

CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE COÛT DES CATASTROPHES NATURELLES EN FRANCE À HORIZON 2050

SEPTEMBRE 2023

ÉDITORIAL



Antoine Quantin,
Directeur des Réassurances
& des Fonds Publics

Institué il y a plus de 40 ans, le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles a atteint les objectifs visés par le législateur en 1982, à savoir la couverture du plus grand nombre à un prix soutenable et une indemnisation adaptée des particuliers et des entreprises sinistrés permettant un retour rapide à la normale et assurant ainsi la résilience de la population et de l'économie française.

Au-delà de la seule indemnisation des sinistres, le régime Cat Nat a permis d'améliorer la connaissance de ces risques, qui étaient relativement mal appréhendés en 1982, et a fortement contribué au financement de la prévention.

Si le régime a bien fonctionné jusqu'à présent, il commence à être confronté au défi du changement climatique, avec une succession d'années fortement sinistrées du fait de la sécheresse géotechnique, ce qui est vraisemblablement un aperçu de la sinistralité attendue à moyen terme.

Le changement climatique bouleverse les approches classiques de l'actuariat, l'exploitation d'historiques de sinistralité et même de modélisations physiques complexes atteignant ses limites du fait de l'évolution et de la non-stationnarité du climat. Afin de mieux appréhender les bouleversements à venir, CCR s'est lancée depuis plusieurs années, en lien avec ses partenaires scientifiques, au premier rang desquels se situe Météo-France, dans un ambitieux travail de modélisation et d'anticipation des conséquences du changement climatique en termes de dommages assurés au titre du régime Cat Nat.

Cette nouvelle étude, qui s'inscrit dans la continuité de celles publiées en 2015, 2018 et 2020 permet de capitaliser sur les avancées récentes en termes de modélisation des dommages et de prendre en compte les effets des réformes récentes et en cours du régime. Ses résultats permettront d'alimenter les réflexions sur la nécessaire adaptation du régime Cat Nat, du fait de la hausse de la sinistralité, en lien avec le changement climatique, en vue d'assurer sa pérennité, mais également pourront permettre d'orienter les politiques publiques de prévention afin de contenir la hausse des dommages.

CCR estime que la sinistralité devrait augmenter d'environ + 40 % à horizon 2050 sous l'effet du changement climatique et + 60 % en intégrant l'évolution des enjeux assurés. La dérive déjà observée de la sinistralité et les projections à horizon 2050 montrent la nécessité de revoir le financement du régime en ajustant le taux de la surprime Cat Nat afin de permettre au régime de retrouver un équilibre technique et à CCR de jouer pleinement son rôle d'amortisseur de chocs. La hausse nécessaire est estimée à + 7 points à court terme et devra être suivie d'une hausse supplémentaire de 3 points pour tenir compte du changement climatique à venir d'ici 2050.

TABLE DES MATIÈRES

1. SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE 05

2. INTRODUCTION 09

3. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE : DES SIMULATIONS CLIMATIQUES À HORIZON 2050 À L'ÉVALUATION DU MONTANT DES DOMMAGES ASSURÉS
- 3.1 - Les simulations climatiques de Météo-France 11
- 3.2 - La simulation des aléas climatiques 14
- 3.3 - La simulation des dommages assurés 21

4. PROJECTION À HORIZON 2050 DES ENJEUX ASSURÉS
- 4.1 - Les biens assurés de particuliers 23
- 4.2 - Les biens assurés de professionnels 23
- 4.3 - Le cas des Outre-mer 24
- 4.4 - En résumé 24

5. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA SINISTRALITÉ CAT NAT
- 5.1 - Les inondations en 2050 26
- 5.2 - Les submersions marines en 2050 31
- 5.3 - Les sécheresses géotechniques en 2050 35

6. BILAN DU COÛT DE L'ÉVOLUTION DES DOMMAGES MULTIPÉRILS 39

7. UN BESOIN DE RENFORCEMENT DE LA PRÉVENTION DES RISQUES CLIMATIQUES POUR LIMITER LA HAUSSE DES DOMMAGES 40

8. DISCUSSION SUR LA MÉTHODOLOGIE 42

9. CONCLUSION ET PERSPECTIVES 43

10. PRINCIPALES RÉFÉRENCES 45

1. SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE

La France a été impactée ces dernières années par des événements météorologiques de grande ampleur : la crue de la Seine 2016, l'Ouragan Irma de 2017, une succession de sécheresses exceptionnelles entre 2016 et 2020 dont la sécheresse de 2018 et la sécheresse quasi généralisée de 2022 d'une intensité qui n'a jamais été connue par le passé. Ainsi, la France enregistre des dommages économiques assurés particulièrement importants ces dernières années. Ces événements qui se succèdent rappellent l'exposition du territoire français et la vulnérabilité de notre société aux risques naturels.

Il est nécessaire de chiffrer ces événements climatiques extrêmes en termes de fréquence et d'intensité en prenant en compte l'impact du changement climatique pour adapter nos politiques publiques de gestion des risques. La Caisse Centrale de Réassurance (CCR), est le réassureur public en France qui propose, avec la garantie de l'État, une couverture illimitée aux principales catastrophes naturelles (inondations, sécheresses géotechniques, séismes, submersions marines et cyclones) dans le cadre du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles. Dans ce contexte, CCR a noué de nombreux partenariats avec des organismes scientifiques reconnus, au premier rang desquels Météo-France, afin de renforcer son rôle d'expert de l'évaluation des conséquences économiques des catastrophes naturelles et de contributeur au Risk management de l'État français.

Depuis la COP 21 en 2015, CCR a réalisé plusieurs études dont l'objectif est l'estimation de l'évolution des dommages assurés due au changement climatique sur le territoire français. Ce présent rapport fait suite à trois études publiées respectivement en 2015, 2018, 2020. L'objectif de ce rapport est de bénéficier de l'amélioration continue des outils de modélisation et de fournir une vision complète du chiffrage des dommages pour deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre utilisés par le GIEC, un scénario intermédiaire de hausse, plafonnement puis baisse des émissions au cours du 21ème siècle (RCP 4.5), et un scénario de forte hausse des émissions tout au long du 21ème siècle (RCP 8.5) à horizon 2050. L'impact du changement climatique a été étudié sur les trois principaux périls couverts par le régime Cat Nat : inondation par débordement et ruissellement, submersion marine, sécheresse géotechnique. Les deux autres périls majeurs relevant du régime (séismes et cyclones) sont intégrés pour disposer d'une vision multipérils.

Ainsi, les résultats de cette étude intègrent, d'une part la chaîne de modélisation développée chez CCR issue d'une connaissance robuste des phénomènes climatiques et de l'exposition aux risques des territoires, et d'autre part une méthodologie innovante des simulations climatiques produite par Météo-France : la simulation dite à climat constant. Cette méthodologie permet de simuler un large panel d'événements hydrométéorologiques selon les différents scénarios à horizon 2050 et d'analyser la fréquence et l'intensité des événements extrêmes qui sont rares par définition. L'association de ces deux expertises permet de constituer une chaîne de modélisation complète allant du phénomène météorologique jusqu'à l'estimation de l'impact des aléas sur les dommages aux biens assurés à horizon futur.

Cette étude met en évidence quatre résultats principaux :

• depuis l'année 2000, le climat a évolué et on observe déjà une dérive de la sinistralité avec une augmentation du niveau des dommages moyens annuels. Si la sinistralité due à l'inondation reste stable, les dommages annuels moyens dus à la sécheresse géotechnique ont augmenté de 23 % entre le climat 2000 et aujourd'hui du fait du climat. À cela s'ajoute l'effet des réformes récentes et en cours (loi Baudu, loi dite « 3DS ») portant la hausse de la sinistralité sécheresse à 56 % au global ;

• quel que soit le scénario RCP du GIEC, les montants des dommages dus aux aléas vont augmenter à horizon 2050 en raison d'une hausse de l'intensité des événements climatiques ;

• l'accroissement des enjeux assurés à horizon futur, en particulier dans les zones à risques, augmente d'autant plus le coût des dommages ;

• quels que soient les scénarios, la sécheresse géotechnique apparaît comme le péril le plus préoccupant compte tenu du montant des dommages qu'elle engendre et de leur forte évolution à horizon futur.

Quelques différences existent néanmoins sur l'évolution des périls selon les scénarios du GIEC. L'intensité de la sécheresse géotechnique est plus importante selon le scénario RCP 8.5 du GIEC. L'augmentation du montant des dommages est estimée à 162 % en raison de l'aléa, et 190 % en intégrant l'évolution des biens assurés en 2050. Ces événements d'une extrême sévérité, dont le cycle s'allonge à horizon futur posent la question de la mise en place d'une politique nationale de prévention. En parallèle, on anticipe une hausse des dommages causés par les inondations qui serait plus importante sur le scénario RCP 4.5 et serait due à l'augmentation de la fréquence des crues rapides.

Enfin, la hausse du niveau marin entraînerait une augmentation de la fréquence et de l'intensité des submersions marines. Au global, on estime une hausse des dommages comprise entre 27 % et 62 % à l'horizon 2050 du seul fait du changement climatique.

Face à l'augmentation des dommages assurés, le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles devra relever le défi du changement climatique afin de préserver le principe de solidarité nationale sur lequel il repose. Ainsi, trois pistes sont envisageables pour garantir la pérennité du régime :

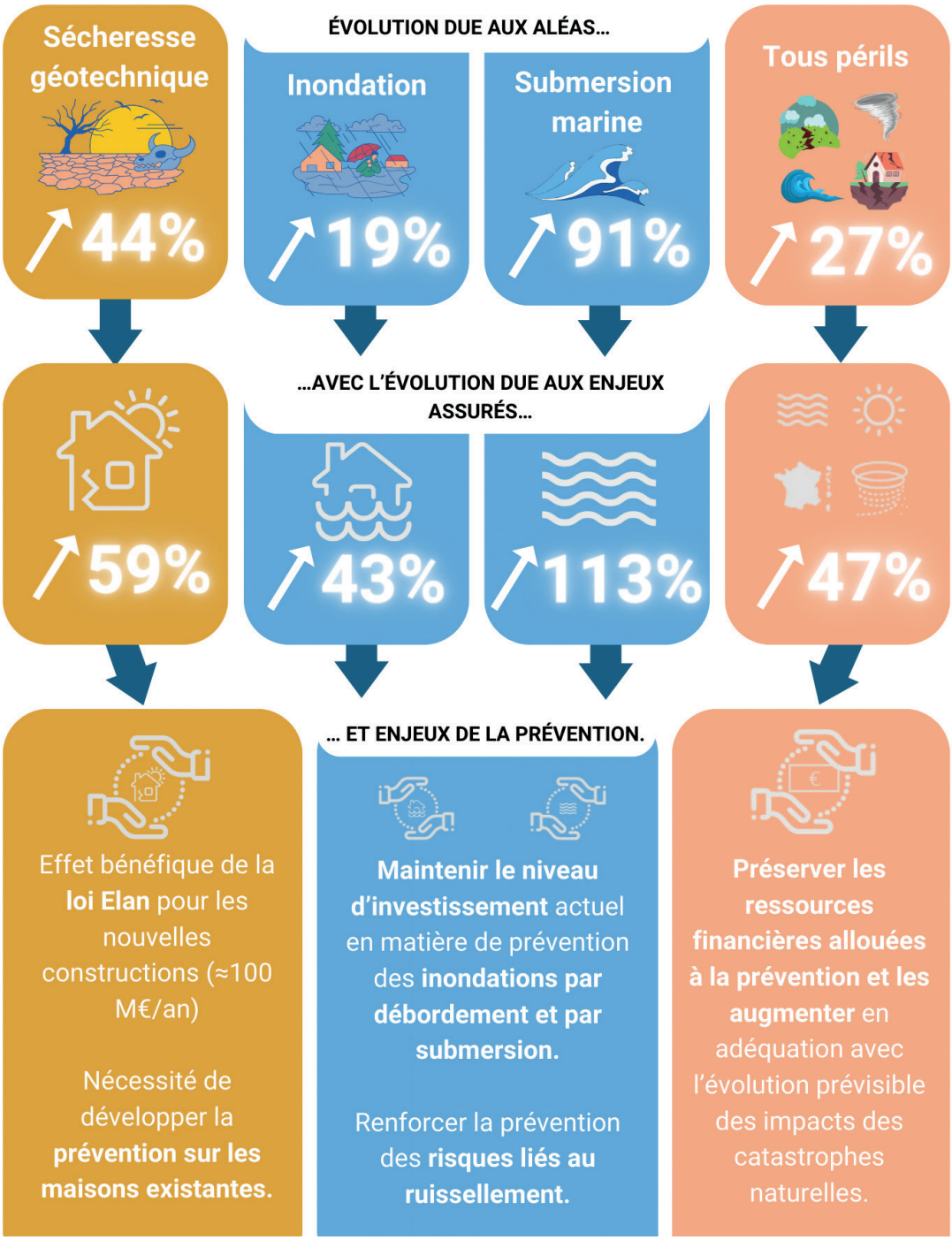
• renforcer les efforts en matière de prévention en particulier de la sécheresse géotechnique et du ruissellement ;

• recentrer les critères de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sur le principe législatif originel, soit la couverture des événements d'intensité anormale ;

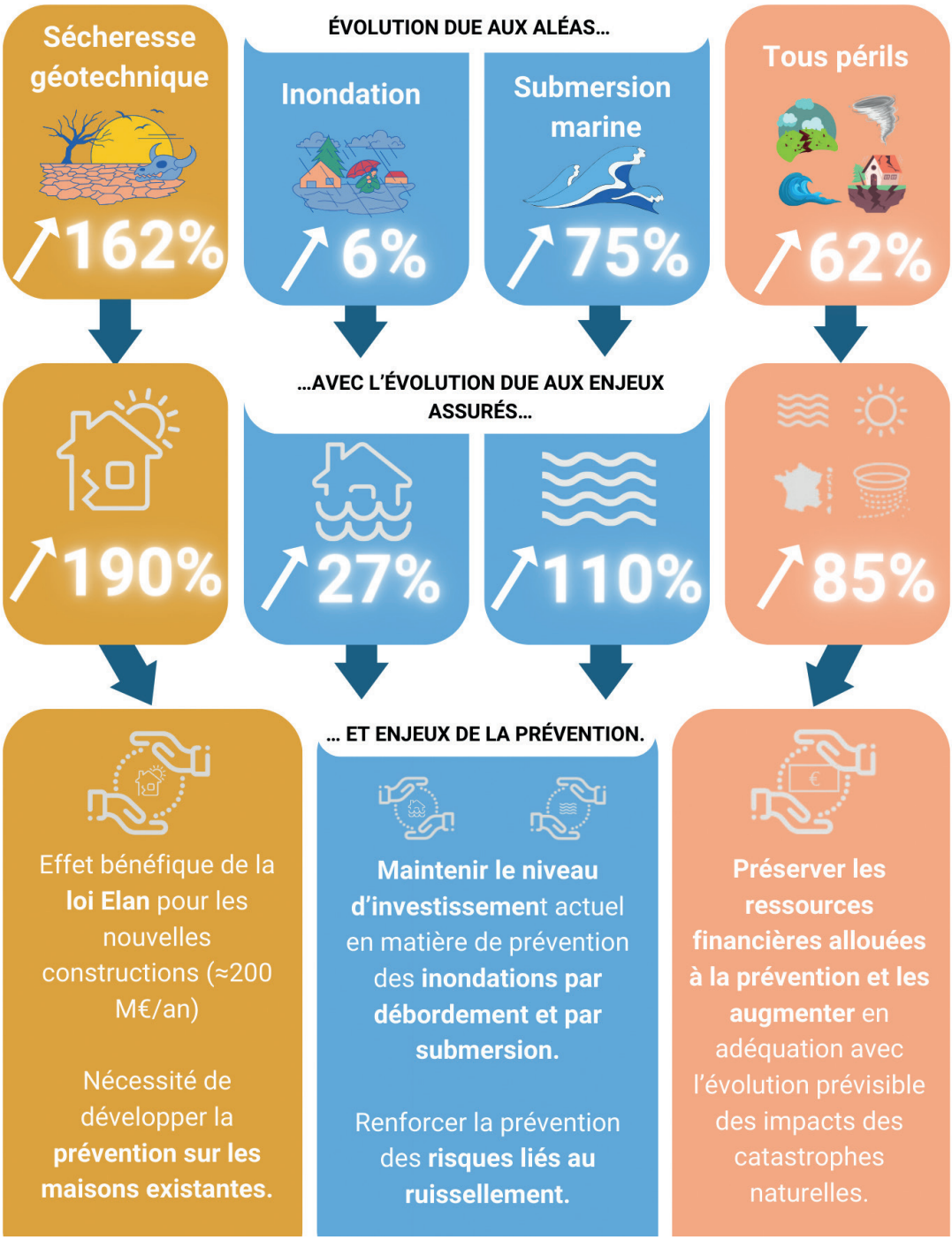
• augmenter le taux de surprime, afin de permettre au régime Cat Nat de retrouver un équilibre technique et à CCR de jouer son rôle d'amortisseur de chocs.

Ces solutions combinées permettraient à la société de s'adapter aux risques futurs.

Évolution de la sinistralité moyenne annuelle à l'horizon 2050 par rapport au climat 2023 en France - **RCP 4.5**



Évolution de la sinistralité moyenne annuelle à l'horizon 2050 par rapport au climat 2023 en France - **RCP 8.5**



2. INTRODUCTION

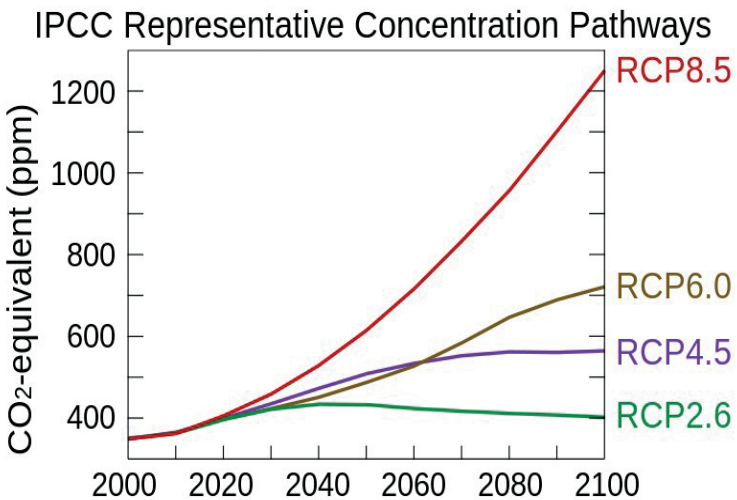
Les gaz à effet de serre jouent un rôle important dans la régulation du climat. Depuis le XIXème siècle, l'homme, par ses activités (notamment la combustion de ressources fossiles), a accru la quantité de gaz à effet de serre présente dans l'atmosphère. Cette hausse a pour conséquence une modification de l'équilibre du climat. Depuis 1988, le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) analyse l'évolution du climat à l'échelle mondiale et les impacts de ces changements sur les populations et les écosystèmes en fonction de différents scénarios de concentration de gaz à effet de serre. Ces scénarios sont présentés en Figure 1.

La présente étude réalisée par CCR se focalise sur deux scénarios proposés par le GIEC :

• Le scénario RCP (Representative Concentration Pathways) 4.5, avec un écart de température entre 2050 et 2000 de 1,5 °C en France. Compte tenu des politiques d'adaptation et d'atténuation mises en place, ce scénario est plus probable que les scénarios à très fortes émissions ou au contraire, à très fortes baisses des émissions. Il peut être considéré comme un scénario médian.

• Le scénario RCP 8.5 avec un écart des températures entre 2050 et 2000 de 1,9 °C en France. Il correspond à un scénario à fortes émissions de gaz

Figure 1 : Évolution des concentrations de gaz à effet de serre selon les différents scénarios RCP du GIEC (Source GIEC).



à effet de serre tout au long du 21ème siècle. Il est donc retenu afin d'estimer une borne supérieure de l'évolution des dommages assurés.

Ces scénarios RCP sont basés sur les hypothèses de trajectoires de changement climatique CMIP5. Depuis, de nouvelles hypothèses ont été formulées dans le catalogue CMIP6 pour inclure les évolutions socio-économiques (SSP). Les données Météo-France sont antérieures à ces nouveaux scénarios. Toutefois, pour effectuer des simulations régionales et notamment pour les études d'impact, ce sont les scénarios RCP qui font encore référence. En étudiant deux scénarios RCP, il est possible de fournir un intervalle sur l'estimation de l'évolution de la sinistralité et ainsi de prendre en compte l'incertitude sur les trajectoires du changement climatique. Comme le montre la Figure 1, les trajectoires de concentration de gaz à effet de serre ne commencent à diverger qu'en milieu de siècle, et les différences s'accroissent au fil des décennies.

L'objectif de cette étude est de mesurer l'impact du changement climatique sur les principaux périls climatiques couverts par le régime Cat Nat : inondations par ruissellement et débordement, submersion marine, sécheresse géotechnique. Les deux autres périls majeurs relevant du régime (séismes et cyclones) sont intégrés pour disposer d'une vision multipérils. Concernant les coulées de boue et les mouvements de terrain consécutifs aux inondations qui relèvent également du régime Cat Nat, ils sont pris en compte dans les estimations des dommages. Les avalanches, les glissements de terrain non consécutifs à une inondation, les tsunamis et les éruptions volcaniques sont exclus de cette étude. Ces événements représentent un très faible poids dans la sinistralité historique.

Dans cette étude, les projections climatiques sont réalisées à horizon 2050, échéance adaptée pour l'étude de l'évolution des enjeux assurés et des politiques publiques. Par ailleurs, les données climatiques de référence fournies par Météo-France sont celles du climat 2000.

Néanmoins, les variations climatiques sont déjà visibles aujourd'hui, en particulier sur les épisodes de canicules. En effet, il est enregistré 22 vagues de chaleur sur ces douze dernières années alors que la période 1947-2000 n'en avait connu que 24[1]. Ce même effet est observé sur la sinistralité moyenne. En effet, le coût moyen des dommages annuels causés par la sécheresse sur la période 2016-2020 dépasse les 1,3 Md€ contre 350 M€ sur la période 2000-2015. Les conséquences du changement climatique sont déjà visibles aujourd'hui ; aussi, dans cette nouvelle étude, la dérive de la sinistralité entre le climat 2000 et le climat actuel a également été étudiée.

Dans cette étude, l'analyse des dommages se concentre sur 4 climats : le climat 2000, le climat actuel (vision 2023) et le climat à horizon 2050 selon les deux scénarios RCP du GIEC sélectionnés.

1 - Vagues de chaleur et changement climatique | Météo-France (meteofrance.com)

3. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE : DES SIMULATIONS CLIMATIQUES À HORIZON 2050 À L'ÉVALUATION DU MONTANT DES DOMMAGES ASSURÉS

3.1 - Les simulations climatiques de Météo-France

Le modèle global

Météo-France a configuré son modèle climatique atmosphérique ARPEGE-Climat selon les besoins exprimés par CCR pour l'estimation des risques à climat 2000 et climat 2050 sur l'Europe. Il s'agissait de produire des séries de données à **climat constant** suffisamment longues pour permettre des études statistiques robustes incluant un large panel d'événements dont des événements extrêmes dont la fréquence est rare par définition.

Une simulation à climat constant réunit une série climatique chronologique continue (ici 400 années), simulée autour d'une même année cible. L'avantage de la démarche est de décrire la variabilité interne du climat fixé sur l'année cible et de disposer d'une grande variété d'événements. Ces 400 simulations doivent donc être considérées comme des réalisations possibles de l'année cible avec leur probabilité d'occurrence. De plus, la taille de l'échantillon permet de calculer des statistiques robustes et fiables. Ainsi, avec 400 années 2000 potentielles et 400 années 2050, il est possible d'analyser la fréquence et l'intensité des événements extrêmes et d'étudier l'évolution du profil de ces événements dans le futur. Le choix des scénarios d'évolution des gaz à effet de serre (RCP) et des années cibles est effectué selon les intérêts des utilisateurs.

Météo-France a donc mis en œuvre trois simulations de 400 années :

- sur le climat 2000[2] ;
- sur le climat 2050 selon le scénario RCP 4.5 du GIEC[3] ;
- sur le climat 2050 selon le scénario RCP 8.5 du GIEC[4].

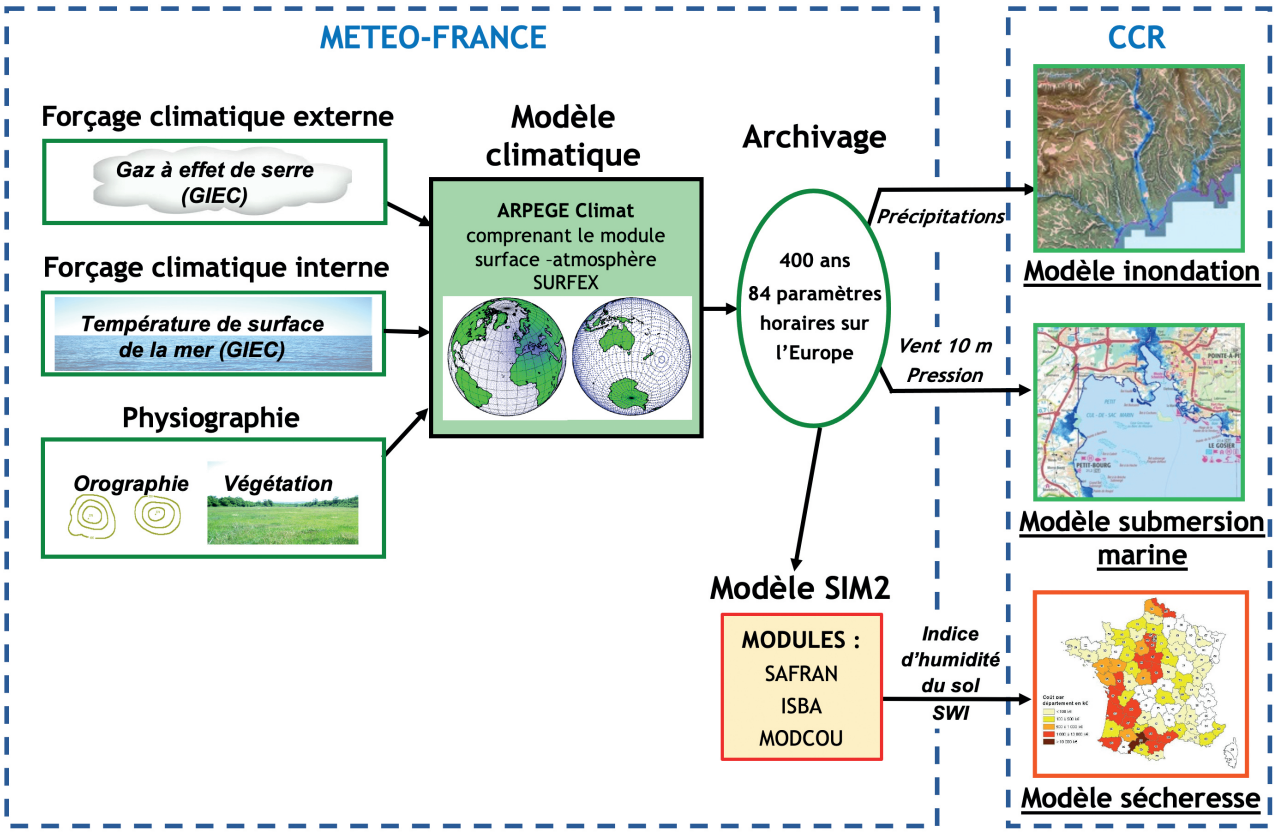
Afin d'obtenir une résolution horizontale intéressante sur l'Europe, la maille du modèle ARPEGE-Climat a été resserrée sur ce continent (~20 km) et relâchée aux antipodes. Le climat est fixé par les concentrations en gaz à effet de serre sur l'année cible. La variabilité interne du climat est donnée par un forçage de la température de surface de la mer par des séries de 400 années issues des travaux du GIEC. Le module de surface SURFEX assure la modélisation des échanges terre-atmosphère. Le pas de temps du modèle est de 10 minutes. L'archivage de plus de 80 paramètres d'intérêt est horaire sur un domaine prédéfini couvrant l'Europe et le nord de l'Afrique.

2 - Concentration de CO_2 : 369 ppm
3 - Concentration de CO_2 : 486 ppm
4 - Concentration de CO_2 : 540 ppm

Les données ainsi obtenues en sortie du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France permettent d'alimenter les modèles d'aléa développés par CCR comme présenté en Figure 2.

Ainsi, les données de précipitations ont alimenté le modèle d'inondation de CCR et les composantes horizontales de la vitesse du vent à 10 m et de la pression atmosphérique ont alimenté le modèle CCR de submersion marine. Pour la simulation de la sécheresse géotechnique, Météo-France a mis en œuvre son modèle hydrométéorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM2) comme présenté par la suite.

Figure 2 : Principe de la production de données à climat constant pour alimenter les modèles d'impact de CCR.



Le modèle SIM2 sur la France

Pour disposer de données de surface avec une définition inférieure à 10 km sur la France, Météo-France a mis en œuvre en descente d'échelle son modèle terre-atmosphère SIM2. Le modèle SIM2 comprend les modules SAFRAN (analyse des variables météorologiques), ISBA (modélisation des échanges terre-atmosphère : évaporation, ruissellement, infiltration, couverture neigeuse, etc.) et MODCOU (modèle hydrologique). Les données nécessaires en entrée de SIM2 ont été interpolées à la résolution horizontale de 8 km sur la France. Les biais sont corrigés sur la base de la réanalyse SAFRAN servant de référence climatologique historique sur la période 1984-2013, avant d'alimenter le modèle SIM2. Les sorties de ce modèle comprennent notamment l'indice d'humidité du sol (SWI) qui alimente le modèle d'aléa de sécheresse géotechnique de CCR.

La correction des biais de modélisation

Tous les modèles numériques atmosphériques présentent des biais, dépendant parfois de la période de l'année. Ces biais sont dus aux choix et approximations pour la résolution des systèmes d'équations d'évolution des paramètres atmosphériques et aux différents niveaux de complexité adoptés pour la prise en compte des phénomènes météorologiques. En l'absence de correction des biais, les données simulées ne peuvent pas être comparées à des valeurs historiques connues, tant pour les statistiques comme moyennes ou écarts-types que pour les valeurs extrêmes.

Les biais des modèles sont estimés par comparaison avec des données climatologiques de référence provenant d'observations ou de modélisations dites « réanalyses » qui prennent en compte toutes les observations disponibles sur plusieurs dizaines d'années. La méthode de correction des biais à climat passé ou actuel consiste à rapprocher la distribution des données simulées de celle des données climatologiques prises comme référence, pour un climat sensiblement identique. La méthode de correction des biais à climat futur repose généralement sur l'hypothèse que le modèle connaît le même type de biais à climat futur qu'à climat historique.

3.2 - La simulation des aléas climatiques

Les inondations

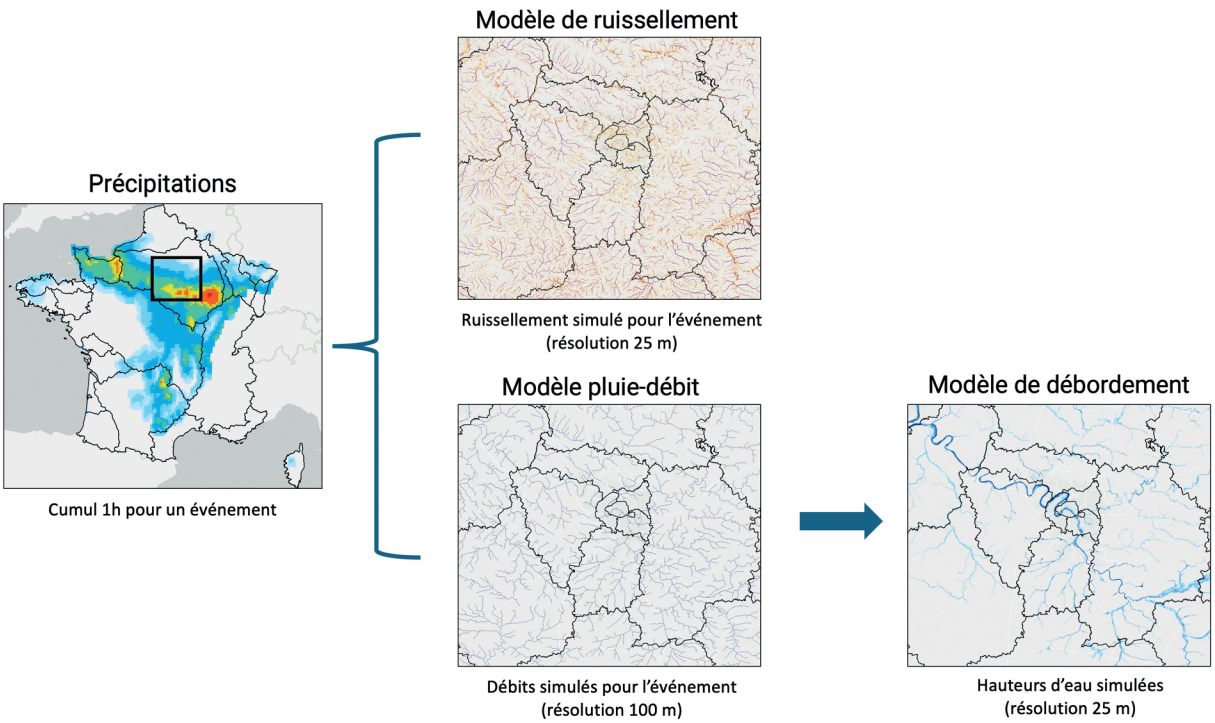
Architecture du modèle

La modélisation de l'aléa inondation nécessite le développement de trois modèles :

- un modèle de ruissellement, qui estime les quantités d'eau qui vont s'écouler sur le sol en tout point du territoire ;
- un modèle pluie-débit qui estime le débit sur les cours d'eau principaux ;
- un modèle de débordement (alimenté par le modèle pluie-débit) qui quantifie les hauteurs d'eau causées par les crues.

Ces modèles, illustrés en Figure 3, sont alimentés par les mêmes données de précipitations et fonctionnent sur la durée d'un événement.

Figure 3 : Articulation des modèles utilisés dans la simulation de l'aléa inondation à l'échelle d'un événement.

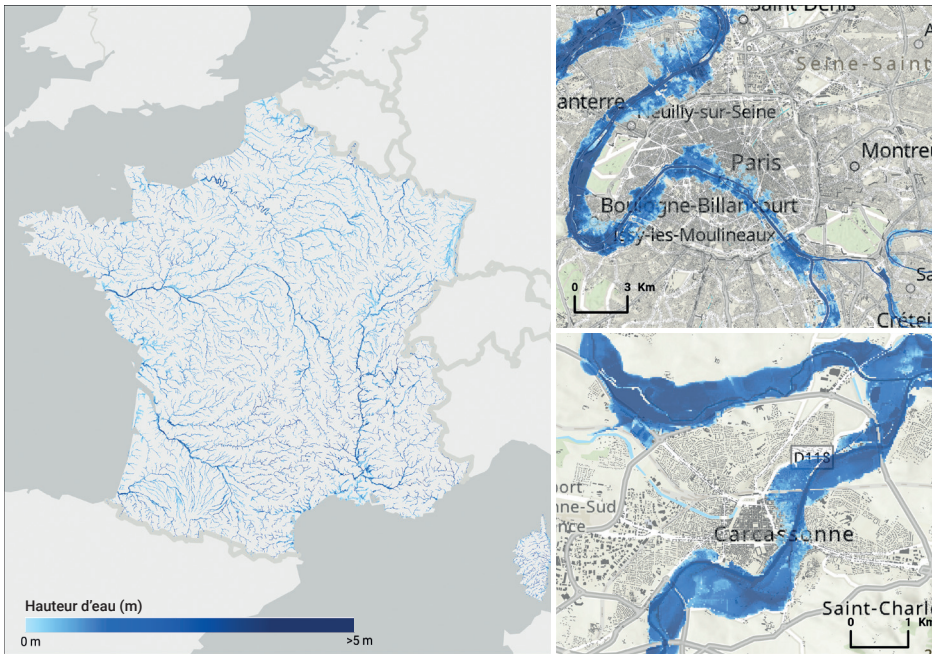


La première étape pour la simulation de l'aléa inondation consiste à identifier les événements sévères sur la base des données de précipitations des scénarios climatiques. Cette identification est effectuée à l'échelle du bassin versant. Une fois l'événement identifié, la simulation pluie-débit est effectuée. Au cours de cette simulation, le modèle estime les débits sur une maille de 100 m de côté sur la France métropolitaine. Ce modèle pluie-débit est initialisé par la pluie des 10 jours qui précèdent l'événement.

En parallèle, un modèle pluie-débit a été mis en œuvre par l'INRAE (modèle de type GR[5]) sur l'ensemble des données climatiques. Ce modèle présente un pas de temps journalier et simule le débit en continu sur environ 1000 stations couvrant l'ensemble du territoire français. Ce débit modélisé ponctuellement par le modèle permet de redresser les sorties du modèle pluie-débit de CCR, en particulier sur les grands cours d'eau.

Le débit simulé sur les cours d'eau alimente le modèle de débordement qui convertit le débit en hauteurs d'eau avant de propager celles-ci sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Pour cette étude, le MNT à 25 m de l'IGN® a été retenu. Cette propagation est assurée par un modèle hydraulique 2D, reposant sur les équations du modèle Lisflood FP[6]. La Figure 4 montre le débordement simulé pour une période de retour de 200 ans.

Figure 4 : Sorties du modèle de débordement pour une période de retour de 200 ans à l'échelle de la France métropolitaine et détail des sorties au niveau des villes de Paris et de Carcassonne sur le climat 2000.



Le modèle de ruissellement est un modèle pluie-débit 2D spatialisé sur le même MNT que le débordement à un pas de temps de 30 secondes qui prend en compte la topographie et l'occupation du sol (données Corine Land Cover).

Ainsi, le modèle inondation, développé par CCR simule deux types d'aléas (le ruissellement et le débordement) à fine échelle afin de prendre en compte l'ensemble des phénomènes hydrologiques provoquant des dommages sur les biens assurés. Cette méthodologie permet de produire une carte homogène sur toute la France à 25 m de résolution.

5 - Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology, 279 : 275-289. doi: 10.1016/S0022-1694(03)00225-7.
6 - Bates PD, Horritt MS, Fewtrell Tj, 2010, A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two dimensional flood inundation modelling, Journal of Hydrology, Volume 387, Issues 1–2, 7 June 2010, Pages 33-45.

Analyse des pluies

Les précipitations alimentant le modèle d'aléa inondation jouent un rôle important dans l'évolution des aléas hydrologiques à climat futur. C'est pourquoi une analyse comparative spécifique des pluies sur le climat 2000 et à horizon 2050 a été réalisée. Cette analyse intègre différentes durées de cumuls de précipitations (6 heures et 21 jours) sur plusieurs périodes de retour. Le choix de la durée des cumuls de pluies permet d'expliquer le comportement des phénomènes de ruissellement résultant des cumuls de courte durée et ceux du débordement de cours d'eau issus des cumuls de plus longues durées.

Les premiers résultats sur l'analyse de l'évolution des pluies montrent que la pluie n'augmente pas de manière homogène sur le territoire métropolitain dans un contexte de changement climatique. En effet, il existe d'importantes disparités régionales pouvant entraîner à horizon futur une diminution de l'exposition aux inondations sur certaines zones, en particulier sur le pourtour méditerranéen.

La Figure 5 illustre le rapport des précipitations entre le climat futur (RCP 4.5) et le climat 2000 pour des cumuls de 6 heures et 21 jours pour une période de retour de 50 ans. Les précipitations de 6 heures augmentent en moyenne de 12 % entre 2000 et 2050. De plus, 17 % du territoire est impacté par une augmentation de plus de 20 % des précipitations de 6 heures. Les précipitations de 21 jours augmentent, en moyenne, de 7 % à horizon futur et seulement 1 % du territoire est impacté par une évolution de plus de 20 % de ces pluies. Ces mêmes tendances sont observées en comparant le climat futur selon le scénario RCP 8.5 et le climat 2000 (Figure 6). Cependant, une plus grande diminution des pluies de 21 jours est observée dans le Sud de la France (22 % du territoire enregistre une évolution négative des pluies de 21 jours).

L'analyse comparative des durées des cumuls de précipitations est une étape importante dans la compréhension de l'évolution des phénomènes de ruissellement et de débordement à horizon futur. Elle souligne l'importance de s'intéresser à l'évolution à horizon futur de deux types d'événements différents : les crues rapides et les crues lentes.

Figure 5 : Rapport des cumuls de précipitations entre climat 2050 - RCP 4.5 et climat 2000 pour la période de retour 50 ans. Cumul sur 6 h (à gauche) et 21 jours (à droite).

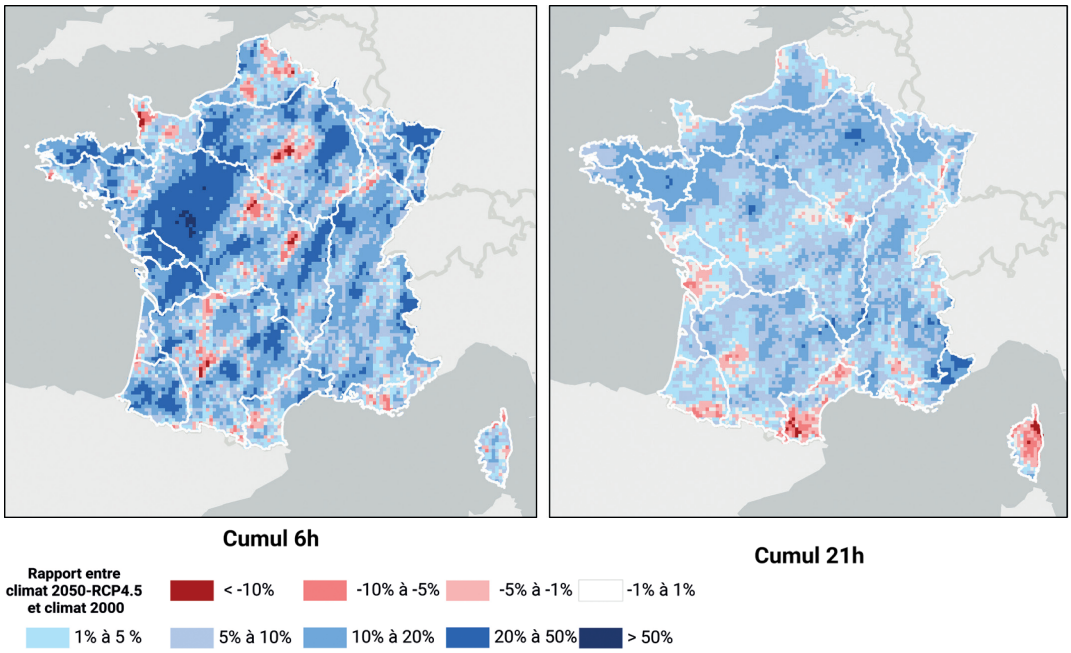
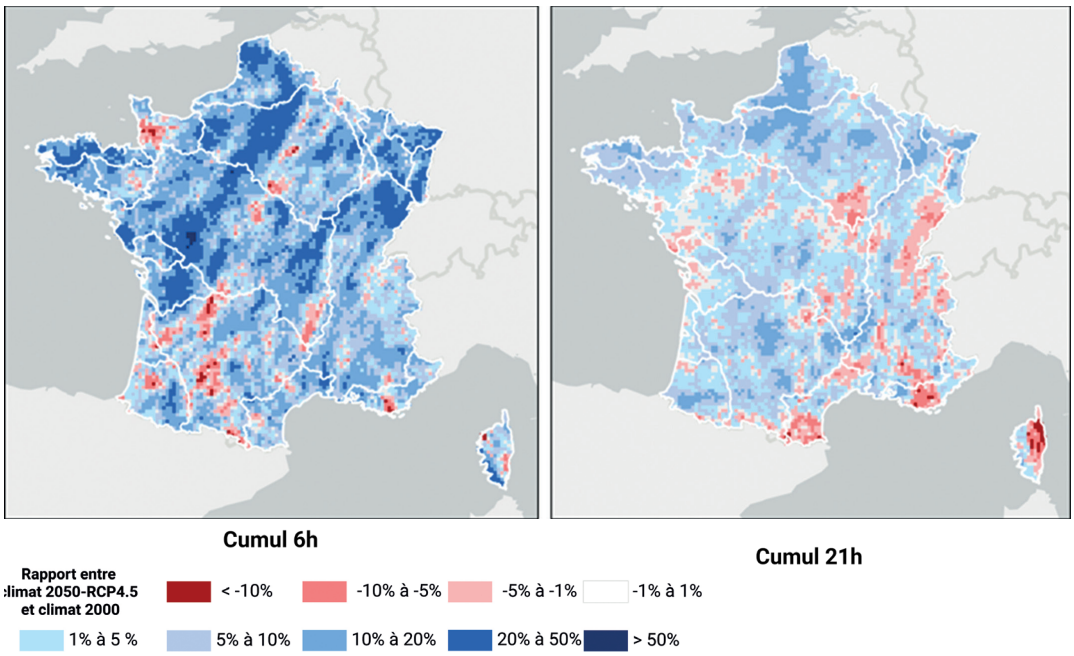


Figure 6 : Rapport des cumuls de précipitations entre climat 2050 - RCP 8.5 et climat 2000 pour la période de retour 50 ans. Cumul sur 6 h (à gauche) et 21 jours (à droite).



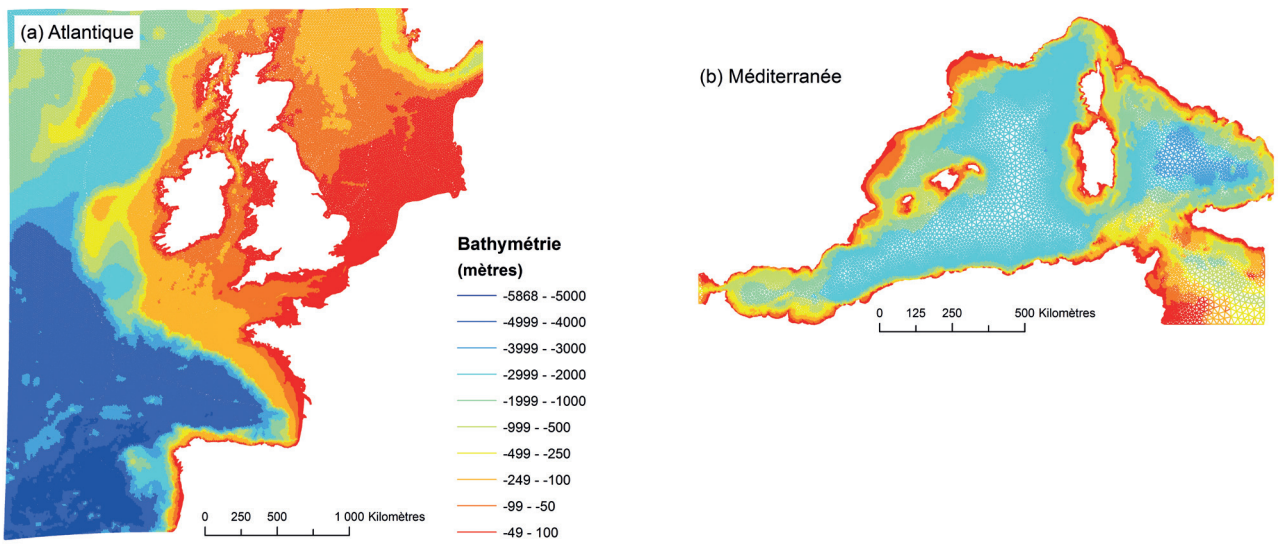
Les submersions marines

Architecture du modèle

Les submersions marines représentent l'inondation de la zone côtière par la mer en raison de conditions météorologiques et marégraphiques sévères (fort coefficient de marées et/ou passage d'une dépression). Le modèle d'aléa submersion marine est construit en trois étapes :

- la simulation des niveaux d'eau au large utilise les champs de pression atmosphérique et de vitesses de vent issues du modèle ARPEGE-Climat, disponibles à un pas de temps de 3 h et à une résolution spatiale de 0.5°. Ces champs alimentent le modèle hydrodynamique Telemac-2D[7] qui calcule la propagation des niveaux d'eau en mer sous l'effet de la marée et des conditions météorologiques. Ce modèle est découpé en deux secteurs (Figure 7) couvrant l'Atlantique, la Manche et la mer du Nord d'une part, et la Méditerranée de l'autre. Le maillage du modèle va de 5 km au large à 250 m près des côtes ;
- en parallèle à l'estimation des niveaux d'eau en mer, une simulation des vagues est réalisée à partir du modèle Tomawac[8]. Les sorties du modèle de vagues permettent d'estimer l'augmentation du niveau moyen de l'eau à la côte due au déferlement des vagues (soit le wave setup). Elles sont également utilisées pour estimer le jet de rive, soit la quantité d'eau qui monte sur un rivage sous l'impulsion que lui a donnée une vague lors de son déferlement ;
- à partir des sorties Telemac-2D et Tomawac, le modèle de débordement Lisflood, utilisé également pour l'inondation, propage l'eau sur le MNT. Ce modèle fonctionne à une résolution spatiale de 25 m et à un pas de temps de calcul d'une seconde.

Figure 7 : Illustration du maillage de simulation du modèle Telemac2D.



7 - EDF R&D 2014. 2D hydrodynamics, TELEMAC-2D Software - Realease 7.0, User manual, 134 pages.
8 - EDF R&D 2016. TELEMAC Modelling System, TOMAWAC Software - Realease 7.1, User manual, 59 pages.

Élévation du niveau de la mer

Une des conséquences majeures du changement climatique est l'élévation du niveau de la mer. Cette élévation est susceptible d'impacter fortement les côtes en augmentant l'intensité et la fréquence des phénomènes de submersion marine. Afin d'évaluer cet impact sur la France, les simulations réalisées pour le scénario à climat actuel sont associées à deux hypothèses d'élévation de la mer correspondant aux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 du GIEC[9]. Ce rapport repose sur une estimation du rythme de hausse du niveau marin entre 2010[10] et 2050 comprise entre 4 et 5,5 mm par an pour le scénario RCP 4.5 et entre 4 et 7 mm par an pour le RCP 8.5. L'accélération de la hausse du niveau marin est similaire sur les premières années pour les deux scénarios, mais augmente avec le temps ce qui conduit à une hausse de 20 cm pour le premier scénario et 23 cm pour le second à horizon 2050. Ces hausses correspondent aux valeurs moyennes des projections des modèles climatiques.

Les sécheresses géotechniques

Une sécheresse peut être définie comme un déficit hydrique d'au moins une composante du cycle hydrologique. Ce déficit hydrique peut se traduire par un changement d'humidité du sol.

Celui-ci a pour conséquence une modification du volume des sols argileux dont la dynamique est appelée retrait-gonflement des argiles. Ce phénomène est lié à la grande affinité de certains minéraux argileux présents dans le sol avec les molécules d'eau. Ces minéraux gonflent lorsque les conditions météorologiques sont humides et se rétrécissent lors de sécheresses. Ces mouvements de terrains peuvent affecter les fondations des bâtiments causant des dommages par affaissement. L'indicateur utilisé pour caractériser ce déficit hydrique est le SWI (Soil Wetness Index) uniforme qui représente l'humidité des sols superficiels. Cet indicateur est calculé par Météo-France sur la base de variables mensuelles et sur une maille de 8 km sur la France métropolitaine (environ 8900 mailles). Afin de déterminer le caractère anormal d'une sécheresse, un critère décennal (période de retour 10 ans) a été retenu pour la caractérisation des valeurs anormales du SWI. Ce critère est cohérent avec les travaux préparatoires à la mise en œuvre de l'ordonnance du 8 février 2023 relative à la loi dite « 3DS ». Ce critère est appliqué pour l'identification des événements extrêmes de sécheresse sur le climat 2000 et le climat 2050.

Synthèse des indicateurs utilisés pour la modélisation des aléas climatiques

Les modèles développés à CCR permettent de simuler chaque aléa climatique couvert par le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, intégrant ainsi une vision multi-périls de l'exposition au risque du territoire français métropolitain et ultra-marin. Cette simulation des événements climatiques s'appuie sur le développement d'indicateurs représentant les phénomènes physiques avec précision pour chaque péril. Ces variables explicatives sont résumées dans le Tableau 1. Afin d'intégrer une vision multi-péril, le coût des dommages est évalué pour les séismes (en métropole) et les cyclones (aux Antilles et à La Réunion) via une modélisation de ces deux aléas. Ces deux périls constituent une exception notable par rapport aux autres car la modélisation de l'aléa ne prend pas en compte l'évolution du climat selon les scénarios RCP du GIEC.

La modélisation de la sinistralité liée aux séismes et aux cyclones est commune à celle des périls traités précédemment. La méthodologie mise en place simule des événements fictifs mais plausibles sur une période relativement longue pour intégrer des événements extrêmes, en se basant sur l'observation des événements passés. Dans les deux cas, des lois spatio-temporelles sont calibrées à partir de ces événements passés afin de générer les événements fictifs. Au sein des modules d'aléa, ces événements fictifs sont respectivement caractérisés par des accélérations maximales du sol (cm/s²) et des vitesses de vent (km/h), comme le résume le Tableau 1.

Tableau 1 : Détail des variables explicatives utilisées pour chacun des risques modélisés.

Péril	Variable explicative	Résolution
Sécheresse géotechnique	SWI	8 km (maille Safran)
Inondation débordement	Hauteur d'eau (m) Débits max sur les cours d'eau	25 m 100 m
Inondation ruissellement	Débit de ruissellement (m³/s) Cumul de précipitations (mm)	25 m 1 km
Submersion marine	Hauteur d'eau (m) Surcote (m)	25 m 25 m
Séisme	Accélération maximale du sol (cm/s²)	250 m
Cyclone	Vitesse des vents (km/h)	250 m

Ainsi, la chaîne de modélisation mise en place chez CCR simule les aléas de sécheresses, inondations, submersions marines et leur évolution à horizon 2050 en intégrant l'impact du changement climatique. Cette modélisation s'appuie sur des variables climatiques en sortie du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5 du GIEC. Les modules d'aléas développés pour chaque péril permettent de simuler l'évolution de l'aléa climatique à fine échelle sur l'ensemble du territoire français métropolitain afin de caractériser l'exposition aux risques climatiques du territoire en termes de fréquence et d'intensité. Cette modélisation est croisée avec un module de vulnérabilité qui intègre la localisation et la caractérisation des biens assurés. La dernière étape de la chaîne de modélisation est la simulation des dommages à partir des modules d'aléas et de vulnérabilité. Ce module de dommages permet d'évaluer le coût des catastrophes naturelles à l'échelle du bien, de la commune ou du territoire dans son ensemble.

Afin d'estimer de manière globale l'exposition du territoire français aux périls couverts par le régime Cat Nat, deux modèles complémentaires ont été intégrés à l'analyse : le modèle séisme et le modèle cyclone (Outre-mer). Ces deux périls n'utilisent pas les données du modèle ARPEGE-Climat en entrée mais ont pu intégrer une projection des enjeux assurés à l'horizon 2050.

9 - IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
10 - L'année 2010 correspond à l'année de constitution du MNT et sert donc de référence pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer.

3.3 - La simulation des dommages assurés

Méthodologie d'estimation des dommages

La méthodologie d'estimation de la sinistralité associée à un aléa, par exemple une zone inondée, est appelée modèle de dommages. Le montant de ces dommages dépend à la fois de la présence d'enjeux assurés dans la zone (particuliers, agricoles, industriels, autres professionnels) et de la vulnérabilité de ces enjeux face à l'aléa considéré. En effet, les différentes typologies des bâtiments n'ont pas la même sensibilité à une même intensité d'aléa, ce qui engendre une différence au niveau du montant des dommages observés. Un modèle de dommages repose donc sur deux piliers :

- La connaissance de ces enjeux ;
- La connaissance de leurs vulnérabilités à un aléa donné.

La création d'un modèle de dommages s'appuie sur une base de données comprenant d'une part l'information sur les enjeux assurés et d'autre part la sinistralité historique. Cette sinistralité est utilisée pour calibrer les modèles de dommages, qui font le lien entre l'aléa et la vulnérabilité. CCR calibre le modèle de dommages pour chaque péril en établissant la relation entre l'aléa simulé par les modèles, les valeurs des biens assurés, les montants de sinistres observés sur des événements réels passés. La qualité d'un modèle de dommages et de son calibrage est ainsi fortement liée à la qualité et à la richesse de la base de données utilisée. Il est à noter que les modèles intègrent également la simulation de la sinistralité liée aux dommages sur les automobiles.

La base de données utilisée par CCR dans cette étude a été constituée à partir des informations fournies annuellement par les assureurs. Elle offre une vision particulièrement exhaustive de la répartition des valeurs assurées et des sinistres sur le territoire français dans le cadre du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles.

Les modèles de dommages développés par CCR pour chaque péril permettent d'ajuster deux fonctions qui permettent de calculer :

- la fréquence de sinistre, qui exprime la probabilité qu'un bien situé dans la zone d'aléa soit effectivement sinistré ;
- le taux de destruction, c'est-à-dire le rapport entre le montant du sinistre et la valeur assurée du bien sinistré.

Cette méthodologie permet d'estimer un nombre de sinistres et le montant des dommages à la suite de la survenance d'un aléa climatique.

En simulant l'ensemble des événements survenus au cours d'une année, les modèles de dommages développés à CCR fournissent une estimation des dommages annuels moyens et une évaluation de la sinistralité à la suite des événements extrêmes à horizon futur en se basant sur les aléas et les données d'enjeux assurés correspondants. Grâce à la méthodologie établie, il est possible de distinguer dans l'évolution des dommages assurés, la part due au changement climatique (soit l'évolution de l'aléa), et la part due à l'évolution des enjeux assurés.

Prise en compte du choc d'inflation et des réformes en cours

Le changement climatique est à l'origine de l'évolution de l'intensité et de la fréquence des événements climatiques ce qui a pour conséquence une évolution du montant des dommages. Afin de pouvoir déterminer avec précision la part due uniquement à l'aléa dans l'augmentation du montant des dommages, il est nécessaire d'intégrer dans les modèles le choc de l'inflation de ces dernières années dans le montant du coût des dommages. Pour ce faire, CCR modélise le montant de la sinistralité en euros constants 2023.

Outre l'effet de l'inflation, le régime des catastrophes naturelles fait l'objet de réformes régulières aussi bien dans la procédure de reconnaissance des catastrophes naturelles que dans l'indemnisation des sinistres. Ces réformes modifient le montant des dommages pris en charge par les différents acteurs du système. Au cours des dernières années, deux réformes ont modifié le régime Cat Nat :

- la loi du 28 décembre 2021 relative à l'indemnisation des catastrophes naturelles et présentée par le député Stéphane Baudu a renforcé le régime en améliorant la transparence de la procédure de l'état de catastrophe naturelle, en facilitant et favorisant l'indemnisation des victimes et en renforçant les efforts de la prévention des risques naturels. Afin de prendre en compte cette modification règlementaire, les dommages simulés sont redressés pour prendre en compte les effets de cette loi et en particulier la prise en charge des frais de relogement ;
- la loi du 21 février 2022 dite "3DS" relative à la Différenciation, Décentralisation et Déconcentration qui a habilité le gouvernement à prendre toute mesure afin d'améliorer la prise en charge des dommages causés par le phénomène de retrait-gonflement des argiles. Dans ce contexte, l'ordonnance du 8 février 2023 précise notamment les conditions d'indemnisation des sinistres à la suite du phénomène de retrait-gonflement des argiles. Ce nouveau dispositif modifie les critères de reconnaissance d'un aléa de sécheresse géotechnique. Les nouveaux critères de reconnaissance pressentis sont intégrés dans la chaîne de modélisation.

La chaîne de modélisation mise en place chez CCR permet de simuler l'impact des aléas climatiques dans une vision multipérils et leurs conséquences sur les biens assurés par un chiffrage du montant des dommages assurés. Cette évaluation de la sinistralité intègre les dernières modifications du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles ainsi que le choc de l'inflation de ces dernières années.

4. PROJECTION À HORIZON 2050 DES ENJEUX ASSURÉS

Pour analyser les conséquences du changement climatique sur les dommages assurés à horizon 2050, une étude des trajectoires d'évolution de la population française est nécessaire. Il s'agit d'estimer le nombre de biens assurés, leur répartition géographique et leur valeur assurée quelle que soit leur typologie (particuliers ou professionnels). Les scénarios de projection développés pour cette étude de la vulnérabilité future sont une représentation plausible des enjeux assurés en 2050 et correspondent au scénario « central » de l'INSEE.

4.1 - Les biens assurés de particuliers

Historiquement (d'après les données de l'INSEE entre 2006 et 2019), le nombre de logements continue de croître à un rythme quasi-linéaire (+1,2 % chaque année). Cependant, la part de résidences principales (82 % en 2019) diminue de 2 % depuis 2006 au profit des logements vacants (8 %). Les biens de particuliers sont composés de maisons (57 %) et d'appartements (43 %) dont les proportions restent stables au cours du temps.

Pour connaître l'évolution de ces biens assurés à horizon 2050, la précédente étude CCR se basait sur les projections démographiques du modèle Omphale de l'INSEE[11]. Le scénario « central » décline à l'échelle des départements les tendances nationales observées pour le solde migratoire, la fécondité et le gain de l'espérance de vie. Ces projections ont été reprises pour l'étude actuelle. Les résultats aboutiraient à une baisse de 4,8 millions de personnes en 2050 par rapport aux projections utilisées dans l'étude climatique précédente.

4.2 - Les biens assurés de professionnels

Pour étudier l'évolution du nombre de biens assurés de professionnels, on distingue les biens agricoles des autres biens. Les enjeux agricoles comportent deux variables à analyser pour comprendre les tendances d'évolution à horizon 2050. La première est celle du nombre d'exploitations agricoles constituée à l'aide des données décennales du ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA) qui prévoit une diminution de 10 % du nombre d'exploitations entre 2020 et 2030, soit un nombre total de 350 000 exploitations agricoles en 2030. La deuxième est celle du nombre de bâtiments agricoles, qui selon les données de CCR a tendance à augmenter historiquement. Néanmoins, ces deux variables ne sont pas corrélées. Ainsi, pour procéder au développement du scénario, une évolution de 0,1 % par an a été définie en appliquant la tendance d'évolution des primes Cat Nat issue de France Assureurs sur le nombre de bâtiments et leur valeur assurée.

La base SIRENE a été utilisée pour projeter le nombre de biens industriels et des autres biens de professionnels (i.e., services, commerces)[12]. L'évolution est modérée sur la période 2013-2022 (+ 3,3 % pour les biens industriels et + 4 % pour les autres professionnels). Concernant l'évolution de la valeur assurée, elle est aussi de + 4 % sur la même période pour les biens industriels mais elle diminue pour les autres professionnels (- 1,25 % sur la même période).

11 - Projections démographiques Omphale | Insee.
12 - Le répertoire Sirene et sa diffusion.

4.3 - Le cas des Outre-mer

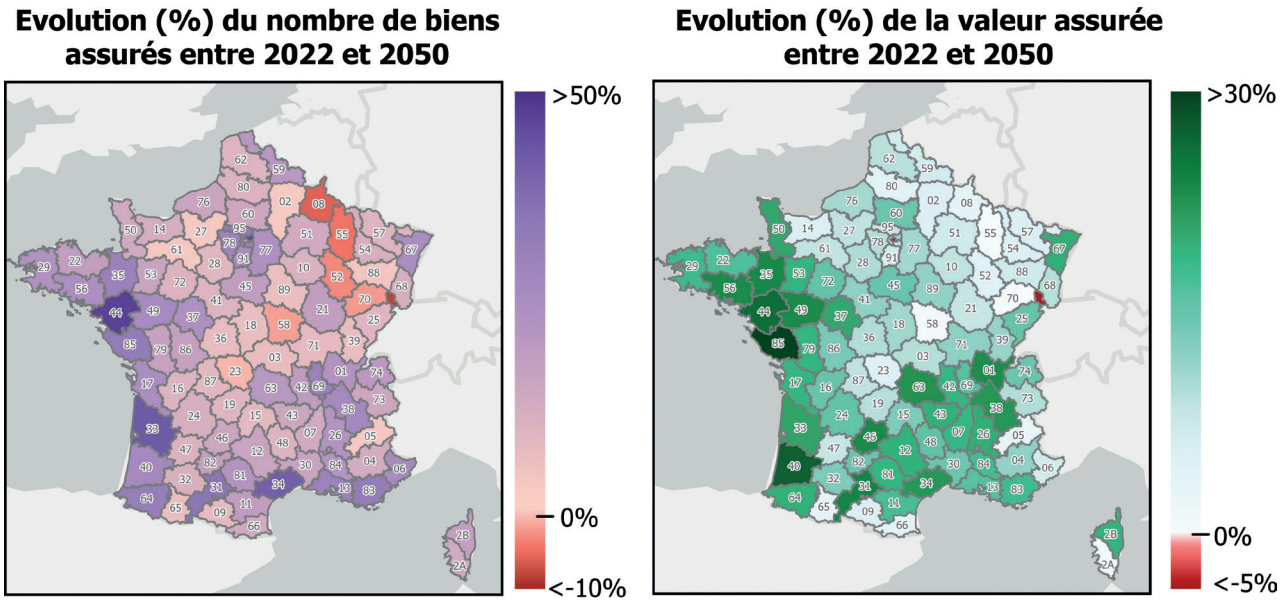
Concernant la projection en 2050 des biens assurés dans les Outre-mer, les mêmes méthodologies que celles présentées précédemment ont été appliquées. La différence réside dans l'augmentation des biens assurés des particuliers au cours du temps. Cette information est donnée par France Assureurs chaque année. La tendance est projetée et analysée jusqu'en 2050 pour chaque territoire d'Outre-mer couvert par le régime Cat Nat (Guadeloupe, Martinique, Saint-Martin, Saint-Barthélemy, La Réunion).

4.4 - En résumé

Le scénario retenu comprend les projections de la tendance moyenne des biens assurés de particuliers selon l'INSEE et des tendances moyennes distinctes entre les biens assurés de professionnels (+ 3.3 % pour les biens industriels et + 4 % pour les autres professionnels) et leurs valeurs assurées (respectivement + 4 % et – 1,25 %). Ce scénario souligne des dynamiques territoriales hétérogènes comme présenté en Figure 8. Ainsi, certains territoires connaîtraient une croissance importante du nombre de biens assurés, en particulier les littoraux atlantiques et méditerranéens et la région Île-de-France. À l'inverse, des territoires pourraient être concernés par une baisse du nombre de biens assurés ou une relative stabilité comme certains départements de la région Grand-Est.

Pour la projection à horizon 2050 des enjeux assurés, le scénario retenu conduit à une augmentation de 19 % du nombre de biens assurés et de 12 % des valeurs assurées.

Figure 8 : Exemple de la spatialisation du scénario central sur le territoire national utilisé dans le modèle de dommages : évolution du nombre de bien assurés et de la valeur assurée (%) à horizon 2050 des biens assurés de particuliers et de professionnels.



5. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA SINISTRALITÉ CAT NAT

5.1 - Les inondations en 2050

Évolution de l'aléa

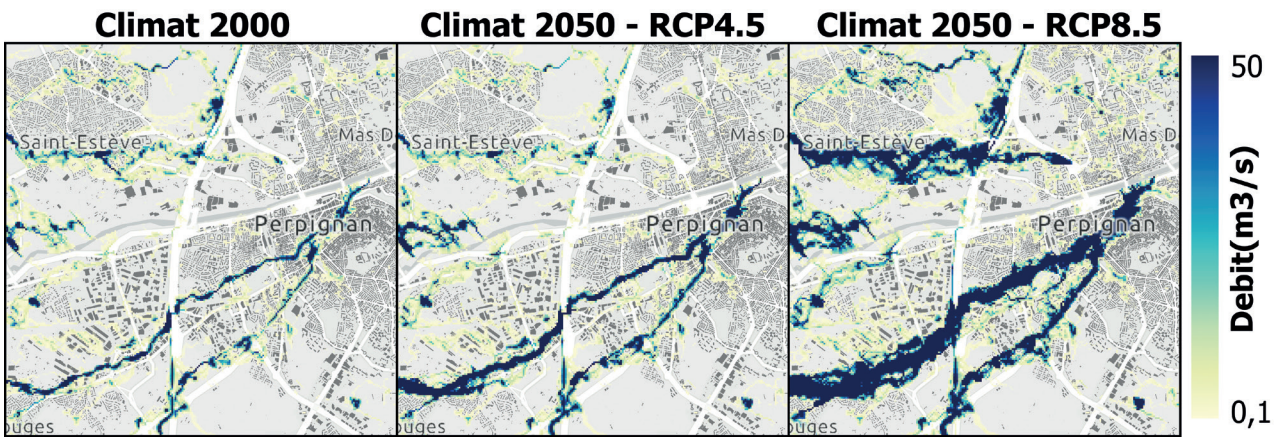
La modélisation des inondations repose sur la simulation d'un grand nombre d'événements météorologiques sur 400 années possibles. Chacun d'entre eux diffère en termes de durée, d'intensité et de localisation géographique. Il est cependant possible de faire ressortir plusieurs tendances en regardant les résultats synthétiques présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Évolutions de l'étendue de la surface impactée par le débordement et le ruissellement ainsi que des débits entre climat 2000 et climat futur, par période de retour.

	Évolution des surfaces de ruissellement		Évolution moyenne des débits journaliers sur le modèle pluie-débit		Évolution des surfaces de débordement	
Période de retour	RCP 4.5 vs climat 2000	RCP 8.5 vs climat 2000	RCP 4.5 vs climat 2000	RCP 8.5 vs climat 2000	RCP 4.5 vs climat 2000	RCP 8.5 vs climat 2000
20 ans	+ 29 %	+ 39 %	+ 4,4 %	+ 0,9 %	+ 0,8 %	+ 3,3 %
50 ans	+ 24 %	+ 37 %	+ 5,6 %	- 0,3 %	+ 1,6 %	+ 2,0 %
100 ans	+ 19 %	+ 33 %	+ 5,8 %	+ 0,1 %	+ 1,8 %	+ 2,0 %
200 ans	+ 12 %	+ 14 %	+ 7,0 %	+ 1,6 %	+ 2,1 %	+ 1,9 %

Ces résultats font ressortir une tendance marquée à un accroissement des phénomènes de ruissellement. Cette augmentation est plus importante sur le scénario RCP 8.5 que sur le scénario RCP 4.5. Ce résultat peut s'expliquer par l'augmentation à horizon futur des épisodes de fortes intensités, mais de courtes durées (soit les crues rapides). La Figure 9 (page suivante) illustre cette tendance pour la ville de Perpignan où une forte augmentation des débits de ruissellement peut être observée pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 sur des zones déjà impactées à climat 2000.

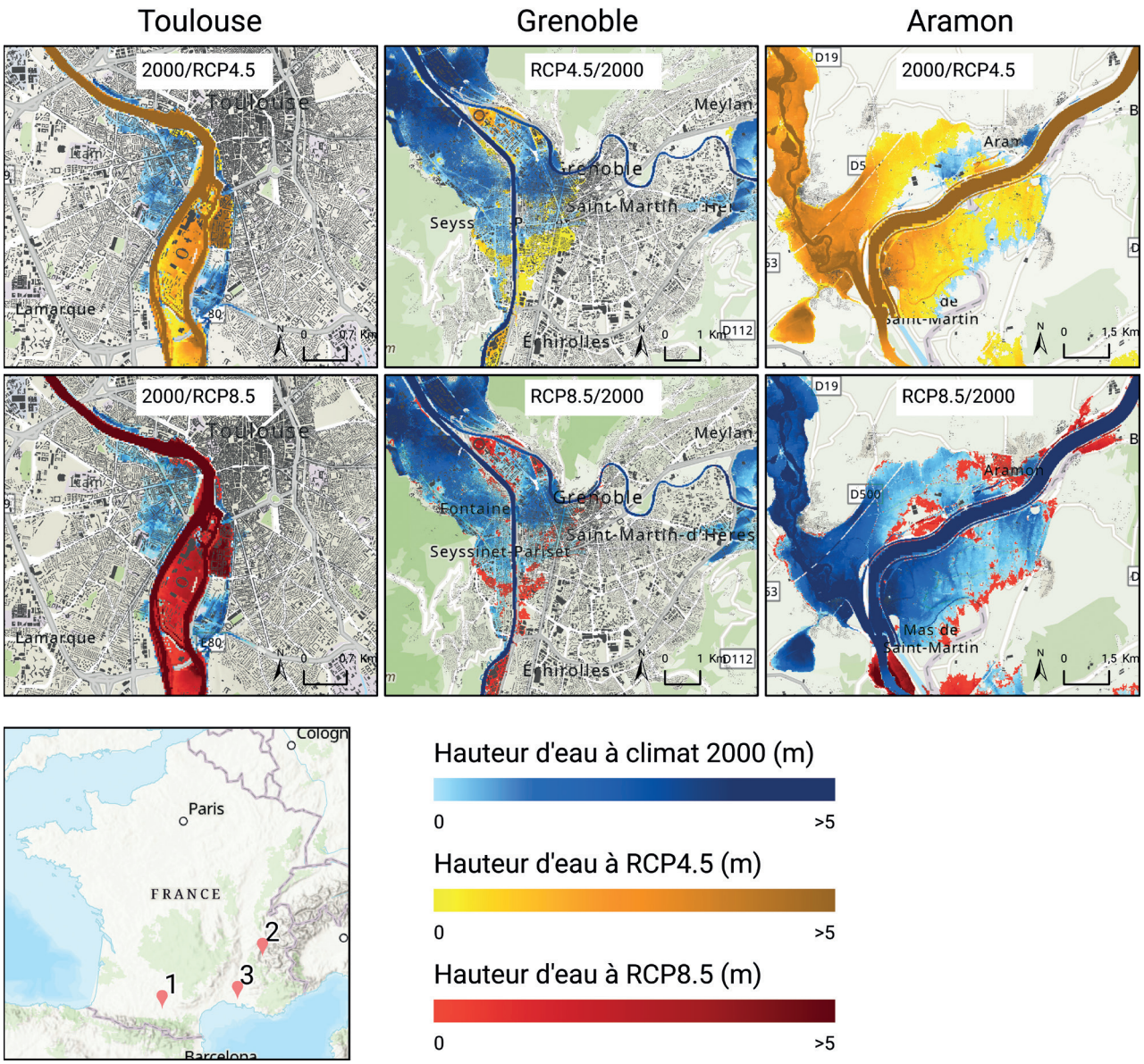
Figure 9 : Comparaison des débits et des emprises impactées par le ruissellement pour une période de retour de 50 ans à Perpignan (66) pour le climat 2000 et le climat 2050 (RCP 4.5 et RCP 8.5).



En parallèle, on observe une tendance inverse sur le débordement avec une très légère hausse des surfaces inondées à horizon futur selon le scénario RCP 4.5 et une légère diminution selon le scénario RCP 8.5. Cette évolution est cohérente avec celles des moyennes des débits présentées dans le Tableau 2. Cette augmentation est plus forte sur le scénario RCP 4.5 que le RCP 8.5 où on observe même une diminution pour une période de retour de 50 ans. En effet, l'évolution moyenne masque des tendances contrastées entre les stations. Ainsi, on observe souvent une diminution des débits sur les grands fleuves tels que la Seine, le Rhône ou la Garonne. Cette évolution est visible sur le scénario RCP 8.5 et dans une moindre mesure sur le RCP 4.5. Cette diminution peut s'expliquer par une diminution des épisodes de précipitations de longues durées qui engendrent des crues lentes sur certains bassins.

La Figure 10 illustre, à partir de trois exemples de villes, les différentes tendances d'évolution que l'on observe, selon les scénarios climatiques, en particulier lorsqu'on regarde des périodes de retour importantes.

Figure 10 : Comparaison des emprises impactées par le débordement à climat 2000 et 2050 (RCP 4.5 et RCP 8.5) pour une période de retour de 50 ans sur les villes de Toulouse, Grenoble et Aramon.



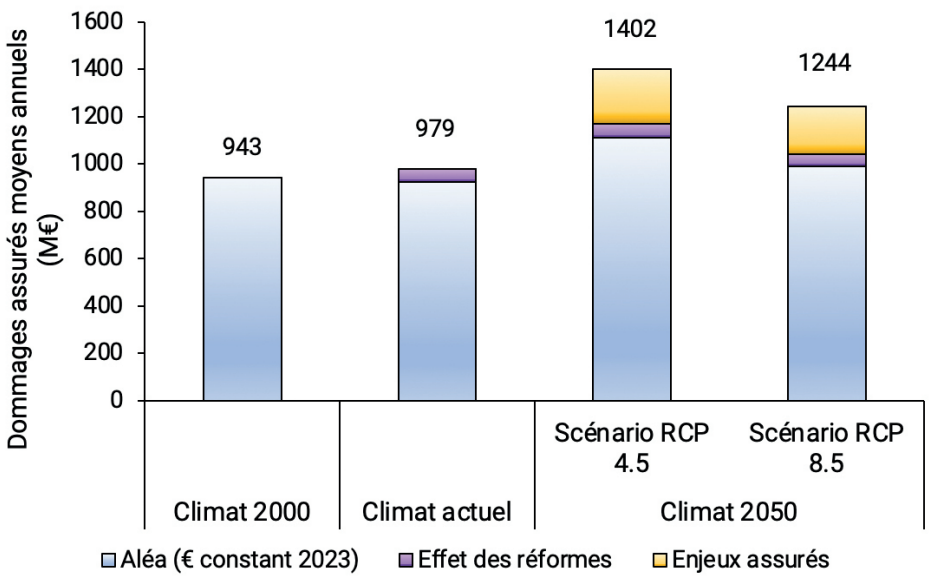
Évolution des dommages

La modélisation des dommages développée chez CCR donne une estimation des coûts moyens annuels comme présentés en Figure 11. Les dommages assurés moyens annuels simulés à climat 2000 sont de 943 M€ en intégrant l'inflation et la sinistralité automobile, chiffrage cohérent avec la vision climat actuel de CCR, basée sur la sinistralité historique. Le scénario RCP 4.5 entrainerait une hausse de + 19 % de la sinistralité par rapport au climat actuel en considérant uniquement l'effet de l'aléa. Le scénario RCP 8.5 serait moins sévère (augmentation des dommages assurés moyens annuels de 6 %).

Cette différence de sévérité peut être expliquée par l'aléa débordement qui est moins étendu sur ce dernier scénario.

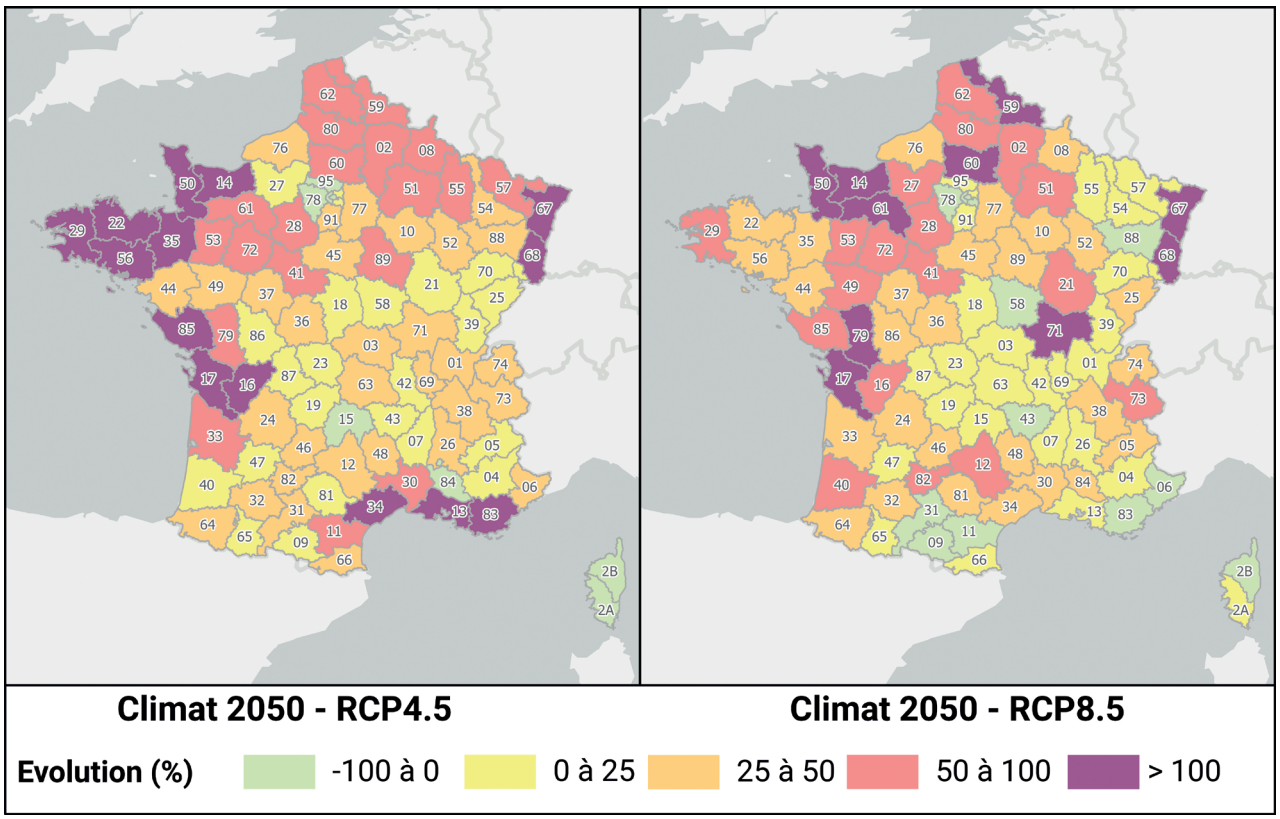
Enfin, la projection de la vulnérabilité à l'horizon 2050 conduirait à une augmentation supplémentaire du coût moyen annuel des dommages d'environ 20 %, quel que soit le scénario retenu. Au total, la hausse des dommages à l'horizon 2050 serait de 43 % pour le scénario RCP 4.5 et de 27 % pour le scénario RCP 8.5.

Figure 11 : Comparaison des dommages assurés moyens annuels dus aux inondations entre le climat 2000, actuel et futur (RCP 4.5 et 8.5).



Les cartes d'évolution des dommages simulés soulignent des tendances différentes entre les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 même si dans les deux cas, la quasi-totalité de la France observerait une augmentation des dommages (Figure 12). À titre d'exemple, l'augmentation de la sinistralité sur l'arc méditerranéen est plus importante pour le RCP 4.5 que pour le RCP 8.5. Il en est de même pour la Bretagne et la Normandie. A contrario, les Alpes seraient davantage touchées selon le RCP 8.5.

Figure 12 : Comparaison des évolutions des dommages assurés moyens annuels par département dus aux inondations entre le climat actuel et 2050 (RCP 4.5 et RCP 8.5).



Le climat 2050 entraînerait une augmentation des phénomènes de crues rapides causés par des pluies intenses de courte durée. En revanche, il n'est pas possible de distinguer une tendance homogène sur la France métropolitaine de l'évolution à climat futur des débits des grands cours d'eau. La hausse du montant annuel moyen des dommages due à l'aléa pourrait être comprise entre 6 % et 19 % selon les scénarios du GIEC. L'augmentation des biens assurés pourrait entraîner une hausse supplémentaire de 20 % des dommages selon les deux scénarios du GIEC.

5.2 - Les submersions marines en 2050

Évolution de l'aléa

Les submersions marines sont, à l'heure actuelle, des événements moins fréquents que les inondations par débordement et ruissellement. Il est en effet nécessaire d'avoir une concomitance entre le pic d'une marée dont les coefficients sont importants et le passage d'une dépression pour générer un événement significatif. Aussi, un échantillon de 400 années est insuffisant pour caractériser les événements de submersion les plus extrêmes qui pourraient se produire.

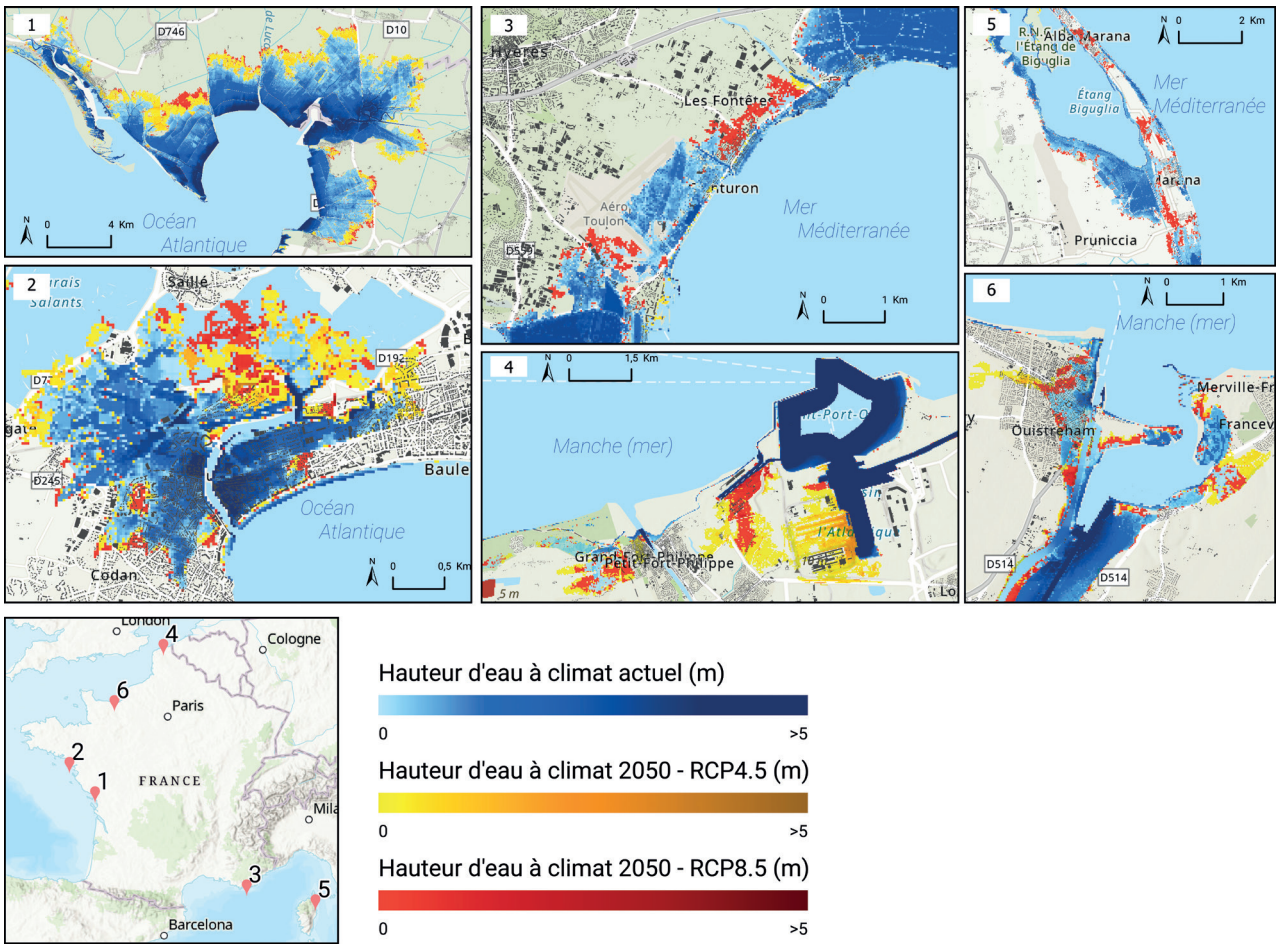
Les résultats présentés dans le Tableau 3 montrent l'évolution des surfaces submergées entre le climat 2000 et le climat 2050. Dans le cas du scénario RCP 4.5, les surfaces inondées augmentent d'environ 15 % quelles que soient les périodes de retour. En revanche, selon le scénario RCP 8.5 du GIEC, les surfaces inondées sont plus importantes sur les événements à très forte période de retour (>100 ans). Cette augmentation est donc liée en grande partie à l'élévation de la mer. Elle est également influencée par la sélection de scénarios rares dans le jeu de simulations qui vont chacun toucher des sections différentes du littoral.

Tableau 3 : Évolution de l'étendue de la surface submergée entre climat actuel et climat futur par période de retour.

Période de retour	Évolution entre climat futur RCP 4.5 et climat 2000	Évolution entre climat futur RCP 8.5 et climat 2000
20 ans	+ 15,6 %	+ 15,4 %
50 ans	+ 15,1 %	+ 15,5 %
100 ans	+ 15,0 %	+ 24,9 %
200 ans	+ 14,7 %	+ 27,0 %

L'analyse géographique des résultats révèle que selon le scénario RCP, les territoires les plus exposés ne seraient pas identiques. En effet, pour une période de retour de 50 ans, le scénario RCP 4.5 est plus sévère sur la Manche que le scénario RCP 8.5, lui-même plus sévère dans le Golfe de Gascogne et en Méditerranée (Figure 13). Compte tenu de la fréquence rare de ces événements, l'analyse de ces résultats se heurte à un effet d'échantillonnage et il n'est pas possible de conclure à des tendances générales d'augmentation plus importantes que d'autres sur certains secteurs selon les scénarios. Cependant, on peut affirmer que l'augmentation du niveau de la mer risque d'accroitre les surfaces exposées au risque de submersion marine de manière significative à horizon 2050.

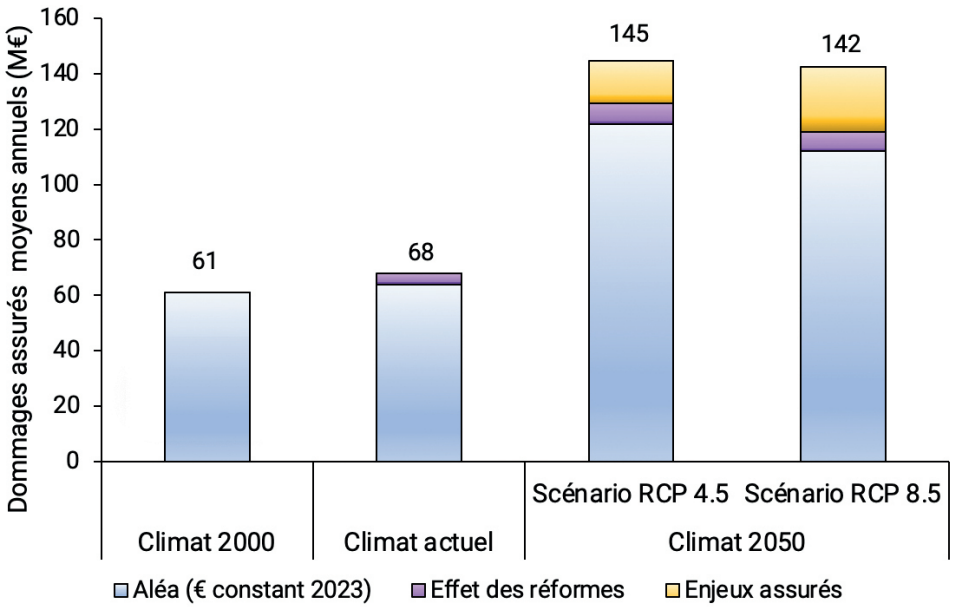
Figure 13 : Illustration des submersions simulées pour les trois scénarios climatiques sur 6 secteurs côtiers pour une période de retour de 50 ans sur le climat 2000 et le climat 2050 (RCP 4.5 et RCP 8.5).



Évolution des dommages

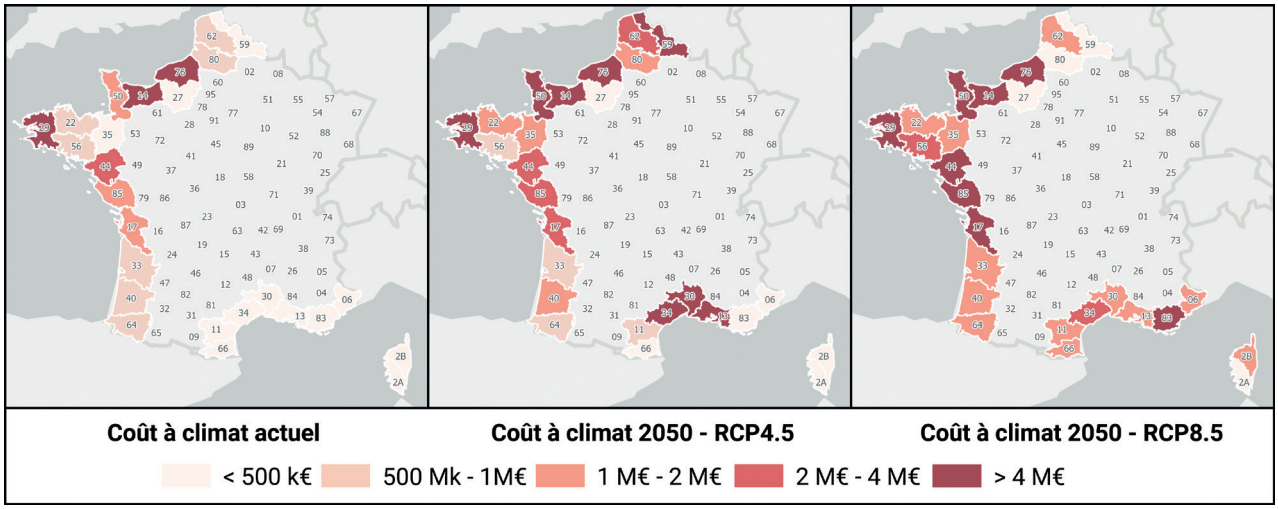
Les dommages moyens annuels simulés pour le climat 2000 sont de 68 M€ en intégrant l'effet de la loi Baudu, ce qui est proche de la version climat actuel. Le scénario RCP 4.5 entrainerait une hausse de + 91 % et le scénario RCP 8.5 une hausse de + 75 % de la sinistralité moyenne annuelle par rapport au climat actuel. Si le scénario RCP 8.5 semble un peu moins sévère que RCP 4.5 en termes de coût moyen annuel, il l'est davantage sur les périodes de retour les plus élevées (au-delà de 50 ans). Ce résultat est à mettre en parallèle avec les tendances observées sur l'aléa (Tableau 3) qui expliquent bien cette répartition des coûts. La projection des enjeux assurés à l'horizon 2050 diminuerait l'écart entre les deux scénarios puisqu'elle conduirait à une hausse des dommages d'environ 110 % dans les deux cas.

Figure 14 : Comparaison des dommages assurés moyens annuels dus aux submersions marines entre le climat 2000, actuel et futur (RCP 4.5 et RCP 8.5).



La Figure 15 présente la répartition des dommages assurés moyens annuels par département simulés par le modèle. La majorité des départements sont impactés par une augmentation importante des dommages à l'horizon 2050. Cependant, cet accroissement n'est pas le même selon les scénarios. Le scénario RCP 4.5 entrainerait une augmentation plus significative des dommages sur la Manche et la mer du Nord alors que le RCP 8.5 serait plus sévère sur le Golfe de Gascogne. La Méditerranée subirait également une hausse importante des dommages simulés, en particulier pour le scénario RCP 8.5. Comme cela a été mentionné précédemment, il est préférable de rester prudent quant aux différences entre les deux scénarios 2050 compte tenu du nombre d'années restreint et de la rareté des submersions marines. Aussi, on retiendra que l'élévation de la mer risque d'entraîner une hausse très significative des dommages.

Figure 15 : Comparaison des dommages assurés moyens annuels simulés par département sur les scénarios climat actuel (à gauche), 2050 - RCP 4.5 (au centre) et 2050 - RCP 8.5 (à droite).



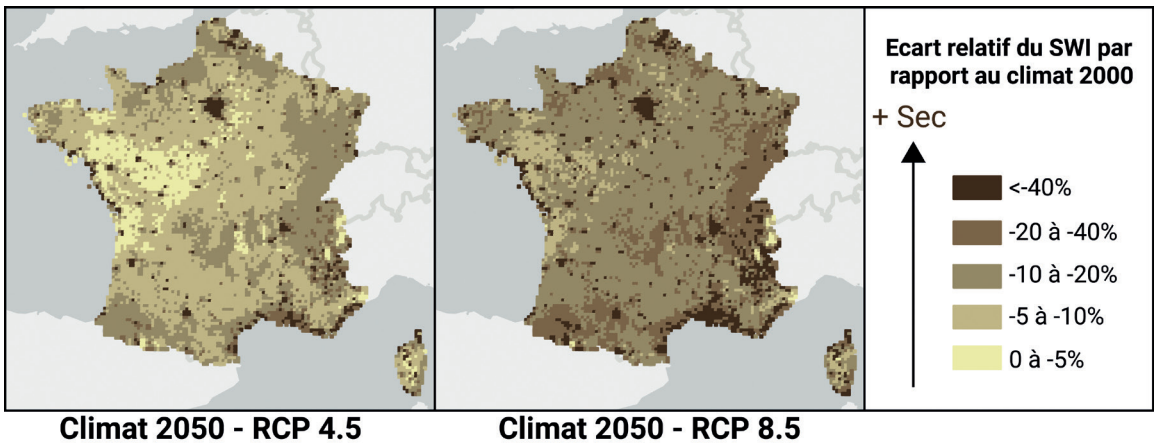
L'élévation du niveau de la mer entraînerait une augmentation importante du montant des dommages annuels moyens (entre 75 % et 91 %). Compte tenu de la rareté de ce phénomène, il est plus difficile d'identifier un changement sur la fréquence et l'intensité des dépressions météorologiques qui conduirait à une augmentation de la sinistralité modélisée. L'accroissement du nombre d'enjeux assurés sur le littoral accentuerait d'autant plus le montant des dommages.

5.3 - Les sécheresses géotechniques en 2050

Évolution de l'aléa

Les résultats sur la sécheresse géotechnique montrent un assèchement généralisé sur l'ensemble de la France métropolitaine à horizon 2050 (voir Figure 16). Le déficit hydrique enregistré est particulièrement marqué sur le scénario RCP 8.5. En moyenne sur l'ensemble de la France métropolitaine, le minimum annuel du SWI baisse de 20 % selon le scénario RCP 4.5 et de 40 % selon le scénario RCP 8.5. De plus, les résultats présentés en Figure 16 montrent une surexposition du pourtour méditerranéen au risque de sécheresse géotechnique.

Figure 16 : Cartographie de l'écart de la moyenne du minimum du SWI annuel entre le climat 2000 et 2050 (RCP 4.5 et RCP 8.5).



Les événements extrêmes deviennent plus intenses. En effet, le déficit hydrique lors des sécheresses décennales, vingtennales et cinquantennales serait environ 10 % plus fort à climat futur RCP 4.5 qu'à climat 2000, tandis qu'il serait environ 20 % plus fort à climat futur RCP 8.5. **Des sécheresses comme celles de 2003 et 2022 verraient leur période de retour fortement diminuée à horizon futur** (Tableau 4).

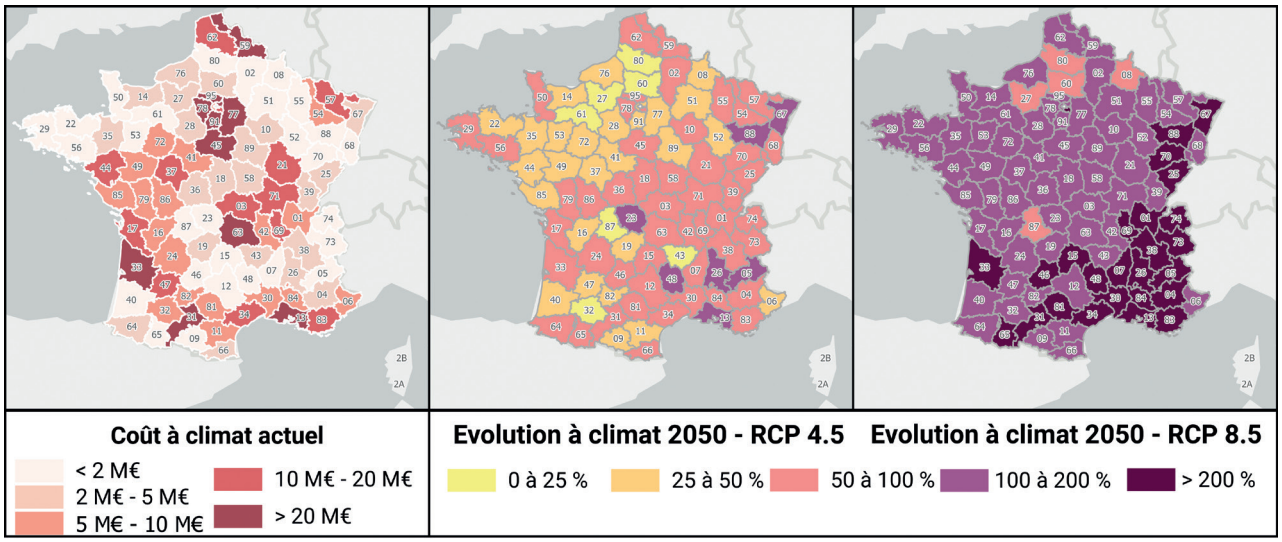
Tableau 4 : Période de retour des sécheresses extrêmes type 2003 et 2022 sur le climat 2000, climat actuel et horizon futur (RCP 4.5 et RCP 8.5).

	Climat 2000	Climat actuel	Horizon 2050 - RCP 4.5	Horizon 2050 - RCP 8.5
Période de retour de la sécheresse 2003 (ans)	27	12	8	4
Période de retour de la sécheresse 2022 (ans)	44	25	12	6

Évolution des dommages

La Figure 17 illustre la répartition par département du coût moyen annuel des dommages causés par le phénomène de retrait-gonflement des argiles. À climat actuel, les dommages les plus importants sont situés dans le Centre de la France et le Sud, ce qui correspond aux zones de plus forte présence d'argiles. Sur le climat futur, quel que soit le scénario du GIEC simulé, les dommages augmentent de manière significative sur l'ensemble du territoire français métropolitain. Selon le scénario RCP 4.5, les pertes annuelles moyennes augmenteraient de 50 % à 100 % dans la moitié sud de la France et l'Est, tandis que le quart Nord-ouest connaîtrait une augmentation des dommages plus modérée. Selon le scénario RCP 8.5, les pertes annuelles moyennes doubleraient sur presque la totalité du territoire. Le sud de la France serait particulièrement exposé avec un montant des dommages annuels moyens qui serait multiplié par au moins un facteur 3.

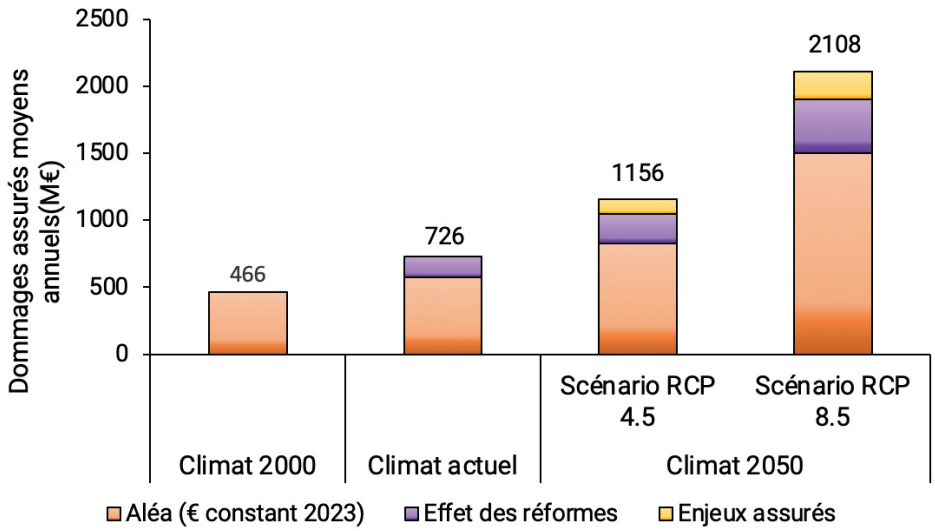
Figure 17 : Répartition des coûts moyens annuels dus à la sécheresse géotechnique par département sur le territoire métropolitain à climat actuel (à gauche). Évolution du coût de la sécheresse entre le climat actuel et l'horizon 2050 – RCP 4.5 (centre) et l'horizon 2050 – RCP 8.5 (droite).



La hausse du coût des dommages pour des événements extrêmes est également particulièrement importante. En effet, le coût des dommages d'une sécheresse cinquantennale selon le scénario RCP 8.5 serait de 7,5 Md€, soit une augmentation de 40 % par rapport au climat actuel.

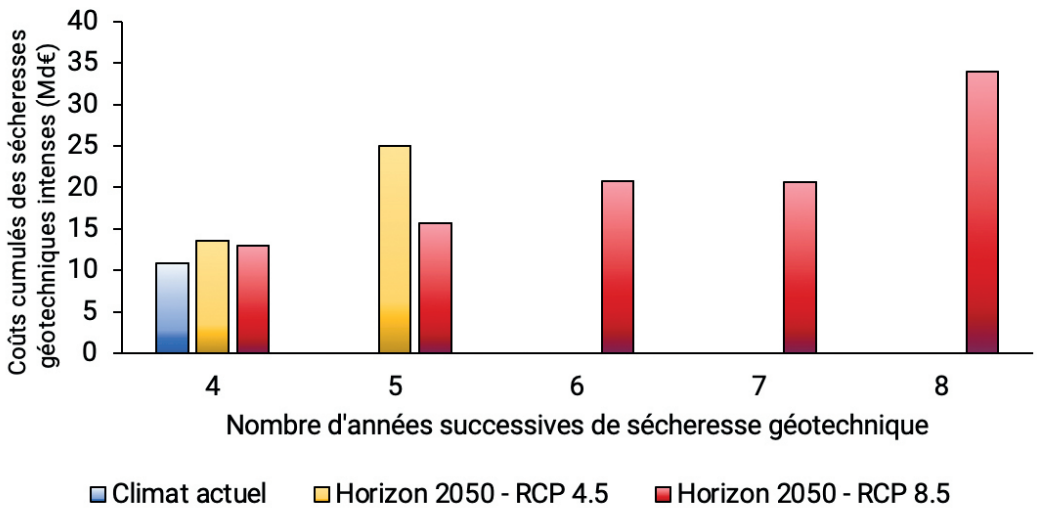
La Figure 18 présente l'évolution des dommages assurés moyens annuels sur la France métropolitaine entre le climat 2000, le climat actuel et le climat futur selon les deux scénarios du GIEC. Ces dernières années ont été impactées par une succession anormale de sécheresses. Ainsi, entre le climat actuel et le climat 2000, l'augmentation des dommages liés uniquement à l'effet de l'aléa est de 23 %. Outre cet effet, la réforme 3DS a pour conséquence une augmentation des indemnisations liées au péril de retrait-gonflement des argiles. Ainsi, en prenant en compte l'effet des réformes, le montant annuel moyen des dommages augmente de manière significative (+ 56 %) entre le climat actuel et le climat 2000. Sur le climat futur, du fait d'une exposition accrue au risque de sécheresse, et d'une augmentation des biens assurés dans les zones à risques, les dommages annuels moyens augmentent de 59 % entre le climat actuel et 2050 sur le scénario RCP 4.5 et de 190 % sur le scénario RCP 8.5.

Figure 18 : Comparaison des dommages assurés moyens annuels dus à la sécheresse géotechnique entre le climat 2000, actuel et futur (RCP 4.5 et RCP 8.5).



Le nombre de cycles de sécheresse au cours desquels chaque année enregistre un coût supérieur à 1 Md€ augmente à climat futur comme présenté en Figure 19. Si l'on observe un seul cycle de quatre années pour lesquelles le coût est supérieur à 1 Md€ à climat actuel, on en connaîtrait quatre à horizon 2050 selon le scénario RCP 4.5 et neuf selon le scénario RCP 8.5. Les cycles de sécheresse s'allongeraient ; ainsi, selon le scénario RCP 8.5, il pourrait y avoir jusqu'à huit années successives de sécheresse intense, cycle qui n'a jamais été connu par le passé. Une sécheresse pluriannuelle comme celle-ci engendrerait des coûts cumulés s'élevant à 34 Md€ sur les 8 années, soit environ 4,2 Md€ par an.

Figure 19 : Coûts cumulés des sécheresses intenses pluriannuelles (supérieures ou égales à 4 ans consécutifs) sur le climat actuel et à horizon futur (RCP 4.5 et 8.5).

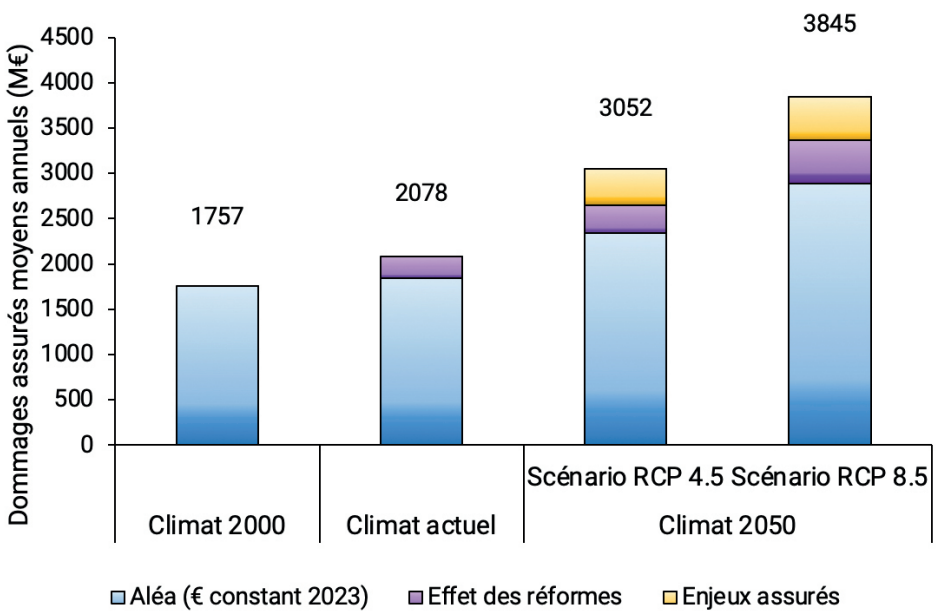


Le risque de sécheresse géotechnique augmente à horizon futur avec une exposition accrue sur l'ensemble du territoire métropolitain. L'augmentation du montant annuel moyen des dommages due à l'aléa serait comprise entre 44 % et 162 % selon les scénarios du GIEC. La projection des enjeux assurés à horizon futur accentue d'autant plus ces évolutions.

6. BILAN DU COÛT DE L'ÉVOLUTION DES DOMMAGES MULTIPÉRILS

Afin de prendre en compte l'ensemble des périls couverts par le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, une analyse multipérils des dommages, incluant les séismes et les cyclones, est réalisée. Cette évaluation des dommages est présentée en Figure 20. Elle fait état d'une évolution des dommages comprise entre 27 % et 62 % due uniquement à l'aléa. La projection des biens assurés à horizon 2050 engendre une augmentation de la sinistralité moyenne annuelle comprise entre 47 % et 85 % (soit une hausse de 20 % supplémentaire). Le montant des dommages serait supérieur à 3 Md€ en 2050 quel que soit le scénario RCP du GIEC. Il est rappelé que l'augmentation des dommages est très fortement liée à la surexposition du territoire métropolitain au risque de sécheresse géotechnique dont la fréquence et l'intensité augmente de manière significative.

Figure 20 : Comparaison du montant des dommages assurés moyens annuels tous périls entre le climat 2000, actuel et futur (RCP 4.5 et 8.5).



Cette augmentation notable des dommages annuels moyens cache une hausse beaucoup plus importante de la sinistralité extrême. L'analyse sur les sécheresses intenses comme celle de 2003 montre que celles-ci vont voir leur fréquence tripler à horizon futur sous le scénario RCP 8.5. À ces augmentations de fréquence et d'intensité, s'ajoute un nombre croissant d'événements pluriannuels.

7. UN BESOIN DE RENFORCEMENT DE LA PRÉVENTION DES RISQUES CLIMATIQUES POUR LIMITER LA HAUSSE DES DOMMAGES

À l'heure où la France se met en ordre de marche pour s'adapter au changement climatique, en particulier avec la proposition d'une Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC), **la politique de prévention des risques naturels doit elle aussi s'interroger sur d'éventuelles évolutions** face à cette menace.

Les vingt-cinq dernières années ont vu le déploiement d'une batterie d'outils de prévention des risques, qui ont d'ores et déjà permis d'alléger les conséquences des catastrophes. Les résultats présentés dans cette étude de modélisation prennent en partie en compte, de manière implicite, les effets de ces efforts passés pour réduire le coût des catastrophes naturelles. Ainsi, sans les Plans de prévention des risques d'inondation (PPRi) déployés depuis 1995, les inondations coûteraient vraisemblablement, en 2050, plusieurs centaines de millions d'euros supplémentaires chaque année[13]. Néanmoins, la plupart des dispositifs, comme les PPRi ou les Programmes d'action de prévention des inondations (PAPI), produisent leurs effets dans la durée.

Les effets à long terme des efforts de prévention accomplis ces dernières années, de même que les mesures de prévention qui seront poursuivies à l'avenir, contribueront à atténuer l'augmentation du montant des dommages anticipée à l'horizon 2050. Par exemple, le maintien du niveau actuel des investissements du Fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM) en matière de confortement des ouvrages hydrauliques (96 M€/an) permet une réduction de la sinistralité annuelle moyenne à horizon 2050 estimée, dans une étude antérieure[14], à 130 M€. Les dispositions de la loi ELAN sur la construction de maisons neuves en zone argileuse, en vigueur depuis 2020, devraient, elles, permettre d'économiser environ 100 à 200 M€/an sur la sinistralité due à la sécheresse géotechnique.

13 - Caisse Centrale de Réassurance (2023), Efficacité des Plans de Prévention des Risques d'inondation sur le coût des dommages assurés : estimation des impacts passés, présents et futurs.
14 - Caisse Centrale de Réassurance (2022), Rapport au ministre de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique sur le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles.

Pour autant, ces chiffres demeurent en-deçà de la hausse de sinistralité anticipée d'ici 2050 : **une simple prolongation des efforts actuels en matière de prévention des risques naturels ne suffira pas à endiguer l'augmentation du coût des dommages des catastrophes naturelles d'ici 2050.** Afin de contrer cette hausse, la politique de prévention nécessite des moyens financiers accrus, et mérite probablement d'être infléchie sur plusieurs points. Si des ajustements ont été initiés en ce qui concerne les submersions marines, pour tenir compte de l'élévation du niveau de la mer, cet exemple demeure isolé jusqu'à présent.

En premier lieu, il s'agit d'**adapter la politique de prévention à l'évolution du poids relatif des menaces.** Alors qu'historiquement, les inondations constituaient le premier péril au regard des dommages observés, la sécheresse géotechnique apparaît comme le péril le plus préoccupant à horizon futur au regard du montant des dommages. Par conséquent, il importe de **concevoir une politique de prévention de la sécheresse,** portant non seulement sur les maisons neuves, mais s'attaquant aussi au stock de bâtiments existants, notamment les plus vulnérables.

En matière d'inondations, l'étude met en évidence une hausse significative des phénomènes de ruissellement dans une large partie du territoire. Jusqu'à présent, la politique de prévention des inondations s'est avant tout concentrée sur les débordements. Si l'effort de prévention des débordements doit être maintenu, pour au moins maintenir le niveau de protection actuel, il paraît nécessaire d'**envisager une politique de prévention traitant spécifiquement la question du ruissellement.** Ceci implique de porter les efforts sur des petits cours d'eau et sur les zones urbaines exposées, pour les adapter à des événements de forte intensité mais de courte durée. La répartition des investissements nécessaires pourrait ainsi s'avérer plus diffuse.

Dans l'ensemble, les évolutions du climat et des conséquences des catastrophes naturelles envisagées dans cette étude et, plus encore, les incertitudes qui les entourent, suggèrent l'intérêt de **questionner l'ensemble des dispositifs existants pour la prévention des risques naturels.** L'objectif d'une telle revue serait d'identifier quels leviers de la prévention mériteraient d'être adaptés, et de définir les modalités et le calendrier pour ces adaptations. Il conviendrait par exemple d'interroger les modalités de réalisation des cartographies d'aléa dans les Plans de prévention des risques, afin d'intégrer les évolutions projetées, ou encore les référentiels normatifs, mais aussi les modes de financement ou de gouvernance. Cette analyse n'est pas sans soulever des questions délicates. Par exemple, faut-il dimensionner les dispositifs de prévention en fonction du scénario d'évolution climatique le plus défavorable, au risque de surdimensionner les contraintes réglementaires ou les investissements ? Notre étude révèle que les évolutions ne seront pas forcément homogènes sur l'ensemble du territoire métropolitain : de ce fait, les choix effectués en réponse aux différentes questions soulevées pourraient relever d'approches locales différenciées.

La politique de prévention des risques naturels est mise au défi des différentes évolutions possibles du climat. S'interroger **sur sa capacité à y faire face semble essentiel pour contenir au mieux les impacts de l'accroissement de l'intensité et de la fréquence de certains phénomènes naturels extrêmes.**

8. DISCUSSION SUR LA MÉTHODOLOGIE

La présente étude vise à estimer l'impact du changement climatique sur les trois principaux types de dommages (inondations, submersions, sécheresse) au titre du régime Cat Nat à Horizon 2050.

Pour ce faire, nous avons utilisé des données météorologiques fournies par Météo-France qui représentent 400 ans de données à climat 2000 et à climat 2050 sur les vents, les précipitations la pression atmosphérique et l'humidité du sol. Les données à climat 2050 intègrent deux scénarios de changement climatique du GIEC : le RCP 4.5 (scénario médian) et le RCP 8.5 (scénario pessimiste), la réalité se situant probablement entre les deux.

Cette étude vise également à estimer la sinistralité Cat Nat tous périls à horizon 2050. C'est pourquoi elle tient compte également des séismes qui ne sont pas impactés par le changement climatique et des vents cycloniques à climat actuel.

Elle n'inclut pas les dommages causés par les périls ne relevant pas du régime Cat Nat (tempête et grêle notamment), ni les dommages causés par des événements qui ne donneraient pas lieu à des reconnaissances Cat Nat (inondations et sécheresse d'intensité normale notamment).

Certains périls relevant du régime Cat Nat ne sont également pas pris en compte : volcanisme, glissement de terrain et avalanches (phénomènes qui représentent une très faible part de la sinistralité historique).

- Nous avons choisi de travailler uniquement sur les données de Météo-France qui présentent l'avantage de couvrir une durée de 400 ans et d'étudier deux scénarios de changement climatique RCP 4.5 et RCP 8.5. Le modèle ARPEGE de Météo-France reproduit difficilement les phénomènes non linéaires potentiellement majeurs, dont la fonte des glaciers.
- Concernant la sécheresse géotechnique, c'est une version R&D du modèle SIM de Météo-France qui a été utilisée. Cette version diffère de la version du modèle SIM-uniforme utilisée pour les critères de reconnaissance Cat Nat. Cependant, une nouvelle version du module de surface ISBA est sur le point d'être intégrée par la commission Cat Nat. Cette nouvelle version se rapprochera de la chaîne utilisée pour l'étude.
- Par ailleurs, l'année 2022, marquée par une sécheresse extrême, n'a pas été intégrée dans le calibrage des modèles CCR.

Cette étude donne une photographie qui tient compte des données et des connaissances dont nous disposons à ce jour. Elle intègre la réglementation actuelle et les évolutions anticipables des critères de reconnaissance Cat Nat, notamment la mise en œuvre de l'ordonnance 3DS.

Elle prend également en compte l'évolution due aux enjeux assurés, c'est-à-dire l'évolution de la population et du nombre d'entreprises qui accroît logiquement le montant des sinistres. Elle n'intègre en revanche ni projection d'inflation à horizon 2050, ni évolution des valeurs assurées.

9. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Si l'activité opérationnelle de CCR dans le cadre du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles nécessite la modélisation des risques à climat actuel, notamment à des fins de provisionnement et de tarification, l'anticipation des impacts potentiels du changement climatique est essentielle pour estimer les évolutions prochaines de la sinistralité et pouvoir ainsi proposer les mesures d'adaptation nécessaires.

Après les études menées en 2015, 2018 et 2020, la présente étude constitue une consolidation des travaux conduits au sein de CCR autour de la problématique du changement climatique. Elle intègre les avancées récentes en termes de modélisation des dommages, mais également les effets des réformes récentes et en cours du régime (loi Baudu et ordonnance 3DS).

Le scénario RCP 8.5 du GIEC permet de disposer d'une borne supérieure des effets du changement climatique à horizon 2050. Le scénario RCP 4.5, quant à lui, reste un objectif, mais il pourrait être dépassé si les émissions de gaz à effet de serre dans les prochaines années ne sont pas maitrisées.

Cette nouvelle étude permet donc d'encadrer la hausse attendue de la sinistralité à horizon 2050 du fait du climat. Celle-ci se situe entre 27 % et 62 % selon le scénario RCP étudié. À cette hausse, il faut ajouter l'impact de l'accroissement des enjeux assurés, ce qui conduit à une hausse de la sinistralité attendue située entre 47 % et 85 %. Si le scénario RCP 4.5 constitue le scénario médian, on peut estimer qu'en moyenne la hausse de la sinistralité devrait être de l'ordre de 40 % du seul fait du climat et de + 60 % en tenant compte de l'évolution des enjeux assurés.

L'intérêt de cette nouvelle étude est également de dresser un constat à mi-parcours de la période 2000-2050. Elle permet d'objectiver la dérive de sinistralité déjà observée du fait du changement climatique depuis 2000, en particulier en matière de sécheresse géotechnique. Ainsi, la sinistralité due à la sécheresse s'est déjà dégradée de 23 % du seul fait du changement climatique depuis 2000 selon l'estimation des modèles. Cette hausse doit être conjuguée aux effets des lois Baudu et 3DS aboutissant à une augmentation de la sinistralité sécheresse de 56 %.

Ce rapport confirme la nécessité de mettre en œuvre une série d'adaptations afin d'assurer la soutenabilité du régime qui contribue à la résilience de l'économie française et des territoires.

Bien entendu, ces résultats montrent la nécessité de poursuivre les efforts de prévention menés depuis de nombreuses années et qui produisent leurs effets, notamment en matière d'inondation par débordement. Ils montrent également le besoin de développer la prévention du risque de ruissellement, qui devrait s'accroitre fortement du fait de l'augmentation des phénomènes orageux extrêmes, mais surtout de la sécheresse géotechnique sur les bâtiments existants, la loi ELAN permettant de limiter le risque sur les nouvelles constructions, qui ne constituent qu'une petite portion des enjeux.

Une autre piste d'adaptation du régime est le recentrage des critères de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sur le principe législatif originel, afin de ne couvrir que des événements d'intensité anormale. Les événements fréquents pourraient voir leurs effets maitrisés par le développement de la prévention, ou, le cas échéant, couverts par le marché privé.

Enfin, la dérive déjà observée de la sinistralité et les projections à horizon 2050 montrent la nécessité de revoir le financement du régime en ajustant le taux de la surprime Cat Nat afin de permettre au régime de retrouver un équilibre technique et à CCR de jouer pleinement son rôle d'amortisseur de chocs. La hausse nécessaire est estimée à + 7 points à court terme et devra être suivie d'une hausse supplémentaire de 3 points pour tenir compte du changement climatique à venir d'ici 2050.

Il subsiste bien sûr des incertitudes sur ces travaux. CCR poursuivra ses études en matière de changement climatique en lien avec ses partenaires de longue date, au premier rang desquels se situe Météo-France, afin de réduire ces incertitudes et d'affiner ces projections. À titre d'exemple, on peut citer quelques pistes d'améliorations envisageables : l'utilisation d'une approche multi-modèles, afin de confronter plusieurs visions du risque, l'augmentation du nombre de simulations pour réduire le biais d'échantillonnage et mieux appréhender les événements extrêmes, ainsi que la réalisation de projections au-delà de 2050, pour mieux illustrer les différences d'impacts entre les différentes trajectoires d'émission de gaz à effet de serre qui s'accentuent progressivement dans la deuxième partie du 21ème siècle, travailler selon les niveaux de degrés de réchauffement correspondant à la TRACC plutôt qu'à échéance donnée. Enfin, il serait intéressant d'analyser l'impact du changement climatique sur les dommages causés par des événements ne relevant pas actuellement du régime Cat Nat (la grêle, les pertes de récoltes sur l'agriculture, les pertes d'exploitations directes et indirectes) afin d'accompagner l'État dans ses réflexions sur la gestion des risques extrêmes.

10. PRINCIPALES RÉFÉRENCES

Boone A., J.C. Calvet and J. Noilhan, 1999 : Inclusion of a third layer in a land surface scheme using the force restore. J. Appl Meteor, 38(11), 1611-1630.

Déqué M., Dreveton C., Braun A., Cariolle D. (1994) : The ARPEGE-IFS atmosphere model : a contribution to the French community climate modelling. Climate Dynamics 10:249-266

Déqué M. and Piedelievre J.-P. (1995) : High-Resolution climate simulation over Europe. Climate Dynamics 11:321-339

Habets F., A. Boone, J.L Champeaux, P. Etchevers, L. Franchistéguy, E.Leblois, E. Ledoux, P. Le Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P.Quintana Segui F. Rousset-Regimbeau, P. Viennot (2008)) : The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorol-ogical model applied over France, Journal of Geophysical Research D : Atmospheres 113, D06113 (2008) 18

Ledoux, E., G. Girard, G. De Marsily, and J. Deschenes (1989), Spatially distributed modeling: Conceptual approach, coupling surface water and ground-water, in Unsaturated Flow Hydrologic Modeling: Theory and Practice, NATO ASI Series C, vol. 275, edited by H. J. Morel- Seytoux, pp. 435–454, Kluwer Acad., Norwell, Mass.

Noilhan, J. and J.-F. Mahfouf, 1996 : The ISBA land surface parameterization scheme. Global and Planetary Change, 13, 145-159.

Quintana-Seguí, P., P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy, and S. Morel, 2008 : Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN Analysis over France. J. Appl. Meteor. Climatol., 47, 92-107.

Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M. and Soubeyroux, J.-M. (2010), A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. International Journal of Climatology, 30 : 1627–1644. doi : 10.1002/joc.2003

Fonds cartographiques :

Figure 4 : Esri, Intermap, NASA, NGA, USGS, HERE, Garmin, Foursquare, FAO, METI/NASA, Instituto Geográfico Nacional, GeoTechnologies, NOAA

Figure 3,5,6,7,12,15,16,17 : Esri, Garmin, FAO, NOAA, USGS

Figure 9, 10: ICGC, Instituto Geográfico Nacional, Esri, HERE, Garmin, Foursquare, GeoTechnologies, METI/NASA, USGS, Intermap, NGA,

Figure 13 : OpenStreetMap (and) contributors, Esri, Intermap, NASA, NGA, USGS, HERE, Garmin, Foursquare, FAO, METI/NASA, GeoTechnologies



Nous dédions ce rapport à David Moncoulon, Directeur du Département R&D et Modélisation de CCR, disparu au mois de juillet dernier.

David Moncoulon a grandement contribué avec son équipe à cette étude et plus généralement à la connaissance des risques naturels en France. Cette connaissance est essentielle pour aujourd'hui et pour demain.



Contact presse :
Agathe Le Bars – Taddeo
agathe.lebars@taddeo.fr

ccr.fr
catastrophes-naturelles.ccr.fr

CCR – 157 bd Haussmann, 75008 Paris – France – Tél. : +33 1 44 35 31 00