2024).

I.2. Revue de la littérature théorique sur la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique

La vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique constituent des thèmes majeurs dans la littérature scientifique, reflétant la complexité et l'urgence de répondre à ces enjeux globaux. Elles ont fait l'objet d'études approfondies au cours des dernières décennies, car ces deux composantes sont fondamentales pour comprendre les effets sociaux, économiques, environnementaux et politiques du changement climatique et pour établir des politiques efficaces en vue de leur atténuation. Dans les sous-sections suivantes, nous explorerons différents concepts, y compris la vulnérabilité climatique, l'adaptation, la capacité d'adaptation et la préparation à l'adaptation au changement climatique.

I.2.1. Vulnérabilité

1) Définition de la vulnérabilité

Dans la littérature, la définition de la vulnérabilité varie en fonction de son application, conduisant au développement de diverses approches d'évaluation et à de nombreuses tentatives de simplification du concept. La signification du concept ne fait pas l'objet d'un consensus fort (Amegavi et al., 2021).

Pour Busby et al. (2013), la vulnérabilité est souvent définie comme la probabilité de subir des pertes de vies et de moyens de subsistance. Bankoff et al. (2010) soutient que la vulnérabilité dans les organisations sociales peut être comprise comme une capacité réduite à s'adapter ou à s'ajuster à certaines circonstances environnementales. La résilience, d'autre part, est l'opposé de la vulnérabilité, se référant au degré auquel les nations, communautés, familles et individus peuvent se protéger des pertes ou, au minimum, répondre rapidement aux urgences et s'en remettre, minimisant ainsi les dommages à long terme et la perte de vies (Busby et al., 2013).

Pour Adger (2006) et Smit & Wandel (2006), la vulnérabilité est liée à la sensibilité d'un système et à son exposition aux facteurs de stress ou chocs externes, ainsi qu'à sa capacité à s'adapter à ces défis. De manière similaire, la définition de la vulnérabilité que nous allons adopter dans le cadre de cette recherche est conforme à celle proposée par le *GIEC*. Selon le *GIEC*, la vulnérabilité fait référence au degré de susceptibilité d'un système aux impacts négatifs du changement climatique, incluant la variabilité climatique et les événements extrêmes. Elle est influencée par divers facteurs tels que la nature, l'intensité et le rythme du changement climatique et des variations auxquelles un système est exposé, ainsi que par sa sensibilité et sa capacité d'adaptation (Barnett, 2020).

Cette définition implique que les facteurs de stress liés au changement climatique de même magnitude peuvent avoir des effets variés dans différentes zones géographiques en raison de vulnérabilités sous-jacentes distinctes (Gloire, 2023).

2) Les déterminants de la vulnérabilité

La littérature met en évidence plusieurs facteurs contribuant à la vulnérabilité face au changement climatique. Ces facteurs englobent des aspects sociaux (tels que la pauvreté et les inégalités selon le genre ou le groupe social), des aspects économiques (tels que la dépendance aux secteurs sensibles au climat), des aspects environnementaux (incluant la localisation géographique et la biodiversité) et des aspects institutionnels (comme la gouvernance, l'accès aux ressources et la capacité de planification et de mise en œuvre) (NAP-DRC, 2021; Theokritoff et al., 2023)

De plus, la littérature souligne que la vulnérabilité n'est pas uniformément répartie et que certains groupes et régions sont confrontés à des niveaux de vulnérabilité plus élevés. La vulnérabilité est influencée par l'intersection des identités sociales (telles que l'âge, le genre, l'ethnicité et le statut socio-économique). Les nations en développement, les communautés marginalisées et les petits États insulaires sont souvent reconnus comme étant particulièrement susceptibles à la vulnérabilité en raison de leurs ressources limitées, de leur exposition élevée aux risques climatiques et de leur faible capacité d'adaptation (Twecan et al., 2022).

3) Les concepts d'exposition et de sensibilité dans la vulnérabilité au changement climatique

Pour appréhender la vulnérabilité au changement climatique d'un lieu spécifique, les chercheurs suggèrent d'examiner des concepts connexes tels que l'exposition et la sensibilité. L'exposition renvoie au degré de stress subi par la société humaine et ses secteurs sous-jacents en raison des changements climatiques à venir. Ce concept englobe les facteurs physiques externes qui contribuent à la vulnérabilité en dehors du système (Chen et al., 2024), tels que les saisons de pluies courtes, les températures maximales élevées ou la montée du niveau de la mer (IPCC, 2001 ; Garderen & Ludwig, 2012). Néanmoins, l'impact de ces changements dépend de la sensibilité de la région à une telle exposition. Par exemple, un pays enclavé n'est pas exposé au risque de montée du niveau de la mer. La sensibilité démontre l'ampleur de l'impact, c'est-à-dire le degré auquel les individus et les secteurs sur lesquels ils comptent subissent des impacts liés aux perturbations climatiques (Garderen & Ludwig, 2012 ; Chen et al., 2024).

Les facteurs qui amplifient la sensibilité englobent l'étendue de la dépendance aux secteurs sensibles au climat et la proportion de populations susceptibles aux dangers climatiques en raison de facteurs tels que la topographie et la démographie. Une faible sensibilité indique un impact minime, tandis qu'une sensibilité élevée entraîne un impact majeur. Certains secteurs, tels que l'agriculture, sont très sensibles aux variations de précipitations. Un lieu est considéré comme étant à risque s'il manque de capacité d'adapter ses systèmes aux effets de ces changements (Garderen & Ludwig, 2012 ; Chen et al., 2024).

Une bonne compréhension des notions de vulnérabilité au changement climatique offre la possibilité de renforcer la préparation des pays à pouvoir atténuer les impacts des risques climatiques. Ainsi, l'adaptation émerge comme un pilier fondamental à la fois dans les stratégies globales et locales visant à réduire la vulnérabilité des populations face au changement climatique et à ses conséquences (Amegavi et al., 2021). Nous explorons cette notion d'adaptation au changement climatique dans la sous-section suivante.

I.2.2. L'adaptation au changement climatique

1) Définition du concept d'adaptation

L'adaptation peut être définie comme étant le processus d'ajustement des systèmes écologiques, sociaux ou économiques en réponse aux stimuli climatiques existants ou anticipés ainsi qu'à leurs effets ou impacts (IPCC, 2001). Ce terme englobe les modifications dans les processus, les pratiques ou les structures visant à atténuer ou compenser les dommages potentiels ou à saisir les opportunités associées au changement climatique (IPCC, 2001). Il s'agit de mettre en œuvre des ajustements pour réduire la vulnérabilité des communautés, des régions ou des activités face aux changements et à la variabilité climatique. Cela signifie que les pays et les communautés doivent élaborer des stratégies d'adaptation et prendre des mesures pour résoudre à la fois les impacts actuels et futurs du changement climatique (UNFCCC, 2023).

2) Capacité d'adaptation

La capacité d'adaptation fait référence à la possibilité qu'a un système de pouvoir modifier ses propriétés ou son comportement afin de faire face à la variabilité climatique actuelle ou prévue. L'adaptabilité d'un système peut se manifester par l'augmentation de sa capacité à faire face aux défis climatiques, ce qui réduit sa vulnérabilité aux risques climatiques. Le potentiel adaptatif inhérent d'un système est constitué des *ressources disponibles pour l'adaptation et de l'efficacité avec laquelle le système utilise ces ressources* pour mener des tentatives d'adaptation (Lim et al., 2004) ou de *la manière dont un système peut mobiliser un ensemble de ressources pouvant être facilement déployées pour faire face aux impacts du changement climatique spécifiques à un secteur* (Chen et al., 2024).

En termes de vulnérabilité et de processus d'adaptation au changement climatique, la notion de *capacité d'adaptation* est très importante (Garderen & Ludwig, 2012). Elle est influencée par plusieurs facteurs tels que la prospérité économique, l'infrastructure et la technologie, l'équité, les connaissances et compétences, les institutions et les services. Une faible capacité d'adaptation est fréquemment corrélée à un accès limité aux ressources, à une infrastructure inadéquate, aux inégalités sociales, à un manque de connaissances et de technologie et à un soutien institutionnel insuffisant. En revanche, une capacité d'adaptation élevée se caractérise par des grandes ressources financières, une infrastructure bien développée, un accès

équitable aux ressources et aux opportunités, des cadres institutionnels solides et une base de connaissances bien établie. Ces facteurs facilitent des réponses et des adaptations efficaces au changement climatique. Toutefois, il est important de noter que des facteurs tels que les conflits, les migrations forcées et le faible respect de la loi peuvent réduire considérablement la capacité d'adaptation d'un pays ou d'une région (Garderen & Ludwig, 2012 ; United Nations Environment Programme, 2009).

3) La préparation à l'adaptation au changement climatique

La notion de préparation peut être définie comme « l'état d'être pleinement prêt pour quelque chose » ou « ayant la disposition à agir » (Ford et al., 2017). Elle a été largement utilisée dans des disciplines telles que la gestion d'entreprise, la psychologie et l'éducation pour comprendre la préparation au changement, où la préparation est définie comme la *capacité à saisir les opportunités présentées par le changement* (Ford et al., 2017).

La préparation à l'adaptation se concentre sur l'identification et la caractérisation de ce qui est réellement fait pour se préparer à l'adaptation, en mettant l'accent sur la force et l'existence des structures de gouvernance qui déterminent la préparation à soutenir l'action d'adaptation et à développer, mettre en œuvre et surveiller efficacement les interventions d'adaptation (Ford & King, 2015).

Les travaux de Ford et King (2015) montrent que la préparation à l'adaptation se concentre sur l'identification et la caractérisation de ce qui est fait pour se préparer à l'adaptation. Ils mettent l'accent sur l'existence et la robustesse des structures de gouvernance qui déterminent la préparation à accumuler un soutien pour les actions d'adaptation et à développer, mettre en œuvre et évaluer efficacement les interventions d'adaptation. En d'autres termes, la préparation à l'adaptation est la mesure dans laquelle les structures de gouvernance et les processus politiques déterminent comment, quand et si l'adaptation a lieu (Ford & King, 2015). Elle soutient l'adaptation en abordant les problèmes spécifiques au contexte et en facilitant la transition du potentiel à l'action (Smith et al., 2009).

4) Stratégies d'adaptation au changement climatique

Il n'existe pas des stratégies universelles pour s'adapter aux effets du changement climatique. Selon Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC, 2023), les stratégies d'adaptation au changement climatique sont déterminées par le contexte

spécifique d'une communauté, d'une entreprise, d'une organisation, d'une nation ou d'une région. Dans la littérature, de nombreuses stratégies d'adaptation ont été analysées. Ces stratégies comprennent des mesures préventives telles que les systèmes d'alerte précoce, des réponses réactives comme les efforts de récupération post-catastrophe, des solutions technologiques visant à améliorer les infrastructures, des interventions politiques telles que les plans d'adaptation au changement climatique, et des approches communautaires impliquant des connaissances locales et des processus participatifs (Obsi Gameda et al., 2023).

Néanmoins, les limites de nombreuses initiatives et stratégies d'adaptation traditionnelles ont été reconnues au fil du temps, incitant les chercheurs à mettre aujourd'hui l'accent sur l'importance de la transformation et du changement systémique. Historiquement, les efforts se sont souvent appuyés sur des "solutions techniques", entraînant des progrès d'adaptation incrémentaux. Mais la littérature actuelle préconise de se concentrer sur les causes fondamentales de la vulnérabilité, tout en promouvant simultanément un développement durable et équitable, pour traiter efficacement la vulnérabilité (Fedele et al., 2019).

Ayant déjà une compréhension de la vulnérabilité, de l'adaptation, la préparation à l'adaptation climatique, et de la capacité d'adaptation, il est utile à ce niveau de conceptualiser un cadre pouvant nous aider à examiner le nexus entre la vulnérabilité et la préparation à l'adaptation.

I.2.3. Cadre conceptuel et approches pour la vulnérabilité et la préparation à l'adaptation au changement climatique

I.2.3.1. Les approches d'évaluation de l'adaptation.

Plusieurs approches ont été utilisées dans la littérature pour évaluer l'état et le besoin en matière d'adaptation au changement climatique. Selon Ford et al. (2017), elles peuvent être divisées en trois approches : *l'approche basée sur la capacité d'adaptation*, *l'approche basée sur les obstacles* et *l'approche axée sur la préparation à l'adaptation* au changement climatique.

a) L'approche basée sur la capacité d'adaptation

L'approche basée sur la capacité d'adaptation implique des analyses de diverses dimensions, notamment sociales, politiques, économiques, techniques et institutionnelles. Ces analyses visent à déterminer dans quelle mesure un système peut s'adapter au changement. Cependant, avoir une capacité d'adaptation élevée ne garantit pas la conception et la mise en œuvre de politiques, de programmes et d'actions d'adaptation (Adger & Barnett, 2009 ; Ford et al., 2017). Comme le rappellent Adger et Barnett (2009), dire qu'un pays peut s'adapter au changement climatique n'implique pas nécessairement qu'il le fera. Par exemple, les États-Unis estimaient que leur économie peut faire face aux impacts du changement climatique et s'adapter sereinement. Cependant, les efforts des organismes publics et privés responsables de l'adaptation ont été insuffisants. Dans certains cas, comme la préparation aux tempêtes à New York, les codes de construction et les cartes des risques d'inondation sont basés sur les risques passés et actuels, et non sur les risques projetés pour l'avenir. Cette approche s'est avérée inadéquate en Louisiane et Nouvelle-Orléans lors de l'ouragan Katrina en août 2005 (Adger & Barnett, 2009). De plus, la capacité d'adaptation fournit des informations limitées sur la probabilité et le moment où l'adaptation se produira (Ford et King, 2015).

b) L'approche basée sur les obstacles

D'autres efforts de recherche ont cherché à identifier les contraintes à l'adaptation et les solutions potentielles. Selon Biesbroek et al. (2015), cette approche suppose que les décisions collectives aux niveaux national, régional et local devraient automatiquement conduire à des actions climatiques adaptées. Cependant, cette vision simplifie excessivement les processus décisionnels complexes en les réduisant à des modèles d'entrée-sortie, où des facteurs comme le manque de ressources ou de volonté sont souvent perçus comme les principaux obstacles à l'adaptation (Biesbroek et al., 2015).

Ainsi, cette approche basée sur les obstacles néglige les dynamiques internes et les processus sociaux, politiques et culturels qui influencent réellement la prise de décision. Les recherches récentes soulignent qu'une telle vision ne permet pas de comprendre la complexité des processus décisionnels, limitant ainsi l'efficacité des politiques d'adaptation. Pour des interventions plus efficaces, il est crucial de prendre en compte des facteurs dynamiques et

contextuels, tels que les luttes de pouvoir, l'apprentissage social, et la légitimité, plutôt que de se focaliser sur des obstacles statiques et réducteurs (Biesbroek et al., 2015).

En revanche, un autre ensemble de travaux s'est consacré à la documentation et à l'analyse d'exemples concrets d'actions d'adaptation (Chen et al., 2016 ; Ford et al., 2017). Cette étude a été cruciale pour jeter les bases de l'exécution pratique des stratégies d'adaptation. Néanmoins, elle a été limitée dans la mesure où elle a capturé les éléments de gouvernance et institutionnels plus vastes qui définissent et influencent le niveau d'opportunités et de restrictions en matière d'adaptation (Ford et al., 2017). En réponse à ces limitations, le concept de préparation à l'adaptation a été proposé comme une approche alternative.

c) L'approche axée sur la préparation à l'adaptation au changement climatique

L'approche axée sur la préparation à l'adaptation va au-delà de la simple reconnaissance de la capacité d'adaptation et des obstacles à l'adaptation. Au lieu de cela, elle évalue la probabilité d'une adaptation réussie en déterminant dans quelle mesure les structures de gouvernance et les processus politiques sont bien préparés à favoriser la prise de décision adaptative et le changement. En identifiant des domaines d'intervention spécifiques et en comprenant les facteurs qui contribuent aux cadres institutionnels adaptatifs, cette approche vise à permettre des actions d'adaptation efficaces et opportunes. Ses forces résident dans sa praticabilité, sa spécificité contextuelle et son accent sur des mesures concrètes pour améliorer la préparation au changement climatique et la résilience (Khan & Amelie, 2015; Tilleard & Ford, 2016; Ford et al., 2017).

C'est le cas par exemple de la ville de Rotterdam, aux Pays-Bas, qui a développé un document de stratégie de résilience pour la période 2022-2027 afin de se préparer aux opportunités et défis futurs liés au changement climatique. Cette stratégie anticipe sept crises majeures, incluant le climat, la biodiversité, la pollution/épuisement des ressources naturelles, l'inégalité, la cybersécurité, la santé, ainsi que des crises potentielles et inconnues. Elle est structurée autour de sept thèmes de résilience : la résilience climatique, écologique, énergétique, numérique, sociale, économique et institutionnelle (The Municipality of Rotterdam, 2022).

De même, après des événements extrêmes comme l'ouragan Katrina aux Etats-Unis, les codes de construction dans les zones à risque ont été révisés pour inclure des normes de construction

plus strictes adaptées aux projections de risques climatiques futurs. Selon la Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2020), ces codes aident les communautés à mieux se préparer, atténuer, répondre et se remettre des dangers naturels. Investir dans des stratégies de mitigation, telles que l'adoption des codes de construction internationaux, s'avère économiquement bénéfique. Il est estimé que chaque dollar investi permet d'économiser 11 dollars en coûts futurs (NIBS, 2019 ; cité par FEMA, 2020). En plus, la base de données de l'étude de la FEMA sert de ressource pour des programmes de préparation et de mitigation, s'appliquant à divers niveaux gouvernementaux (FEMA, 2020).

I.2.3.2. Cadre conceptuel d'évaluation de la préparation à l'adaptation au changement climatique.

Dans le domaine émergent de la recherche sur la préparation à l'adaptation, les chercheurs se sont concentrés sur deux cadres conceptuels principaux.

a) Cadre conceptuel de Ford et King (2015)

Ford et King (2015) ont examiné le contexte politique au sens large et ont proposé un cadre d'évaluation en six composantes pour la préparation à l'adaptation au changement climatique :

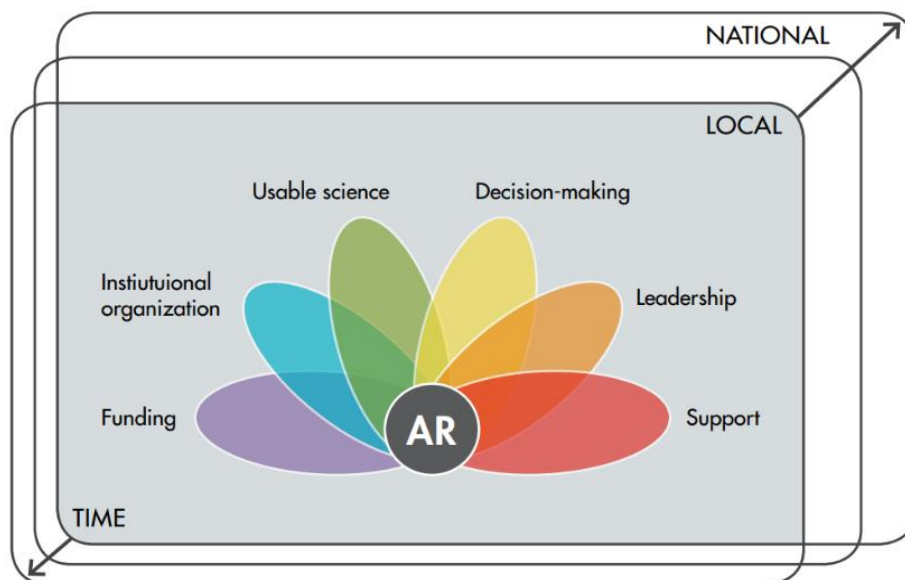


Figure 1 : Composantes de la préparation à l'adaptation (Ford et King, 2015)

Ces composantes comprennent le financement de l'adaptation, l'organisation institutionnelle, la recherche sur l'adaptation (« usable science »), les techniques de prise de décision

appropriées, le leadership politique et la participation des parties prenantes (« support ») (Amegavi et al., 2021) (figure 1).

Bien que ce cadre offre un outil conceptuel utile pour évaluer la préparation à l'adaptation au changement climatique, il présente certaines limites. Par exemple, sa dépendance aux données qualitatives rend difficile la quantification et la comparaison des niveaux de préparation à travers les régions ou les nations. Ceci peut entraver la priorisation efficace des efforts et l'allocation des ressources lors du processus de planification de l'adaptation.

D'autres chercheurs ont défini la préparation comme la capacité à utiliser efficacement les investissements pour l'adaptation (Chen et al., 2016). Le cadre analytique qui a émergé ici est celui proposé par l'université de Notre Dame (ND-GAIN), que nous utiliserons également dans le cadre de ce mémoire. La particularité de ce cadre est qu'il évalue à la fois la vulnérabilité et la préparation à l'adaptation au changement climatique (Chen et al. 2024). De plus, sa base des données est disponible publiquement en ligne.

b) Le cadre conceptuel de Notre Dame Global Adaptation Initiative (ND-GAIN)

Le cadre ND-GAIN est intéressant car il divise d'une part l'évaluation de la vulnérabilité en exposition, sensibilité et capacité d'adaptation, et d'autre part il décompose la préparation en composantes économiques, sociales et de gouvernance. De plus, ce cadre a été construit en s'inspirant de la littérature examinée par des pairs et le processus d'examen du GIEC et les contributions des parties prenantes des entreprises, des praticiens et des acteurs du domaine de développement (Chen et al. 2024).

À l'exception des indicateurs d'exposition, la majorité des mesures de vulnérabilité et de préparation sont *actionnables*, ce qui signifie qu'elles représentent des actions qui peuvent être entreprises par les gouvernements nationaux, les communautés, les organisations de la société civile, les organisations non gouvernementales et d'autres parties prenantes (Chen et al. 2024).

Un ensemble de quarante-cinq indicateurs mesurant la préparation et la vulnérabilité de chaque pays a été créé en intégrant soixante-quatorze variables différentes. Le résultat obtenu est adapté aux comparaisons annuelles et interpays (Chen et al. 2024).

Le tableau 2 présente un résumé des indicateurs de vulnérabilité aux changements climatiques. L'indice de vulnérabilité aux changements climatiques a été calculé en agrégeant 36 variables. Ces variables ont été sélectionnées dans les six secteurs suivants : santé, alimentation, eau, infrastructures, services écosystémiques et habitat humain. Six indicateurs, représentant chacun l'une de ces six variables sectorielles, ont été créés à partir des trois éléments transversaux d'exposition, de sensibilité et de capacité d'adaptation (Chen et al., 2024).

Tableau 2 : Les indicateurs de vulnérabilité au changement climatique classés en exposition, sensibilité et capacité d'adaptation.

Secteur	Composante d'exposition	Composante de sensibilité	Composante de capacité d'adaptation
Santé	Changement projeté des décès dus aux maladies induites par le changement climatique (mesure l'impact du changement climatique sur plusieurs types de maladies, exclut la malaria)	Dépendance aux ressources externes pour les services de santé	Personnel médical (infirmières, médecins, sage-femmes)
	Changement projeté de la durée de transmission des maladies vectorielles (ici nombre estimé de cas de malaria par 1000 habitants par mois selon l'OMS)	Part de la population vivant dans des bidonvilles	Accès à des installations sanitaires appropriées
Alimentation	Changement projeté dans les rendements céréaliers en 2100	Dépendance aux importations alimentaires	Capacité agricole (utilisation d'engrais, irrigation, pesticides, utilisation de tracteurs)
	Changement projeté de la population en 2050	Proportion de la population rurale	Malnutrition des enfants
Eau	Changement projeté de la recharge annuelle des eaux souterraines en 2050	Taux de prélèvement d'eau douce	Capacité des barrages

	Changement projeté du ruissellement annuel en 2050	Ratio de dépendance à l'eau	Accès à une eau potable fiable
Habitat humain	Changement projeté des périodes chaudes en 2050	Concentration urbaine (Niveau d'urbanisation et la répartition de la population urbaine dans les grandes villes (750 000 habitants ou plus)	Qualité des infrastructures liées au commerce et au transport
	Changement projeté des risques d'inondation (mesuré par les précipitations maximales prévues sur 5 jours consécutifs dans un mois)	Ratio de dépendance à l'âge (Part de la population en dessous de 14 et/ou au-delà de 65 ans)	Proportion des routes pavées (reflète aussi la capacité d'un pays à améliorer ses infrastructures de transport, notamment en milieu rural)
Infrastructure	Changement projeté de la capacité de production d'hydroélectricité en 2100	Dépendance à l'énergie importée	Part de la population ayant accès à l'électricité du réseau public
	Projection des impacts de l'élévation du niveau de la mer en 2100	Part de la population vivant à une altitude de 5 m ou moins, indicatif des risques côtiers	Préparation aux catastrophes mesurée par l'ODD 13.1.2
Services écosystémiques	Changement projeté de la distribution des domaines bio-climatiques (biomes) à la fin de 2100	Dépendance au capital naturel (inclut les cultures, les pâturages, les forêts (bois et non-bois) et les zones protégées, mais exclut les ressources sous-sol, comme le pétrole, le gaz et les minerais)	Biomes protégés (Mesure de la protection de 17% de chaque biome terrestre, pondérée par sa contribution nationale)
	Changement projeté de la biodiversité marine (espèces marines) exploitée dans un pays d'ici 2050	Empreinte écologique (nombre d'hectares de terres et d'eaux, à l'intérieur et à l'extérieur du pays, nécessaire pour répondre aux besoins de la population en services écosystémiques)	Engagement dans des conventions environnementales mondiales

Source: Chen et al. 2024

En plus de la vulnérabilité, l'indice de préparation à l'adaptation a été développé à partir de la sélection de neuf indicateurs, classés en trois dimensions sous-sectorielles : sociale, économique et gouvernance (Chen et al., 2024). Le tableau 3 donne un aperçu des constituants des trois composantes de la préparation.

Tableau 3: Composantes et indicateurs de la préparation pour atténuer les impacts du changement climatique.

Variables	Composantes			
Préparation économique	Doing business (Capacité des pays à attirer des investissements pour l'adaptation au changement climatique à travers 10 domaines : création d'entreprise, permis de construire, accès à l'électricité, enregistrement de la propriété, obtention de crédit, protection des investisseurs, fiscalité, commerce international, exécution des contrats, et résolution des faillites).			
Préparation sociale	Inégalités sociales (part du quintile le plus pauvre dans le revenu ou la consommation nationale)	Infrastructure des TIC (abonnements mobiles et fixes, abonnements au haut débit fixe pour 100 personnes et pourcentage d'utilisateurs d'internet.)	Education (taux d'inscription dans l'enseignement supérieur)	Innovation (Nombre de demandes de brevet par habitant)
Préparation de la gouvernance	Stabilité politique et non-violence	Contrôle de la corruption	Qualité des réglementations	État de droit

Source: Chen et al. 2024

Ce tableau 3 fournit une liste des composantes et des indicateurs de la préparation pour atténuer les impacts du changement climatique. La préparation économique est caractérisée par la capacité à mener des affaires dans un environnement affecté par le changement climatique. Elle est définie comme étant la capacité d'une nation à attirer des investissements pour l'adaptation au climat (Chen et al., 2024).

La préparation sociale se réfère à l'exploitation des conditions sociales, comprenant la lutte contre les inégalités, l'éducation, l'infrastructure des technologies de l'information et de la communication (TIC), ainsi que l'innovation, dans le but de permettre à la société de tirer parti de manière équitable et efficace des investissements, conduisant ainsi à des résultats d'investissement plus favorables. Il est communément admis que les inégalités sociales

réduisent la capacité des populations marginalisées à s'adapter aux risques climatiques (Wang et al., 2020 ; Adger, 2006).

A l'inverse, l'innovation joue un rôle crucial dans le renforcement des capacités et la croissance, car elle influence les stratégies d'adaptation (Tilleard & Ford, 2016 ; Smit & Wandel, 2006). De surcroît, le développement de l'infrastructure des TIC facilite l'intégration des connaissances (Amegavi et al., 2018) et la transmission d'informations, éléments essentiels à une adaptation réussie (Bellamy, 2019). Ainsi, les inégalités sociales, le faible taux d'alphabétisation, l'insuffisance de l'infrastructure des TIC et le déficit de recherche et d'innovation entravent la capacité d'un pays à faire face aux risques climatiques (Amegavi et al., 2021).

Enfin, la préparation de la gouvernance se concentre sur des éléments tels que la stabilité politique, l'absence de violence, le contrôle de la corruption, l'application de l'état de droit et la qualité des réglementations, tous essentiels pour une réponse efficace et coordonnée au changement climatique. Autrement dit, la préparation gouvernementale renvoie aux structures institutionnelles et sociétales soutenant les investissements dans des solutions d'adaptation au climat (Chen et al., 2024). Selon des études antérieures (Ford & King, 2015 ; Moser & Ekstrom, 2010 ; Amegavi et al., 2021), les pays dotés de régimes institutionnels et réglementaires solides sont généralement mieux préparés à faire face aux préoccupations liées au changement climatique. Ainsi, ces structures de gouvernance fournissent les cadres et les mécanismes nécessaires pour faciliter les efforts d'adaptation.

I.2.4. Revue de la littérature empirique

Dans cette section, notre objectif est de présenter un examen approfondi des études disponibles sur la vulnérabilité et la préparation à l'adaptation. Nous avons examiné des publications académiques, des articles évalués par des pairs, des rapports et des documents politiques publiés entre 2000 et 2024. Ces articles comprenaient des études en anglais et en français. Les recherches ont été menées en utilisant des bases de données académiques telles que Web of Science, Google Scholar, les publications SAGE, Science Direct et la revue Sustainability.

Les critères de recherche incluaient "changement climatique", "vulnérabilité", "adaptation", "capacité d'adaptation" et "préparation à l'adaptation", ainsi que des combinaisons de ces

termes. Les études directement pertinentes à ces questions ont été prises en compte, tandis que les études non pertinentes ou exploratoires qui n'avaient aucun lien clair avec les catégories définies ont été éliminées. Ceci a permis la capture des recherches récentes ainsi que la prise en considération de l'évolution du domaine au fil du temps.

Sarkodie et al. (2022) examinent la préparation à l'adaptation mondiale et le revenu pour faire face aux vulnérabilités sectorielles au changement climatique telles que les services écosystémiques, l'alimentation, la santé, l'habitat humain, l'infrastructure et l'eau. Leurs conclusions, peu surprenantes, indiquent que les économies à revenu élevé dotées d'une forte préparation sont moins vulnérables, tandis que les pays en développement à faible revenu sont plus exposés et sensibles.

De même, Sarkodie et Strezov (2019) évaluent la relation entre la vulnérabilité au changement climatique et la capacité d'adaptation dans les 192 nations membres de l'ONU. À l'aide de modèles de cartographie et de données de panel, cette étude conclut que l'Afrique est le continent le plus vulnérable, en raison de sa grande sensibilité et exposition, ainsi que de son faible potentiel d'adaptation. En comparaison, les pays industrialisés tels que la Norvège, la Suisse, le Canada, la Suède, le Royaume-Uni, la Finlande, la France, l'Espagne et l'Allemagne sont moins vulnérables au changement climatique en raison de leurs fortes capacités économiques, de gouvernance et d'adaptation sociale.

Tilleard et Ford (2016) comparent la préparation à l'adaptation et la capacité d'adaptation dans les pays développés et en développement. Ils constatent que, tandis que certains pays en développement disposent d'une grande capacité d'adaptation, leur préparation à l'adaptation est entravée par des institutions inadéquates, un manque de volonté politique et de leadership. Des institutions efficaces et un engagement politique sont nécessaires pour traduire le potentiel de capacité d'adaptation en stratégies d'adaptation réalisables. Dans la même perspective que Tilleard et Ford (2016), Raworth (2007) montre dans une étude axée sur l'Afrique, que la capacité des pays à s'adapter aux menaces du changement climatique dépend principalement de la préparation des institutions responsables des politiques et stratégies en matière de changement climatique.

Epule et al. (2021) ont utilisé l'Indice ClimAdaptCap pour évaluer la préparation de l'Afrique à l'adaptation au changement climatique. Leurs conclusions indiquent que l'Afrique du Nord et

l'Afrique australe sont les régions les mieux préparées à l'adaptation au changement climatique, tandis que l'Afrique de l'Ouest est la moins préparée, et que l'Afrique centrale et l'Afrique de l'Est se situent quelque part entre ces extrêmes.

De même, Amegavi et al. (2021) ont fait une analyse de régression pour examiner l'impact de la préparation à l'adaptation sur la vulnérabilité au changement climatique dans 51 nations africaines entre 1995 et 2018. Les résultats montrent qu'une plus grande préparation à l'adaptation est associée à une moindre vulnérabilité au changement climatique dans la région. L'étude constate également que l'Afrique centrale est la sous-région la plus vulnérable, avec une forte exposition, une sensibilité élevée et une capacité d'adaptation limitée, tandis que l'Afrique australe et l'Afrique du Nord sont les moins vulnérables du sous-continent.

Garcia & Adriatico (2022) explorent la notion de résilience climatique et identifient six variables comme composantes essentielles qui aideront à évaluer où le pays a besoin d'un renforcement supplémentaire pour être résilient face au climat. Leur étude utilise une analyse en composantes principales pour condenser ces six facteurs en une seule composante. La Norvège, le Luxembourg, la Suisse, Singapour et le Danemark sont plus résilients face au climat que le reste du monde, en raison de leur PIB élevé, de leur facilité de faire des affaires, de leur préparation gouvernementale et de leur préparation sociale. En revanche, le Zimbabwe est l'un des pays les moins résilients face au climat en raison d'une gouvernance et d'une préparation sociale inadéquates, ainsi que de sa grande vulnérabilité.

Garschagen et al. (2021) réalisent une analyse approfondie et une comparaison de quatre indices mondiaux parmi les plus utilisés concernant le climat et le risque de catastrophe que nous avons présenté plus haut : le WRI, INFORM, ND-GAIN et le CRI. Leur étude révèle une variation significative entre ces indices en ce qui concerne les niveaux de risque des pays et leurs classements comparatifs, bien qu'il existe un niveau de consensus considérable pour les pays à haut risque climatique. De manière plus spécifique, il y a peu de consensus parmi les résultats concernant l'exposition aux risques, tandis que des corrélations fortes émergent entre les indices lors du classement des pays en fonction de leur vulnérabilité socio-économique et de leur capacité à faire face et à s'adapter au changement climatique. Leurs résultats révèlent à la fois les avantages et les limites des approches par indices, en insistant sur la nécessité d'une bonne compréhension de leurs bases conceptuelles et méthodologiques

pour une bonne utilisation et une interprétation des résultats dans une démarche de triangulation.

Contrairement aux études antérieures dans ce domaine, ce mémoire va se focaliser sur la relation entre la vulnérabilité et la préparation à l'adaptation au changement climatique au niveau mondial, en utilisant une nouvelle méthode de construction d'indice qui emploie l'analyse en composantes principales pour réduire les variables de vulnérabilité et de préparation, respectivement, en une seule composante.

CHAPITRE II. DONNEES ET METHODOLOGIE

Dans ce chapitre, nous détaillons les sources de données utilisées ainsi que la méthodologie appliquée pour évaluer la vulnérabilité et la préparation des pays face au changement climatique. Les données sont issues de la base des données ND-GAIN. Elles seront analysées à l'aide de techniques statistiques, dont l'ACP. Comme indiqué précédemment, l'objectif est de comparer les résultats obtenus avec le nouvel indicateur développé à ceux du ND-GAIN à l'échelle internationale. En parallèle, il s'agit d'identifier les secteurs qui contribuent le plus à la vulnérabilité et à la préparation à l'adaptation, afin d'approfondir la compréhension des mécanismes sous-jacents. Après avoir exposé la source des données, nous présenterons la procédure de calcul des scores du ND-GAIN, suivi de l'application de l'ACP pour la construction du nouvel indicateur.

II.1. Source des données

Les données utilisées proviennent de la base de données ND-GAIN (Chen et al., 2024), un projet de recherche de l'université de Notre-Dame. Cette base compile des informations issues de sources fiables telles que des agences gouvernementales, des organisations internationales, des institutions académiques et des publications scientifiques. Pour assurer la transparence et permettre la vérification des résultats, des liens vers les sources originales de données sont accessibles via la plateforme web ND-GAIN. Pour cette étude, les données sont collectées pour l'année 2022 et sont organisées selon des sous-ensembles pour chaque indicateur.

II.2. Méthodologie de calcul des scores du ND-GAIN : méthode d'origine

La procédure de calcul des scores ND-GAIN se déroule en sept étapes, illustrées dans la Figure 2 (Chen et al., 2024).

- 1. Sélection et collecte des données** : Les données brutes sont extraites de diverses sources ou calculées à partir de données de base par l'équipe de l'université de Notre Dame. Des erreurs de tabulation sont identifiées et corrigées à ce stade. Les

transformations nécessaires, comme la conversion des unités ou l'application d'une transformation logarithmique, sont effectuées ici.

2. **Gestion des données manquantes** : Les données manquantes pour certaines années ou certains pays sont comblées par interpolation linéaire. Si toutes les données manquent pour un pays, cet indicateur est exclu du calcul de la moyenne.
3. **Sélection des valeurs minimales et maximales** : Cette troisième étape peut être effectuée avant ou après la deuxième. On sélectionne les valeurs minimales et maximales des données brutes. Dans certains cas, la distribution des données brutes présente une forte asymétrie. Si la distribution est asymétrique, le 90e ou le 10e percentile est utilisé pour ajuster les extrêmes, respectivement pour une asymétrie à droite ou à gauche.
4. **Définition des points de référence** : Les points de référence représentent un état optimal. En d'autres termes, la meilleure performance qui reflète soit une absence totale de vulnérabilité, soit une préparation complète. Par exemple, pour la malnutrition infantile, le point de référence est de 0 %, et pour l'accès à l'eau potable, de 100 %. D'autres points sont fixés selon les pratiques d'adaptation ou de développement, ou issus des sources de données (cf. Rapport technique ND-GAIN 2024, page 39 à 42 pour plus des détails).

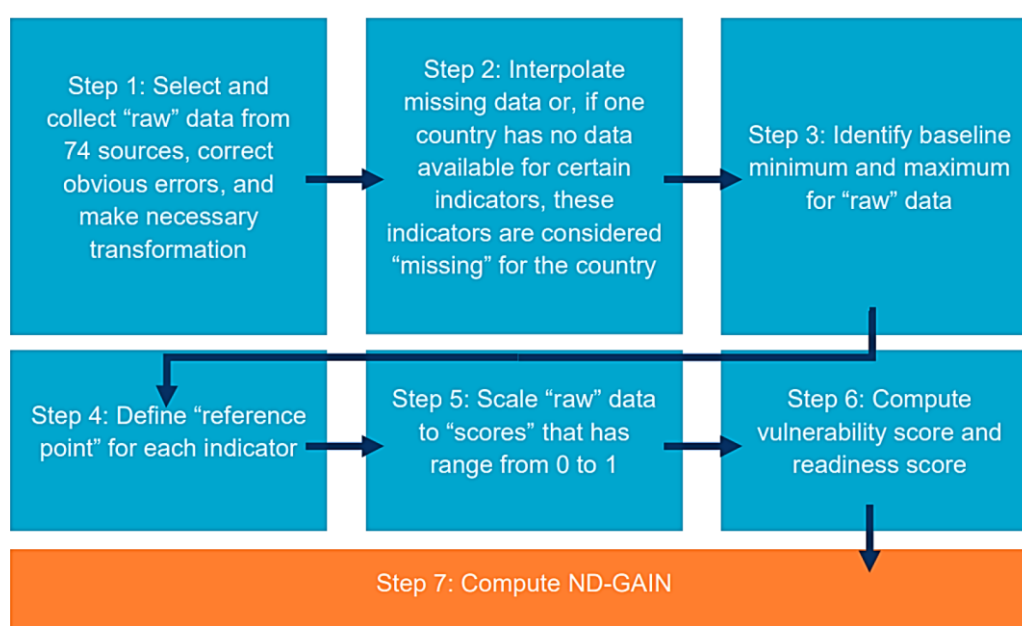


Figure 2 : Sept étapes pour créer le score ND-GAIN. Source : Chen et al. (2024)

- 5. Normalisation des données :** Les données brutes sont transformées en un score de 0 à 1 afin de faciliter les comparaisons. La formule suivante est utilisée :

$$\text{Score} = \left| \text{Direction} - \frac{\text{Données Brutes} - \text{Point de Référence}}{\text{Maximum de Référence} - \text{Minimum de de Référence}} \right|$$

Où le paramètre de "Direction" prend la valeur 0 pour les indicateurs de vulnérabilité et 1 pour les indicateurs de préparation. Un score de 1 dans l'indice de vulnérabilité climatique reflète un niveau de vulnérabilité plus élevé (plus grave) face aux effets du changement climatique. En parallèle, un score de 0 indique une vulnérabilité moindre (meilleur). Inversement, un score de 1 dans l'indice de préparation à l'adaptation indique une meilleure préparation pour atténuer les impacts du changement climatique, alors qu'un score de 0 signale une préparation insuffisante (Chen et al., 2024).

- 6. Calcul des scores globaux :** Le score de vulnérabilité est obtenu en calculant la moyenne arithmétique des six indicateurs sectoriels (santé, alimentation, eau, infrastructure, services écosystémiques et habitat humain), normalisés entre 0 et 1. Le score de préparation est calculé de la même manière à partir de trois indicateurs (économique, de gouvernance et social).
- 7. Calcul du score ND-GAIN :** Une fois les scores de vulnérabilité et de préparation calculés, le score ND-GAIN de chaque pays est obtenu en soustrayant le score de vulnérabilité du score de préparation. Toutefois, pour garantir une représentation standardisée, les scores sont normalisés sur une échelle de 0 à 100 à l'aide de la formule suivante (Chen et al., 2024) :

$$\text{Score ND} - \text{GAIN} = (\text{Score de Préparation} - \text{Score de Vulnérabilité} + 1) * 50$$

Les scores ND-GAIN sont généralement présentés sous forme d'une matrice appelée la « matrice ND-GAIN ». Il s'agit d'un outil visuel sous forme de diagramme de dispersion qui classe les pays en fonction de leur préparation et de leur vulnérabilité face au changement climatique (Figure 3). Elle permet de les comparer rapidement et de suivre leur progression dans le temps. La matrice est divisée en quatre quadrants, déterminés par les scores médians de vulnérabilité et de préparation (Chen et al., 2024) :

- a) Le quadrant rouge (en haut à gauche)** regroupe les pays avec une vulnérabilité élevée et une faible préparation. Ces pays ont un besoin urgent d'investissement pour améliorer leur préparation et adapter leurs politiques.
- b) Le quadrant jaune (en bas à gauche)** comprend les pays ayant une faible préparation et une faible vulnérabilité. Leur adaptation peut être limitée malgré une vulnérabilité relativement basse.

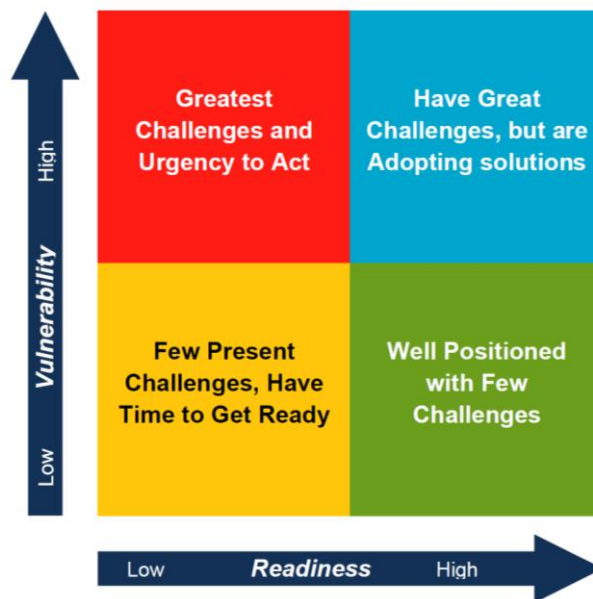


Figure 3. La matrice ND-GAIN, Source : Chen et al. (2024)

- c) Le quadrant bleu (en haut à droite)** contient les pays avec une haute vulnérabilité et une préparation élevée. Ils sont prêts à faire face aux défis du changement climatique et peuvent bénéficier d'une participation accrue du secteur privé.
- d) Le quadrant vert (en bas à droite)** regroupe les pays avec une faible vulnérabilité et une haute préparation. Bien que moins vulnérables, ces pays doivent continuer à adapter leurs politiques et sont bien positionnés pour le faire.

II.3. Calcul d'un nouvel indice à l'aide de l'analyse en composantes principales

L'ACP est une technique statistique multivariée permettant de sélectionner un sous-ensemble de variables qui conserve le maximum d'informations des données initiales. Elle identifie les structures dans les données, réduisant ainsi la dimensionnalité des ensembles de données tout en minimisant la perte d'information (Yu et al., 2021).

L'indice ND-GAIN, bien qu'efficace pour comparer les vulnérabilités et les capacités d'adaptation entre pays, présente certaines limites. C'est pourquoi dans le cadre de cette étude, l'ACP est utilisée pour affiner l'évaluation de la vulnérabilité et de la préparation à l'adaptation des pays face au changement climatique. L'ACP présente plusieurs avantages dans ce contexte :

- Premièrement, cette technique réduit la dimensionnalité des données tout en préservant les variables qui expliquent le plus de variance, ce qui permet de nous concentrer sur les facteurs les plus significatifs influençant la vulnérabilité et la préparation (Jolliffe & Cadima, 2016 ; Greyling & Tregenna, 2017).
- Deuxièmement, l'ACP prend en compte la multi-colinéarité entre les variables en transformant les variables corrélées en composantes principales non corrélées, améliorant ainsi la robustesse des indices (Abson et al., 2012).
- Troisièmement, contrairement à la méthode ND-GAIN qui attribue des poids égaux à tous les indicateurs, l'ACP pondère les variables en fonction de leur contribution statistique à la variance totale, offrant un schéma de pondération guidé par les données (Filmer & Pritchett, 2001).

II.3.1. Application de l'ACP dans cette étude

Pour appliquer l'ACP, nous utiliserons les mêmes ensembles d'indicateurs que ceux utilisés par le ND-GAIN. Il s'agit de 36 indicateurs de vulnérabilité couvrant six secteurs dont la santé, l'alimentation, l'eau, les infrastructures, les écosystèmes et l'habitat. En plus des indicateurs de la vulnérabilité, il y a aussi neuf indicateurs de préparation, couvrant les dimensions économiques, sociales et de gouvernance (Chen et al., 2024).

L'ACP dans cette recherche a été réalisée à l'aide du package *factomineR* sous R. Après l'importation des données dans R, la première étape de cette analyse a consisté en la gestion des données manquantes (Medina et al., 2020). Pour les indicateurs de vulnérabilité, le tableau suivant (Tableau 4) montre que certaines variables présentent un pourcentage élevé de valeurs manquantes, comme "Part de la population vivant dans des bidonvilles" (30,21%) et "Accès à des installations sanitaires appropriées" (32,29%), tandis que d'autres n'ont pas de données manquantes. En générale, 9,28% des données sont manquantes, ce qui suggère que l'ensemble reste relativement bien renseigné.

Tableau 4 : Proportion des données manquantes des indicateurs de vulnérabilité

Indicateurs	Noms des indicateurs	Valeurs manquantes	% valeurs manquantes
id_ecos_01	Changement projeté de la distribution des domaines bio-climatiques (biomes)	24	12,50
id_ecos_02	Changement projeté de la biodiversité marine	0	0,00
id_ecos_03	Dépendance au capital naturel	43	22,40
id_ecos_04	Empreinte écologique	15	7,81
id_ecos_05	Biomes protégés (Mesure de la protection de 17% de chaque biome terrestre, pondérée par sa contribution nationale.)	13	6,77
id_ecos_06	Engagement dans des conventions environnementales mondiales	0	0,00
id_food_01	Changement projeté dans les rendements céréaliers	3	1,56
id_food_02	Changement projeté de la population	5	2,60
id_food_03	Dépendance aux importations alimentaires	10	5,21
id_food_04	Proportion de la population rurale	0	0,00
id_food_05	Capacité agricole (utilisation d'engrais, irrigation, pesticides, utilisation de tracteurs)	4	2,08
id_food_06	Malnutrition des enfants	18	9,38
id_habi_01	Changement projeté des périodes chaudes	0	0,00
id_habi_02	Changement projeté des risques d'inondation	0	0,00
id_habi_03	Concentration urbaine et de la population urbaine	0	0,00
id_habi_04	Ratio de dépendance à l'âge (Part de la population en dessous de 14 et/ou au-delà de 65 ans)	0	0,00
id_habi_05	Qualité des infrastructures liées au commerce et au transport	24	12,50
id_habi_06	Proportion des routes pavées, inclus en milieu rural	12	6,25
id_heal_01	Changement projeté des décès dus aux maladies induites par le changement climatique	0	0,00
id_heal_02	Changement projeté de la période de transmission des maladies vectorielles	0	0,00
id_heal_03	Dépendance aux ressources externes pour les services de santé	15	7,81
id_heal_04	Part de la population vivant dans des bidonvilles	58	30,21
id_heal_05	Personnel médical (infirmières, médecins, sage-femmes)	1	0,52
id_heal_06	Accès à des installations sanitaires appropriées	62	32,29
id_infr_01	Changement projeté de la capacité de production d'hydroélectricité	67	34,90

id_infr_02	Projection des impacts de l'élévation du niveau de la mer	41	21,35
id_infr_03	Dépendance à l'énergie importée	44	22,92
id_infr_04	Part de la population vivant à une altitude de 5 m ou moins, indicatif des risques côtiers	0	0,00
id_infr_05	Part de la population ayant accès à l'électricité du réseau public	0	0,00
id_infr_06	Préparation aux catastrophes mesurée par l'ODD 13.1.2	57	29,69
id_wate_01	Changement projeté de la recharge annuelle des eaux souterraines	27	14,06
id_wate_02	Changement projeté du ruissellement annuel	14	7,29
id_wate_03	Taux de prélèvement d'eau douce	18	9,38
id_wate_04	Ratio de dépendance à l'eau	6	3,12
id_wate_05	Capacité des barrages	29	15,10
id_wate_06	Accès à une eau potable fiable	67	34,90
N = 192 par indicateur			

Par ailleurs, le pourcentage global des données manquantes est de 5,49% pour les indicateurs de préparation. Cependant, certaines variables pour les dimensions sociales présentent des taux élevés de valeurs manquantes. En revanche, les variables économiques et de gouvernance montrent un faible pourcentage de données manquantes comme le montre le tableau suivant (Tableau 5).

Tableau 5 : Proportion des données manquantes des indicateurs de vulnérabilité

Indicateurs	Noms des indicateurs	Valeurs manquantes	% valeurs manquantes
id_econ_01	Doing business	7	3,65
id_gove_01	Stabilité politique et non-violence	4	2,08
id_gove_02	Contrôle de corruption	4	2,08
id_gove_03	Qualité des réglementations	4	2,08
id_gove_04	Etat de droit	4	2,08
id_soci_01	Inégalités sociales	43	22,4
id_soci_02	Infrastructure des TIC	0	0
id_soci_03	Education	8	4,17
id_soci_04	Innovation	42	21,88
N = 192 par indicateur			

Dans le cadre de cette étude, ces données manquantes ont été traitées en utilisant la méthode d'imputation à l'aide de la fonction *imputePCA* du package *missMDA* (Audigier et al., 2012). Cette fonction permet d'imputer les données manquantes avant de réaliser toute analyse statistique (sur le jeu de données imputé) à l'aide d'un logiciel adapté comme FactoMineR (Audigier et al., 2012).

Par la suite, l'ACP a été réalisée sur les données normalisées. Cette standardisation est recommandée pour permettre des comparaisons entre les variables (Medina et al., 2020). La normalisation produit des variables ayant une moyenne de 0 et un écart-type de 1. Même lorsque les unités de mesure diffèrent, cette opération est généralement préférable car elle confère la même importance à chaque variable (Medina et al., 2020).

Le critère de Kaiser et Cattell via le graphique des valeurs propres a été utilisé pour déterminer le nombre optimal de composantes à retenir dans l'analyse. Après avoir déterminé le nombre optimal des composantes, la rotation *varimax* a été appliquée pour simplifier l'interprétation des facteurs en clarifiant la contribution de chaque variable aux composantes principales (Medina et al., 2020).

II.3.2. Comparaison avec les résultats de l'approche ND-GAIN

Après avoir appliqué l'ACP, les nouveaux scores de vulnérabilité et de préparation ont été comparés à ceux du ND-GAIN. Pour comparer les résultats obtenus avec l'ACP à ceux du ND-GAIN, le test de corrélation de Spearman a été utilisé pour évaluer la relation entre les scores de vulnérabilité et de préparation issus des deux approches. Un coefficient de corrélation proche de 1 indique une forte similarité entre les deux méthodes, tandis qu'un coefficient faible révèle des différences importantes dans la classification des pays (Odhiambo et al., 2021). De même, l'analyse des clusters a été réalisée pour vérifier si les regroupements de pays selon les deux approches concordent ou divergent (Odhiambo et al., 2021). Plus pragmatiquement, les pays ont été classés dans les quatre quadrants comme avec la matrice ND-GAIN de base et voir si les pays se trouvent bien dans les mêmes quadrants selon les deux méthodes.

CHAPITRE III. RESULTATS

Ce chapitre vise à présenter les résultats de l'analyse de la vulnérabilité et de la préparation à l'adaptation au changement climatique, en mettant en lumière les contributions spécifiques de différents secteurs. Les principaux objectifs consistent à : (i) identifier les secteurs contribuant le plus, soit à la vulnérabilité ou à la préparation et (ii) comparer les résultats obtenus à travers l'indice de vulnérabilité et de préparation que nous avons élaboré par l'ACP avec ceux de ND-GAIN. Nous commencerons par présenter les analyses descriptives des indicateurs de vulnérabilité et de préparation avant de passer à l'analyse et l'interprétation des résultats de l'ACP pour finir par la comparaison de ces derniers avec ceux de ND-GAIN.

III.1. Statistiques descriptives des indicateurs de vulnérabilité et de préparation

Les indicateurs de vulnérabilité et de préparation pour l'année 2022 ont été soumis à une analyse descriptive afin de mieux comprendre la distribution et la variabilité des données avant toute analyse comparative ou dimensionnelle. Les statistiques descriptives, présentées dans les Tableaux 1 et 2, offrent un aperçu des tendances centrales (moyennes), de la dispersion (écarts-types), ainsi que des valeurs minimales et maximales pour chaque indicateur.

a) Indicateurs de la vulnérabilité

L'analyse des indicateurs de vulnérabilité montre des disparités parmi les différentes variables. Certains indicateurs, tels que « l'empreinte écologique » et le « changement projeté de la biodiversité marine », présentent des écarts-types très élevés (respectivement 8,17 et 2,72). Ces écarts sont en partie attribuables à la présence de valeurs extrêmes, comme en témoignent les valeurs maximales respectivement de 73,63 et 30,05 pour ces indicateurs. Cette grande dispersion pourrait aussi suggérer que les pays observés sont confrontés à des réalités très diverses en termes de vulnérabilité écologique.

De plus, des indicateurs comme la « dépendance aux importations alimentaires » et le « taux de prélèvement d'eau douce » montrent des variabilités importantes, avec des valeurs maximales particulièrement élevées.

Tableau 6 : Statistiques descriptives des indicateurs de vulnérabilité

Indicateurs	Noms des indicateurs	Moyenne	Ecart-type	Min	Max	N
id_ecos_01	Changement projeté de la distribution des domaines bio-climatiques (biomes)	0,61	0,11	0,11	0,96	168
id_ecos_02	Changement projeté de la biodiversité marine exploitée dans un pays d'ici 2050	0,75	2,72	0,00	30,05	149
id_ecos_03	Dépendance au capital naturel	0,18	0,22	0,00	1,23	177
id_ecos_04	Empreinte écologique	0,17	8,17	-11,01	73,63	179
id_ecos_05	Biomes protégés (Mesure de la protection de 17% de chaque biome terrestre, pondérée par sa contribution nationale.)	67,33	14,80	27,66	90,68	192
id_ecos_06	Engagement dans des conventions environnementales mondiales	0,29	0,23	0,00	1,00	188
id_food_01	Changement projeté dans les rendements céréaliers	1,40	4,62	-0,39	43,92	189
id_food_02	Changement projeté de la population	0,35	0,36	-0,19	1,81	187
id_food_03	Dépendance aux importations alimentaires	15,84	8,05	3,67	45,57	182
id_food_04	Proportion de la population rurale	39,84	22,89	0,00	86,42	192
id_food_05	Capacité agricole (utilisation d'engrais, irrigation, pesticides, utilisation de tracteurs)	0,84	0,20	0,02	1,00	188
id_food_06	Malnutrition des enfants	4,32	4,06	0,00	18,70	174
id_habi_01	Changement projeté des périodes chaudes	76,23	32,67	29,99	233,09	192
id_habi_02	Changement projeté des risques d'inondation	0,04	0,06	-0,18	0,16	168
id_habi_03	Concentration urbaine et de la population urbaine	60,16	22,89	13,58	100,00	192
id_habi_04	Ratio de dépendance à l'âge (Part de la population en dessous de 14 et/ou au-delà de 65 ans)	0,36	0,06	0,17	0,51	168
id_habi_05	Qualité des infrastructures liées au commerce et au transport	2,79	0,70	1,67	4,60	180
id_habi_06	Proportion des routes pavées, inclus en milieu rural	50,18	33,22	1,00	100,00	192
id_heal_01	Changement projeté des décès dus aux maladies	1,07	0,04	1,03	1,19	177

	induites par le changement climatique					
id_heal_02	Changement projeté de la période de transmission des maladies vectorielles	1,71	7,44	-8,16	64,86	130
id_heal_03	Dépendance aux ressources externes pour les services de santé	10,83	16,04	0,00	80,07	191
id_heal_04	Part de la population vivant dans des bidonvilles	24,83	24,11	0,00	82,00	134
id_heal_05	Personnel médical (infirmières, médecins, sage-femmes)	6,77	5,90	0,14	28,59	192
id_heal_06	Accès à des installations sanitaires appropriées	59,40	30,83	2,70	100,00	130
id_infr_01	Changement projeté de la capacité de production d'hydroélectricité	-0,05	0,36	-1,82	1,41	125
id_infr_02	Projection des impacts de l'élévation du niveau de la mer	0,06	0,16	0,00	0,95	151
id_infr_03	Dépendance à l'énergie importée	34,66	33,33	0,00	100,00	148
id_infr_04	Part de la population vivant à une altitude de 5 m ou moins, indicatif des risques côtiers	6,60	11,96	0,00	78,48	135
id_infr_05	Part de la population ayant accès à l'électricité du réseau public	86,47	23,44	10,30	100,00	192
id_infr_06	Préparation aux catastrophes mesurée par l'ODD 13.1.2	0,63	0,32	0,00	1,00	192
id_wate_01	Changement projeté de la recharge annuelle des eaux souterraines	0,64	0,27	0,00	1,00	165
id_wate_02	Changement projeté du ruissellement annuel	0,75	0,14	0,00	1,00	178
id_wate_03	Taux de prélèvement d'eau douce	129,76	684,66	0,02	7750,00	174
id_wate_04	Ratio de dépendance à l'eau	23,19	29,98	0,00	100,00	186
id_wate_05	Capacité des barrages	43,67	137,89	0,00	841,51	163
id_wate_06	Accès à une eau potable fiable	69,81	30,09	6,13	100,00	125

Certains indicateurs, comme le « ratio de dépendance à l'âge » et le « changement projeté des décès dus aux maladies », montrent des écarts-types faibles. Ces indicateurs pourraient refléter des aspects moins variés de la vulnérabilité dans les pays étudiés.

b) Indicateurs de préparation à l'adaptation

Les indicateurs de préparation montrent également des grandes variabilités pour certains indicateurs, bien que généralement moins extrêmes que pour les indicateurs de vulnérabilité. Par exemple, les indicateurs relatifs à la gouvernance (stabilité politique et non-violence, contrôle de corruption, qualité des réglementations, et état de droit) présentent des moyennes proches de zéro et des écarts-types élevés, indiquant des différences notables dans la qualité de la gouvernance entre les pays. Les indicateurs sociaux, tels que « l'éducation » et les « inégalités sociales » montrent une grande dispersion. Cependant, les indicateurs comme « l'innovation », le « doing business » et « l'infrastructure des TIC », ont des écarts-types faibles, ce qui peut indiquer une certaine homogénéité pour ces indicateurs de la préparation dans les pays sous étude.

Tableau 7 : Statistiques descriptives des indicateurs de préparation

Indicateurs	Noms des indicateurs	Moyenne	Ecart-type	Min	Max	N
id_econ_01	Doing business	0.5085	0.1241	0.1923	0.7999	185
id_gove_01	Stabilité pol. et non-violence	-0.0736	0.9679	-2.7973	1.6443	188
id_gove_02	Contrôle de corruption	-0.0575	1.0015	-1.7925	2.4027	188
id_gove_03	Qualité des réglementations	-0.0782	0.9843	-2.3930	2.2144	188
id_gove_04	Etat de droit	-0.0614	0.9845	-2.2869	1.9584	188
id_soci_01	Inégalités sociales	6.383	2.0184	1.1000	10.2000	149
id_soci_02	Infrastructure des TIC	0.5052	0.1398	0.2518	0.8721	192
id_soci_03	Education	43.324	31.2908	1.9220	150.202	184
id_soci_04	Innovation	0.0001	0.0003	0.0000	0.0036	150

Il convient de souligner que, bien que les données fournissent un aperçu utile de la variabilité des indicateurs à travers les pays, ces statistiques descriptives ne permettent pas encore de tirer des conclusions. En effet, les différences méthodologiques entre les indicateurs, ainsi que l'hétérogénéité des sources de données, rendent toute comparaison directe prématurée à ce stade. L'ACP nous permettra de mieux comprendre les interactions et les contributions respectives de chaque facteur à la vulnérabilité et à la préparation au changement climatique.

III.2. Analyse en composantes principales

III.2.1. Test d'adéquation des données pour une analyse factorielle

Lorsque l'on souhaite effectuer une analyse factorielle, il est important de vérifier si les données s'y prêtent bien. Cela implique de tester deux éléments principaux :

1. Mesure d'adéquation des échantillons (KMO)

Le test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) évalue dans quelle mesure les données sont adaptées à une analyse factorielle, sur base de la corrélation et de la corrélation partielle. Une statistique KMO est calculée pour chaque variable individuelle, et la somme de ces statistiques donne la statistique KMO globale. La valeur du KMO varie entre 0 et 1. Une statistique KMO globale proche de 1 indique une excellente adéquation. En revanche, si elle est inférieure à 0,5 ; cela suggère que les corrélations entre variables sont trop faibles pour poursuivre avec une analyse factorielle (Krishnan, 2010 ; Ajtai et al., 2023).

2. Test de sphéricité de Bartlett

Ce test examine si la matrice de corrélation entre les variables est significativement différente d'une matrice d'identité (où toutes les corrélations seraient nulles). Un résultat statistiquement significatif (p-value très faible, généralement $< 0,05$) montre que les variables sont suffisamment corrélées pour permettre une analyse factorielle (Krishnan, 2010 ; Ajtai et al., 2023).

Dans la présente étude, le test de KMO indique une statistique globale de 0,5 et 0,9, respectivement pour nos données de vulnérabilité et de préparation. Cela suggère qu'il est pertinent que fassions l'ACP. De même, le test de sphéricité de Bartlett produit un $X^2 = 10\,007,149$ avec un degré de liberté de 630 et un p-value 0.000 pour les données sur la vulnérabilité et un $X^2 = 207,98$ avec un degré de liberté de 36 et un p-value 0.000. Ceci confirme la significativité statistique des corrélations dans les deux matrices de vulnérabilité et de préparation, démontrant ainsi que l'ACP est adaptée aux deux bases de données.

III.2.2. Analyse factorielle sur les indicateurs de la vulnérabilité

En appliquant l'ACP sur les 36 indicateurs de vulnérabilité, huit composantes principales ont été extraites, en ne considérant que celles dont la valeur propre (eigenvalue) est supérieure à 1 (Tableau 8 et Fig. 4). Les résultats indiquent que les composantes extraites, avec valeurs propres > 1, expliquent 71,25% de la variation des données, avec une contribution de 30, % pour la première composante, 9,2% pour la deuxième, 7,9% pour la troisième, 5,7% pour la quatrième, 5,08% pour la cinquième, 4,33% pour la sixième, 4,11% pour la septième et 3,91% pour la huitième composante.

Tableau 8 : Extraction des composantes principales de la vulnérabilité

Composante	Eigenvalue	% de variance	% cumulé
comp 1	11,126	30,905	30,905
comp 2	3,316	9,212	40,117
comp 3	2,867	7,963	48,08
comp 4	2,068	5,744	53,824
comp 5	1,83	5,082	58,906
comp 6	1,559	4,33	63,236
comp 7	1,478	4,106	67,342
comp 8	1,408	3,911	71,253
comp 9	0,962	2,674	73,927
comp 10	0,834	2,316	76,242
comp 11	0,772	2,144	78,386
comp 12	0,709	1,969	80,355
comp 13	0,679	1,885	82,24
comp 14	0,636	1,767	84,007
comp 15	0,553	1,536	85,543
comp 16	0,519	1,441	86,984
comp 17	0,451	1,253	88,237
comp 18	0,443	1,231	89,468
comp 19	0,416	1,156	90,624
comp 20	0,375	1,041	91,665
comp 21	0,362	1,007	92,672
comp 22	0,328	0,912	93,584
comp 23	0,304	0,844	94,428
comp 24	0,277	0,769	95,197
comp 25	0,249	0,693	95,89
comp 26	0,226	0,627	96,517
comp 27	0,211	0,587	97,104
comp 28	0,191	0,531	97,634
comp 29	0,166	0,461	98,095
comp 30	0,152	0,423	98,518
comp 31	0,139	0,387	98,905
comp 32	0,129	0,357	99,263

comp 33	0,106	0,295	99,557
comp 34	0,096	0,267	99,824
comp 35	0,063	0,176	100
comp 36	0	0	100

Par ailleurs, pour identifier les indicateurs représentatifs de chaque composante de la vulnérabilité, la *rotation varimax* a été utilisée, et seules les valeurs significatives des charges factorielles (supérieures à 0,5) sont présentées dans le tableau 9.

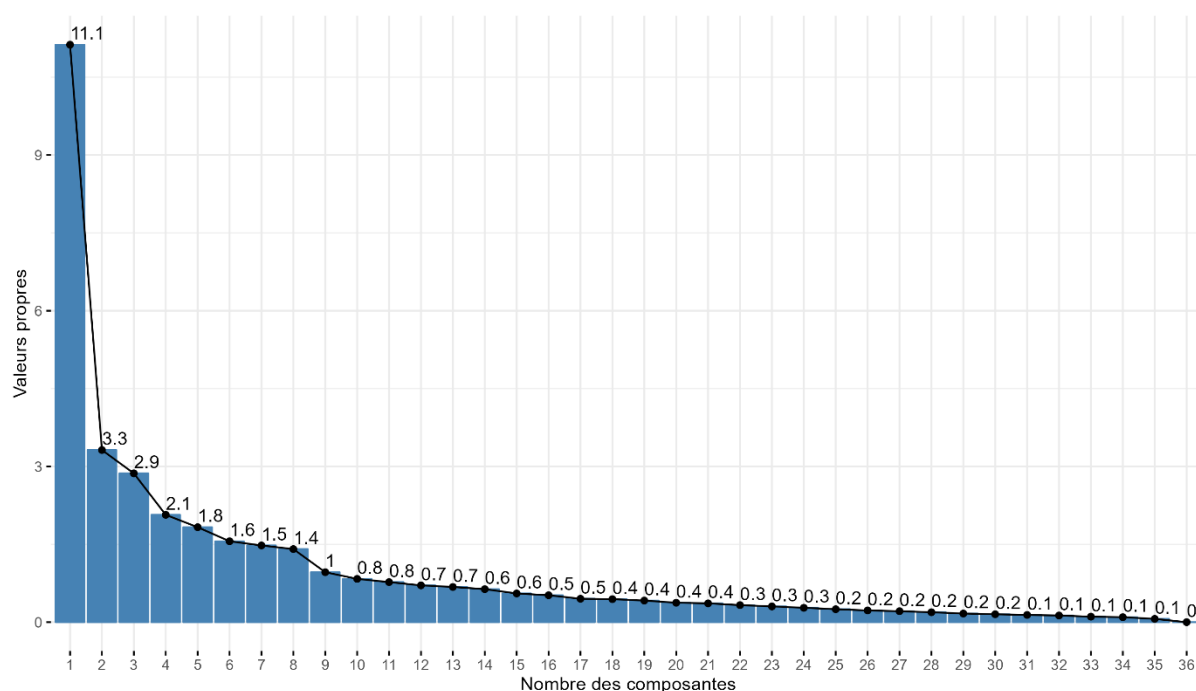


Figure 4 : Graphique des valeurs propres des composantes principales de la vulnérabilité

Ces charges permettent de déterminer les indicateurs qui décrivent de manière significative chaque dimension de la vulnérabilité, en fonction de leur contribution aux différentes composantes. Les composantes ainsi définies sont les suivantes :

Composante 1 : Composante de vulnérabilité liée à l'alimentation, l'habitat, la santé et les écosystèmes

La composante 1 met en évidence des facteurs qui, pris ensemble, peuvent influencer la vulnérabilité d'un pays face aux changements climatiques. Cette composante montre que la vulnérabilité climatique est particulièrement influencée par des secteurs liés à l'alimentation,

à l'habitat, à la santé, aux écosystèmes, aux infrastructures et à l'eau. Les facteurs positifs augmentent la résilience des pays, tandis que les facteurs négatifs accentuent la vulnérabilité.

Pour les variables liées à l'alimentation : une croissance démographique rapide (-0,73) exerce une pression sur les ressources alimentaires, tandis que la dépendance aux importations (-0,52) expose davantage aux perturbations des chaînes d'approvisionnement. Une population rurale importante (-0,7), souvent dépendante de l'agriculture de subsistance, et une faible adoption de technologies agricoles modernes (-0,54) rendent les pays sensibles aux défis climatiques et limitent leur capacité d'adaptation. Enfin, la malnutrition des enfants (-0,63) reflète les impacts des insuffisances alimentaires, exposant ainsi les enfants aux effets du changement climatique.

Tableau 9 : Matrice des composantes après rotation Varimax de la vulnérabilité

Indicateurs	Noms des indicateurs	Comp 1	Comp 2	Comp 3	Comp 4	Comp 5
id_ecos_01	Changement projeté de la distribution des domaines bio-climatiques (biomes)		-0,56			
id_ecos_02	Changement projeté de la biodiversité marine exploitée dans un pays d'ici 2050					
id_ecos_03	Dépendance au capital naturel	-0,66				
id_ecos_04	Empreinte écologique		0,59			
id_ecos_05	Biomes protégés (Mesure de la protection de 17% de chaque biome terrestre, pondérée par sa contribution nationale.)	0,9				
id_ecos_06	Engagement dans des conventions environnementales mondiales	0,62				
id_food_01	Changement projeté dans les rendements céréaliers					
id_food_02	Changement projeté de la population	-0,73				
id_food_03	Dépendance aux importations alimentaires	-0,52				
id_food_04	Proportion de la population rurale	-0,7				
id_food_05	Capacité agricole (utilisation d'engrais, irrigation, pesticides, utilisation de tracteurs)	-0,54				
id_food_06	Malnutrition des enfants	-0,63				
id_habi_01	Changement projeté des périodes chaudes					
id_habi_02	Changement projeté des risques d'inondation			0,64		
id_habi_03	Concentration urbaine et de la population urbaine	0,7				
id_habi_04	Ratio de dépendance à l'âge (Part de la population en dessous de 14 et/ou au-delà de 65 ans)	-0,57		0,54		
id_habi_05	Qualité des infrastructures liées au commerce et au transport	0,8				

id_habi_06	Proportion des routes pavées, inclus en milieu rural	0,72				
id_heal_01	Changement projeté des décès dus aux maladies induites par le changement climatique	-0,59				
id_heal_02	Changement projeté de la période de transmission des maladies vectorielles					
id_heal_03	Dépendance aux ressources externes pour les services de santé	-0,66				
id_heal_04	Part de la population vivant dans des bidonvilles	-0,89				
id_heal_05	Personnel médical (infirmières, médecins, sage-femmes)	0,85				
id_heal_06	Accès à des installations sanitaires appropriées	0,88				
id_infr_01	Changement projeté de la capacité de production d'hydroélectricité		0,72			
id_infr_02	Projection des impacts de l'élévation du niveau de la mer		0,79			
id_infr_03	Dépendance à l'énergie importée			0,59		
id_infr_04	Part de la population vivant à une altitude de 5 m ou moins, indicatif des risques côtiers		0,81			
id_infr_05	Part de la population ayant accès à l'électricité du réseau public	0,75				
id_infr_06	Préparation aux catastrophes mesurée par l'ODD 13.1.2					
id_wate_01	Changement projeté de la recharge annuelle des eaux souterraines				0,55	
id_wate_02	Changement projeté du ruissellement annuel		-0,69			
id_wate_03	Taux de prélèvement d'eau douce				0,69	
id_wate_04	Ratio de dépendance à l'eau				0,65	
id_wate_05	Capacité des barrages			-0,76		
id_wate_06	Accès à une eau potable fiable	0,92				
SS Loading		10,90	3,16	2,77	2,34	2,03
% Variance		30,3	8,8	7,7	6,5	5,6
% Var. cumulée		30,3	39,1	46,8	53,3	58,9

Les variables liées à l'habitat dans cette composante mettent en lumière de faiblesses qui peuvent réduire la capacité des pays et leur sensibilité à s'adapter aux conséquences du changement climatique : une forte concentration urbaine et une population urbaine croissante (0,7) peuvent intensifier les risques en raison de la densité et de la gestion urbaine. Le ratio de dépendance à l'âge (-0,57) suggère une population plus vulnérable aux effets du changement climatique (notamment les enfants et les personnes âgées) et un moindre potentiel de croissance économique. La qualité des infrastructures de commerce et de

transport (0,8) ainsi que la proportion de routes pavées, dans les milieux urbains et ruraux (0,72), sont des facteurs positifs pouvant améliorer l'adaptation aux impacts du changement climatique en facilitant la mobilité et l'accès aux ressources.

Pour les variables liées à la santé, le changement projeté des décès dus aux maladies induites par le changement climatique (-0,59) indique que les impacts sanitaires, notamment les maladies liées au changement climatique, pourraient contribuer à aggraver la vulnérabilité de la population. La dépendance aux ressources externes pour les services de santé (-0,66) pourrait indiquer des systèmes de santé fragiles face aux crises sanitaires liées au climat, dans la mesure où une telle dépendance peut limiter la capacité des pays à répondre de manière autonome et rapide aux défis sanitaires amplifiés par le changement climatique. La part de la population vivant dans des bidonvilles (-0,89) rend sensible les populations les plus pauvres à des conditions de vie insalubres. À l'inverse, la disponibilité du personnel médical (0,85) et l'accès à des installations sanitaires appropriées (0,88) sont des facteurs positifs qui renforcent la capacité d'adaptation aux effets du changement climatique en améliorant la réponse aux crises sanitaires.

Les variables liées aux écosystèmes soulignent l'importance de la gestion durable des ressources naturelles. La dépendance au capital naturel (-0,66) est une faiblesse qui peut être mise en lien avec les chocs climatiques : les pays fortement dépendants de leurs ressources naturelles, sans diversification, sont plus vulnérables à ces chocs. Cependant, la protection des biomes (0,9) offre une réponse positive en réduisant la vulnérabilité, car des écosystèmes bien protégés peuvent aider à atténuer les impacts climatiques. De même, l'engagement dans des conventions environnementales mondiales (0,62) suggère qu'un engagement international peut renforcer les capacités d'adaptation en favorisant des actions collectives pour la préservation de l'environnement et la lutte contre le changement climatique.

L'accès à l'électricité du réseau public (0,75) indique que les pays avec une large proportion de leur population connectée à l'électricité sont mieux équipés, notamment pour gérer les défis du changement climatique. De même, l'accès à une eau potable fiable (0,92) est crucial pour réduire la vulnérabilité, car l'eau potable est essentielle pour la santé et la résilience face aux événements climatiques extrêmes.

Composante 2 : Composante de vulnérabilité liée aux écosystèmes et infrastructures

Les indicateurs qui forment la composante 2 se réfèrent aux aspects écologiques et infrastructurels. Le changement projeté de la distribution des biomes (-0,56) indique que les changements climatiques entraîneront une perte de biodiversité, contribuant ainsi à augmenter la vulnérabilité des territoires. L'empreinte écologique (0,59) présente un score positif signalant que la surconsommation des ressources naturelles constitue un risque pour la durabilité environnementale et une vulnérabilité pour les territoires concernés.

Concernant les infrastructures, la capacité de production d'hydroélectricité projetée (0,72) présente également un score positif. Ce résultat met en évidence la nécessité d'une gestion prudente de l'eau et de l'énergie pour assurer la résilience face aux changements climatiques. En fin, la projection des impacts de l'élévation du niveau de la mer (0,79) et la part de la population vivant à une altitude de 5 m ou moins (0,81) indiquent que les populations côtières sont particulièrement exposées et sensibles aux risques liés à l'élévation du niveau de la mer. Le score positif pour ces deux indicateurs est défavorable, car il révèle une vulnérabilité aux catastrophes climatiques dans ces régions, notamment les inondations et les tempêtes.

Composante 3 : Composante de vulnérabilité axée sur l'habitat et l'eau

Les variables de la composante 3, axées sur l'habitat et l'eau, mettent en lumière les vulnérabilités liées aux dynamiques démographiques et hydrologiques face au changement climatique. Le changement projeté des risques d'inondation (0,64) signale une exposition accrue aux aléas hydrologiques, particulièrement dans les zones où les infrastructures sont insuffisantes pour gérer de telles catastrophes. Le ratio de dépendance à l'âge (0,54) reflète la sensibilité des populations avec une proportion élevée de jeunes et de personnes âgées, souvent moins aptes à faire face aux impacts climatiques. Enfin, le changement projeté du ruissellement annuel (-0,69) montre que des changements dans les régimes hydrologiques affecteront la disponibilité de l'eau, augmentant ainsi la vulnérabilité des zones dépendantes de ressources hydriques sensibles aux variations climatiques.

Composante 4 & 5: Composante de vulnérabilité axée sur l'infrastructure et l'eau

Les résultats montrent que la dépendance à l'énergie importée et la gestion des barrages constituent des facteurs clés de vulnérabilité. En plus, le changement projeté de la recharge annuelle des eaux souterraines, un taux de prélèvement élevé d'eau douce et une forte dépendance hydraulique, sont aussi des facteurs qui contribuent à la vulnérabilité des pays due au changement climatique.

La première composante explique 30,3 % de la variance. Les composantes suivantes contribuent à des degrés de moins en moins importants. En cumulant, environ 59 % de la variance totale est expliquée par ces cinq premières composantes.

3.2.3. Résultats pour les indicateurs de la préparation

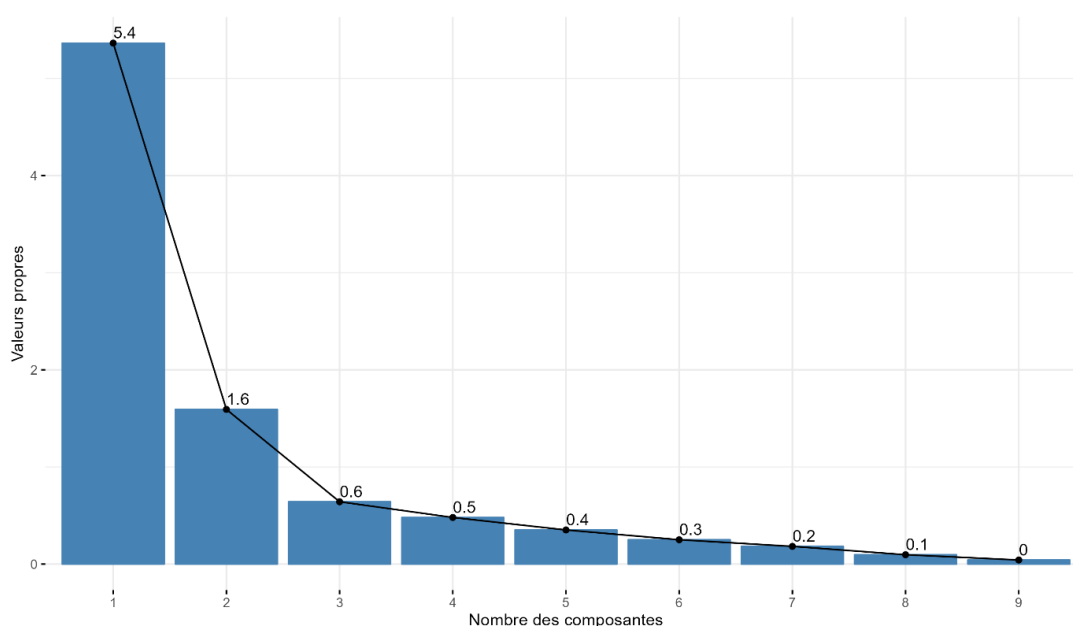
L'ACP a été appliquée sur neuf indicateurs de la préparation à l'adaptation au changement climatique. Sur les neuf composantes principales extraites, seules deux ont été retenues car ayant des valeurs propres (eigenvalue) supérieure à 1 (Tableau 10 et Fig. 5). Les résultats montrent que les deux composantes expliquent 77,29 % de la variance totale des données (respectivement 59,60% et 17,69%).

Tableau 10 : Extraction des composantes principales de la préparation

Composante	Eigenvalue	% de variance	% cumulé
comp 1	5,36	59,60	59,60
comp 2	1,59	17,69	77,29
comp 3	0,64	7,13	84,42
comp 4	0,48	5,33	89,75
comp 5	0,35	3,90	93,65
comp 6	0,25	2,78	96,44
comp 7	0,18	2,03	98,46
comp 8	0,10	1,07	99,53
comp 9	0,04	0,47	100,00

Les mêmes résultats sont également repris sur la figure 5 ci – dessous.

Figure 5 : Graphique des valeurs propres des composantes principales de la vulnérabilité



L'ACP avec rotation varimax appliquée aux indicateurs de préparation à l'adaptation au changement climatique révèle une structure en cinq dimensions principales, qui expliquent ensemble 93,7 % de la variance totale des données. Seules les valeurs significatives des charges factorielles supérieures à 0,5 sont présentées dans le tableau 11.

Tableau 11 : Matrice des composantes après rotation Varimax de la préparation

Indicateurs	Noms des indicateurs	Comp 1	Comp 2	Comp 3	Comp 4	Comp 5
id_econ_01	Doing business					-0,78
id_gove_01	Stabilité politique et non-violence	0,92				
id_gove_02	Contrôle de corruption	0,86				
id_gove_03	Qualité des réglementations	0,78				
id_gove_04	Etat de droit	0,88				
id_soci_01	Inégalités sociales		0,95			
id_soci_02	Infrastructure des TIC	0,55		-0,67		
id_soci_03	Education			-0,91		
id_soci_04	Innovation				-0,95	
SS Loading		3,53	1,06	1,73	1,04	1,08
% Variance		39,2	11,8	19,2	11,6	12
% Var. cumulée		39,2	51	70,1	81,7	93,7

Composante 1 : Préparation de la gouvernance (39,2 % de la variance)

Cette composante est dominée par des indicateurs liés à la gouvernance, en particulier stabilité politique et non-violence (0,92), contrôle de la corruption (0,86), état de droit (0,78),

qualité des réglementations (0,88). Ces indicateurs montrent une forte corrélation avec des facteurs institutionnels et politiques, qui sont des éléments clés dans la préparation des pays à faire face aux défis du changement climatique. Une gouvernance stable et transparente joue un rôle central dans la préparation des pays à faire face au changement climatique.

Composante 2 : Préparation sociale (11,8 % de la variance)

Cette composante est dominée par l'indicateur d'inégalités sociales (0,95). Cet indicateur montre que les inégalités sociales doivent être réduites pour garantir une préparation équitable et inclusive à l'adaptation. Une société plus équitable est cruciale pour garantir la résilience collective face aux impacts climatiques.

Composante 3 : Préparation des infrastructures technologiques et éducatives (19,2 % de la variance)

Cette composante est constituée par l'infrastructure des TIC et l'éducation, suggérant leur rôle clé dans la préparation à l'adaptation au changement climatique, notamment par l'accès à l'information et le renforcement des compétences.

Composante 4 : Innovation (12 % de la variance)

L'indicateur innovation est l'élément clé de cette composante. Il souligne l'importance des solutions novatrices pour relever les défis du changement climatique.

Composante 5 : Préparation économique (11,6 % de la variance)

L'indicateur doing business est prédominant dans cette composante. En effet, un bon environnement économique et des conditions favorables à l'investissement et à l'innovation sont cruciaux pour soutenir les efforts d'adaptation au changement climatique.

Il sied également de rappeler à ce niveau que pour les deux indicateurs de vulnérabilité et de préparation à l'adaptation au changement climatique, on retient uniquement la première composante pour construire l'indice dans la suite de ce travail.

III.3. Comparaison des résultats des indicateurs ND-GAIN et de l'ACP

Après avoir appliqué l'ACP, nous avons comparé les scores de vulnérabilité et de préparation obtenus à partir de l'ACP avec ceux fournis par l'indice ND-GAIN. Pour cette comparaison, nous avons utilisé le coefficient de corrélation de Spearman, qui nous permet d'évaluer la relation entre les scores de vulnérabilité et de préparation des deux approches. Un coefficient proche de 1 indique une forte similarité dans la classification des pays.

III.3.1. Comparaison des indices de vulnérabilité ND-GAIN et de l'ACP

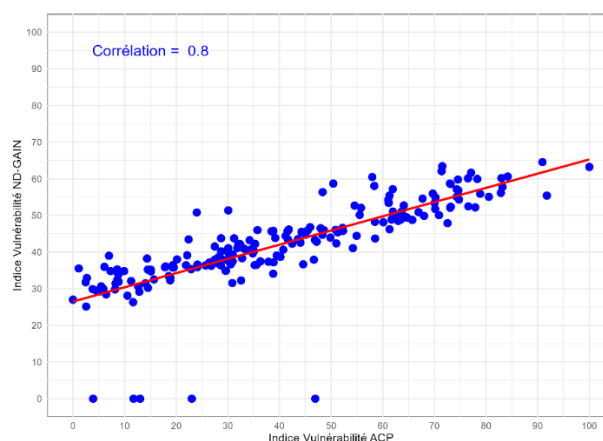
L'indice de vulnérabilité ACP varie de 0 à 100. Le premier quartile des pays étant à 22,06 avec une médiane de 37,08 et une moyenne de 40,31. Le troisième quartile se situe à 61,18 et le maximum atteint 100 dans le groupe des 192 pays étudiés.

Tableau 12 : Statistiques descriptives des indices de vulnérabilité

	ACP	ND-GAIN
Minimum	0,00	0,00
1er Quartile	22,06	35,85
Médiane	37,08	42,17
Moyenne	40,31	42,14
3e Quartile	61,18	50,09
Maximum	100,00	64,55

En comparaison, l'indice de vulnérabilité du ND-GAIN présente un minimum de 0 une médiane de 42,17 et une moyenne de 42,14. Cela suggère que bien que les deux indices affichent des distributions comparables, les écarts sont surtout liés aux différences de construction de ces deux indices.

Figure 6: Diagramme de dispersion présentant les indices de vulnérabilité ND-GAIN et ACP



La corrélation entre l'indice de vulnérabilité ACP et celui de ND-GAIN est de 0,80. En effet, les deux indices sont globalement en accord, mais des différences existent dans la classification de certains pays, notamment ceux se situant aux extrêmes de la distribution. La visualisation graphique de ces deux indices (voir Figure 6), illustre bien l'association linéaire forte, mais avec quelques écarts importants pour certains pays. Les 5 pays qui s'écartent les plus sont entre autres Monaco, Saint-Marin, Liechtenstein, Saint-Kitts-et-Nevis, Andorre. Il s'agit des pays dont le score final de la vulnérabilité n'a pas été calculé en 2022 pour l'indicateur ND-GAIN.

III.3.2. Comparaison des indices de préparation ND-GAIN et de l'ACP

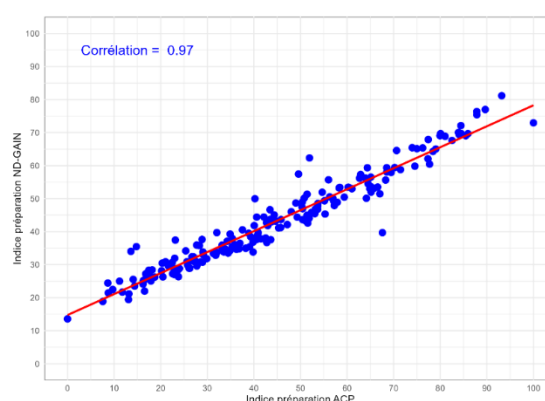
L'indice de préparation ACP varie de 0 à 100 avec des valeurs similaires à celles observées dans l'indice de préparation ND-GAIN. Le premier quartile est à 26,97 ; la médiane à 42,62 et la moyenne à 44,49. Le troisième quartile est à 59,61 et le maximum est de 100.

Tableau 13 : Statistiques descriptives des indices de préparation

	ACP	ND-GAIN
Minimum	0,00	13,59
1er Quartile	26,97	31,91
Médiane	42,62	41,18
Moyenne	44,49	43,01
3e Quartile	59,61	52,98
Maximum	100,00	81,17

L'indice de préparation ND-GAIN présente un minimum de 13,59 ; une médiane de 41,18 et une moyenne de 43,01. La corrélation entre les deux indices est particulièrement forte à 0,97. Ceci indique que les deux approches classent les pays de manière très similaire en termes de préparation à l'adaptation au changement climatique. Cette forte corrélation pourrait aussi s'expliquer par le fait qu'il y a moins d'indicateurs (neuf) comparés aux 36 indicateurs utilisés dans la construction de l'indice de vulnérabilité.

Figure 7 : Matrice de corrélation des indices de préparation ND-GAIN et ACP



Le graphique de dispersion (voir Figure 7) confirme cette similitude, avec une association linéaire très marquée entre les scores des deux indices. Parmi, les pays qui s'écartent les plus, on peut citer la Corée du Sud, Nouvelle-Zélande, Japon, Irlande, Andorre, Somalie, et la Corée du Nord. Toutefois, cette forte corrélation suggère ainsi que l'ACP est capable de reproduire l'évaluation de préparation à l'adaptation fournie par le ND-GAIN avec une grande précision sur base des mêmes indicateurs.

III.3.3. Comparaison des matrices ND-GAIN et de l'ACP

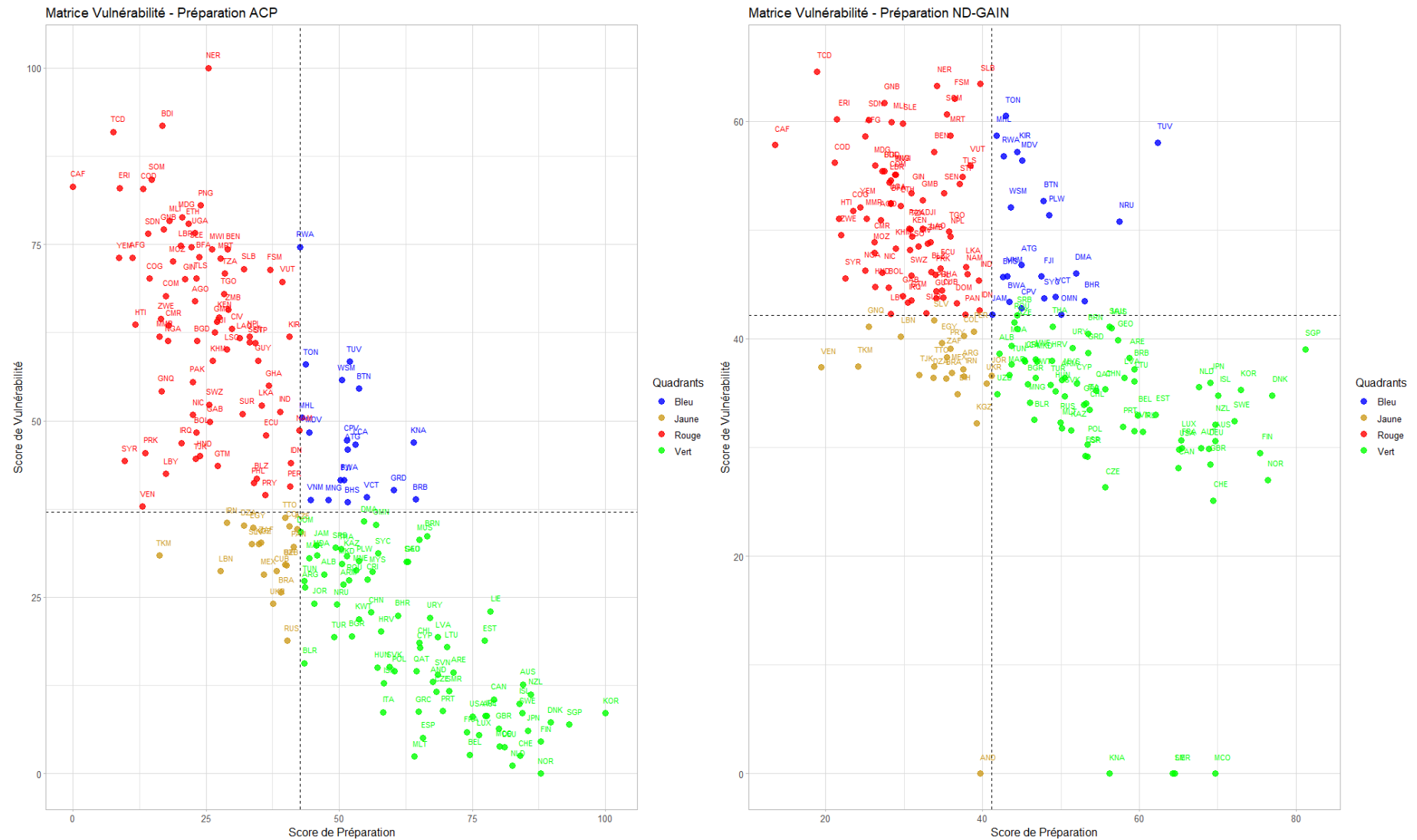


Figure 8 : Comparaison des matrices ND-GAIN et de l'ACP

Dans cette section, nous comparons si les regroupements de pays dans les quatre quadrants sont concordants entre les deux approches ou s'ils divergent, comme suggéré par Odhiambo et al. (2021). Pour rappel, les pays sont classés en fonction de leurs scores médians de vulnérabilité et de préparation :

- **Rouge** : Vulnérabilité élevée, préparation faible (le plus critique).
- **Jaune** : Vulnérabilité faible, préparation faible (préparation limitée malgré une faible situation de vulnérabilité).
- **Bleu** : Vulnérabilité élevée, préparation élevée (des pays confrontés à de grands défis mais mieux préparés).
- **Vert** : Vulnérabilité faible, préparation élevée (le plus favorable).

Tableau 14: Tableau croisé des classifications des pays selon les quadrants

		ND – GAIN			
		Bleu	Jaune	Rouge	Vert
ACP	Bleu	14	0	0	5
	Jaune	0	14	2	3
	Rouge	1	5	71	0
	Vert	7	3	1	66

Les lignes représentent la classification des pays selon l'ACP. Les colonnes représentent la classification des pays selon le ND-GAIN. Nous observons qu'une majorité de pays (71) se retrouvent dans le quadrant rouge selon les deux indices (ACP et ND-GAIN), ce qui reflète une situation d'urgence en termes de vulnérabilité au changement climatique. Ces pays nécessitent une attention immédiate pour améliorer leur préparation afin de réduire leur exposition aux risques. De même, 66 pays sont bien classés selon les deux indices dans le quadrant vert. Cela montre aussi bon nombre des pays sont bien préparés, avec de scores de vulnérabilité moins élevés. Le quadrant bleu regroupe un nombre relativement faible de pays (14 pays) qui sont aussi bien classés selon les deux indices, indiquant qu'il est rare de trouver des pays qui soient simultanément vulnérables et bien préparés. Enfin, le quadrant jaune représente un groupe restreint des pays (14) pour les deux indices, mettant en évidence que certains pays, bien que moins vulnérables, restent peu préparés aux risques climatiques futurs. La figure 9 nous permet de visualiser les indices de vulnérabilité et de préparation de ces 192 pays analysés selon les deux approches.

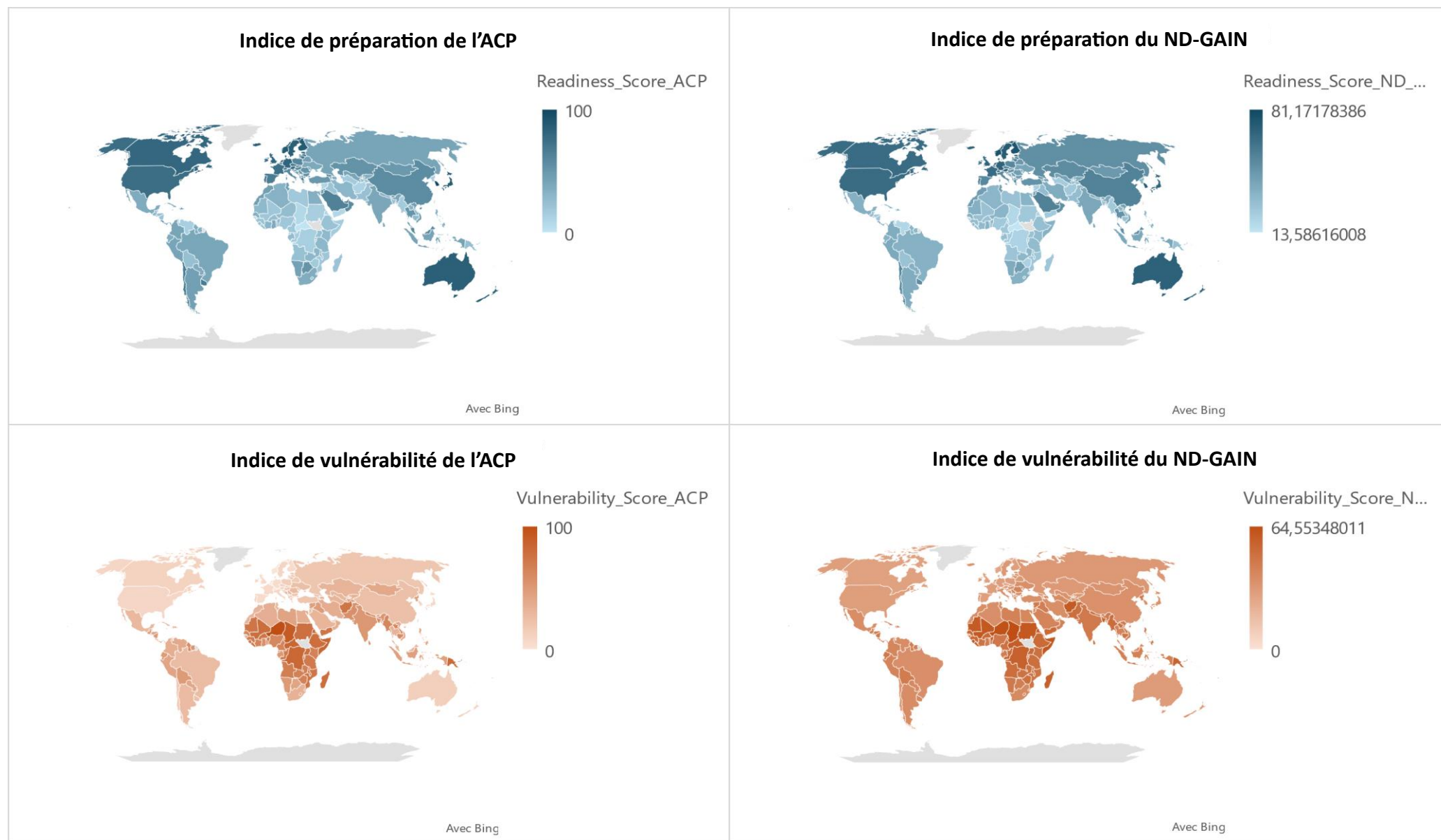


Figure 9 : Comparaison des indices des indices de vulnérabilité et de préparation : ND-GAIN et ACP

Les résultats issus de cette étude confirment également que les pays industrialisés, principalement ceux situés en Europe, en Amérique du Nord, quelques-uns en Asie et l'Australie, affichent une préparation à l'adaptation supérieure et une faible vulnérabilité face au changement climatique. Par contre, beaucoup des pays situés en Afrique et en Amérique Latine présentent une faible préparation et des grands scores de vulnérabilité (Figure 9).

Tableau 15 : Aperçu des pays classés avec des divergences

N°	Pays	Quadrant ACP	Quadrant ND-GAIN
1	Andorre (AND)	Vert	Jaune
2	Argentine (ARG)	Vert	Jaune
3	Azerbaïdjan (AZE)	Jaune	Vert
4	Bahreïn (BHR)	Vert	Bleu
5	Barbade (BRB)	Bleu	Vert
6	Cuba (CUB)	Jaune	Rouge
7	Dominique (DMA)	Vert	Bleu
8	République dominicaine (DOM)	Vert	Rouge
9	Guinée équatoriale (GNQ)	Rouge	Jaune
10	Grenade (GRD)	Bleu	Vert
11	Jamaïque (JAM)	Vert	Bleu
12	Jordanie (JOR)	Vert	Jaune
13	Kiribati (KIR)	Rouge	Bleu
14	Saint-Christophe-et-Niévès (KNA)	Bleu	Vert
15	Sainte-Lucie (LCA)	Bleu	Vert
16	Mongolie (MNG)	Bleu	Vert
17	Nauru (NRU)	Vert	Bleu
18	Oman (OMN)	Vert	Bleu
19	Panama (PAN)	Jaune	Rouge
20	Pérou (PER)	Rouge	Jaune
21	Palaos (PLW)	Vert	Bleu
22	Paraguay (PRY)	Rouge	Jaune
23	Russie (RUS)	Jaune	Vert
24	Seychelles (SYC)	Vert	Bleu
25	Tadjikistan (TJK)	Rouge	Jaune
26	Ouzbékistan (UZB)	Jaune	Vert
27	Venezuela (VEN)	Rouge	Jaune

De manière générale, sur un total de 192 pays analysés, 165 (86%) ont été classés dans le même quadrant par les deux approches. Ce résultat reflète une cohérence globale entre l'ACP et la matrice ND-GAIN dans la catégorisation des pays selon leur vulnérabilité et leur préparation. En annexe, nous présentons le classement complet de tous les 192 pays étudiés.

Cependant, 27 pays (14%) présentent des divergences, se retrouvant dans des quadrants différents selon les deux méthodologies.

Ces divergences peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs, notamment :

1. **Différences de pondération et de méthodologie** : L'ACP repose sur des composantes principales, mettant en avant les variables les plus significatives en termes statistiques. À l'inverse, ND-GAIN utilise une approche pondérée basée sur des critères prédéfinis, ce qui peut donner un poids différent à certaines dimensions ou secteurs spécifiques.
2. **Variabilité des seuils de classification** : Les médianes des scores de vulnérabilité et de préparation diffèrent légèrement entre l'ACP (37,08 pour la vulnérabilité et 42,62 pour la préparation) et ND-GAIN (42,17 pour la vulnérabilité et 41,18 pour la préparation). Ces variations entraînent des déplacements de certains pays d'un quadrant à un autre.

Nous pouvons également expliquer les divergences de ces 27 pays selon leurs classifications ou quadrants :

- a) Les pays classés dans le quadrant Bleu de l'ACP et le quadrant Vert du ND-GAIN (Barbade, Grenade, Saint-Christophe-et-Niévès, Sainte-Lucie, Mongolie, Bahreïn, Dominique, Jamaïque, Nauru, Oman, Palaos, Seychelles) ont une préparation élevée selon les deux indices, mais sont indiqués comme plus vulnérables selon nos calculs. Cela pourrait être dû à leur faible population et du fait qu'il s'agit des petites îles dans beaucoup des cas, qui sont parmi les plus vulnérables aux effets du changement climatique. Pareillement, les pays du quadrant Vert de l'ACP, mais classés dans le quadrant Bleu dans le ND-GAIN (Bahreïn, Dominique, Jamaïque, Nauru, Oman, Palaos, Seychelles) confirment qu'ils disposent de politiques d'adaptation bien structurées et de gouvernance efficace pour affronter les défis climatiques, malgré leur différence dans le classement de la vulnérabilité.
- b) Les pays du quadrant Jaune dans l'ACP mais dans le quadrant Vert du ND-GAIN (Azerbaïdjan, Russie, Ouzbékistan) sont des pays qui semblent peu vulnérables, mais un peu moins préparés selon nos calculs. On notera qu'il s'agit de trois pays proches d'Eurasie. De même, les pays dans le quadrant Vert de l'ACP, mais classés dans le quadrant Jaune dans le ND-GAIN (Andorre, Argentine, Jordanie) suggèrent aussi qu'ils disposent des conditions favorables pour s'adapter. Les pays classés dans le quadrant

Jaune de l'ACP, mais qui sont classés dans le quadrant Rouge de ND-GAIN (Cuba, Panama), correspondent à des cas moins vulnérables selon nos calculs, mais aussi peu préparés. A nouveau, il s'agit de pays voisins.

- c) Kiribati est situé dans le quadrant Rouge dans l'ACP mais dans le quadrant Bleu du ND-GAIN suggère qu'il soit perçu comme extrêmement vulnérable selon l'ACP (en raison de ses caractéristiques géographiques, par exemple, étant un petit état insulaire exposé à la montée du niveau de la mer). En revanche, les pays du quadrant Rouge dans l'ACP mais dans le quadrant Jaune du ND-GAIN (Guinée équatoriale, Pérou, Paraguay, Tadjikistan et Vénézuéla), suggèrent que ces pays font face à des vulnérabilités spécifiques (comme des instabilités politiques, des inégalités sociales ou des fragilités économiques) non pleinement capturées par le ND-GAIN, qui pourrait sous-estimer certains facteurs de vulnérabilité.
- d) Enfin, la République dominicaine est classée dans le quadrant Vert de l'ACP, mais elle se trouve dans le quadrant Rouge du ND-GAIN. Ce cas particulier mérite davantage d'attention pour comprendre pourquoi les deux indices divergent tant.

CHAPITRE IV. DISCUSSIONS

Ce mémoire confirme plusieurs conclusions des études antérieures. Premièrement, les résultats que nous avons obtenus à partir de l'analyse des indicateurs de vulnérabilité par l'ACP confirment et enrichissent les conclusions de la littérature existante, notamment celles de Sarkodie et al. (2022), qui soulignent que les pays à revenu élevé sont moins vulnérables grâce à leur préparation à l'adaptation, tandis que les pays en développement, en particulier ceux à faible revenu, sont davantage exposés et sensibles aux effets du changement climatique. Cette dynamique est clairement observée dans la Composante 1 de la vulnérabilité, qui regroupe des secteurs cruciaux comme l'alimentation, l'habitat, la santé et les écosystèmes,... et où des facteurs négatifs tels que la dépendance alimentaire, la croissance démographique rapide, une grande population rurale, la malnutrition des enfants, la faiblesse des infrastructures, etc. qui augmentent la vulnérabilité. Cela est aussi observé dans le quadrant rouge de notre matrice rassemblant beaucoup de pays en développement (figure 8).

A l'inverse, Sarkodie & Strezov (2019) ont trouvé que les pays industrialisés tels que la Norvège, la Suisse, le Canada, la Suède, le Royaume-Uni, la Finlande, la France, l'Espagne et l'Allemagne sont moins vulnérables au changement climatique en raison de leurs fortes capacités économiques, de gouvernance et d'adaptation sociale. D'après notre nouvel indicateur, les 15 pays les moins vulnérables sont respectivement la Norvège, le Pays-Bas, le Malte, la Suisse, la Belgique, l'Allemagne, le Monaco, la Finlande, l'Espagne, le Luxembourg, la France, le Japon, Royaume-Uni, le Singapore et le Danemark.

Les résultats de cette analyse confirment également les résultats présentés par Sarkodie et Strezov (2019) pour les 192 pays membres de l'ONU, selon lesquels l'Afrique est le continent le plus vulnérable, en raison de sa grande sensibilité et exposition, ainsi que de sa faible capacité d'adaptation, telle que nous l'avons aussi présenté sur la figure 9. Dans la même perspective, l'étude d'Amegavi et al. (2021) constate également que l'Afrique centrale est la sous-région la plus vulnérable, avec une forte exposition, une sensibilité élevée et une capacité d'adaptation limitée, tandis que l'Afrique australe et l'Afrique du Nord sont les moins vulnérables du sous-continent. En revanche, pour Epule et al. (2021), l'Afrique du Nord et l'Afrique australe sont les régions les mieux préparées à l'adaptation au changement

climatique, tandis que l'Afrique de l'Ouest est la moins préparée, et que l'Afrique centrale et l'Afrique de l'Est se situent quelque part entre ces extrêmes.

Nos résultats mettent également en évidence l'importance des facteurs institutionnels, tels que la stabilité politique, le contrôle de la corruption, l'état de droit et la qualité des réglementations, dans la préparation à l'adaptation au changement climatique. Cependant, il convient de noter que ces résultats sont en partie influencés par les indicateurs choisis. Si nous étendions l'analyse à un panel plus large d'indicateurs à travers une ACP, de nouvelles dimensions peuvent émerger. Cela pourrait être vérifié dans une autre étude. Les conclusions de Raworth (2007) et Tilleard et Ford (2016) soulignent le rôle central des institutions et de la gouvernance dans la capacité des pays à traduire leur potentiel d'adaptation en stratégies concrètes. Par ailleurs, les travaux de Garschagen et al. (2021) sur la forte corrélation entre la vulnérabilité socio-économique et la capacité d'adaptation appuient également cette analyse. Ces résultats soulignent que les pays ayant une gouvernance stable et transparente sont mieux équipés pour relever les défis climatiques, ce qui peut expliquer pourquoi des pays comme la Norvège, le Luxembourg, la Suisse, Singapour et le Danemark, étudiés par Garcia et Adriatico (2022), se classent parmi les plus résilients.

Pour Garcia et Adriatico (2022), ces pays sont parmi les plus résilients face au climat que le reste du monde, en raison de leur PIB élevé, leur facilité de faire des affaires, leur préparation gouvernementale et leur préparation sociale. En revanche, le Zimbabwe est l'un des pays les moins résilients face au climat en raison d'une gouvernance et d'une préparation sociale inadéquates, ainsi que de sa grande vulnérabilité.

Nos analyses ont également abouti aux mêmes résultats, classant ces pays parmi les mieux préparés sur les 192 pays sous étude. Parmi les pays les mieux préparés figurent la Corée du Sud, Singapour, Danemark, Finlande, Norvège, Nouvelle-Zélande, Japon, Australie, Suède, Suisse, Islande, Pays-Bas, Allemagne, et Monaco. En dernière position du classement, nous avons respectivement République centrafricaine, Tchad, Yémen, Érythrée, Syrie, Afghanistan, Haïti, Venezuela, République Démocratique du Congo, Corée du Nord, Soudan, Congo, Somalie, Turkménistan, Myanmar.

Enfin, à l'instar de Garschagen et al. (2021), qui ont comparé quatre indices climatiques mondiaux parmi les plus utilisés (WRI, INFORM, ND-GAIN et CRI) et identifié des variations

significatives entre ces indices concernant les niveaux de risque et les classements des pays — malgré un consensus notable pour les pays à haut risque climatique —, nous avons également trouvé de fortes corrélations de 0,8 et 0,97 respectivement pour les indicateurs de vulnérabilité et de préparation à l'adaptation au changement climatique. Cela s'explique en partie parce que nous partons des mêmes indicateurs. Cependant, après avoir classé les 192 pays étudiés, 27 d'entre eux ont montré des divergences dans leurs classements comparatifs.

Limites de l'étude et pistes pour des recherches futures

Bien que cette étude ait permis de mettre en évidence des composantes clés de la vulnérabilité et de la préparation à l'adaptation au changement climatique, certaines limites méritent d'être mentionnées. Tout d'abord, l'ACP repose sur des données quantitatives, ce qui risque de ne pas saisir entièrement la complexité des processus de l'analyse ou l'évaluation des pays à être vulnérables ou à être prêts à s'adapter au changement climatique. En travaillant sur les mêmes indicateurs, on teste la sensibilité des indices à la construction statistique qui les sous-tend, mais pas leur sensibilité aux choix des indicateurs de base.

Des recherches futures pourraient se concentrer sur l'intégration d'indicateurs qualitatifs ou l'utilisation d'approches mixtes, combinant les méthodes quantitatives et qualitatives, afin d'obtenir une compréhension plus approfondie des dynamiques locales de vulnérabilité et de préparation. De plus, des études comparatives entre différents pays ou régions pourraient permettre d'identifier des modèles d'adaptation spécifiques et de mieux comprendre les facteurs de résilience à l'échelle locale.

En outre, il serait pertinent d'explorer ces indices dans le cadre d'études de cas sur la réponse aux événements climatiques extrêmes. Par exemple, la question se pose de savoir si deux pays ayant des classements différents subissent réellement les conséquences d'un événement climatique extrême de manière distincte. Une autre limite de ces indices réside dans le fait qu'ils sont calculés à l'échelle nationale, alors que certains pays présentent des hétérogénéités internes. C'est le cas de Mayotte, qui fait partie de la France, mais dont les vulnérabilités locales et les besoins en termes d'adaptation au changement climatique peuvent être très différents de ceux de la métropole.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer et comparer la vulnérabilité ainsi que la préparation à l'adaptation au changement climatique à l'échelle internationale. Il était question de calculer un nouvel indicateur de vulnérabilité et de préparation à l'adaptation au changement climatique, en nous inspirant du ND-GAIN et en exploitant les mêmes indicateurs, mais à l'aide de l'ACP. Ensuite, nous avons comparé les classements des pays entre les deux indices.

Pour répondre aux objectifs énoncés, les questions de recherche suivantes ont orienté cette étude :

- 1) Quels secteurs spécifiques émergent comme les principaux contributeurs à la vulnérabilité et à la préparation à l'adaptation au changement climatique à l'échelle internationale d'après les données quantitatives disponibles?
- 2) Quelle est l'étendue de la vulnérabilité et de la préparation au changement climatique et comment ces deux composantes varient-elles à l'échelle internationale ?
- 3) Les regroupements de pays obtenus à partir des deux approches (ND-GAIN et ACP) concordent-ils ou montrent-ils des divergences dans leurs classements ?
- 4) Quelles recommandations peuvent être formulées pour renforcer la capacité des pays à faire face à la vulnérabilité et aux défis climatiques de préparation, en se basant sur les résultats obtenus ?

Afin de répondre à ces questions, cette étude a été structurée autour d'une méthodologie en plusieurs étapes. Tout d'abord, une analyse des données a été réalisée en utilisant l'ACP pour développer un indicateur composite de vulnérabilité et de préparation à l'adaptation au changement climatique. Ce processus a permis d'identifier les facteurs déterminants dans l'ensemble des pays sous étude, tout en réduisant la complexité des données initiales. Ensuite, une comparaison des classements obtenus à partir de nos indicateurs avec l'ACP et ceux fournis par le ND-GAIN a été effectuée afin de mettre en lumière les similitudes et les divergences entre les deux approches.

Les résultats montrent que 71 pays se situent dans le quadrant rouge dans les deux indices (ACP et ND-GAIN), indiquant une situation d'urgence en termes de vulnérabilité au changement climatique, nécessitant une attention immédiate pour améliorer leur

préparation. Le quadrant vert de ces deux indices regroupe 66 pays, suggérant une préparation relativement bonne et une vulnérabilité moins élevée. Le quadrant bleu représente 14 pays pour ces deux indices. Enfin, le quadrant jaune de ces indices, avec 14 pays, met en évidence ceux qui, bien que moins vulnérables, restent peu préparés aux risques climatiques futurs. Seuls 27 pays sur les 192 (14%) ont présenté des divergences, se retrouvant dans des quadrants différents selon les deux méthodologies.

Les principaux secteurs identifiés comme contribuant à la vulnérabilité au changement climatique, ainsi que leurs saturations incluent :

- **Alimentation** : Le changement projeté de la population (-0,73), la dépendance aux importations alimentaires (-0,52), la capacité agricole (-0,54), proportion de la population agricole (-0,7) et la malnutrition des enfants (-0,63).
- **Habitat** : Concentration urbaine et population urbaine (0,7), Ratio de dépendance à l'âge (-0,57), Qualité des infrastructures liées au commerce et au transport (0,8), Proportion des routes pavées, y compris en milieu rural (0,72).
- **Santé** : Changement projeté des décès dus aux maladies induites par le changement climatique (-0,59), Dépendance aux ressources externes pour les services de santé (-0,66), Part de la population vivant dans des bidonvilles (-0,89), Personnel médical (infirmières, médecins, sage-femmes) (0,85), Accès à des installations sanitaires appropriées (0,88).
- **Écosystèmes** : La dépendance au capital naturel (-0,66), la qualité des biomes protégés (0,9) et l'engagement dans des conventions environnementales mondiales (0,62).
- **Infrastructure et Eau** : L'accès aux infrastructures de transport et à l'électricité (0,8 et 0,75 respectivement), et l'accès à l'eau potable (0,92).

De même, les principaux secteurs contribuant à la préparation à l'adaptation au changement climatique, ainsi que leurs saturations sont les suivants :

- **Gouvernance** : La stabilité politique (0,92), le contrôle de la corruption (0,86), l'état de droit (0,88) et la qualité des réglementations (0,78).

- **Social** : L'infrastructure des technologies de l'information et de la communication (0,55).

Les premières composantes principales ayant contribué à construire ces indices expliquent respectivement 30,3 % de la variance pour la vulnérabilité et 39,2 % de la variance pour la préparation.

Les résultats de cette étude confirment que les pays à revenu élevé, comme la Norvège, la Corée du Sud, et la Suisse, sont moins vulnérables au changement climatique grâce à de meilleures capacités d'adaptation et une meilleure préparation ; ce qui rejoint les conclusions de Sarkodie et al. (2022). En revanche, les pays à faible revenu, notamment Tchad, Yémen, Érythrée, Syrie, Afghanistan, Haïti, Venezuela, République Démocratique du Congo, Corée du Nord, Soudan, Congo, Somalie, Turkménistan, Myanmar, etc. sont plus vulnérables et les moins préparés à faire face aux défis du changement climatique. Nos analyses soulignent également l'importance des facteurs institutionnels, tels que la stabilité politique, l'état de droit, le contrôle de la corruption et la qualité des réglementations ; qui jouent un rôle crucial dans la préparation à l'adaptation, comme le suggèrent Raworth (2007) et Tilleard et Ford (2016).

Enfin, nos résultats montrent de fortes corrélations entre nos indices de vulnérabilité et de préparation à l'adaptation construits avec l'ACP et les indices ND-GAIN d'origine ; bien que des divergences apparaissent dans les classements de certains pays. Ce qui souligne la complexité de l'évaluation de la résilience climatique à l'échelle mondiale.

Au vu de ces résultats, nous pouvons donc formuler les recommandations suivantes :

- **Renforcement des infrastructures essentielles** : Prioriser les investissements dans les infrastructures de santé, d'eau potable et de transport pour réduire la vulnérabilité des populations les plus exposées, notamment dans les pays à faible revenu.
- **Amélioration de la gouvernance** : Mettre en œuvre des réformes visant à renforcer la stabilité politique, l'état de droit et la lutte contre la corruption, éléments clés pour une meilleure préparation à l'adaptation climatique.
- **Renforcement de la résilience alimentaire** : Promouvoir des stratégies agricoles durables, notamment la sécurité alimentaire pour lutter contre la malnutrition des enfants, l'amélioration des capacités agricoles et la réduction de la dépendance aux importations alimentaires.

- **Promotion des technologies de l'information et de la communication** : Développer l'accès aux TIC pour faciliter la diffusion d'informations climatiques à travers l'amélioration des abonnements mobiles et fixes, abonnements au haut débit fixe et le nombre des personnes qui ont accès à l'internet.
- **Protection des écosystèmes** : Investir dans la gestion durable des écosystèmes et renforcer les engagements envers les conventions environnementales internationales pour préserver le capital naturel et réduire les risques liés au changement climatique.
- **Approches adaptées au contexte local** : Favoriser la participation des acteurs locaux pour élaborer des politiques climatiques adaptées aux spécificités socio-économiques et environnementales de chaque pays et/ou région.
- **Intégration des méthodes mixtes pour une évaluation plus complète** : Combiner des approches quantitatives et qualitatives permettrait d'obtenir une image plus complète des défis auxquels les pays font face pour s'adapter au changement climatique. Bien que les méthodes quantitatives, telles que les indices de vulnérabilité et de préparation fournissent des mesures objectives et comparables à travers les pays, les approches qualitatives offrent également des perspectives intéressantes, permettant de mieux comprendre les défis spécifiques, les perceptions des communautés, les capacités d'adaptation, etc.

BIBLIOGRAPHIE

- Abson, D. J., Dougill, A. J., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.08.004>
- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Adger, W. N., & Barnett, J. (2009). Four Reasons for Concern about Adaptation to Climate Change. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 41(12), 2800–2805. <https://doi.org/10.1068/a42244>
- Ajtai, I., Ștefănie, H., Maloș, C., Botezan, C., Radovici, A., Bizău-Cârstea, M., & Baci, C. (2023). Mapping social vulnerability to floods. A comprehensive framework using a vulnerability index approach and PCA analysis. *Ecological Indicators*, 154, 110838. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110838>
- Amegavi, G. B., Bawole, J. N., & Buabeng, T. (2018). The dynamics of e-government enactment in a developing country public sector organisation: Evidence from Ghana. *International Journal of Electronic Governance*, 10(1), 74. <https://doi.org/10.1504/IJEG.2018.091267>
- Amegavi, G. B., Langnel, Z., Ofori, J. J. Y., & Ofori, D. R. (2021). The impact of adaptation on climate vulnerability: Is readiness relevant? *Sustainable Cities and Society*, 75, 103325. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103325>
- Audigier, V., Husson, F., & Josse, J. (2012). *Imputation de données manquantes pour des données mixtes via les méthodes factorielles grâce à missMDA*. 3. <https://hal.science/hal-00716876>
- Bankoff, G., Frerks, G., & Hilhorst, T. (Eds.). (2010). *Mapping vulnerability: Disasters, development, and people*. Earthscan Publications.
- Barnett, J. (2020). Global environmental change II: Political economies of vulnerability to climate change. *Progress in Human Geography*, 44(6), 1172–1184. <https://doi.org/10.1177/0309132519898254>

Bellamy, R. (2019). Social readiness of adaptation technologies. *WIREs Climate Change*, 10(6), e623. <https://doi.org/10.1002/wcc.623>

Biesbroek, R., Dupuis, J., Jordan, A., Wellstead, A., Howlett, M., Cairney, P., Rayner, J., & Davidson, D. (2015). Opening up the black box of adaptation decision-making. *Nature Climate Change*, 5(6), 493–494. <https://doi.org/10.1038/nclimate2615>

Busby, J. W., Smith, T. G., White, K. L., & Strange, S. M. (2013). Climate Change and Insecurity: Mapping Vulnerability in Africa. *International Security*, 37(4), 132–172. JSTOR.

Carman, R. (2023). *Les dernières données scientifiques sur le climat nous mettent en garde – il est temps de les prendre au sérieux*. <https://climatepromise.undp.org/fr/news-and-stories/IPCC-latest-climate-science-warning-climate-change>

Chen, C., Doherty, M., Coffee, J., Wong, T., & Hellmann, J. (2016). Measuring the adaptation gap: A framework for evaluating climate hazards and opportunities in urban areas. *Environmental Science & Policy*, 66, 403–419. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.05.007>

Chen, C., Noble, I., Hellmann, J., Coffee, J., Murillo, M., & Chawla, N. (2024). *University of Notre Dame Global Adaptation Initiative: Country Index Technical Report* (p. 50). University of Notre Dame. https://gain.nd.edu/assets/581554/nd_gain_countryindex_technicalreport_2024.pdf

Eckstein, D., Künzel, V., Schäfer, L., & Wings, M. (2019). *Global Climate Risk Index 2020: Who suffers most from extreme weather events? Weather-related loss events in 2018 and 1999 to 2018*. https://www.germanwatch.org/sites/default/files/20-2-01e%20Global%20Climate%20Risk%20Index%202020_14.pdf

Epule, T. E., Chehbouni, A., Dhiba, D., & Moto, M. W. (2021). The Readiness Index for Climate Change Adaptation in Africa: The Role of Climate and Adaptive Capacity Proxies. *Applied Sciences*, 11(20), 9413. <https://doi.org/10.3390/app11209413>

European Commission. Joint Research Centre. (2024). *INFORM report 2024: 10 years of INFORM: shared evidence for managing crises and disasters*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/555548>

Fedele, G., Donatti, C. I., Harvey, C. A., Hannah, L., & Hole, D. G. (2019). Transformative adaptation to climate change for sustainable social-ecological systems. *Environmental Science & Policy*, 101, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.07.001>

FEMA. (2020). *Building Codes Save: A Nationwide Study: Losses Avoided as a Result of Adopting Hazard-Resistant Building Codes* (Contract HSFE60-15-D-0003). Federal Emergency Management Agency. https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-11/fema_building-codes-save_study.pdf

Filmer, D., & Pritchett, L. H. (2001). Estimating wealth effects without expenditure data—or tears: An application to educational enrollments in states of India. *Demography*, 38(1), 115–132. <https://doi.org/10.1353/dem.2001.0003>

Ford, J. D., & King, D. (2015). A framework for examining adaptation readiness. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(4), 505–526. <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9505-8>

Ford, J. D., Labbé, J., Flynn, M., Araos, M., & IHACC Research Team. (2017). Readiness for climate change adaptation in the Arctic: A case study from Nunavut, Canada. *Climatic Change*, 145(1), 85–100. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2071-4>

Garcia, C. M., & Adriatico, C. (2022). *Determining the Climate Resiliency of Countries Worldwide*. 10:64-75.

Garderen, L. van, & Ludwig, F. (2012). Climate Change Adaptation Options for the Congo Basin Countries. In A. Heansler, F. Ludwig, & D. jacob (Eds.), *Climate change scenarios for the Congo Basin* (pp. 167–209). Climate Service Centre. <https://edepot.wur.nl/341521>

Garschagen, M., Doshi, D., Reith, J., & Hagenlocher, M. (2021). Global patterns of disaster and climate risk—An analysis of the consistency of leading index-based assessments and their results. *Climatic Change*, 169(1–2), 11. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03209-7>

Gloire, B. (2023). *Readiness for economic, social, and governance adaptation to mitigate vulnerability to climate change: Evidence from African Great Lakes Region*. University of Antwerp.

Greyling, T., & Tregenna, F. (2017). Construction and Analysis of a Composite Quality of Life Index for a Region of South Africa. *Social Indicators Research*, 131(3), 887–930. <https://doi.org/10.1007/s11205-016-1294-5>

Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1st ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

IPCC (Ed.). (2001). *Impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge Univ. Press.

Jolliffe, I. T., & 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. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>

Khan, A., & Amelie, V. (2015). Assessing climate change readiness in Seychelles: Implications for ecosystem-based adaptation mainstreaming and marine spatial planning. *Regional Environmental Change*, 15(4), 721–733. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0662-4>

Krishnan, V. (2010). *Constructing an Area-based Socioeconomic Index: A Principal Components Analysis Approach*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:28505642>

Lim, B., Spanger-Siegfried, E., Burton, I., Malone, E., & Huq, S. (2004). *Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures*. <http://www.cambridge.org>

Medina, N., Abebe, Y. A., Sanchez, A., & Vojinovic, Z. (2020). Assessing Socioeconomic Vulnerability after a Hurricane: A Combined Use of an Index-Based approach and Principal Components Analysis. *Sustainability*, 12(4), 1452. <https://doi.org/10.3390/su12041452>

Moser, S. C., & Ekstrom, J. A. (2010). A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(51), 22026–22031. <https://doi.org/10.1073/pnas.1007887107>

NAP-DRC. (2021). *Ministry of the Environment and Sustainable Development: National adaptation plan to climate change for the Democratic Republic of the Congo (2022-2026)*.

Nkhonjera, G. K. (2017). Understanding the impact of climate change on the dwindling water resources of South Africa, focusing mainly on Olifants River basin: A review. *Environmental Science & Policy*, 71, 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.02.004>

Obsi Gemed, D., Korecha, D., & Garedew, W. (2023). Determinants of climate change adaptation strategies and existing barriers in Southwestern parts of Ethiopia. *Climate Services*, 30, 100376. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100376>

Odhiambo, V. O., Hendriks, S. L., & Mutsvangwa-Sammie, E. P. (2021). The effect of an objective weighting of the global food security index's natural resources and resilience component on country scores and ranking. *Food Security*, 13(6), 1343–1357. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01176-6>

Raworth, K. (2007). *Adapting to Climate Change: What's needed in poor countries, and who should pay*. Oxfam Policy and Practice: Climate Change and Resilience.

Sarkodie, S. A., Ahmed, M. Y., & Owusu, P. A. (2022). Global adaptation readiness and income mitigate sectoral climate change vulnerabilities. *Humanities and Social Sciences Communications*, 9(1), 113. <https://doi.org/10.1057/s41599-022-01130-7>

Sarkodie, S. A., & Strezov, V. (2019). Economic, social and governance adaptation readiness for mitigation of climate change vulnerability: Evidence from 192 countries. *Science of The Total Environment*, 656, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.349>

Smit, B., & Wandel, J. (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008>

Smith, J. B., Vogel, J. M., & Iii, J. E. C. (2009). An architecture for government action on adaptation to climate change. An editorial comment. *Climatic Change*, 95(1–2), 53–61. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9623-1>

The Municipality of Rotterdam. (2022). *Resilient Rotterdam Strategy 2022-2027: From risks to resilience*. <https://www.resilientrotterdam.nl/en/download/>

Theokritoff, E., Thomas, A., Lissner, T., & Schleussner, C.-F. (2023). Interacting adaptation constraints in the Caribbean highlight the importance of sustained adaptation finance. *Climate Risk Management*, 39, 100483. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2023.100483>

Tilleard, S., & Ford, J. (2016). Adaptation readiness and adaptive capacity of transboundary river basins. *Climatic Change*, 137(3–4), 575–591. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1699-9>

Twecan, D., Wang, W., Xu, J., & Mohmmed, A. (2022). Climate change vulnerability, adaptation measures, and risk perceptions at households level in Acholi sub-region, Northern Uganda. *Land Use Policy*, 115, 106011. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106011>

UNFCCC. (2023). *Introduction to adaptation and resilience*. <https://unfccc.int/topics/adaptation-and-resilience/the-big-picture/introduction>

United Nations. (2023). What Is Climate Change? *Climate Action*. <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>

United Nations Environment Programme. (2009). *Vulnerability and Climate Change Impact Assessments for Adaptation: VIA Module*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/11217>

Vial, J., Aroskay, A., Wilgenbus, D., Guilyardi, E., Caud, N., Rumjaun, A., Schlüpmann, J., Côté, C., & Barve, A. (2024). *Sixième rapport d'évaluation: Résumé pour enseignants basé sur le sixième rapport d'évaluation du GIEC (AR6)*. https://www.oce.global/sites/default/files/2024-02/OCE_R%C3%A9sum%C3%A9pourenseignants_AR6.pdf

Wang, P., Qiao, W., Wang, Y., Cao, S., & Zhang, Y. (2020). Urban drought vulnerability assessment – A framework to integrate socio-economic, physical, and policy index in a vulnerability contribution analysis. *Sustainable Cities and Society*, 54, 102004. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.102004>

Welle, T., & Birkmann, J. (2015). The World Risk Index – An Approach to Assess Risk and Vulnerability on a Global Scale. *Journal of Extreme Events*, 02(01), 1550003. <https://doi.org/10.1142/S2345737615500037>

Yu, J., Kim, J. E., Lee, J.-H., & Kim, T.-W. (2021). Development of a PCA-Based Vulnerability and Copula-Based Hazard Analysis for Assessing Regional Drought Risk. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(5), 1901–1908. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0922-z>

ANNEXES

Tableau 16 : Scores ACP et ND-GAIN de préparation

N°	ISO3	Readiness_Score_ACP	Readiness_Score_ND_GAIN
1	KOR	100	72,9504468
2	SGP	93,19279806	81,17178386
3	DNK	89,65633086	76,97958643
4	FIN	87,85390511	75,38123283
5	NOR	87,84032253	76,36291329
6	NZL	85,93835566	69,67477586
7	JPN	85,48393602	69,04458742
8	AUS	84,49649153	69,69940322
9	SWE	84,43336663	72,11663129
10	CHE	84,0491932	69,37973749
11	ISL	83,91121303	70,0331411
12	NLD	82,52881935	67,6022136
13	DEU	81,04503589	68,86897626
14	MCO	80,07279067	69,68393521
15	GBR	79,94642126	69,05741072
16	CAN	79,03790925	65,02765132
17	LIE	78,43404191	64,296679
18	IRL	77,70694829	60,43860935
19	AUT	77,42367535	67,89611471
20	EST	77,35846317	62,06804161
21	LUX	76,22842616	65,35059831
22	USA	74,98824231	65,11905045
23	BEL	74,54871186	59,83326327
24	FRA	73,9770703	65,41646621
25	ARE	71,45999058	58,78114669
26	SMR	70,62431844	64,56065033
27	LTU	70,22053033	59,39745191
28	PRT	69,462447	57,93609272
29	LVA	68,52796088	58,08850928
30	SVN	68,51231735	59,3531147
31	CZE	68,27656646	55,62847588
32	AND	67,58613133	39,70047919
33	URY	67,0342843	51,45984053
34	BRN	66,55924503	53,50650872
35	ESP	65,75140582	53,11329945
36	CYP	65,16049621	51,99042357
37	MUS	65,10348517	56,5010797
38	CHL	65,06571752	53,68895182
39	GRC	64,89915754	52,97397198
40	QAT	64,50466934	54,51987802
41	BRB	64,35014303	59,33471083
42	MLT	64,14092831	50,11338232

43	KNA	63,95165387	56,22470379
44	GEO	62,91354866	57,29434229
45	SAU	62,66464419	56,19590413
46	BHR	61,03720121	52,99318996
47	POL	60,35352511	53,42782646
48	GRD	60,2272237	53,44132198
49	SVK	59,4008193	50,45154283
50	ISR	58,42673112	53,41787764
51	ITA	58,2908349	53,23192471
52	HRV	57,88194	48,89009869
53	SYC	57,26856302	47,9021426
54	HUN	57,11721922	49,31648819
55	OMN	56,96719423	50,08679469
56	MYS	56,26279866	50,53242156
57	CHN	56,0132844	55,70066082
58	CRI	55,2783135	45,33667008
59	VCT	55,15760657	49,35903357
60	DMA	54,66196424	51,94248407
61	PLW	53,72407948	48,52155682
62	BTN	53,70994389	47,80805657
63	KWT	53,69488403	46,80082226
64	MNE	53,17136184	46,77512908
65	LCA	53,07898023	45,45428861
66	BGR	52,32167291	45,77236561
67	TUV	51,93366408	62,33118526
68	ROU	51,86353662	44,04416577
69	ATG	51,55383418	44,9569467
70	BHS	51,55322836	42,5833488
71	CPV	51,4265249	44,96916716
72	KAZ	51,41744009	51,32979806
73	BWA	50,93823787	43,40643291
74	ARM	50,79649552	50,13535732
75	MKD	50,46168984	46,93348187
76	WSM	50,44790497	43,64256447
77	THA	50,38268773	48,97712441
78	FJI	50,31006879	47,50916657
79	NRU	49,57499839	57,44353988
80	SRB	49,29704478	44,39525862
81	TUR	48,99869588	48,65809956
82	MNG	48,02440447	46,03228306
83	ALB	47,17001268	42,14752263
84	MDA	45,82567807	43,67961855
85	JAM	45,73824953	41,23099635
86	JOR	45,31505482	41,13200571
87	VNM	44,6390104	43,17970029
88	MAR	44,44314531	43,39040552
89	MDV	44,36735692	45,05032433
90	TON	43,75129606	42,97330864

91	ARG	43,61825762	37,58263198
92	TUN	43,45948388	43,68778346
93	BLR	43,4519603	46,63944364
94	MHL	42,98252144	41,82440463
95	DOM	42,7686418	36,70391222
96	RWA	42,70726232	42,7442916
97	NAM	42,52350305	38,08981905
98	AZE	42,13334482	44,43479148
99	PAN	41,50635938	37,8250848
100	IDN	40,93511534	39,66980319
101	PER	40,76164121	38,86743834
102	COL	40,61330202	37,66647819
103	KIR	40,60454509	44,4073793
104	RUS	40,22405333	49,97823299
105	UZB	40,07256346	41,85257885
106	TTO	39,83096274	33,83576741
107	BIH	39,83024747	36,83657364
108	VUT	39,31466651	38,44513473
109	BRA	39,08010907	35,39604067
110	IND	38,89468777	39,49551476
111	CUB	38,25071924	34,97630985
112	UKR	37,54178612	40,55086784
113	FSM	36,99061945	36,48679791
114	GHA	36,81600338	34,79620113
115	ECU	36,26968032	34,64392291
116	PRY	36,09475049	35,88065186
117	MEX	35,81571818	36,0954745
118	LKA	35,39985275	37,88962264
119	ZAF	35,3343916	35,46360768
120	KGZ	34,892154	39,28273286
121	GUY	34,8151575	34,1405476
122	BLZ	34,47001421	33,51173533
123	STP	34,27094728	37,11795724
124	PHL	33,97073841	34,07351319
125	EGY	33,789139	34,80597291
126	SLV	33,55361563	33,87194175
127	SEN	33,18359101	35,12251441
128	NPL	33,15722716	35,91281584
129	DZA	32,06700313	33,76399839
130	SLB	32,04601982	39,70847513
131	SUR	31,79907597	32,85775232
132	LAO	31,29385645	33,3916556
133	CIV	29,87568637	31,7986034
134	ZMB	29,14907984	33,00528019
135	BEN	29,07459096	33,83758128
136	LSO	28,97089768	30,74975994
137	IRN	28,87516205	37,63631201
138	TZA	28,55718532	30,84692366

139	TGO	28,31679035	35,77995729
140	LBN	27,75682448	29,60653392
141	MRT	27,71521499	35,93615389
142	KEN	27,48607613	31,00915001
143	GTM	27,17022547	30,94417482
144	GMB	27,0537312	32,34464105
145	DJI	26,7029014	32,39347127
146	KHM	26,2460712	28,92872081
147	MWI	26,09299486	28,93007563
148	GAB	25,76783158	29,89340866
149	SWZ	25,60896864	30,89308789
150	NER	25,3761581	34,18342198
151	PNG	24,01569408	28,83897222
152	HND	23,80250684	26,35652064
153	BFA	23,66804741	28,35297817
154	BGD	23,29304381	27,48409095
155	BOL	23,23548333	27,99375131
156	TLS	23,1382393	37,45687794
157	TJK	22,99138643	31,9493435
158	UGA	22,95179476	28,26709341
159	AGO	22,9258383	27,04592194
160	NIC	22,54975097	27,25825772
161	PAK	22,49019487	30,67553878
162	SLE	22,29112253	29,80441907
163	ETH	21,6543936	29,58513696
164	GIN	21,04076931	30,89328726
165	MDG	20,46906272	26,29489738
166	IRQ	20,32780281	30,47201238
167	LBR	20,19733552	28,13750238
168	MOZ	18,72022931	26,23759938
169	MLI	18,16631037	28,42631983
170	CMR	17,94324187	26,25025371
171	NGA	17,90539874	25,06361138
172	LBY	17,49436071	28,34107991
173	COM	17,44180153	28,29124697
174	GNB	17,0387648	27,45218865
175	BDI	16,76963819	27,21692386
176	GNQ	16,62554379	25,46404319
177	ZWE	16,53565289	21,9822154
178	MMR	16,2744686	25,20497671
179	TKM	16,21361112	24,11394678
180	SOM	14,77548674	35,46906752
181	COG	14,4041895	23,51791341
182	SDN	14,08515799	25,54319694
183	PRK	13,59911716	34,0298064
184	COD	13,17518257	21,1828835
185	VEN	13,09222163	19,43869877
186	HTI	11,76212859	21,69759023

187	AFG	11,16821194	25,01705924
188	SYR	9,694519021	22,49586433
189	ERI	8,754293146	21,46517434
190	YEM	8,650826295	24,44214166
191	TCD	7,565638398	18,86409374
192	CAF	0	13,58616008

Tableau 17 : Scores ACP et ND-GAIN de vulnérabilité

N°	ISO3	Vulnerability_Score_ACP	Vulnerability_Score_ND_GAIN
1	NOR	0	27,0063887
2	NLD	1,120489598	35,5319983
3	MLT	2,452065891	31,77544707
4	CHE	2,552054146	25,13313315
5	BEL	2,681580478	32,92883467
6	DEU	3,812775126	29,90399645
7	MCO	3,906897936	0
8	FIN	4,525352461	29,50471365
9	ESP	5,127804986	29,22386555
10	LUX	5,459363548	30,66042143
11	FRA	5,898751881	29,96450983
12	JPN	6,094587152	35,97665306
13	GBR	6,423392995	28,45756139
14	SGP	6,974445691	39,0010736
15	DNK	7,293308995	34,78897699
16	USA	8,125959513	29,80758939
17	AUT	8,170109996	29,92531486
18	IRL	8,24504488	31,44736777
19	KOR	8,573258375	35,27543109
20	SWE	8,599946606	32,40343068
21	ITA	8,713071999	34,07660476
22	GRC	8,802764029	33,90881209
23	PRT	8,861659885	31,90188829
24	ISL	9,918899274	34,8019656
25	CAN	10,5436621	28,11075661
26	NZL	11,25881768	32,09602841
27	CZE	11,64674538	26,32585979
28	SMR	11,71978731	0
29	AUS	12,65752523	30,60457229
30	ISR	12,84157285	29,15322807
31	AND	13,00530167	0
32	SVN	14,02746648	31,51158114
33	ARE	14,34179314	38,23196888
34	QAT	14,50069032	35,23085105
35	POL	14,51289396	30,23824759
36	HUN	15,06370089	35,18679061
37	SVK	15,09662951	34,72475844

38	BLR	15,68943045	32,52247515
39	CYP	17,82700519	35,8640336
40	LTU	17,91213018	36,0711399
41	CHL	18,53342639	33,44415373
42	RUS	18,8195531	32,27926306
43	EST	18,83955971	33,03519487
44	TUR	19,33615011	35,75432855
45	LVA	19,3411456	36,42506161
46	BGR	19,50903557	35,79723063
47	HRV	20,15894619	38,00020517
48	KWT	21,8949792	36,40527074
49	URY	22,11571844	39,12784108
50	BHR	22,393145	43,45300922
51	CHN	22,89043504	35,33549629
52	LIE	23,00793441	0
53	NRU	23,98654968	50,80147786
54	UKR	24,0826723	35,87172563
55	JOR	24,11339955	36,57886353
56	BRA	25,6679494	36,34847766
57	ARG	26,41561155	37,17042757
58	ARM	26,78942444	36,23384179
59	TUN	27,26465747	37,62257557
60	ROU	27,45762083	41,52646026
61	CRI	27,55763172	38,01325908
62	ALB	28,23410109	38,63316265
63	MEX	28,24891045	36,83621529
64	MYS	28,61253438	36,38861537
65	CUB	28,67907901	43,75921788
66	LBN	28,69331079	40,19307789
67	MNE	28,80175453	38,1056237
68	UZB	29,54001335	34,90926855
69	BIH	29,62568344	34,88565677
70	MKD	29,74629116	37,88067987
71	SAU	30,0745802	41,07424744
72	GEO	30,07699916	39,86373875
73	PLW	30,08005957	51,37241475
74	MAR	30,54700062	36,63952251
75	KAZ	30,8569043	31,56432618
76	TKM	30,91565037	37,45460446
77	MDA	30,9234393	39,34940376
78	SYC	31,2033838	43,74599089
79	THA	31,83639401	41,12132708
80	SRB	32,00420003	42,12921137
81	PAN	32,1744369	42,21909979
82	JAM	32,3147127	42,2050676
83	SLV	32,50679218	41,70815195
84	KGZ	32,55591867	32,25284716
85	ZAF	32,75291713	38,327735

86	MUS	33,11461395	40,95917901
87	BRN	33,69932619	40,4359133
88	DOM	34,20795054	43,23718496
89	AZE	34,68994137	40,93410217
90	EGY	34,81681463	39,62713158
91	COL	35,04599889	40,28553908
92	DZA	35,19837847	36,43099613
93	OMN	35,28084338	42,23552901
94	IRN	35,54973537	36,50932011
95	DMA	35,72861094	45,98679778
96	TTO	36,29161523	37,46851484
97	VEN	37,87307001	37,36028567
98	BHS	38,45555039	45,65585816
99	MNG	38,76899737	34,08873304
100	VNM	38,79623277	45,77083491
101	BRB	38,86323721	37,21427009
102	VCT	39,17440016	43,85423328
103	PRY	39,45324946	39,08137936
104	GRD	40,16798495	38,69230444
105	PER	40,71872203	40,64451444
106	PHL	41,17702914	44,39237526
107	FJI	41,55350958	45,71648462
108	BWA	41,64784105	43,39411421
109	BLZ	41,81091463	46,1605095
110	LBY	42,46107422	42,2801313
111	GTM	43,56859837	43,54904678
112	IDN	44,0577022	42,57893886
113	SYR	44,26964664	45,52646033
114	TJK	44,59008276	36,65623692
115	HND	45,02298039	44,73388281
116	PRK	45,45266634	45,88626285
117	ATG	45,93757865	46,80614989
118	LCA	46,65918091	37,90468493
119	IRQ	46,86458547	43,30337982
120	KNA	46,92845138	0
121	CPV	47,19883533	42,8217672
122	ECU	47,96469757	46,49135669
123	BOL	48,30734503	44,70253469
124	MDV	48,35261521	56,36100319
125	NAM	48,59281464	45,95866355
126	GAB	49,86271994	43,92927206
127	MHL	50,41314708	58,68317141
128	NIC	50,85730822	46,07547015
129	SUR	51,00026068	42,36004394
130	IND	51,28416602	45,36683243
131	LKA	52,21288171	46,61838502
132	SWZ	52,30410053	45,77610118
133	GNQ	54,21137065	41,08533752

134	BTN	54,54215993	52,67913103
135	GHA	54,93333876	44,43537659
136	PAK	55,52264827	50,13922101
137	WSM	55,78588969	52,07116814
138	TON	57,9621644	60,4733093
139	TUV	58,36306788	58,04877169
140	KHM	58,4737906	48,26955383
141	GUY	58,51295993	43,69314161
142	LSO	60,09901853	48,14718219
143	STP	61,05633326	54,20746689
144	SEN	61,14596837	53,40355406
145	BGD	61,29495318	55,4273337
146	NGA	61,303734	46,23483998
147	LAO	61,71330381	48,88298679
148	KIR	61,92903798	57,16615087
149	MMR	61,94562326	51,04502898
150	NPL	61,95384138	49,37772218
151	DJI	62,48216468	50,14795792
152	CIV	62,99021899	48,49948863
153	CMR	63,51483966	48,90791565
154	HTI	63,63566338	51,01095767
155	GMB	64,06517326	52,7134043
156	ZWE	64,46545314	49,55327237
157	KEN	64,68806872	49,3816065
158	ZMB	65,70799832	48,7665948
159	AGO	66,93158989	50,88688962
160	COM	67,70690281	54,57164681
161	TGO	67,98397373	49,86994931
162	VUT	69,69100568	55,95176746
163	GIN	70,03677122	53,37492783
164	COG	70,14271511	51,76718183
165	TLS	70,20744484	54,89755821
166	TZA	70,88262783	50,0745309
167	FSM	71,39438185	62,0661464
168	SLB	71,52919323	63,41182956
169	MOZ	72,54356872	47,89161462
170	MRT	72,9988114	58,67841601
171	YEM	73,04284853	52,10580349
172	AFG	73,11141259	58,60214668
173	BFA	73,15652119	52,37406079
174	BEN	74,31079647	57,1565444
175	MWI	74,31145884	55,0691729
176	SLE	74,55065241	59,79123259
177	RWA	74,63677289	56,7822129
178	LBR	74,76558689	54,33385054
179	SDN	76,50027159	60,10569251
180	UGA	76,57228645	52,48056356
181	GNB	77,08841383	61,66011773

182	ETH	77,90197198	52,19539367
183	MLI	78,29794609	59,94205023
184	MDG	78,85751943	55,90785118
185	PNG	80,53767026	55,06897954
186	COD	82,87138598	56,15728128
187	ERI	82,99105442	60,17268144
188	CAF	83,18020845	57,79655368
189	SOM	84,18274398	60,61662586
190	TCO	90,92323316	64,55348011
191	BDI	91,76904392	55,41774667
192	NER	100	63,22264485

```

-----#
#                               Université Catholique de Louvain
#       Advanced Master in Quantitative Methods in Social Sciences
#       Orientation : Causal Data Analysis & Public Policy Evaluation
#
#                               Analyse des données pour le mémoire
#   Sujet : Vulnérabilité et préparation à l'adaptation au changement climatique:
#                               Une comparaison internationale
#
#                               Par Balolage Gloire Musimwa
#-----#
#
# Effacer l'environnement de travail
rm(list = ls())

# Définition du répertoire de travail
setwd("C:/Users/hp/Documents/UCLouvain/Dissertation/Data")
options(max.print = 10000)
options(scipen = 100)
getwd() # Affiche le répertoire de travail actuel

# Charger les bibliothèques nécessaires
library(tidyverse)
library(readxl)
library(writexl)
library(dplyr)
library(readr)
library(corrplot)
library(FactoMineR)
library(ggcorrplot)
library(ggplot2)
library(corr)
library(missMDA)
library(factoextra)
library(psych) # Pour le test KMO
library(REDaS) # Pour le test de Bartlett
library(GPArotation) # Pour la rotation Varimax

#####
#
# 1. DONNEES SUR LES 36 INDICATEURS DE LA VULNERABILITE
#
#####

# Définir le chemin vers ton dossier d'indicateurs de vulnérabilité
vul_indicators_path <- "C:/Users/hp/Documents/UCLouvain/Dissertation/nd_gain_countryindex_2024/resources/indicators/Vulnerability"

# Liste des sous-dossiers (indicateurs) dans le dossier "Vulnerability"
vul_indicators_folders <- list.dirs(vul_indicators_path, full.names = TRUE, recursive = FALSE)

# Créer une liste pour stocker les données des indicateurs
input_data_list <- list()

# Boucle pour lire chaque fichier 'input.csv' dans chaque sous-dossier

```

```

for (folder in vul_indicators_folders) {
  # Créer le chemin vers le fichier 'input.csv' dans chaque sous-dossier
  file_path <- file.path(folder, "input.csv")

  # Lire le fichier si le fichier existe
  if (file.exists(file_path)) {
    input_data <- read_csv(file_path)

    # Ajouter un identifiant pour chaque indicateur
    input_data$indicator <- basename(folder)

    # Ajouter les données à la liste
    input_data_list[[basename(folder)]] <- input_data
  }
}

# Combiner toutes les données dans un seul data frame
vul_all_data <- bind_rows(input_data_list)

# Extraire uniquement les colonnes ISO3, Name, et l'année 2022
vul_data_2022 <- vul_all_data %>%
  select(ISO3, Name, `2022`, indicator)

# Inspecter les premières lignes du tableau final
head(vul_data_2022)

# Pivoter pour que chaque indicateur devienne une colonne
vul_data_pivoted <- vul_data_2022 %>%
  pivot_wider(names_from = indicator, values_from = `2022`)

# Inspecter les premières lignes de la base des données pivotée
head(vul_data_pivoted)

#md.pattern(vul_data_pivoted)
#md.pairs(vul_data_pivoted)

# Calculer le nombre de valeurs manquantes et la proportion en pourcentage par variable
missing_data_summary <- sapply(vul_data_pivoted, function(x) c(
  missing_count = sum(is.na(x)), # Nombre de valeurs manquantes
  missing_percentage = round((sum(is.na(x)) / length(x)) * 100, 2) # Proportion de valeurs
  manquantes en % avec 2 chiffres après la virgule
))

# Afficher le résumé des valeurs manquantes pour chaque variable
missing_data_summary

# Calculer la proportion globale de valeurs manquantes
total_missing_proportion <- sum(is.na(vul_data_pivoted)) / prod(dim(vul_data_pivoted))
print(total_missing_proportion)

summary(vul_data_pivoted[, 3:38])

# Calculate the maximum and standard deviation for each column
summary_stats <- sapply(vul_data_pivoted[, 3:38], function(x) {
  c(
    Mean = mean(x, na.rm = TRUE),
    SD = sd(x, na.rm = TRUE),
    Min = min(x, na.rm = TRUE),
    Max = max(x, na.rm = TRUE)
  )
})

# Display the summary statistics
summary_stats

# Visualiser les proportions de données manquantes
gg_miss_var(vul_data_pivoted[3:38]) +
  labs(title = "Proportion de données manquantes", x = "Variables", y = "Proportion manquante")

# Calculer la matrice de corrélation pour vulnerability_indicators
correlation_matrix <- cor(vul_data_pivoted[, 3:38], use = "complete.obs")
print(correlation_matrix)

# Test KMO sur les indicateurs de vulnérabilité
kmo_result_vul <- KMO(correlation_matrix)
print(kmo_result_vul)

```

```

# Test de sphéricité de Bartlett les indicateurs de vulnérabilité
bartlett_result_vul <- bart_spher(correlation_matrix)
print(bartlett_result_vul)

# Tracer un graphique de la matrice de corrélation
corrplot(correlation_matrix, method = "color")

# Effectuer l'ACP sur les 36 indicateurs de la vulnérabilité
pca_data <- vul_data_pivoted[, 3:38]
comp <- imputePCA(pca_data, scale = TRUE) # Impute the table
res.pca <- PCA(comp$completeObs) # Do the PCA. This estimate should be better
# than simply using the mean, because we've
# taken into account the links between variables
# and similarities between individuals in its
# calculation.

#pca_data          # pca_data with missing values
#comp$completeObs  # pca_data imputed

# Visualizing uncertainty due to missing data
#uncertainty <- MIPCA(pca_data, scale = TRUE)
#plot(uncertainty)

# pour synthétiser
summary(res.pca)

# Les valeurs propres
res.pca$eig # 8 composantes avec eigenvalues > 1

#####
# Refaire l'ACP avec ncp = 8
comp2 <- imputePCA(pca_data, scale = TRUE, ncp = 8)
res.pca <- PCA(comp2$completeObs)

#pca_data          # pca_data with missing values
#comp2$completeObs # pca_data imputed

# Visualizing uncertainty due to missing data
#uncertainty <- MIPCA(pca_data, scale = TRUE, ncp = 8)
#plot(uncertainty)

# pour synthétiser
summary(res.pca)

# Afficher les valeurs propres avec 3 décimales
round(res.pca$eig, 3)

# Catell criterion: on recherche un "coude"
fviz_eig(res.pca)

plot.PCA(res.pca, choix = "var", max.overlaps = 192)
plot.PCA(res.pca, choix = "ind")

# Les saturations
res.pca$var$coord #corrélations entre variables initiales et les composantes
# C'est la contribution d'une variable à la construction de la composante

summary(res.pca)

# Appliquer la rotation Varimax
vulnerability_varimax <- varimax(res.pca$var$coord)
vulnerability_varimax

# Extraire les coordonnées des variables (charges factorielles)
loadings_v <- res.pca$var$coord
round(loadings_v, 2)

# Appliquer une rotation Varimax
loadings_rotated_v <- varimax(loadings_v[, 1:5])$loadings
loadings_rotated_v <- round(loadings_rotated_v, 2)

# Définir un seuil pour les valeurs significatives (par exemple, > 0.5)
threshold <- 0.5
loadings_significant_v <- ifelse(abs(loadings_rotated_v) > threshold, loadings_rotated_v, " ")
loadings_significant_v

```

```

# Les communautés
res.pca$var$cos2 #Part de variance d'une variable représentée par la composante

# Contribution des variables initiales aux composantes
res.pca$var$contrib

# Pour une représentation graphique de la contribution des variables aux composantes
corrplot(res.pca$var$coord,
          is.corr=FALSE) # ce ne sont pas des corrélations, mais la contribution aux composantes
principales

# Inverser la matrice de contributions des variables aux composantes principales
contribution_matrix <- t(res.pca$var$coord)

# Représentation graphique avec les indicateurs en colonnes et les dimensions en lignes
corrplot(contribution_matrix,
          is.corr=FALSE)

# Spécifiez le fichier de sortie
png("contribution_vuln_graph.png", width = 800, height = 600)
# Représentation graphique avec les indicateurs en colonnes et les dimensions en lignes
corrplot(contribution_matrix,
          is.corr=FALSE)

# Sauvegarder le fichier
dev.off()

pca_screepplot <- fviz_eig(
  res.pca,
  choice = "eigenvalue", # Afficher les valeurs propres
  geom = c("bar", "line"),
  barfill = "steelblue",
  barcolor = "steelblue",
  linecolor = "black",
  ncp = 36, # Nombre de dimensions principales affichées
  addlabels = TRUE, # Ajouter les étiquettes sur les barres
  hjust = 0,
  main = "Valeurs propres des composantes principales de la vulnérabilité",
  xlab = "Nombre des composantes",
  ylab = "Valeurs propres",
  ggtheme = theme_minimal()
) +
  theme(
    plot.title = element_text(hjust = 0.5) # Centrer le titre
  )

ggsave(
  filename = "pca_screepplot_vulnerability.png",
  plot = pca_screepplot,
  width = 10,
  height = 6,
  dpi = 300,
  bg = "white" # Forcer le fond blanc ici
)

fviz_eig(
  res.pca,
  choice = c("variance", "eigenvalue"),
  geom = c("bar", "line"),
  barfill = "steelblue",
  barcolor = "steelblue",
  linecolor = "black",
  ncp = 36,
  addlabels = TRUE,
  hjust = 0,
  main = "var",
  xlab = NULL,
  ylab = "% Variances expliquées",
  ggtheme = theme_minimal()
)

# Autre représentation pour les contributions (composante 1)
fviz_contrib(res.pca,
             choice = "var", # contribution des variables (pas des individus)
             axes = 1, # dimension 1
             top = 36, # 36 variables de vulnérabilité

```

```

    title = "Contribution des variables à la composante 1")

# Autre représentation pour les contributions (composante 2)
fviz_contrib(res.pca_r,
  choice = "var",
  axes = 1, # dimension 1
  top = 9, # 9 variables de préparation
  title = "Contribution des variables à la composante 1")

# Autre représentation pour les contributions (composante 2)
fviz_contrib(res.pca,
  choice = "var", # contribution des variables (pas des individus)
  axes = 2, # dimension 1
  top = 36) # dix premières variables

# les scores factoriels de chaque observation
res.pca$ind$coord

# Pour garder la composante 1 comme nouvel index:
vul_data_pivoted$Index_Vuln_ACP <- res.pca$ind$coord[,1]

scores_vulnerability <- vul_data_pivoted$Index_Vuln_ACP

# Standardiser l'indice basé sur PC1
min_pcl <- min(vul_data_pivoted$Index_Vuln_ACP)
max_pcl <- max(vul_data_pivoted$Index_Vuln_ACP)
vul_data_pivoted$SI_Scores <- (vul_data_pivoted$Index_Vuln_ACP - min_pcl) / (max_pcl - min_pcl)
* 100

# Inverser l'échelle de l'indice pour rendre les pays avec petits scores moins vulnérables
vul_data_pivoted$SI_Scores_inv <- 100 - ((vul_data_pivoted$Index_Vuln_ACP - min_pcl) / (max_pcl
- min_pcl) * 100)

# Visualiser la distribution de l'indice inversé
hist(vul_data_pivoted$SI_Scores_inv, breaks = 20,
  main = "Distribution de l'indice de vulnérabilité",
  xlab = "Indice de vulnérabilité")

# Exporter au format CSV
write.csv(vul_data_pivoted, "new_indices_vulnerabilite_acp2.csv", row.names = FALSE)
View(vul_data_pivoted)

# Comparaison des indices de vulnérabilité ND_GAIN et ACP
indices_vul <- read_excel("new_indices_vulnerabilite_acp.xlsx", sheet =
"new_indices_vulnerabilite_acp")
summary(indices_vul)

# Vérifier combien de valeurs manquantes existent
sum(is.na(indices_vul$Index_Vulnerabilité_ND_GAIN))

# Conversion en numérique
indices_vul$Index_Vulnerabilité_ND_GAIN <- as.numeric(gsub(",", ".",
indices_vul$Index_Vulnerabilité_ND_GAIN))
summary(indices_vul)
str(indices_vul$Index_Vulnerabilité_ND_GAIN)

# Calcul de la corrélation
correlation_value <- cor(indices_vul$Index_Vulnerabilite_ACP,
  indices_vul$Index_Vulnerabilité_ND_GAIN,
  method = "pearson")
print(correlation_value)

# Créer le graphique avec ggplot2
vuln_plot <- ggplot(indices_vul, aes(x = Index_Vulnerabilite_ACP, y =
Index_Vulnerabilité_ND_GAIN)) +
  geom_point(color = "blue", size = 3) + # Points de données
  geom_smooth(method = "lm", color = "red", se = FALSE) + # Droite de régression
  annotate("text", x = 15, y = 95, label = paste("Corrélation = ", round(correlation_value, 2)),
color = "blue", size = 5) + # Corrélation
  labs(title = "Matrice de corrélation des indices de vulnérabilité ND-GAIN et ACP",
    x = "Indice Vulnérabilité ACP",
    y = "Indice Vulnérabilité ND-GAIN") +
  scale_x_continuous(limits = c(0, 100), breaks = seq(0, 100, by = 10)) + # Limites pour l'axe
des x
  scale_y_continuous(limits = c(0, 100), breaks = seq(0, 100, by = 10)) + # Limites pour l'axe
des y
  theme_minimal() + # Utilisation du fond minimal blanc

```

```

theme(panel.background = element_rect(fill = "white")) # Garantir un fond blanc

# Exporter le graphique en format PNG
ggsave("comparaison_vulnerabilite.png", plot = vuln_plot, width = 8, height = 6, dpi = 300)

#####
#
# 2. DONNEES SUR LES 9 INDICATEURS DE LA PREPARATION
#
#####

# Charger les fichiers CSV des neuf sous-dossiers
data1 <- read.csv("C:/Users/hp/Documents/UCLouvain/Dissertation/nd_gain_countryindex_2024/resources/indicators/Readiness/id_econ_01/input.csv")
data2 <- read.csv("C:/Users/hp/Documents/UCLouvain/Dissertation/nd_gain_countryindex_2024/resources/indicators/Readiness/id_gove_01/input.csv")
data3 <- read.csv("C:/Users/hp/Documents/UCLouvain/Dissertation/nd_gain_countryindex_2024/resources/indicators/Readiness/id_gove_02/input.csv")
data4 <- read.csv("C:/Users/hp/Documents/UCLouvain/Dissertation/nd_gain_countryindex_2024/resources/indicators/Readiness/id_gove_03/input.csv")
data5 <- read.csv("C:/Users/hp/Documents/UCLouvain/Dissertation/nd_gain_countryindex_2024/resources/indicators/Readiness/id_gove_04/input.csv")
data6 <- read.csv("C:/Users/hp/Documents/UCLouvain/Dissertation/nd_gain_countryindex_2024/resources/indicators/Readiness/id_soci_01/input.csv")
data7 <- read.csv("C:/Users/hp/Documents/UCLouvain/Dissertation/nd_gain_countryindex_2024/resources/indicators/Readiness/id_soci_02/input.csv")
data8 <- read.csv("C:/Users/hp/Documents/UCLouvain/Dissertation/nd_gain_countryindex_2024/resources/indicators/Readiness/id_soci_03/input.csv")
data9 <- read.csv("C:/Users/hp/Documents/UCLouvain/Dissertation/nd_gain_countryindex_2024/resources/indicators/Readiness/id_soci_04/input.csv")

# Vérifier le nombre de lignes dans chaque fichier pour l'année 2022
nrow(data1) # 193
nrow(data2) # 192
nrow(data3) # 192
nrow(data4) # 192
nrow(data5) # 192
nrow(data6) # 192
nrow(data7) # 192
nrow(data8) # 192
nrow(data9) # 192

# Supprimer la ligne 25 de data1 ne correspondant pas aux autres
data1_clean <- data1[-25, ]

# Sélectionner uniquement les colonnes ISO3, Name, et X2022
data1_selected <- data1_clean %>% select(ISO3, Name, X2022)
data2_selected <- data2 %>% select(ISO3, Name, X2022)
data3_selected <- data3 %>% select(ISO3, Name, X2022)
data4_selected <- data4 %>% select(ISO3, Name, X2022)
data5_selected <- data5 %>% select(ISO3, Name, X2022)
data6_selected <- data6 %>% select(ISO3, Name, X2022)
data7_selected <- data7 %>% select(ISO3, Name, X2022)
data8_selected <- data8 %>% select(ISO3, Name, X2022)
data9_selected <- data9 %>% select(ISO3, Name, X2022)

# Renommer X2022 dans chaque base de données avec le nom correspondant
data1_selected <- data1_selected %>% rename(id_econ_01 = X2022)
data2_selected <- data2_selected %>% rename(id_gove_01 = X2022)
data3_selected <- data3_selected %>% rename(id_gove_02 = X2022)
data4_selected <- data4_selected %>% rename(id_gove_03 = X2022)
data5_selected <- data5_selected %>% rename(id_gove_04 = X2022)
data6_selected <- data6_selected %>% rename(id_soci_01 = X2022)
data7_selected <- data7_selected %>% rename(id_soci_02 = X2022)
data8_selected <- data8_selected %>% rename(id_soci_03 = X2022)
data9_selected <- data9_selected %>% rename(id_soci_04 = X2022)

```

```

# Remplacer les noms de data1_selected par ceux de data2_selected pour une bonne fusion
data1_selected$Name <- data2_selected$Name

# Fusionner toutes les données par ISO3 et Name en utilisant merge
merged_data <- merge(data1_selected, data2_selected, by = c("ISO3", "Name"))
merged_data <- merge(merged_data, data3_selected, by = c("ISO3", "Name"))
merged_data <- merge(merged_data, data4_selected, by = c("ISO3", "Name"))
merged_data <- merge(merged_data, data5_selected, by = c("ISO3", "Name"))
merged_data <- merge(merged_data, data6_selected, by = c("ISO3", "Name"))
merged_data <- merge(merged_data, data7_selected, by = c("ISO3", "Name"))
merged_data <- merge(merged_data, data8_selected, by = c("ISO3", "Name"))
merged_data <- merge(merged_data, data9_selected, by = c("ISO3", "Name"))

# Vérifions si la fusion a bien marché
stopifnot(data1_selected$ISO3 == data2_selected$ISO3)
stopifnot(data1_selected$ISO3 == data3_selected$ISO3)
stopifnot(data1_selected$ISO3 == data4_selected$ISO3)
stopifnot(data1_selected$ISO3 == data5_selected$ISO3)
stopifnot(data1_selected$ISO3 == data6_selected$ISO3)
stopifnot(data1_selected$ISO3 == data7_selected$ISO3)
stopifnot(data1_selected$ISO3 == data8_selected$ISO3)
stopifnot(data1_selected$ISO3 == data9_selected$ISO3)

# Renommons merged_data en readiness_data
readiness_data <- merged_data

# Afficher les premières lignes du tableau final
readiness_data

# Calculer le nombre de valeurs manquantes et la proportion en pourcentage par variable
summary_missing_data <- sapply(readiness_data, function(x) c(
  missing_count = sum(is.na(x)), # Nombre de valeurs manquantes
  missing_percentage = round((sum(is.na(x)) / length(x)) * 100, 2) # Proportion de valeurs
manquantes en % avec 2 chiffres après la virgule
))

# Afficher le résumé des valeurs manquantes pour chaque variable
summary_missing_data

# Calculer la proportion globale de valeurs manquantes
total_missing_readiness <- sum(is.na(readiness_data)) / prod(dim(readiness_data))
print(total_missing_readiness)

# Calculate the maximum and standard deviation for each column
summary_stats_r <- sapply(readiness_data[3:11], function(x) {
  c(
    Mean = mean(x, na.rm = TRUE),
    SD = sd(x, na.rm = TRUE),
    Min = min(x, na.rm = TRUE),
    Max = max(x, na.rm = TRUE)
  )
})

# Display the summary statistics
summary_stats_r

# Calculer la matrice de corrélation pour vulnerability_indicators
correl_readiness <- cor(readiness_data[3:11], use = "complete.obs")

# Test KMO sur les indicateurs de préparation
kmo_result_ready <- KMO(correl_readiness)
print(kmo_result_ready)

# Test de sphéricité de Bartlett les indicateurs de préparation
bartlett_result_ready <- bart_spher(correl_readiness)
print(bartlett_result_ready)

# Tracer un graphique de la matrice de corrélation
corrplot(cor(readiness_data[3:11], use = "complete.obs"), method = "color")

# Effectuer l'ACP sur les indicateurs de la préparation
pca_data_r <- readiness_data[, 3:11]
comp_r <- imputePCA(pca_data_r, scale = TRUE) # Impute the table
res.pca_r <- PCA(comp_r$completeObs) # Do the PCA. This estimate should be better
# than simply using the mean, because we've
# taken into account the links between variables

```

```

# and similarities between individuals in its
# calculation.

#pca_data_r          # pca_data with missing values
#comp_r$completeObs  # pca_data imputed

# Visualizing uncertainty due to missing data
#uncertainty_r <- MIPCA(pca_data_r, scale = TRUE)
#plot(uncertainty_r)

# pour synthétiser
summary(res.pca_r)

# Les valeurs propres
res.pca_r$eig

# Refaire l'ACP avec ncp = 2
#####
comp2_r <- imputePCA(pca_data_r, scale = TRUE, ncp = 2)
res.pca_r <- PCA(comp2_r$completeObs)

#pca_data          # pca_data with missing values
#comp2_r$completeObs # pca_data imputed

# Visualizing uncertainty due to missing data
#uncertainty_r <- MIPCA(pca_data_r, scale = TRUE, ncp = 2)
#plot(uncertainty_r)

# pour synthétiser
summary(res.pca_r)

res.pca_r$eig

# Catell criterion: on recherche un "coude"
fviz_eig(res.pca_r)

pca_screepplot_r <- fviz_eig(
  res.pca_r,
  choice = "eigenvalue", # Afficher les valeurs propres
  geom = c("bar", "line"),
  barfill = "steelblue",
  barcolor = "steelblue",
  linecolor = "black",
  ncp = 9, # Nombre de dimensions principales affichées
  addlabels = TRUE, # Ajouter les étiquettes sur les barres
  hjust = 0,
  main = "Valeurs propres des composantes principales de la préparation",
  xlab = "Nombre des composantes",
  ylab = "Valeurs propres",
  ggtheme = theme_minimal()
) +
  theme(
    plot.title = element_text(hjust = 0.5) # Centrer le titre
  )

ggsave(
  filename = "pca_screepplot_readiness.png",
  plot = pca_screepplot_r,
  width = 10,
  height = 6,
  dpi = 300,
  bg = "white" # Forcer le fond blanc ici
)

plot.PCA(res.pca_r, choix = "var")
plot.PCA(res.pca_r, choix = "ind")

# Les saturations
res.pca_r$var$coord

# Appliquer la rotation Varimax
readiness_varimax <- varimax(res.pca_r$var$coord)
readiness_varimax

# Extraire les coordonnées des variables (charges factorielles)
loadings_r <- res.pca_r$var$coord

```

```

# Appliquer une rotation Varimax
loadings_rotated_r <- varimax(loadings_r[, 1:5])$loadings
loadings_rotated_r <- round(loadings_rotated_r, 2)

# Définir un seuil pour les valeurs significatives (par exemple, > 0.5)
threshold <- 0.5
loadings_significant_r <- ifelse(abs(loadings_rotated_r) > threshold, loadings_rotated_r, " ")
loadings_significant_r

# Les communautés
res.pca_r$var$cos2 #Part de variance d'une variable représentée par la composante

# Contribution des variables initiales aux composantes
res.pca_r$var$contrib

# Pour une représentation graphique de la contribution des variables aux composantes
corrplot(res.pca_r$var$coord,
         is.corr=FALSE)

# Autre représentation pour les contributions (composante 1)
fviz_contrib(res.pca_r,
             choice = "var",
             axes = 1, # dimension 1
             top = 9,  # 9 variables de préparation
             title = "Contribution des variables à la composante 1")

# Autre représentation pour les contributions (composante 2)
fviz_contrib(res.pca_r,
             choice = "var",
             axes = 2, # dimension 2
             top = 9,  # 9 variables de préparation
             title = "Contribution des variables à la composante 2")

# les scores factoriels de chaque observation
res.pca_r$ind$coord

# Pour garder la composante 1 comme nouvel index:
readiness_data$Index_readiness_ACP <- res.pca_r$ind$coord[,1]

# Standardiser l'indice basé sur PC1
min_pcl_r <- min(readiness_data$Index_readiness_ACP)
max_pcl_r <- max(readiness_data$Index_readiness_ACP)
readiness_data$Scores_readiness <- (readiness_data$Index_readiness_ACP - min_pcl_r) /
(max_pcl_r - min_pcl_r) * 100

# Visualiser la distribution de l'indice de préparation
hist(readiness_data$Scores_readiness, breaks = 20,
     main = "Distribution de l'indice de préparation",
     xlab = "Indice de préparation")

write.csv(readiness_data, "new_indices_préparation_acp2.csv", row.names = FALSE)

# Comparaison des indices de préparation ND_GAIN et celui de ACP
indices_preparation <- read_excel("new_indices_préparation_acp.xlsx", sheet =
"new_indices_préparation_acp")
summary(indices_preparation)

# Vérifier s'il y a de valeurs manquantes
sum(is.na(indices_preparation$Index_preparation_ND_GAIN))

# Conversion en numérique
indices_preparation$Index_preparation_ND_GAIN <- as.numeric(gsub(",", ".",
indices_preparation$Index_preparation_ND_GAIN))
summary(indices_preparation)
str(indices_preparation$Index_preparation_ND_GAIN)

# Comparaison des indices
#####
# Calcul de la corrélation
correlation_ready <- cor(indices_preparation$Index_readiness_ACP,
                        indices_preparation$Index_preparation_ND_GAIN,
                        method = "pearson")

print(correlation_ready)

# Créer le graphique avec ggplot2
ready_plot <- ggplot(indices_preparation, aes(x = Index_readiness_ACP, y =
Index_preparation_ND_GAIN)) +

```

```

geom_point(color = "blue", size = 3) + # Points de données
geom_smooth(method = "lm", color = "red", se = FALSE) + # Droite de régression
annotate("text", x = 15, y = 95, label = paste("Corrélation = ", round(correlation_ready, 2)),
color = "blue", size = 5) + # Corrélation
labs(title = "Matrice de corrélation des indices de préparation ND-GAIN et ACP",
x = "Indice préparation ACP",
y = "Indice préparation ND-GAIN") +
scale_x_continuous(limits = c(0, 100), breaks = seq(0, 100, by = 10)) + # Limites pour l'axe
des x
scale_y_continuous(limits = c(0, 100), breaks = seq(0, 100, by = 10)) + # Limites pour l'axe
des y
theme_minimal() + # Utilisation du fond minimal blanc
theme(panel.background = element_rect(fill = "white")) # Garantir un fond blanc

# Exporter le graphique en format PNG
ggsave("comparaison_preparation.png", plot = ready_plot, width = 8, height = 6, dpi = 300)

# CREATION DE LA MATRICE AVEC 4 QUADRANTS
#####

# Garder uniquement les colonnes nécessaires
vul_data_cleaned <- vul_data_pivoted %>%
  select(Name, SI_Scores_inv) # "Name" pour les pays et "SI_Scores_inv" pour la vulnérabilité

readiness_data_cleaned <- readiness_data %>%
  select(Name, Scores_readiness) # "Name" pour les pays et "Scores_readiness" pour la
préparation

# Fusionner les deux bases avec le nom des pays
merged_data <- merge(vul_data_cleaned, readiness_data_cleaned, by = "Name")

# Renommer les colonnes pour plus de clarté
colnames(merged_data) <- c("Name", "Vulnerability_Score", "Readiness_Score")

# Calcul des médianes
median_vulnerability <- median(merged_data$Vulnerability_Score, na.rm = TRUE)
median_readiness <- median(merged_data$Readiness_Score, na.rm = TRUE)

# Classification pour les quadrants
merged_data <- merged_data %>%
  mutate(
    Quadrant = case_when(
      Vulnerability_Score > median_vulnerability & Readiness_Score <= median_readiness ~
"Rouge",
      Vulnerability_Score <= median_vulnerability & Readiness_Score <= median_readiness ~
"Jaune",
      Vulnerability_Score > median_vulnerability & Readiness_Score > median_readiness ~ "Bleu",
      Vulnerability_Score <= median_vulnerability & Readiness_Score > median_readiness ~ "Vert"
    )
  )

# Définir les couleurs pour les quadrants
colors <- c("Rouge" = "red", "Jaune" = "goldenrod3", "Bleu" = "blue", "Vert" = "green")

# Créer le graphique
ggplot(merged_data, aes(x = Readiness_Score, y = Vulnerability_Score, color = Quadrant)) +
  geom_point(size = 3, alpha = 0.8) +
  geom_hline(yintercept = median_vulnerability, linetype = "dashed", color = "black") +
  geom_vline(xintercept = median_readiness, linetype = "dashed", color = "black") +
  scale_color_manual(values = colors) +
  labs(
    title = "Matrice Vulnérabilité-Préparation",
    x = "Score de Préparation",
    y = "Score de Vulnérabilité",
    color = "Quadrants"
  ) +
  theme_minimal()

# Ajouter les noms des pays avec ajustement des positions pour éviter le chevauchement
plot <- ggplot(merged_data, aes(x = Readiness_Score, y = Vulnerability_Score, color = Quadrant))
+
  geom_point(size = 3, alpha = 0.8) +
  geom_text(aes(
    label = Name,
    color = Quadrant
  ))

```

```

),
size = 3,
vjust = -0.5, # Ajuste la position verticale
fontface = "plain", # Texte normal (non gras)
show.legend = FALSE, # Cache la légende des textes
nudge_y = 1, # Décale verticalement les étiquettes
nudge_x = 1 # Décale horizontalement les étiquettes
) +
geom_hline(yintercept = median_vulnerability, linetype = "dashed", color = "black") +
geom_vline(xintercept = median_readiness, linetype = "dashed", color = "black") +
scale_color_manual(
  values = c("Rouge" = "red", "Jaune" = "goldenrod3", "Bleu" = "blue", "Vert" = "green")
) + # Ajuster le jaune pour une meilleure visibilité
labs(
  title = "Matrice Vulnérabilité-Préparation",
  x = "Score de Préparation",
  y = "Score de Vulnérabilité",
  color = "Quadrants"
) +
theme_light() + # Utilise un thème avec un arrière-plan clair
theme(
  panel.grid.major = element_line(color = "gray85"), # Ajuste la couleur des lignes de grille
  panel.grid.minor = element_line(color = "gray90"), # Ajuste la couleur des lignes mineures
  panel.background = element_rect(fill = "white"), # Arrière-plan blanc
  text = element_text(size = 12), # Texte plus grand
  legend.position = "right" # Déplace la légende à droite
)

# Exporter le graphique
ggsave(
  filename = "matrice_vulnerabilite_preparation_clair_non_gras.png", # Nom du fichier
  plot = plot, # Objet graphique
  width = 10, # Largeur en pouces
  height = 7, # Hauteur en pouces
  dpi = 300 # Résolution (pour une bonne
qualité)
)

#####
# MATRICE ACP

# Garder uniquement les colonnes nécessaires
colnames(vul_data_pivoted)
vul_data_cleaned2 <- vul_data_pivoted %>%
  select(ISO3, SI_Scores_inv) # "Name" pour les pays et "SI_Scores_inv" pour la vulnérabilité

colnames(readiness_data)
readiness_data_cleaned2 <- readiness_data %>%
  select(ISO3, Scores_readiness) # "Name" pour les pays et "Scores_readiness" pour la
préparation

# Fusionner les deux bases avec le nom des pays
merged_data2 <- merge(vul_data_cleaned2, readiness_data_cleaned2, by = "ISO3")

# Renommer les colonnes pour plus de clarté
colnames(merged_data2) <- c("ISO3", "Vulnerability_Score", "Readiness_Score")

# Calcul des médianes
median_vulnerability2 <- median(merged_data2$Vulnerability_Score, na.rm = TRUE)
median_readiness2 <- median(merged_data2$Readiness_Score, na.rm = TRUE)

# Classification pour les quadrants
merged_data2 <- merged_data2 %>%
  mutate(
    Quadrant = case_when(
      Vulnerability_Score > median_vulnerability2 & Readiness_Score <= median_readiness2 ~
"Rouge",
      Vulnerability_Score <= median_vulnerability2 & Readiness_Score <= median_readiness2 ~
"Jaune",
      Vulnerability_Score > median_vulnerability2 & Readiness_Score > median_readiness2 ~
"Bleu",
      Vulnerability_Score <= median_vulnerability2 & Readiness_Score > median_readiness2 ~
"Vert"
    )
  )

# Définir les couleurs pour les quadrants

```

```

colors <- c("Rouge" = "red", "Jaune" = "goldenrod3", "Bleu" = "blue", "Vert" = "green")

# Créer le graphique
ggplot(merged_data2, aes(x = Readiness_Score, y = Vulnerability_Score, color = Quadrant)) +
  geom_point(size = 3, alpha = 0.8) +
  geom_hline(yintercept = median_vulnerability2, linetype = "dashed", color = "black") +
  geom_vline(xintercept = median_readiness2, linetype = "dashed", color = "black") +
  scale_color_manual(values = colors) +
  labs(
    title = "Matrice Vulnérabilité - Préparation ACP",
    x = "Score de Préparation",
    y = "Score de Vulnérabilité",
    color = "Quadrants"
  ) +
  theme_minimal()

# Ajouter les noms des pays avec ajustement des positions pour éviter le chevauchement
plot2 <- ggplot(merged_data2, aes(x = Readiness_Score, y = Vulnerability_Score, color =
Quadrant)) +
  geom_point(size = 3, alpha = 0.8) +
  geom_text(aes(
    label = ISO3,
    color = Quadrant
  ),
  size = 3,
  vjust = -0.5, # Ajuste la position verticale
  fontface = "plain", # Texte normal (non gras)
  show.legend = FALSE, # Cache la légende des
  texteshttp://127.0.0.1:39725/graphics/plot\_zoom\_png?width=1280&height=658
  nudge_y = 1, # Décale verticalement les étiquettes
  nudge_x = 1 # Décale horizontalement les étiquettes
  ) +
  geom_hline(yintercept = median_vulnerability2, linetype = "dashed", color = "black") +
  geom_vline(xintercept = median_readiness2, linetype = "dashed", color = "black") +
  scale_color_manual(
    values = c("Rouge" = "red", "Jaune" = "goldenrod3", "Bleu" = "blue", "Vert" = "green")
  ) + # Ajuster le jaune pour une meilleure visibilité
  labs(
    title = "Matrice Vulnérabilité - Préparation ACP",
    x = "Score de Préparation",
    y = "Score de Vulnérabilité",
    color = "Quadrants"
  ) +
  theme_light() + # Utilise un thème avec un arrière-plan clair
  theme(
    panel.grid.major = element_line(color = "gray85"), # Ajuste la couleur des lignes de grille
    panel.grid.minor = element_line(color = "gray90"), # Ajuste la couleur des lignes mineures
    panel.background = element_rect(fill = "white"), # Arrière-plan blanc
    text = element_text(size = 12), # Texte plus grand
    legend.position = "right" # Déplace la légende à droite
  )

# Exporter le graphique
ggsave(
  filename = "matrice_vulnerabilite_preparation_ACP.png", # Nom du fichier
  plot = plot2, # Objet graphique
  width = 10, # Largeur en pouces
  height = 7, # Hauteur en pouces
  dpi = 300 # Résolution (pour une bonne
qualité)
)

#####
# MATRICE ND-GAIN
View(indices_vul)
View(indices_preparation)
colnames(indices_vul)
# Renommer la colonne "ISO3...1" en "ISO3"
colnames(indices_vul)[colnames(indices_vul) == "ISO3...1"] <- "ISO3"
colnames(indices_preparation)

# Garder uniquement les colonnes nécessaires
vul_data_cleaned3 <- indices_vul %>%
  select(ISO3, Index_Vulnérabilité_ND_GAIN) # "Name" pour les pays et "SI_Scores_inv" pour la
vulnérabilité

readiness_data_cleaned3 <- indices_preparation %>%

```

```

    select(ISO3, Index_preparation_ND_GAIN) # "Name" pour les pays et "Scores_readiness" pour la
    préparation

# Fusionner les deux bases avec le nom des pays
merged_data3 <- merge(vul_data_cleaned3, readiness_data_cleaned3, by = "ISO3")

# Renommer les colonnes pour plus de clarté
colnames(merged_data3) <- c("ISO3", "Vulnerability_Score", "Readiness_Score")

# Calcul des médianes
median_vulnerability3 <- median(merged_data3$Vulnerability_Score, na.rm = TRUE)
median_readiness3 <- median(merged_data3$Readiness_Score, na.rm = TRUE)

# Classification pour les quadrants
merged_data3 <- merged_data3 %>%
  mutate(
    Quadrant = case_when(
      Vulnerability_Score > median_vulnerability3 & Readiness_Score <= median_readiness3 ~
"Rouge",
      Vulnerability_Score <= median_vulnerability3 & Readiness_Score <= median_readiness3 ~
"Jaune",
      Vulnerability_Score > median_vulnerability3 & Readiness_Score > median_readiness3 ~
"Bleu",
      Vulnerability_Score <= median_vulnerability3 & Readiness_Score > median_readiness3 ~
"Vert"
    )
  )

# Définir les couleurs pour les quadrants
colors <- c("Rouge" = "red", "Jaune" = "goldenrod3", "Bleu" = "blue", "Vert" = "green")

# Créer le graphique
ggplot(merged_data3, aes(x = Readiness_Score, y = Vulnerability_Score, color = Quadrant)) +
  geom_point(size = 3, alpha = 0.8) +
  geom_hline(yintercept = median_vulnerability3, linetype = "dashed", color = "black") +
  geom_vline(xintercept = median_readiness3, linetype = "dashed", color = "black") +
  scale_color_manual(values = colors) +
  labs(
    title = "Matrice Vulnérabilité - Préparation ND-GAIN",
    x = "Score de Préparation",
    y = "Score de Vulnérabilité",
    color = "Quadrants"
  ) +
  theme_minimal()

# Ajouter les noms des pays avec ajustement des positions pour éviter le chevauchement
plot3 <- ggplot(merged_data3, aes(x = Readiness_Score, y = Vulnerability_Score, color =
Quadrant)) +
  geom_point(size = 3, alpha = 0.8) +
  geom_text(aes(
    label = ISO3,
    color = Quadrant
  ),
    size = 3,
    vjust = -0.5, # Ajuste la position verticale
    fontface = "plain", # Texte normal (non gras)
    show.legend = FALSE, # Cache la légende des
    texteshttp://127.0.0.1:39725/graphics/plot_zoom_png?width=1280&height=658
    nudge_y = 1, # Décale verticalement les étiquettes
    nudge_x = 1 # Décale horizontalement les étiquettes
  ) +
  geom_hline(yintercept = median_vulnerability3, linetype = "dashed", color = "black") +
  geom_vline(xintercept = median_readiness3, linetype = "dashed", color = "black") +
  scale_color_manual(
    values = c("Rouge" = "red", "Jaune" = "goldenrod3", "Bleu" = "blue", "Vert" = "green")
  ) + # Ajuster le jaune pour une meilleure visibilité
  labs(
    title = "Matrice Vulnérabilité - Préparation ND-GAIN",
    x = "Score de Préparation",
    y = "Score de Vulnérabilité",
    color = "Quadrants"
  ) +
  theme_light() + # Utilise un thème avec un arrière-plan clair
  theme(
    panel.grid.major = element_line(color = "gray85"), # Ajuste la couleur des lignes de grille
    panel.grid.minor = element_line(color = "gray90"), # Ajuste la couleur des lignes mineures
    panel.background = element_rect(fill = "white"), # Arrière-plan blanc

```

```

    text = element_text(size = 12),          # Texte plus grand
    legend.position = "right"                # Déplace la légende à droite
  )

# Exporter le graphique
ggsave(
  filename = "matrice_vulnerabilite_preparation_ND-GAIN.png", # Nom du fichier
  plot = plot3,          # Objet graphique
  width = 10,            # Largeur en pouces
  height = 7,            # Hauteur en pouces
  dpi = 300              # Résolution (pour une bonne
qualité)
)

library(patchwork)
library(gridExtra)

# Afficher les graphiques côte à côte
combined_plot <- plot2 | plot3 # Côté à côté
print(combined_plot)

# Fusionner les classifications des quadrants ACP et ND-GAIN
comparison_data <- merge(
  merged_data2 %>% select(ISO3, Quadrant_ACP = Quadrant),
  merged_data3 %>% select(ISO3, Quadrant_ND_GAIN = Quadrant),
  by = "ISO3"
)

# Ajouter une colonne indiquant si les quadrants correspondent
comparison_data <- comparison_data %>%
  mutate(
    Same_Quadrant = ifelse(Quadrant_ACP == Quadrant_ND_GAIN, "Oui", "Non")
  )
#####
# Résumé des résultats des matrices ACP & ND-GAIN
table(comparison_data$Same_Quadrant)

# Liste des pays avec le même quadrant
same_quadrant_countries <- comparison_data %>%
  filter(Same_Quadrant == "Oui")

# Liste des pays avec des divergences
different_quadrant_countries <- comparison_data %>%
  filter(Same_Quadrant == "Non")

# Tableau croisé des classifications
table(comparison_data$Quadrant_ACP, comparison_data$Quadrant_ND_GAIN)

# Identifier les pays avec des divergences
divergent_countries <- comparison_data %>%
  filter(Quadrant_ACP != Quadrant_ND_GAIN)

# Aperçu des pays avec des divergences
print(divergent_countries)

# Vérifier les médianes
summary(merged_data2$Vulnerability_Score)
summary(merged_data2$Readiness_Score)

summary(merged_data3$Vulnerability_Score)
summary(merged_data3$Readiness_Score)

# Vérifier l'attribution des quadrants
table(merged_data2$Quadrant)
table(merged_data3$Quadrant)

# TOP 10 selon l'ACP
top_10_ACP <- merged_data2 %>%
  arrange(desc(Readiness_Score), Vulnerability_Score) %>%
  slice(1:10)

# Derniers 10 selon l'ACP
last_10_ACP <- merged_data2 %>%
  arrange(Readiness_Score, desc(Vulnerability_Score)) %>%
  slice(1:10)

# TOP 10 selon le ND-GAIN

```

```

top_10_ND_GAIN <- merged_data3 %>%
  arrange(desc(Readiness_Score), Vulnerability_Score) %>%
  slice(1:10)

# Derniers 10 selon le ND-GAIN
last_10_ND_GAIN <- merged_data3 %>%
  arrange(Readiness_Score, desc(Vulnerability_Score)) %>%
  slice(1:10)

# Afficher les résultats
print("TOP 10 ACP")
print(top_10_ACP)

print("Derniers 10 ACP")
print(last_10_ACP)

print("TOP 10 ND-GAIN")
print(top_10_ND_GAIN)

print("Derniers 10 ND-GAIN")
print(last_10_ND_GAIN)

# Comparaison des TOP 10
common_top_10 <- intersect(top_10_ACP$ISO3, top_10_ND_GAIN$ISO3)

# Comparaison des derniers 10
common_last_10 <- intersect(last_10_ACP$ISO3, last_10_ND_GAIN$ISO3)

# Afficher les résultats
print("Pays communs dans le TOP 10")
print(common_top_10)

print("Pays communs dans les derniers 10")
print(common_last_10)

# Nombre de pays communs
print(paste("Nombre de pays communs dans le TOP 10 :", length(common_top_10)))
print(paste("Nombre de pays communs dans les derniers 10 :", length(common_last_10)))

#####
# Classement complet selon l'ACP
classement_ACP <- merged_data2 %>%
  arrange(desc(Readiness_Score), Vulnerability_Score) %>%
  mutate(Rank_ACP = row_number()) # Ajouter un rang pour ACP

# Classement complet selon le ND-GAIN
classement_ND_GAIN <- merged_data3 %>%
  arrange(desc(Readiness_Score), Vulnerability_Score) %>%
  mutate(Rank_ND_GAIN = row_number()) # Ajouter un rang pour ND-GAIN

# Afficher les 192 pays selon l'ACP
print("Classement complet selon l'ACP")
print(classement_ACP)

# Afficher les 192 pays selon le ND-GAIN
print("Classement complet selon le ND-GAIN")
print(classement_ND_GAIN)

# Comparaison des rangs des deux classements
classement_comparatif <- classement_ACP %>%
  select(ISO3, Readiness_Score, Vulnerability_Score, Rank_ACP) %>%
  inner_join(classement_ND_GAIN %>%
    select(ISO3, Readiness_Score, Vulnerability_Score, Rank_ND_GAIN),
    by = "ISO3", suffix = c("_ACP", "_ND_GAIN"))

# Afficher la comparaison des deux classements
print("Comparaison des classements ACP et ND-GAIN")
print(classement_comparatif)

# Exporter les classements dans des fichiers CSV
write.csv(classement_ACP, "Classement_ACP_complet.csv", row.names = FALSE)
write.csv(classement_ND_GAIN, "Classement_ND_GAIN_complet.csv", row.names = FALSE)
write.csv(classement_comparatif, "Comparaison_Classements.csv", row.names = FALSE)

```

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

Faculté des sciences économiques, sociales, politiques et de communication

École des sciences politiques et sociales (PSAD)

Place Montesquieu, 1 bte L2.08.05, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/psad