

# Appréhender la vulnérabilité au changement climatique, du local au global. Regards croisés

MICHAËL GOUJON | ALEXANDRE K. MAGNAN

→ MICHAËL GOUJON est maître de conférences en économie à l'Université Clermont Auvergne - CERDI. Il est responsable du programme "Indicateurs innovants" de la Ferdi. Il a notamment travaillé sur des indicateurs de développement et de vulnérabilités pour les petites économies insulaires.

→ ALEXANDRE K. MAGNAN est chercheur senior à l'IDDRRI. Ses recherches portent sur la vulnérabilité et l'adaptation des sociétés au changement climatique situées sur les littoraux des îles de l'océan Indien et du Pacifique. Il s'intéresse en particulier aux "trajectoires de vulnérabilité" au risque de maladaptation, et à la mise en oeuvre d'un objectif global d'adaptation au sein des négociations internationales sur le climat.

## Résumé

La science du climat est désormais claire sur un point au moins : si les efforts d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre sont plus que jamais nécessaires pour limiter l'ampleur du changement climatique sur le(s) siècle(s) à venir, celui-ci est désormais partiellement irréversible. Cela signifie concrètement qu'une partie de ses impacts est inévitable. Même si l'on a encore du mal à préciser la fréquence, l'intensité et la répartition géographique de ces impacts futurs sur les territoires, ces derniers vont avoir à faire face à une modification des conditions climatiques et environnementales, lesquelles vont nécessairement remettre en cause les modèles de développement actuels.

... / ...

## Remerciements

La réalisation de ce document a principalement bénéficié du soutien financier du gouvernement français au titre du programme Investissements d'avenir administré par l'Agence nationale de la recherche (ANR) sous la référence ANR-10-LABX-14-01.

.../.... Dès lors, l'adaptation au changement climatique s'impose comme étant une stratégie tout aussi prioritaire que l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, ce qu'a d'ailleurs entériné l'Accord de Paris à l'échelle globale (Magnan et Ribera, 2016). Anticiper n'est donc plus une simple option, mais une condition nécessaire au développement durable des territoires, à quelque échelle que ce soit. La question se pose alors de savoir comment anticiper pour s'adapter (Tubiana et al 2010). Étant donné que le but ultime de l'adaptation est de réduire la vulnérabilité sur le long terme, une première partie de réponse réside dans la manière dont on peut concrètement appréhender la vulnérabilité des territoires au changement climatique (voir par ex. Nguyen et al 2016).

Ce document conjoint vise à présenter deux approches pour appréhender cette vulnérabilité et développées pour l'une par la Ferdi (« vulnérabilité structurelle »), pour l'autre par l'Iddri (« trajectoires de vulnérabilité »). L'objectif est, à la croisée de ces deux approches, de proposer une réflexion en termes de pistes d'adaptation, à la fois à l'échelle locale dans le cadre des politiques publiques territoriales, et à l'échelle globale dans le cadre des négociations internationales au sein de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC). De sorte à être aussi concrète que possible, la démarche est appliquée à une étude de cas sur laquelle la Ferdi comme l'Iddri ont développé une expertise, à savoir l'île de la Réunion (sud-ouest de l'océan Indien), et plus précisément la situation de ses littoraux face aux risques liés à la mer.

## **1. L'approche par la vulnérabilité « structurelle »**

### **1.1. La démarche d'ensemble**

L'une des manières d'aborder la vulnérabilité structurelle, à l'échelle des pays en développement notamment, repose sur la construction d'indicateurs synthétiques. La Ferdi participe ainsi aux travaux sur l'indicateur de vulnérabilité économique (EVI) développé par le Comité pour les Politiques de Développement des Nations Unies (Guillaumont, 2009 ; Naude et al., 2014 ; Feindouno et al. 2016). A ce titre, la Ferdi construit régulièrement des séries rétrospectives et propose des améliorations de cet indicateur utilisé pour les politiques internationales et l'allocation des ressources. De même elle a développé ces dernières années un indicateur de vulnérabilité physique au changement climatique, (Guillaumont, 2015). L'originalité consiste ici à construire des indicateurs de « vulnérabilité structurelle », c'est-à-dire un mode de mesure de la vulnérabilité qui s'affranchit des effets du niveau de développement et de la politique actuelle des pays, pour ne retenir que les caractéristiques physiques intrinsèques au territoire concerné. Il va de soi que ces dernières n'expliquent pas à elles seules la vulnérabilité d'ensemble, et que les choix de développement et les orientations socio-économiques et politiques jouent également un rôle, et peuvent aussi être mesurés par d'autres indicateurs. Toutefois, se concentrer sur les caractéristiques physiques des territoires peut offrir une base pertinente pour l'allocation géographique des fonds internationaux pour l'adaptation au changement climatique, tel que cela a été discuté lors de la 21<sup>eme</sup> conférence des Parties à la Convention cadre des Nations Unies sur le

changement climatique (COP21), à Paris en décembre 2015 (Guillaumont, 2015).

## 1.2. Éléments de méthode

Les types d'indicateurs mentionnés ci-dessus sont généralement construits dans le but d'une évaluation comparative des pays, la plus simple et objective possible, et permettant l'identification des pays vulnérables qui doivent ensuite faire l'objet d'une attention particulière de la communauté internationale. Ces indicateurs se veulent donc être quantitatifs pour permettre les comparaisons et le classement des pays. Pour être réellement considérés comme « structurels », les indicateurs doivent être indépendants de la politique actuelle du pays, et doivent dépendre de facteurs de long-terme. Ils doivent capter à la fois l'importance probable des contraintes climatiques<sup>1</sup> exogènes et l'exposition structurelle à ces contraintes, et ce à travers des composants reflétant les facteurs préjudiciables à la croissance économique notamment. Enfin, pour être transparents et parcimonieux, les indicateurs doivent être basés sur un nombre limité de composantes, lesquelles sont renseignées à partir de données disponibles en termes de couverture géographique (internationale) et temporelle. Ces composantes doivent ensuite être agrégées à l'aide de formules mathématiques simples. L'indicateur de vulnérabilité structurelle au changement climatique (Physical Vulnerability to Climate Change Index, PVCCI) a été développé en ce sens (Guillaumont et Simonet, 2011 ; Guillaumont, 2015).

S'appuyant sur la méthodologie de l'EVI, l'indicateur repose sur des composantes reflétant les principales conséquences physiques du changement climatique qui peuvent potentiellement affecter le bien-être et l'activité des populations, et telles que décrites dans la littérature. Le PVCCI laisse donc de côté la résilience, qui est ici considérée comme étant largement dépendante de la politique des pays ou de leur capacité à faire face aux effets du changement climatique, et qui est souvent intégrée dans d'autres indicateurs. Enfin, le PVCCI est basé sur un nombre restreint de composantes, ce qui lui permet de rester transparent et simple d'accès.

Les composantes du PVCCI saisissent deux types de risques liés au changement climatique, ceux qui correspondent à des contraintes climatiques permanentes et progressives, et ceux qui correspondent à une intensification des contraintes climatiques récurrentes. Pour ces deux types de risques, les composantes évaluent l'amplitude probable des contraintes climatiques et le degré d'exposition à celles-ci.

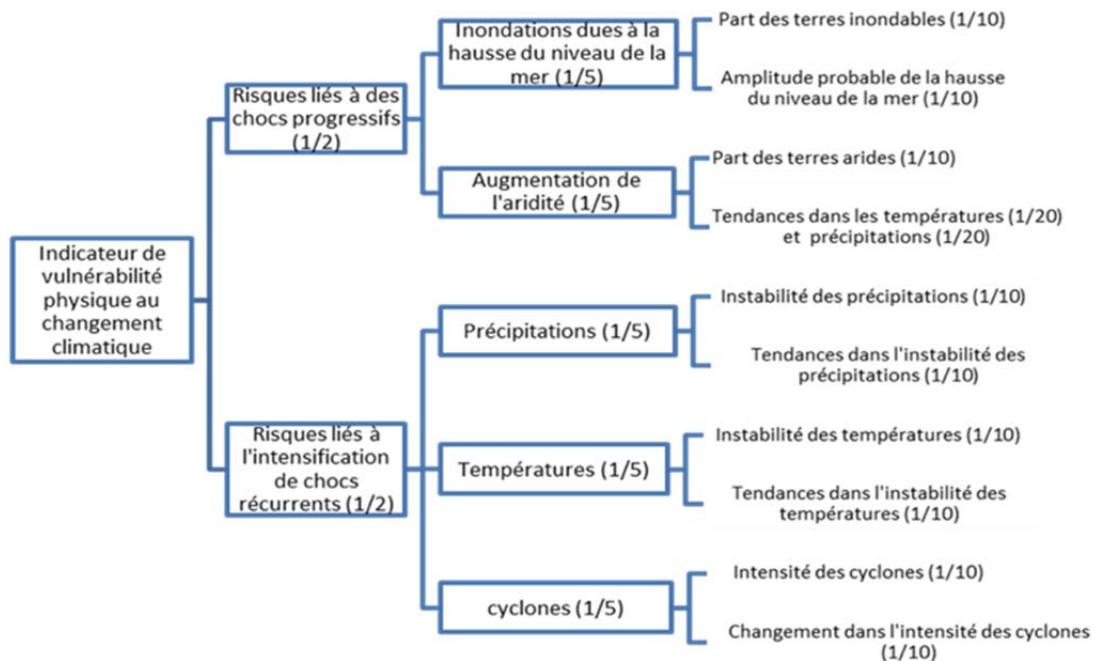
Les contraintes climatiques récurrentes sont reflétées par les tendances de variables climatiques (températures et précipitations essentiellement) et par le changement dans leur instabilité, et mesurés ex-post sur la base des tendances passées. Dans la dernière version de l'indice, une composante relative à l'activité cyclonique a été ajoutée. Les contraintes climatiques progressives sont les risques de submersion marine, mesurés ex-ante avec l'élévation probable du niveau de la

---

<sup>1</sup> On entend ici par « contraintes climatiques » à la fois les événements extrêmes (cyclones, pics de chaleur, etc.) et les changements plus graduels (réchauffement de l'océan, modification des régimes de précipitations, etc.) qui sont inhérents au changement climatique. La Ferdi utilise dans ses travaux le terme de « chocs » (respectivement récurrents et permanents-progressifs).

mer, et les risques d'aridité, mesurés ex-post sur la base des tendances passées de précipitations et d'évapotranspiration (Figure 1). Cet indicateur est calculé à l'aide de données couvrant les 60 dernières années.

**Figure 1 – L'indicateur de vulnérabilité au changement climatique et ses composants, version 2015**



Les variables de base font ensuite l'objet d'une normalisation avec la procédure min-max, les plaçant sur une échelle 0-100, la valeur de la composante augmentant avec la vulnérabilité. Puisque chaque composante, plus ou moins indépendamment du niveau des autres, peut être cruciale pour un pays, la méthode d'agrégation doit refléter une substituabilité limitée entre les composantes, d'où l'emploi d'une moyenne quadratique.

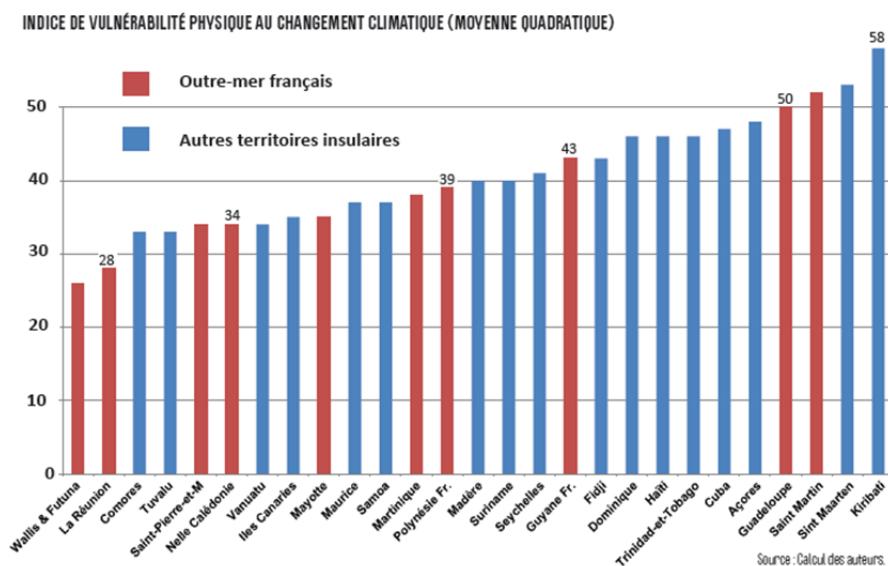
### 1.3. Principaux résultats

Aux travaux initiaux s'ajoutent des applications ciblées sur les Pays les Moins Avancés (Guillaumont et Simonet, 2014), les pays africains (Guillaumont, 2014), les pays asiatiques (Guillaumont, 2015) et les petites îles (Goujon et al., 2015). Les derniers calculs (Guillaumont et al, 2017) couvrant l'ensemble des pays dans le monde montrent que les pays africains et les petites îles sont les plus vulnérables, structurellement parlant, pour des raisons différentes et ses deux groupes pouvant être hétérogènes. L'étude spécifique sur les petites îles de Goujon et al (2015a, b, c) a été réalisée à la demande de l'Agence Française de Développement et a consisté à adapter et calculer des indicateurs de vulnérabilité (vulnérabilité économique, vulnérabilité physique au changement climatique) et de développement pour les petites économies insulaires, avec une attention particulière portée aux départements et collectivités français d'outre-mer (DCOM). Elle a permis de dresser un panorama comparatif des vulnérabilités de ces territoires, et bien que cette étude n'incluait pas encore la dimension de l'activité cyclonique.

Une analyse des composantes désagrégées permet de mettre en évidence les fragilités de chaque territoire – des spécificités que les politiques d'adaptation au changement climatique doivent notamment prendre en considération.

Dans l'ensemble, lorsque l'on considère à la fois les risques de submersion marine et les autres, La Réunion apparaît moins vulnérable que beaucoup d'autres petits territoires insulaires (Figure 2). Plus précisément, si l'île présente un risque élevé associé à l'instabilité des précipitations (Feindouno et al., 2016), le risque associé à la hausse du niveau de la mer apparaît modéré si on le compare aux autres outre-mer insulaires français (notamment Saint-Martin, Polynésie, Wallis-et-Futuna et Saint-Pierre-et-Miquelon). Dans le contexte de l'indice structurel de vulnérabilité, cela s'explique par le fait que la proportion de ce territoire située en zone littorale de basse altitude y est relativement plus limitée que chez ses homologues. Il est intéressant d'approfondir ici ce thème du risque de submersion marine, en considérant à la fois l'élévation du niveau de la mer et l'activité cyclonique.

**Figure 2 – Indice de vulnérabilité physique au changement climatique**



### **Exposition à la montée du niveau de la mer**

Le risque de submersion marine est difficile à appréhender du fait de la gamme d'évolutions futures du niveau moyen de la mer à l'échelle globale (GIEC, 2007 ; Nurse et al, 2014), de la variabilité du niveau marin à l'échelle régionale (Becker et al., 2012), du manque de données marégraphiques à l'échelle des outre-mer français, et plus généralement de la jeunesse des données fournies par les satellites (depuis 1992).

A l'échelle mondiale, le niveau de la mer a augmenté d'une vingtaine de centimètres en moyenne sur le dernier siècle. Concernant les DCOM, l'augmentation du niveau de la mer sur la période 1993-2011 a été estimée de l'ordre de 0 à 3 mm/an en Martinique, Guadeloupe et Polynésie, de 3 à 5 mm/an en Nouvelle Calédonie et Mayotte, et de 5 à 9 mm/an à La Réunion (Duvat et al, 2012).

S'agissant des projections, les scenarii sont de l'ordre de 0,5 m à 1 m d'ici à 2100 en moyenne au niveau global, mais certains scenarios à +2 mètres sont avancés par des études récentes (quand est notamment pris en compte la fonte des glaciers polaires qui s'ajoute à l'expansion thermique de l'océan), une hausse là aussi inégalement répartie. Les DCOM semblent se situer cependant dans des zones subissant une élévation proche de la moyenne mondiale.<sup>2</sup>

Dans le PVCCI, tel qu'il a été appliqué par Goujon et al (2015), ce risque est évalué par une estimation de la part du territoire située en zone littorale de basse altitude (sous 1 mètre). L'objectif étant la comparaison des territoires, le PVCCI utilise des données internationales. Si ces données sont moins précises que les données locales qui peuvent exister – notamment pour la plupart des outre-mer, données cartographiques IGN, altitudinales LIDAR, et démographiques INSEE –, elles présentent l'intérêt d'être disponibles pour l'ensemble des territoires couverts par l'étude et d'être standardisées.<sup>3</sup> Ces données montrent que la part du territoire en zone littorale de basse altitude est plus faible à la Réunion que chez ses homologues tant pour les seuils 1 m et 5 m ; de même que cela est le cas pour la part de la population vivant dans ces zones côtières basses.

Les extrêmes de hausse du niveau de la mer (risque de submersion) dépendent de la hausse progressive du niveau de la mer et des conditions météorologiques, notamment de l'activité cyclonique, qui doit probablement s'intensifier à l'avenir du fait du même changement climatique.

### ***L'indicateur d'intensité cyclonique***

Dans sa dernière version, le PVCCI intègre également une évaluation du risque lié à l'activité cyclonique. L'impact du changement climatique sur l'occurrence et l'intensité des cyclones ne fait pas l'objet d'un consensus, notamment parce que les données historiques ne sont pas aussi bonnes que les données actuelles (GIEC, 2012 ; Kossin et al., 2014 ; Vecchi and Knutson, 2008). Il semblerait cependant qu'il faille s'attendre, non pas à des cyclones plus fréquents en général, mais plutôt à une augmentation dans l'intensité des événements les plus intenses (Park et al., 2013). Là encore, il y aura une grande variabilité spatiale, que les modèles climatiques ont encore du mal à capturer.

L'indicateur d'activité cyclonique tente de mesurer la vulnérabilité des pays à l'activité cyclonique de manière synthétique (Feindouno et al., 2017). Il est calculé au niveau pays en fréquence annuelle. Les données primaires SIG (système d'information géographique) sont fournies par le National Climatic Data Center de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration ; base de données de l'International Best Track Archive for Climate Stewardship – IBTrACS). La dernière version disponible couvre la période 1970-2014 et enregistre 3915 épisodes cycloniques de catégories 1 à 5, au sens de l'échelle Saffir-Simpson, et « tempêtes tropicales » (« catégorie 0 »

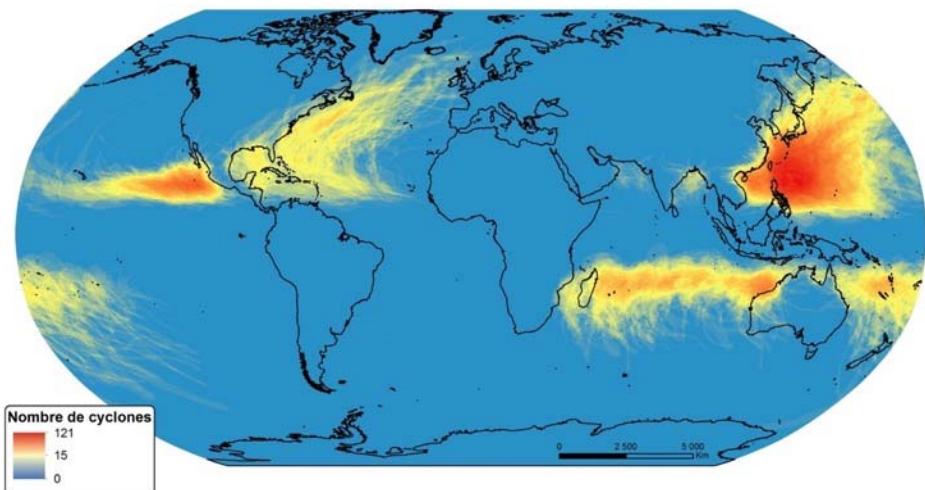
---

<sup>2</sup> De nombreuses études (notamment de l'ONERC) montrent que la part du territoire qui serait affectée par une hausse du niveau de la mer (problème de salinisation, effets mécaniques de la houle sur les côtes, effets de débordements en cas de forte houle...) n'est pas limitée à celle qui serait submergée (donc à celle qui serait située sous l'altitude égale à la hausse du niveau).

<sup>3</sup> Données SIG d'altitude géolocalisées de la NASA, également utilisées notamment pour la base de données CIESIN Place III du Center for International Earth Science Information Network de l'Université Columbia aux États-Unis.

dans la suite) (Figure 3). Ces données montrent bien que la Réunion se situe dans une zone d'intensité cyclonique élevée.

**Figure 3 – Nombre de cyclones (indépendamment de l'intensité) sur la période 1970-2014.**



**Source :** Feindouno et al. (2017).

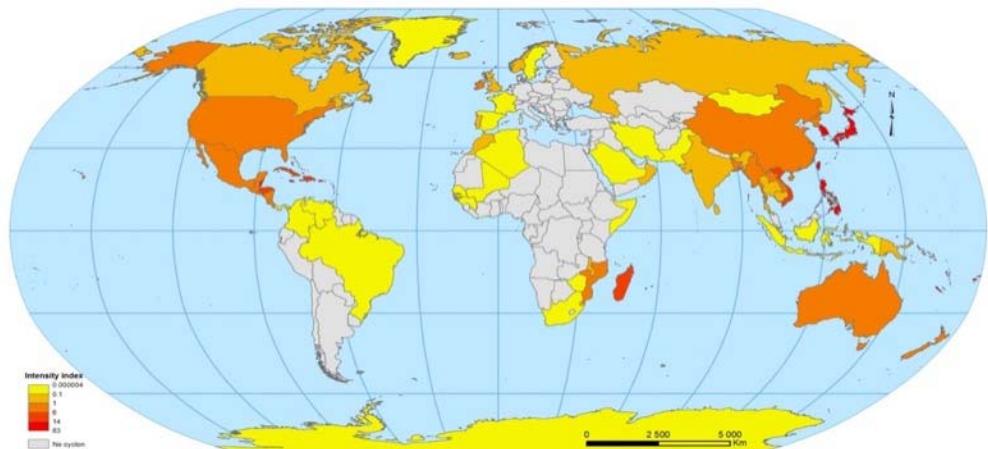
L'indicateur d'activité cyclonique calculé par la Ferdi au niveau pays et territoires, tient compte de la vitesse des vents (intensité ou puissance), de la durée et de la taille en termes de part du territoire touchée par l'évènement cyclonique. Suite au traitement des données de la base primaire de données SIG, pour chaque cyclone-catégorie touchant un pays, on dispose de ses dates, de sa durée et de la part du territoire touché. On définit alors l'indicateur d'intensité cyclonique pays-année selon la formule :

$$IC_{it} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^5 \alpha_k \times D_{kj} \times S_{kj}$$

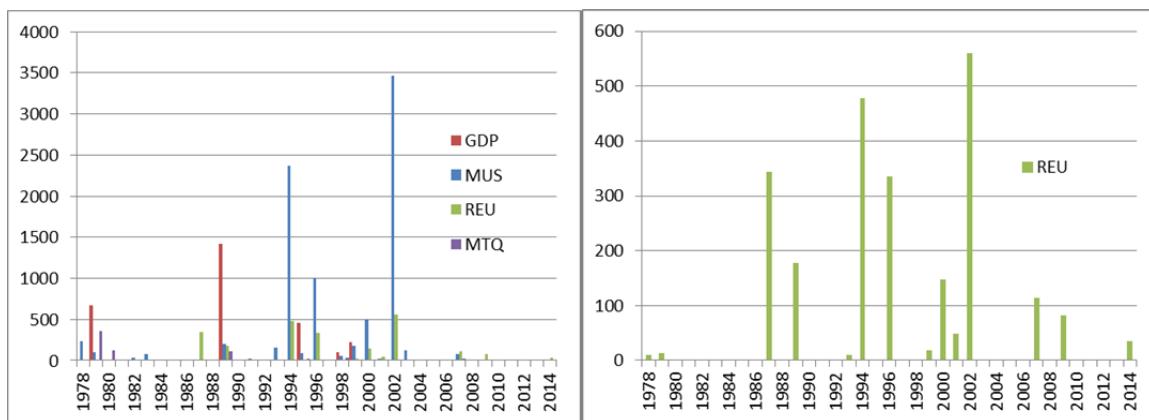
Avec pour le pays  $i$  à la période  $t$ , l'évènement  $j$  (un pays pouvant subir plusieurs événements) et  $k$  la catégorie de l'évènement (6 catégories possibles de 0 à 5, le même évènement pouvant passer par différentes catégories),  $D$  la durée de l'évènement-catégorie (en heures),  $S$  la part du territoire touchée par l'évènement-catégorie (en %).  $\alpha$  est le poids relatif de la catégorie par rapport aux autres qui définit sa puissance ou son intensité relative. Cherchant à dépasser l'échelle d'intensité de Saffir-Simpson, nous utilisons des mesures d'intensité parmi les plus connues, comme le PDI (power dissipation index), basé sur la vitesse maximale au cube (Emanuel, 2005) et l'ACE basé sur la vitesse maximale au carré (Camargo et Sobel, 2005). Ces indicateurs reposent donc sur l'appréciation que l'énergie, ou le pouvoir de destruction du cyclone est plus que proportionnel à la vitesse des vents qu'il génère. En utilisant la pondération au cube, l'indice calculé pour La Réunion sur la période 1978-2014 (somme des valeurs annuelles de l'indice sur la période) est égal à 2380, comparé à 8744 pour Maurice, 8137 pour Madagascar, 2902 pour Guadeloupe et 683 pour

la Martinique (il n'est que de 1 pour la France). Dans la période récente 1990-2014 (si on doute de la qualité des enregistrements sur les années 1970-1980), on n'observe pas de tendance très nette de l'indice (Figures 4 et 5).

**Figure 4 – Indice cyclonique par pays, somme sur 1978-2014.**



**Figure 5 – Indice cyclonique par territoire, données annuelles 1978-2014. GDP pour Guadeloupe, MUS pour Maurice, REU pour la Réunion, MTQ pour la Martinique.**



L'application du PVCCI au niveau international permet la comparaison des vulnérabilités structurelles de manière synthétique, avec l'utilisation de données internationales standardisées. Les travaux de la Ferdi montrent que les petites îles font partie des pays et territoires les plus vulnérables, structurellement parlant, et bien que ce groupe soit hétérogène. Si La Réunion a une part de son territoire situé en zone littorale de basse altitude proportionnellement plus faible que ses homologues, elles montrent toutefois une exposition à l'activité cyclonique significative. Les risques littoraux, notamment lors d'événements extrêmes, sont donc bien présents. Certainement, en abandonnant la perspective de comparaison internationale, il y aurait un intérêt à calculer l'indicateur à des échelles locales, infra-territoriales, en utilisant des données produites localement (notamment par Météo-France et l'INSEE).

## **2. L'approche par les « trajectoires de vulnérabilité »**

### **2.1. La démarche d'ensemble**

Si la mesure de la vulnérabilité structurelle propose une lecture synthétique et quantifiée de l'état de vulnérabilité physique, l'approche par les « trajectoires de vulnérabilité » de l'Iddri<sup>4</sup> se veut davantage qualitative. Elle consiste à analyser les facteurs anthropiques de la vulnérabilité sur les dernières décennies dans le but d'identifier les leviers et barrières à l'adaptation au changement climatique (Duvat et al., 2016 ; Magnan et Duvat, 2016 ; Duvat et al. 2017). Cette approche ne vise donc pas à évaluer directement la vulnérabilité future, mais davantage à comprendre quels sont les fondements de la vulnérabilité actuelle en identifiant les tendances lourdes qui ont opéré jusqu'à aujourd'hui et qui risquent d'opérer encore sur les prochaines décennies, aux côtés des impacts du changement climatique. Il s'agit donc d'abord d'appréhender les logiques territoriales qui ont présidé à l'émergence et au renforcement de la vulnérabilité jusqu'à aujourd'hui, pour ensuite en tirer des enseignements clés sur les options d'ores et déjà disponibles pour éviter que cette vulnérabilité ne continue de croître sous l'effet combiné des processus de développement et de changement climatique.

### **2.2. Éléments de méthode**

L'approche par les « trajectoires de vulnérabilité » a été appliquée au cas de La Réunion dans le cadre d'un projet de recherche (*VulneraRe*, 2011-2015) sur l'évolution des composantes critiques de la vulnérabilité des littoraux de cette île, marqués par une urbanisation importante depuis les années 1950. Il s'est agi de considérer les risques liés à la mer, en l'occurrence les problèmes d'érosion côtière et de submersion marine lors de cyclones ou d'épisodes de houles australes.

Une méthodologie a été élaborée pour reconstruire ces trajectoires de vulnérabilité (Duvat et al., 2016). Elle s'appuie sur quatre indicateurs structurants (position du trait de côte ; exposition du bâti et des infrastructures aux aléas météo-marins ; zone tampon terrestre naturelle constituée selon les cas de plages de sable ou de galets, ou de systèmes plages-dunes ; protection des enjeux humains par des ouvrages de défense), dont les évolutions respectives ont été retracées des années 1950 à aujourd'hui grâce au traitement de photographies aériennes prises à différentes dates et à la constitution d'une base de données SIG. La démarche a été appliquée aux côtes basses de 4 communes réunionnaises : les deux plus grands pôles urbains de l'île (Saint-Denis et Saint-Pierre) et les principales zones industrialo-portuaire (Le Port) et touristique (Saint-Paul). La méthodologie est décrite en détail dans une publication récente de l'Iddri (Duvat et al., 2016).

### **2.3. Principaux résultats**

Cette partie fait un bilan des principaux résultats de l'analyse des évolutions depuis 1950 en termes de position du trait de côte, des enjeux humains exposés (bâti et infrastructures), des zones

---

<sup>4</sup> En collaboration étroite avec le laboratoire LIENSs de l'université de la Rochelle et du CNRS.

tampons terrestres naturelles, et de protection des enjeux (défense des côtes). Elle propose également une synthèse générale.

### **Évolution de la position du trait de côte**

De 1950 à 2011, lorsque l'on considère le pied de plage (interface terre-mer *stricto sensu*), l'érosion concerne 49,5 % du linéaire côtier étudié (39,7 km de côtes meubles), contre 22,5 % en progradation et 28 % en situation de stabilité. Les résultats s'inversent si l'on considère la ligne de stabilité<sup>5</sup> : l'érosion ne concerne plus que 18,4 % du linéaire côtier, la progradation 53 %, et la stabilité 28,6 %. Cela montre notamment la complexité du diagnostic lié au recul du trait de côte, et ce d'autant qu'on observe des changements contrastés à la fois entre les communes et entre les compartiments sédimentaires considérés. Les valeurs d'érosion et de progradation les plus fortes s'observent dans des zones spécifiques des communes de Saint-Denis et du Port, avec un recul maximal de >160 m au Port et une avancée maximale de >130 m à Saint-Denis. Lorsque l'on note des avancées du trait de côte, celles-ci sont liées : (i) à la présence des embouchures des rivières suite à l'endiguement de ces dernières ; (ii) aux impacts des aménagements, qu'ils soient directs (remblaiement pour l'extension d'un terminal portuaire, par ex.) ou indirects (blocage du transit sédimentaire par une jetée, par ex.) ; (iii) à des origines naturelles, mais alors les valeurs sont moins élevées.

Les évolutions respectives des positions du pied de plage et de la ligne de stabilité entre 1950 et 2011 ont globalement engendré une réduction de la largeur des plages (importante sur le littoral de Saint-Denis et de Saint-Pierre, en particulier), sauf dans de rares secteurs où celle-ci s'est maintenue en dépit du recul du trait de côte (baie de Saint-Paul) ou a augmenté suite à l'avancée du trait de côte (plage au sud de la jetée sud du Port-Ouest, plage des Brisants, plage de la Saline). Là où elle s'observe, la contraction de la zone d'amortissement naturelle qu'est la plage a pour effet une augmentation de l'exposition des enjeux situés à faible distance du trait de côte.

### **Évolution des enjeux humains**

Trois types de trajectoires d'urbanisation se distinguent : (i) celle des villes anciennes de Saint-Denis et de Saint-Pierre, qui ont connu au cours des 60 dernières années un phénomène d'étalement vers des zones littorales basses plus exposées aux risques de submersion-inondation que le centre historique ; (ii) celle de la ville du Port dont le fort développement urbain s'est effectué dans les espaces intérieurs (construction de vastes bâtiments à vocation industrielle, principalement) et n'a par conséquent pas engendré d'accroissement majeur du bâti dans la bande côtière des 100 m ; (iii) celle de la commune de Saint-Paul, qui se distingue par l'urbanisation rapide

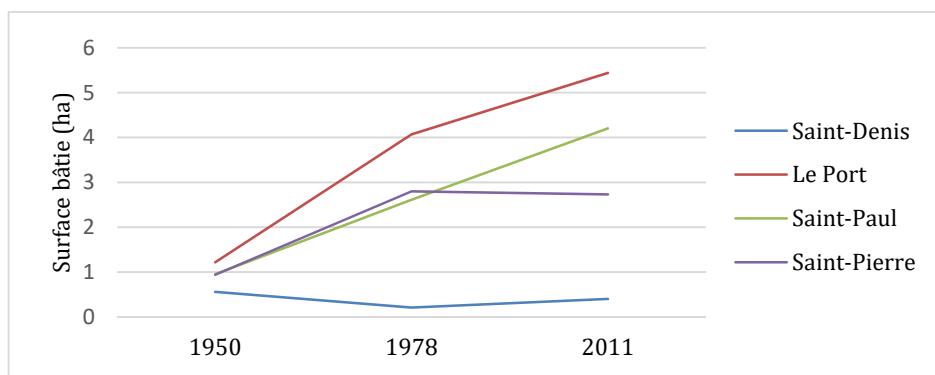
---

<sup>5</sup> La « ligne de stabilité » marque la limite entre la zone active de la plage, dont les matériaux sont remaniés au quotidien sous l'effet des agents marins et éoliens qui commandent la dynamique du littoral, et la zone dite stabilisée du système sédimentaire, dont les matériaux ne sont remobilisés qu'exceptionnellement lorsque survient un événement tempétueux (cyclone ou houle australe). Sur les côtes « naturelles », c'est-à-dire non fixées par l'homme, cette ligne correspond à la limite inférieure de la végétation qui occupe le haut de plage ou la dune. Sur les côtes artificialisées, la ligne de stabilité correspond à la limite des aménagements réalisés au plus près de la mer (ex. : base du mur de soutènement d'un bâtiment) et des ouvrages de défense (pied de ces ouvrages).

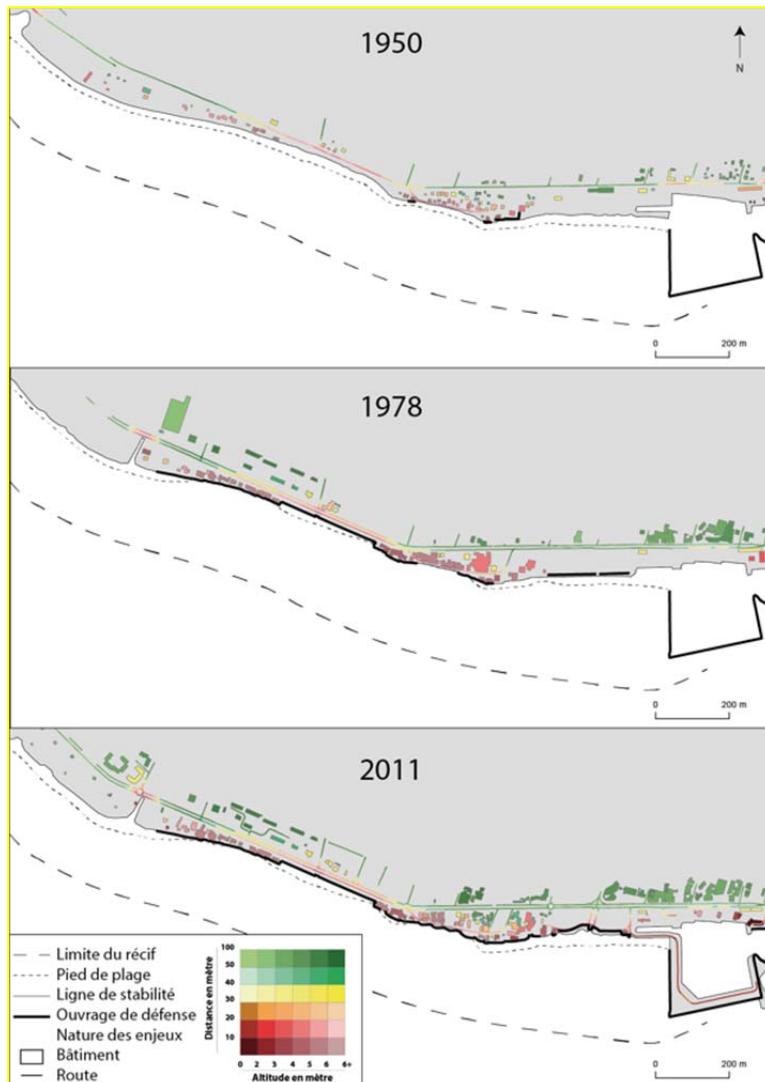
et au plus près de la mer de l'ensemble de son littoral corallien à partir des années 1970. Les résultats obtenus dans la bande côtière des 100 m permettent d'apporter des informations sur les rythmes et les périodes de changement. En termes d'évolution de la surface bâtie, si les quatre communes étudiées ont suivi les mêmes tendances entre 1950 et 1978, après cette date, trois tendances se dégagent nettement : (i) une augmentation soutenue de la surface bâtie dans la bande des 100 m à Saint-Paul et à Saint-Pierre (respectivement + 8,7 ha et + 6 ha) ; (ii) une légère hausse dans la commune du Port (+ 2,5 ha) et ; (iii) une baisse significative dans la commune de Saint-Denis (- 2,8 ha).

Le croisement des paramètres distance au trait de côte et altitude lié à chaque bâtiment situé dans la bande côtière des 100 m permet d'approfondir la question du degré d'exposition potentielle des enjeux aux aléas météo-marins. On peut notamment déterminer le nombre et la surface totale des bâtiments dont on peut considérer qu'ils sont en situation critique, par exemple dans le cadre de cette étude, lorsqu'ils sont localisés à moins de 30 m du trait de côte et à une altitude inférieure à 6 m. Ainsi, à l'échelle des quatre communes étudiées (Figure 6), la surface bâtie en situation critique a plus que triplé entre 1950 et 2011 (de 3,7 à 12,8 ha) et le nombre de bâtiments a plus que doublé (de 218 à 555 unités). La figure 7 illustre ces changements dans le centre-ville de Saint-Pierre.

**Figure 6 – Evolution de la surface bâtie en situation critique (distance à la côte <30m et altitude <6m) par commune entre 1950 et 2011**



**Figure 7 – Evolution de la bande côtière au centre-ville de Saint-Pierre et notamment de l'exposition des enjeux en fonction de leur distance au trait de côte et de leur altitude**



### ***Evolution des zones tampon terrestres naturelles***

La « zone tampon terrestre naturelle » correspond aux espaces non bâties qui s'étendent entre le pied de plage et les premiers enjeux en dur (route côtière, bâtiments et ouvrages de défense massifs) implantés sur le littoral. Elle correspond donc aux unités morphologiques littorales émergées qui, parce qu'elles jouent un rôle « tampon » entre les facteurs de pression météo-marins (vagues, principalement) et les enjeux humains (biens et personnes), contribuent à amortir les impacts potentiellement destructeurs des événements météo-marins intenses. Logiquement, le rôle protecteur de la zone tampon est d'autant plus important que celle-ci est large et qu'elle est peu dégradée par l'homme.

Deux grandes situations s'observent à la Réunion. La première caractérise les centres urbains anciens comme Saint-Pierre et Saint-Denis qui, dès 1950, présentent une forte emprise de l'urbanisation sur les espaces naturels littoraux. L'évolution qu'y a connu la zone tampon entre 1950 et 2011 est moins importante que sur les côtes plus récemment urbanisées, comme celles de Saint-Paul et du Port. En revanche, les évolutions sont notables lorsque l'on étudie la structure de la zone tampon terrestre naturelle des vieux centres urbains de Saint-Denis et de Saint-Pierre. La zone tampon stabilisée (c'est-à-dire fixée artificiellement), par exemple, a vu sa surface augmenter à Saint-Denis du fait de travaux d'aménagement du front de mer ayant conduit à la création de remblais et de talus, et ce au détriment de la zone tampon active (laissée naturelle). La zone tampon stabilisée de Saint-Denis constitue aujourd'hui une zone de loisirs en grande partie végétalisée et que l'on peut considérer comme étant pérenne, étant données les valeurs paysagère et fonctionnelle de ce type d'espace dans les centres urbains.

La seconde situation caractérise le Port et Saint-Paul, où la surface de la zone tampon terrestre naturelle, et en particulier celle de la zone tampon stabilisée, a connu une baisse considérable depuis 1950. Le développement des activités industrielo-portuaires et commerciales explique cet empiètement des activités humaines dans le cas du Port. À Saint-Paul, c'est la forte attractivité résidentielle et le développement du tourisme qui expliquent l'érosion des zones tampons. Quoi qu'il en soit, il y a eu phénomène de contraction des espaces naturels, ce qui a là encore contribué à augmenter l'exposition des enjeux humains aux risques liés à la mer.

### ***Évolution de la protection des enjeux***

Un dernier facteur pris en compte dans l'approche par les trajectoires de vulnérabilité, touche aux ouvrages de défense, autrement dit les ouvrages d'ingénierie ou de maçonnerie jouant un rôle protecteur pour les enjeux exposés aux aléas météo-marins (érosion côtière et submersion marine). Il peut s'agir de cordons d'enrochement et de tétrapodes, de murs de protection, de jetées, de murs et murets en limite de propriété, etc. Selon les cas, ces ouvrages ont été édifiés par des acteurs publics ou privés. L'approche méthodologique a consisté en la numérisation des ouvrages visibles sur les photographies aériennes de 1950 et 1978, complétées ensuite de la situation actuelle (relevés de terrain en 2013). Elle est détaillée dans le document Iddri mentionné plus haut (Duvat et al, 2016), et les données ont été produites pour un linéaire côtier d'environ 41 km de côtes meubles.

Face au nombre croissant d'enjeux humains situés dans des zones basses et à proximité du trait de côte, d'une part, et de la forte contraction de la zone tampon terrestre naturelle depuis 60 ans, le littoral a vu un fort développement des ouvrages lourds de défense. Cette fixation progressive du trait de côte a cependant généré des effets négatifs sur le fonctionnement naturel du littoral. En effet, les ouvrages longitudinaux (parallèles au trait de côte) verticaux (droits, et non inclinés) comme les murs accroissent l'impact érosif des vagues en provoquant leur réflexion. De même que les épis et jetées (ouvrages perpendiculaires au trait de côte) interceptent le transit côtier, générant une érosion en aval-dérive. Les problèmes inhérents à ces ouvrages mènent le plus souvent à la

construction de nouveaux ouvrages qui entraînent à leur tour de nouvelles perturbations, initiant alors un « effet domino » classique dans l'analyse des dynamiques littorales. Là où ils sont artisanaux, ces ouvrages non conformes aux exigences techniques ne protègent pas efficacement les enjeux côtiers et tendent par leurs effets négatifs à accroître la vulnérabilité du littoral.

### **Synthèse générale**

La synthèse des résultats met en lumière des combinaisons de phénomènes relativement similaires d'une commune à une autre (Duvat et al., 2016).

D'une part, sous l'effet conjugué du recul du trait de côte et de l'urbanisation croissante des dunes, on observe entre 1950 et 2011 un quasi-doublement du nombre de bâtiments situés à moins de 100 m du trait de côte (environ 3160 unités aujourd'hui) et une forte hausse de la surface bâtie située dans la bande côtière des 100 m (environ 60 ha aujourd'hui). Cela explique l'augmentation *de facto* de l'exposition potentielle du bâti et des routes (constructions de plus en plus près du rivage et dans des zones basses) à l'érosion côtière et à la submersion marine. Ainsi, lorsqu'on considère la distance au trait de côte et l'altitude de chaque bâtiment à l'échelle des quatre communes étudiées, la surface bâtie en situation critique (< 30 m du trait de côte et < 6 m d'altitude) a plus que triplé sur les 60 dernières années ; et celle en situation très critique (< 30 m du trait de côte et < 3 m d'altitude) a été multipliée par plus de 9.

D'autre part, la zone tampon terrestre naturelle des communes étudiées a connu à la fois une réduction de sa surface de près de 70 % et une dégradation de ses fonctions (par ex., sous l'effet du défrichement de la végétation indigène). L'homme a eu tendance à compenser la compression de la zone tampon par une fixation progressive du trait de côte au travers d'ouvrages de défense (murs et cordons d'enrochement, principalement). Le linéaire côtier équipé d'ouvrages représente aujourd'hui 44 % des 41 km de côtes étudiés, contre 6 % en 1950. La majorité des 216 ouvrages recensés sont artisanaux, car édifiés par des particuliers, et ne sont par conséquent pas calibrés pour résister aux pressions météo-marines auxquelles ils sont exposés.

Ce diagnostic met en lumière l'importante contribution des facteurs anthropiques à l'augmentation de la vulnérabilité des territoires littoraux de la Réunion, et ce dans un contexte d'événements météo-marins dévastateurs (cyclones tropicaux et houles australes) relativement fréquents et intenses. La départementalisation en 1946, qui a encouragé le processus de développement, et la forte croissance démographique qui l'a accompagnée (260 000 habitants en 1950, 845 000 en 2014, 1 061 000 prévus en 2040) ont joué un rôle majeur dans l'émergence (au Port et à Saint-Paul) et dans l'augmentation (à Saint-Pierre et à Saint-Denis) de la vulnérabilité des littoraux.

### **3. Au croisement de la « vulnérabilité structurelle » et des « trajectoires de vulnérabilité » : quelles pistes pour favoriser l'adaptation ?**

Il s'agit ici de proposer deux types d'exploitation croisée des approches « vulnérabilité structurelle » et « trajectoires de vulnérabilité », l'un à l'échelle locale dans le cadre des politiques publiques territoriales, l'autre à l'échelle globale dans le cadre des négociations internationales au sein de la CCNUCC.

#### **3.1. À l'échelle locale**

Croiser les regards macro-quantitatifs (vulnérabilité structurelle) et micro-qualitatif (trajectoires de vulnérabilité) permet de confirmer l'importance de 5 des 8 pistes d'adaptation des littoraux outre-mer proposées par l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) dans un rapport au Premier Ministre et au Parlement publié en 2012 (Duvat et al., 2012). Si ces recommandations s'appliquent parfaitement au cas de la Réunion, elles sont également pertinentes pour la majorité des littoraux outre-mer français et, plus généralement, des littoraux bas de la planète.

- *Réduire la vulnérabilité actuelle (recul stratégique, prévention des risques) et futurs (zonage de l'urbanisation)* – Comme le montre l'approche par les trajectoires de vulnérabilité, il est indispensable de contrôler la pression de l'urbanisation pour la freiner dans un premier temps, puis la réduire dans la mesure du possible dans un second temps. Cela doit notamment passer par la relocalisation des activités, du bâti et des infrastructures stratégiques menacés de destruction, autrement dit par une politique volontariste de recul stratégique. Cela impose en particulier d'élaborer une politique financière adaptée, et viable sur le long terme. Sur ce point l'approche par la « vulnérabilité structurelle » peut aider à identifier les zones prioritaires.
- *Mettre en œuvre un plan de protection global des enjeux exposés qui ne peuvent être relocalisés* – Il convient en effet, en parallèle de la mise en place de la politique volontariste de retrait stratégique mentionnée ci-dessus, de mieux protéger les enjeux ne pouvant être délocalisés, comme l'aéroport Roland Garros de Saint-Denis, par exemple. Cela impose de passer de la défense des enjeux au coup par coup (non planifiée, ni intégrée à une réflexion globale à l'échelle du compartiment sédimentaire) à un plan de protection cohérent, autrement dit de s'appuyer sur une diversité de solutions techniques qui soient les plus adaptées aux spécificités de chaque site (nature, degré stratégique, la valeur des enjeux, configuration). Cela revient à mettre en place une politique différenciée de défense des côtes et de gestion des ouvrages existants et à venir, ce qui n'existe par exemple pas formellement à ce jour à la Réunion.
- *Mener une politique globale de soutien des bonnes pratiques* – Celle-ci pourrait s'appuyer sur un large panel de mesures financières (fiscalité, subventions, accès au crédit), par exemple analysées au filtre de l'indicateur structurel de vulnérabilité appliqué à des échelles locales.

- *Contrôler l'urbanisation* – Il s'agit en particulier d'empêcher les constructions dans les secteurs exposés aux aléas, car situés à proximité de la mer (par l'instauration d'une distance de recul suffisante pour toute nouvelle construction), dans le lit des cours d'eau et sur les fortes pentes. Cela impose en particulier de protéger les zones naturelles tampons menacées (systèmes plages-dunes à la Réunion, mais également récifs coralliens).
- *Préserver les écosystèmes protecteurs* – Il s'agit notamment de réduire les perturbations environnementales qui affaiblissent leur résilience et leurs fonctions, et de restaurer ceux qui ont été dégradés. Un objectif de fond doit être d'accroître la longueur de linéaire côtier protégé et la surface des espaces protégés, de sorte à contrarier les effets de cercle vicieux engagés au cours des dernières décennies et mis en évidence par l'approche des trajectoires de vulnérabilité. En parallèle, il importe de replanter les espaces dénudés situés sur les pentes montagneuses, dans le lit majeur des cours d'eau et sur les dunes afin de stabiliser les sols et de limiter les risques de mouvement de terrain, d'une part, et de réduire le risque d'inondation des zones basses, d'autre part. Ici, l'approche par la « vulnérabilité structurelle » peut fournir des indications complémentaires pour identifier les zones prioritaires.

### **3.1. À l'échelle globale**

Si la COP21 a été un succès, c'est notamment parce qu'en amont de la négociation en tant que telle, à Paris fin 2015, les pays ont joué le jeu des « contributions nationales volontaires intentionnelles » (*INDCs* en anglais), posant ainsi les bases de leurs discussions et de leur accord sur l'objectif ambitieux de limiter le réchauffement moyen de la planète à moins de 2°C d'ici la fin du siècle, voire à 1,5°C (par rapport à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle). Un autre succès de la COP21 touche à la question de l'adaptation. L'Accord de Paris invite en effet la communauté internationale à développer un « objectif global d'adaptation » (*Global Adaptation Goal*), marquant ainsi une prise de conscience internationale de la nécessité de dépasser la simple question historique du financement de l'adaptation des pays du Sud par les pays du Nord. L'équation d'un futur durable ne peut donc plus se limiter à la mesure des progrès en matière d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, et il est indispensable d'apporter une réponse à une autre question-clé : sommes-nous, en tant qu'humanité, sur la voie de l'adaptation ? C'est ce que propose, bien qu'indirectement, l'Accord de Paris lorsqu'il suggère de réaliser un « bilan global » (*Global Stocktake*) sur les progrès en matière d'adaptation. Cela suppose en particulier de définir des manières de qualifier les formes que prend l'adaptation dans différents contextes nationaux, et qui à la fois reflètent les circonstances nationales (en termes d'impacts du changement climatique, de ressources environnementales, de dynamiques de développement, et de fonctionnement politique et social), et autorisent un regard agrégé embrassant tous les pays. Sur cette base, le suivi complet et régulier de la mise en œuvre des NDCs sera envisageable (Magnan et Ribera, 2016). Or, les approches en termes de vulnérabilité structurelle et de trajectoires de vulnérabilité peuvent contribuer à cet effort de manière très complémentaire, l'une sur le volet « exposition physique »,

l'autre sur le volet « vulnérabilité humaine », et suivant trois axes imbriqués : (i) base de données globale, (ii) typologie de profils et (iii) indicateurs de progrès.

### ***Vers une typologie de profils d'exposition physique***

L'approche par la vulnérabilité structurelle, à partir du PVCCI, peut contribuer à développer une typologie de la variabilité de l'exposition physique de différents types de pays. Tous les pays présentant certaines formes d'exposition, plus ou moins directe, à une diversité d'impacts du changement climatique, la question ne peut plus être cantonnée aux pays dits « vulnérables », entendu les pays en développement. De nombreux travaux scientifiques démontrent désormais que les pays industrialisés et émergeants sont eux-aussi pleinement concernés par l'influence du changement climatique. Il y a donc un réel besoin (i) de constituer une base de données mondiale sur l'exposition directe et indirecte au changement climatique, effort auquel la démarche PVCCI contribue. (ii) À partir de là, une typologie de profils d'exposition physique pourrait être constituée qui permettrait au processus de négociation climat de dépasser le clivage historique Nord/Sud, par exemple en rassemblant des atolls et des grands deltas de pays industrialisés sous un profil « risque de submersion marine », ou encore des zones en désertification, des grands bassins de production agricoles et des zones de montagne sous un profil « risque de stress hydrique ». Cela permettait de mettre en place de nouvelles modalités d'apprentissage collectif entre territoires et entre pays, en matière de politiques d'adaptation, tout en ayant le mérite de permettre l'émergence de nouvelles coalitions, « par profils », et une reconfiguration des négociations climat. (iii) Enfin, à terme, à ces profils d'exposition physique pourraient être associés des indicateurs de progrès, dont la pertinente est à chaque fois spécifique à ce groupe de pays et à son profil de vulnérabilité, de sorte à alimenter l'approche globale d'évaluation des progrès d'adaptation qui bute aujourd'hui sur le fait que les stratégies d'adaptation sont nécessairement spécifiques à chaque situation géographique particulière.

### ***Vers une typologie de profils d'exposition humaine***

Une réflexion du même type et complémentaire à la précédente, s'applique aux dimensions sociales, culturelles, économiques et politiques de la vulnérabilité au changement climatique. Tout comme pour le volet « exposition physique », il y a un besoin crucial de définir, dans le cadre des négociations climatiques internationales, des modes d'intégration des dimensions humaines qui dépassent elles aussi l'actuel clivage Nord/Sud, lequel ne laisse en réalité place qu'à la dimension économique de la capacité d'adaptation. Or, l'approche par les trajectoires de vulnérabilité, parce qu'elle adopte un regard systémique des territoires et produit une analyse dynamique des facteurs de vulnérabilité, peut aussi contribuer à une reconfiguration des négociations climat. À l'image de ce qui précède, il pourrait être utile de développer (i) une analyse globale des facteurs anthropiques de vulnérabilité au cours des dernières décennies, pour ensuite en dégager une (ii) typologie de profils de vulnérabilité humaine. Comme précédemment, cette typologie pourrait faire émerger de nouveaux regroupements de pays autour de profils diversifiés, par exemple « densification de l'urbanisation dans des zones naturellement à risque de submersion marine »

(France, Etats-Unis, Kiribati, Maldives, etc.) ou « perte de la culture du risque » (nombreuses mégalopoles, zones d'industrialisation agricole, espaces en déclin démographique, etc.). Là encore, de nouvelles alliances pourraient émerger, pour finalement permettre une approche globale de l'adaptation aux impacts du changement climatique qui soit plus pertinente car plus adaptée aux spécificités de chaque situation, tout en gardant la capacité à monter en généralité pour permettre l'apprentissage collectif et la mesure agrégée des performances en matière d'adaptation . (iii) Enfin, ici aussi des indicateurs de réalisation pourraient être associés à ces profils de vulnérabilité humaine, par exemple pour mesurer les effets des politiques publiques, et toujours dans le but d'alimenter l'évaluation des progrès d'adaptation à l'échelle globale.

## Conclusion

Si les conclusions de l'analyse à l'échelle locale (limiter les pressions, préserver les écosystèmes, mieux gérer, etc.) renvoient à des recommandations courantes et connues, et qui de fait peuvent paraître triviales, celles-ci ne sont cependant pas toujours priorisées dans les arbitrages politiques, notamment en matière d'occupation des sols et d'aménagement du territoire, et elles prennent encore une acuité particulière dans le contexte relativement nouveau imposé par le changement climatique. Ce dernier va en effet d'abord exacerber des pressions qui existent déjà sur les littoraux et qui, comme susmentionné, sont en partie inhérentes à des processus anthropiques. Dès lors, agir sur ces processus d'exacerbation des risques relève des « incontournables de l'adaptation ». Cela renvoie au principe selon lequel une première étape fondamentale du processus d'adaptation de long terme consiste à commencer par éviter d'aggraver les problèmes déjà existants du fait, soit de décisions et de pratiques de court terme qui négligent le poids des impacts des phénomènes météo-marins, soit de la mise en œuvre face à un problème donné d'une réponse uniforme ne prenant pas en compte la diversité des situations locales (Magnan et al., 2016). S'adapter au changement climatique dès aujourd'hui à la Réunion, par exemple, suppose donc en partie de repenser le rapport de la société à l'espace littoral, ce qui sous-entend à la fois une prise de conscience des acteurs locaux et l'acceptation par la population locale de mesures *a priori* contraignantes. À ce titre, les travaux scientifiques doivent servir de supports d'échange sur « quoi faire » et « comment le faire », donc en amont de choix socioéconomiques de développement. Des approches complémentaires comme celles de la « vulnérabilité structurelle » ou des « trajectoires de vulnérabilité » peuvent permettre d'éclairer les débats, respectivement sur les dimensions physiques et humaines de la vulnérabilité.

Cela est également vrai dans le cadre d'une analyse à l'échelle globale, avec pour bénéfice potentiel, entre autres, de permettre des reconfigurations des négociations climat en matière d'adaptation, autour de profils d'exposition physique et de vulnérabilité humaine qui dépasseraient les clivages Nord/Sud pour permettre une approche plus rationnelle de l'adaptation aux impacts du changement climatique.

## Références

- Becker M.B., Meyssignac C., Letetrel C., Llovel W., Cazenave A., Delcroix T., 2012, "Sea level variations at tropical Pacific islands since 1950", *Global and Planetary Change*, vol. 80-81, 85-98.
- Camargo S. J., Sobel A. H., 2005,. Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO. *Journal of Climate*, 18(15), 2996-3006.
- Duvat V. (dir.), Magnan A., Mossot G., Reysset B., Galliot M., Bonnardot F., Dandin P., Palany P., 2012. *Outre-Mer et changement climatique*. La Documentation Française, Paris – Rapport au Premier Ministre et au Parlement, Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC, France).
- Duvat V.K.E., Salmon C., Magnan A.K., 2016. Trajectoires de vulnérabilité des littoraux de l'île de la Réunion aux risques liés à la mer (1950-Actuel). *IDDRI Study*, 04/2016, 72 p. doi : 10.13140/RG.2.2.14267.62242. [[http://www.iddri.org/Publications/Collections/Analyses/ST0416\\_Duvat,V.\\_et\\_al\\_traj\\_vulne\\_Reunion.pdf](http://www.iddri.org/Publications/Collections/Analyses/ST0416_Duvat,V._et_al_traj_vulne_Reunion.pdf)]
- Duvat K.E., Magnan A.K., Wise R.M., Hay J.E., Hinkel J., Stojanovic T.A., Yamano H., Ballu V., 2017. Trajectories of exposure and vulnerability of small islands to climate change. *WIREs Climate Change*. doi:10.1002/wcc.478
- Emanuel K., 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436(7051), 686-688.
- Feindouno S., Goujon M., Santoni O., 2016. Tendances et chocs climatiques à La Réunion : utilisation de la base CRU TS 3.21, dans Lepelley D., Paul M. (dir.), *Droit, Economie et Gestion de l'Eau dans la zone Océan Indien*, Oeconomia.
- Feindouno S., Goujon M., Santoni O., 2017, Un indicateur synthétique d'activité cyclonique au niveau pays, *Ferdi Note brève*, à paraître.
- GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.
- Goujon M., Hoarau J.-F. Rivière F., 2015a, Vulnérabilités économique et environnementale comparées des économies ultramarines françaises, dans Hoarau J-F. (dir.) *Spécialisation touristique et vulnérabilité, Réalités et enjeux pour le développement soutenable des petits territoires insulaires*, L'Harmattan.
- Goujon M., Hoarau J.-F. et Rivière F., 2015b, Vulnérabilités au changement climatique des Outre-mer et des petits Etats insulaires, *Question de développement* n°28, Agence Française de Développement. Diffusé à la Conférence AFD-CEROM Outre-Mer 2015
- Goujon M., Hoarau J.-F. et Rivière F., 2015c, Vulnérabilités économique et environnementale comparées des économies ultramarines françaises, *Document de Travail de l'Agence Française de Développement* n°145 (mai).
- Guillaumont, P. (2009), *Caught in a trap: Identifying the Least Developed Countries*. Economica.
- Guillaumont P. et C. Simonet, 2011, To what extent are African countries vulnerable to climate change? Lessons from a new Indicator of Physical Vulnerability to Climate Change, *FERDI Working Paper* n°108

- Guillaumont, P. (2015), "Mesurer la vulnérabilité au changement climatique pour allouer le financement de l'adaptation" *Ferdi Document de travail* P136, octobre (en anglais : "Measuring vulnerability to climate change for allocating funds for adaptation")
- Guillaumont P. et al., 2017, A Physical Vulnerability to Climate Change Index: Who are the most vulnerable developing countries? *FERDI Working Paper*, à paraître.
- Kossin J. P., Emanuel K. A. & Vecchi G. A. (2014), The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity. *Nature* 509, 349–352, doi:10.1038/nature13278
- Magnan A.K., Duvat V.K.E., 2016. Trajectoires de vulnérabilité et adaptation au changement climatique à la Réunion. *IDDRI Policy Brief*, 08/16, 4 p.
- Magnan A.K., Ribera T., 2016. Global adaptation after Paris. *Science (Policy Forum)*, 352, 6291 : 1280-1282. doi: 10.1126/science.aaf5002.
- Magnan A.K., Schipper E.L.F., Burkett M., Bharwani S., Burton I., Eriksen S., Gemenne F., Schaar J., Zier vogel G., 2016. Addressing the risk of maladaptation to climate change. *WIREs Climate Change (Advanced Review)*, 7(5): 646-665. doi: 10.1002/wcc.409.
- Nguyen T.T.X., Bonetti J., Rogers K., Woodroffe C.D. (2016). Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean and Coastal management*, 123: 18-43.
- Nurse L.A., McLean R.F., Agard J., Briguglio L.P., Duvat-Magnan V., Pelesikoti N., Tompkins E., Webb A., 2014. *Small islands*. In Barros V.R. et al. (eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1613-1654.
- Park D.-S.R., Ho C.-H., Kim J.-H., and Kim H.-S. (2013), Spatially Inhomogeneous Trends of Tropical Cyclone Intensity over the Western North Pacific for 1977–2010, *Journal of Climate*, 26:14, 5088-5101
- Tubiana L., Gemenne F., Magnan A., 2010. *Anticiper pour s'adapter : le nouvel enjeu du changement climatique*. Editions Pearson, France, Paris, 206 p.
- Vecchi, G. A., and Knutson T. R. (2008), On estimates of historical north atlantic tropical cyclone activity, *Journal of Climate*, 21, 3580-3600.



*"Sur quoi la fondera-t-il l'économie du monde qu'il veut gouverner? Sera-ce sur le caprice de chaque particulier? Quelle confusion! Sera-ce sur la justice? Il l'ignore."*

**Pascal**



Créée en 2003, la **Fondation pour les études et recherches sur le développement international** vise à favoriser la compréhension du développement économique international et des politiques qui l'influencent.

**Contact**

[www.ferdi.fr](http://www.ferdi.fr)

[contact@ferdi.fr](mailto:contact@ferdi.fr)

+33 (0)4 73 17 75 30



L'**Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri)** a pour objectif d'identifier les conditions nécessaires pour que le développement durable soit intégré aux politiques publiques et propose des outils pour leur mise en œuvre. Il intervient à différents niveaux, de la coopération internationale aux politiques des pays, villes et entreprises.