



NEXIALOG
CONSULTING

CHANGEMENT CLIMATIQUE, MORTALITÉ ET ASSURANCE SANTÉ ET PRÉVOYANCE

DES DYNAMIQUES SANITAIRES AUX
NOUVEAUX OUTILS ACTUARIELS

JUILLET 2026

SOMMAIRE

INTRODUCTION

..... 1

01 CLIMAT ET MORTALITÉ :
L'ÉVIDENCE SCIENTIFIQUE
ET SES IMPLICATIONS ACTUARIELLES 3

02 MODÉLISATION :
L'ÉMERGENCE DE MODÈLES HYBRIDES CLIMAT-SANTÉ..... 7

03 AU-DELÀ DU CLIMAT :
BIODIVERSITÉ ET DÉPENDANCE GÉOGRAPHIQUE 10

**04 SEGMENTATION DES VULNÉRABILITÉS, CAPACITÉS
D'ADAPTATION ET PRÉVENTION 13**

OUVERTURE

PERSPECTIVES ET POINT DE VUE NEXIALOG 18

INTRODUCTION



NEXIALOG
CONSULTING

Le changement climatique n'affecte pas seulement le patrimoine bâti, les actifs financiers ou les chaînes d'approvisionnement : il agit directement sur la santé humaine. Cette évidence, encore périphérique dans les discussions assurantielles il y a une décennie, se documente aujourd'hui avec une constance qui rend son intégration actuarielle non plus prospective mais prioritaire. L'Organisation mondiale de la santé estime qu'entre 2030 et 2050, le changement climatique pourrait entraîner au moins 250 000 décès supplémentaires par an dans le monde ; les travaux du Lancet Countdown documentent une hausse de l'ordre de 70 à 85 % de la mortalité liée à la chaleur chez les plus de 65 ans par rapport aux années 1990 ; l'Europe a enregistré plus de 62 700 décès attribués à la chaleur pour la seule année 2022 (Ballester et al., 2023). Des travaux récents montrent que près de 37 % des décès liés à la chaleur observés sur la période 1991-2018 sont déjà attribuables au réchauffement anthropique (Vicedo-Cabrera et al., 2021).

Le signal climatique ne se lit pas seulement dans les pics diurnes de canicule. Il s'inscrit aussi dans la dérive des températures nocturnes : Nice a connu 104 nuits chaudes (T° minimale $\geq 20^{\circ}\text{C}$) à l'été 2022, et Paris en a compté près de 20 sur la même année, contre 8 en moyenne sur la période de référence 1976-2005 (Lovisollo et Rapior, 2025, à partir des données Météo-France). Les projections DRIAS dans un scénario France à $+4^{\circ}\text{C}$ situent la région parisienne à 30-40 nuits chaudes annuelles - un niveau comparable à ce qu'était historiquement le pourtour méditerranéen - et le littoral méditerranéen à plus de 120 nuits par an. Ce déplacement des régimes thermiques nocturnes n'est pas un marqueur secondaire : c'est précisément la nuit qui permet à l'organisme de dissiper la chaleur accumulée dans la journée, et l'absence de répit nocturne est aujourd'hui reconnue par l'OMS et par Santé publique France comme un indicateur de mortalité lors des canicules.

Pour un assureur santé/prévoyance, la conséquence est plus structurelle qu'elle n'y paraît.

Le risque santé, longtemps considéré comme essentiellement idiosyncratique - chaque sinistre étant largement indépendant des autres - se mue en un risque partiellement systémique : les chocs climato-sanitaires (canicules, pollution, tensions hydriques) affectent simultanément de larges fractions d'une population, générant des sinistres corrélés dans le temps et dans l'espace. Cette dérive met sous pression le pilier même du modèle assurantiel : la mutualisation, laquelle repose historiquement sur l'agrégation de risques individuels relativement indépendants et stables. Quand la corrélation augmente, une partie du risque devient moins diversifiable, renchérissant le capital requis et interrogeant l'assurabilité de certains segments.

Ce livrable propose un parcours en quatre temps pour aborder ces transformations. La première partie dresse le tableau scientifique du lien entre climat et mortalité, à partir des travaux fondateurs de Besancenot et de références actuarielles récentes, notamment Barigou et al., Guibert et al. et Raynal. La deuxième partie examine les modèles permettant d'intégrer le climat dans la modélisation actuarielle de la mortalité. La troisième partie élargit le périmètre en traitant deux dimensions complémentaires : la biodiversité, dont l'érosion constitue un risque systémique émergent connexe du climat, et la dépendance géographique, qui renouvelle l'analyse territoriale du risque. La quatrième partie présente un cadre de recherche appliquée proposé par Nexialog, consacré à la segmentation des vulnérabilités climato-sanitaires, aux inégalités de capacité d'adaptation et aux leviers de prévention. Elle articule une approche méthodologique, fondée sur les graphes spatio-temporels et le clustering dynamique, et une approche éconómico-actuarielle portant sur les effets sanitaires, les trajectoires de vulnérabilité et les réponses individuelles, collectives et assurantielles.



01.

CLIMAT ET MORTALITÉ : L'ÉVIDENCE SCIENTIFIQUE ET SES IMPLICATIONS ACTUARIELLES



NEXIALOG
CONSULTING

1.1 LA COURBE EN U ET LA TEMPÉRATURE MINIMALE DE MORTALITÉ

Faisant suite à la canicule historique de 2003, le rapport de Jean-Pierre Besancenot (La mortalité selon le contexte thermique : réalité présente et scénarios pour le XXI^e siècle, CNRS, 2004) occupe une place singulière. Il établit empiriquement une relation directe entre conditions thermiques et mortalité journalière, structurée autour d'une Température Minimale de Mortalité (TMM) : un optimum thermique où le nombre de décès quotidiens est le plus faible. En deçà comme au-delà de cet optimum, la mortalité s'élève. Dans le cas de la France, cet optimum se situe dans la plage 18–21 °C, plage aujourd'hui reprise dans les recommandations de confort thermique.

La courbe est asymétrique : la mortalité augmente plus fortement au-delà de l'optimum chaud, par défaillance thermorégulatrice et stress cardio-vasculaire, qu'en deçà de l'optimum froid, où l'effet passe par l'hypothermie et les complications infectieuses ou cardio-vasculaires. Besancenot met également en évidence une dissymétrie temporelle : les effets du froid se déploient lentement et durablement, tandis que ceux de la chaleur se manifestent de manière aiguë et immédiate. Cette dissymétrie est structurante pour la modélisation actuarielle : elle impose de distinguer, dans les séries de mortalité, une composante lente (froid, saisonnalité hivernale) d'une composante aiguë (chaleur, pics synchrones).

Formulées avant les grandes canicules européennes du XXI^e siècle, les conclusions de Besancenot constituent le socle scientifique des modèles de mortalité climatique développés ensuite.

1.2 DÉRIVE STRUCTURELLE ET HÉTÉROGÉNÉITÉ DE LA MORTALITÉ

La combinaison de trois dynamiques - températures extrêmes, exposition chronique à la pollution de l'air, évolution des dynamiques infectieuses sous contrainte climatique - entraîne une hausse lente mais persistante de la mortalité de fond. Selon le scénario RCP 8.5, la mortalité excédentaire annuelle pourrait atteindre 1,5 % dès 2050, et 5,25 % à l'horizon 2100. Cette dérive n'est pas uniforme. Elle touche prioritairement les personnes âgées, les personnes souffrant de comorbidités cardiovasculaires et respiratoires, et les populations en situation de précarité - tant socio-économique qu'énergétique (logements peu isolés, accès limité à la climatisation).

Guibert et al. (2024) rappellent que si les surplus de décès sont causés à la fois par le grand froid et par la grande chaleur, ce sont les hautes températures qui deviennent un facteur prédominant dans les projections futures. En France, la perte d'espérance de vie imputable aux seules températures pourrait atteindre plusieurs mois, voire davantage, selon les régions et les scénarios climatiques envisagés.

Cette tendance impose une adaptation rapide des modèles de projection actuarielle, en particulier pour l'estimation des engagements en prévoyance (incapacité, invalidité, dépendance). Elle rend également caduques les hypothèses de stationnarité encore largement utilisées dans les outils de gestion.

1.3 CHOCS EXTRÊMES ET SYNCHRONISATION TERRITORIALE

Au-delà de la dérive, le climat engendre une hausse de la fréquence des événements extrêmes. Barigou et al. (2025) modélisent ces événements comme un mécanisme à transitions de régimes, déclenché par des seuils de température et par la prévalence d'épidémies saisonnières : le passage d'un régime « normal » à un régime de « choc thermique » ou de « choc infectieux » entraîne une surmortalité brutale.

Sur le plan géographique, ces dynamiques sont souvent corrélées à large échelle. Cette synchronisation territoriale remet en question les fondements mutualistes des portefeuilles santé et prévoyance. Comme le souligne Raynal (2025), les outils traditionnels de diversification par zones, classes d'âge ou saisons deviennent moins efficaces face à des chocs simultanés et multidimensionnels. Il en résulte un risque accru de tension sur les provisions et sur le capital requis lorsque les scénarios extrêmes ne sont pas anticipés.

1.4 UNE TYPOLOGIE DES PÉRILS THERMIQUES : CHALEUR SÈCHE VS CHALEUR HUMIDE

Les effets du changement climatique sur la mortalité, 2025) introduit une typologie utile pour la modélisation actuarielle, en distinguant deux périls thermiques aux dynamiques physiques et sanitaires différentes :

- La « chaleur sèche » survient lorsque le déficit hydrique limite le refroidissement évaporatif au sol, poussant les températures de l'air à la hausse. Elle accroît les risques d'incendies, de dégradation de la qualité de l'air (particules et ozone) et d'atteintes indirectes à la santé, particulièrement pour les systèmes cardio-respiratoires. Ses effets s'expriment souvent avec des décalages temporels et interagissent avec des facteurs urbains (îlots de chaleur) et des inégalités d'accès à la climatisation.
- La « chaleur humide » combine températures élevées et humidité relative forte, indépendamment des conditions de sécheresse. Elle constitue le péril le plus directement dangereux pour la physiologie humaine : lorsque l'air est proche de la saturation en vapeur d'eau, l'évaporation de la sueur devient inefficace, ce qui compromet la thermorégulation et conduit rapidement à l'hyperthermie. Le paramètre clé de caractérisation est la température de bulbe humide (wet-bulb temperature), qui mesure la limite de refroidissement par évaporation. Lorsque cette grandeur approche la température corporelle, le travail en extérieur devient très difficile, voire impossible, et certaines expositions prolongées représentent une limite de survie.

À moyen terme, plusieurs régions densément peuplées d'Asie du Sud et du Moyen-Orient devraient faire face à des occurrences plus régulières de chaleur humide dangereuse. Pour l'Europe, l'enjeu porte davantage sur la chaleur sèche et les îlots de chaleur urbains, sans que la chaleur humide puisse être exclue - en particulier dans certaines zones côtières et dans les centres urbains fortement artificialisés.

Pour la modélisation actuarielle, le couple humidité/température doit être traité explicitement, par exemple en substituant la température de bulbe humide à la seule température sèche dans les modèles à commutation de régimes ou à covariables.

1.5 LES NUITS TROPICALES : UN MARQUEUR RÉVÉLATEUR DU STRESS THERMIQUE NOCTURNE

L'étude Nexialog de Leo Lovisolo et Hugo Rapior (Les nuits tropicales en France, 2025) documente un marqueur climatique spécifique dont les conséquences assurantielles restent encore peu instrumentées : la dérive des températures minimales nocturnes. La définition retenue est celle de Météo-France : une nuit tropicale (ou « nuit chaude ») est une période où la température ne descend pas sous 20 °C entre le coucher et le lever du soleil. Ce seuil n'a rien d'anecdotique : il correspond à la borne opérationnelle de thermorégulation en-dessous de laquelle l'organisme peut encore évacuer la chaleur accumulée dans la journée.

Autrefois circonscrites au pourtour méditerranéen, les nuits chaudes concernent désormais toutes les régions françaises. Au-delà des chiffres cités en introduction (Nice 104 nuits à l'été 2022, Paris 20 contre 8 en moyenne historique), les projections DRIAS couplées aux scénarios SSP 4.5 et 8.5 indiquent que les nuits chaudes deviendront la norme estivale dans une France à +4 °C, avec un doublement à triplement des fréquences régionales. La région parisienne atteindrait en moyenne 30 à 40 nuits tropicales par an, soit un niveau équivalent à ce qu'étaient historiquement les régions méditerranéennes sur la période 1976-2005.

La thermorégulation humaine repose sur un équilibre entre production et dissipation de chaleur. En période de forte chaleur, l'organisme accumule un excédent thermique dans les tissus (à titre illustratif, Kenny et al., 2008, mesurent qu'après 60 minutes d'exercice modéré en conditions chaudes, le corps accumule environ 273 kJ de chaleur dont seulement 53 % sont dissipés dans l'heure de récupération suivante). La nuit constitue la fenêtre privilégiée de dissipation résiduelle. Or, pour entrer dans les phases de sommeil profond (NREM), la température centrale doit décroître d'environ 1 °C par rapport à la valeur

d'éveil, sous contrôle circadien. Ce déclin thermique n'est possible que si le gradient avec l'air ambiant est suffisant : au-dessus de 20 °C, les transferts par radiation, convection et conduction deviennent insuffisants, le système cardiovasculaire doit compenser par un effort accru, et la charge thermique non évacuée se reporte sur les jours suivants - créant un effet cumulatif caractéristique des épisodes caniculaires prolongés.

L'analyse des données de la canicule de 2003 en France (Fouillet et al., 2006) établit que les ratios de mortalité augmentent avec l'âge, passant de 1,3 pour les 35-74 ans à plus de 1,7 pour les plus de 75 ans. Cette surmortalité s'explique par une diminution de la capacité de sudation, une réduction du débit sanguin cutané et une fonction cardiovasculaire diminuée chez les personnes âgées (Bouchama & Knochel, NEJM, 2002). Trois autres catégories de population sont identifiées comme particulièrement exposées : les individus souffrant de pathologies cardiovasculaires, respiratoires, mentales, de diabète ou d'obésité (altération de la thermorégulation) ; les populations en situation de précarité économique (absence de climatisation, logements sous les toits, isolement social) ; les habitants d'îlots de chaleur urbains où la température nocturne ne redescend pas par effet d'accumulation thermique des surfaces minérales.

Pourquoi ce marqueur compte spécifiquement pour l'assureur santé / prévoyance. Les nuits tropicales articulent quatre propriétés qui les rendent particulièrement structurantes pour l'activité assurantielle. (i) Elles sont mesurables simplement et de manière homogène sur le territoire, à partir de stations Météo-France et de données SAFRAN à 8 km, et disposent de projections DRIAS opérationnelles à l'horizon 2100. (ii) Elles révèlent une dimension cumulative du stress thermique, encore peu captée par les stress-tests centrés sur des pics ponctuels. (iii) Elles touchent toutes les régions, donc tous les portefeuilles, et non plus seulement les zones méditerranéennes historiques. (iv) Elles s'articulent avec la typologie chaleur sèche / chaleur humide présentée en 1.4 : à température équivalente, une nuit humide - dans laquelle la sudation devient inefficace - abaisse les seuils critiques de thermorégulation (Vecellio et al., 2022, sur le seuil wet-bulb 35 °C) et aggrave significativement le stress sanitaire.

Ces quatre propriétés conduisent à traiter les nuits tropicales non comme un indicateur climatique de plus, mais comme une covariable candidate de première intention pour les modèles de mortalité climato-sensibles et pour les stress-tests prudentiels (cf. Partie 2).

1.6 IMPLICATIONS POUR LES TABLES DE MORTALITÉ ET LA TARIFICATION

Ces constats convergent vers un constat simple mais structurant : les tables de mortalité stationnaires (historique prolongé par extrapolation) ne suffisent plus à refléter la dynamique projetée. Leur révision est un chantier actuariel majeur, au croisement de la génération de scénarios climatiques, de l'épidémiologie et des modèles de mortalité. Au-delà des tables, les grilles de segmentation tarifaire santé et prévoyance doivent intégrer des critères d'exposition climatique (îlots de chaleur urbains, humidité relative locale, qualité thermique du logement, pollution de l'air, fréquence projetée de nuits tropicales), à l'image de critères aujourd'hui usuels comme la sinistralité historique ou le tabagisme.

02.

MODÉLISATION : L'ÉMERGENCE DE MODÈLES HYBRIDES CLIMAT-SANTÉ



NEXIALOG
CONSULTING

2.1 CADRE GÉNÉRAL : L'HYBRIDATION DES MODÈLES

Les sources académiques (Guibert et al., Barigou et al., Raynal) convergent sur un même constat méthodologique : il n'est plus possible de modéliser la mortalité comme un phénomène endogène au portefeuille. La dynamique climatique doit être traitée comme une covariable exogène des processus de mortalité et de morbidité, que cela soit via les températures, l'humidité ou les épidémies. Cette hybridation change la nature des modèles actuariels : ils cessent d'être purement démographiques pour devenir climato-épidémiologiques.

2.2 COUPLAGE STOCHASTIQUE MULTI-POPULATIONS / ÉPIDÉMIOLOGIQUE (GUIBERT ET AL., 2024)

L'approche développée par Guibert et al. repose sur un couplage entre un modèle stochastique multi-populations (mortalité) et un modèle épidémiologique climatique. Elle permet de projeter directement les effets des scénarios RCP sur l'espérance de vie et la sinistralité, en s'appuyant sur des données quotidiennes de mortalité et de température. La granularité quotidienne joue un rôle essentiel : elle permet d'attribuer les décès observés à des fenêtres climatiques précises (vagues de chaleur de quelques jours, épisodes de pollution), donc de calibrer la réponse du modèle aux covariables climatiques.

2.3 MODÈLE À COMMUTATION DE RÉGIMES (BARIGOU ET AL., 2025)

Barigou et al. mettent en œuvre un modèle à commutation de régimes de type Hidden Markov Model (HMM) à trois états, dont la dynamique temporelle est pilotée par les températures journalières et les données épidémiques. Les trois régimes capturent un état « normal », un état de « choc thermique » et un état de « choc infectieux ». Ce type de modèle est particulièrement utile pour :

- évaluer le risque de pics de sinistralité dans les produits incapacité et invalidité ;
- quantifier les probabilités de transition entre régimes, donc le risque de basculement ;
- distinguer la composante chronique (dérive de régime « normal ») des composantes extrêmes (régimes de choc).

2.4 ALM SANTÉ SOUS CONTRAINTES CLIMATIQUE (RAYNAL, 2025)

Raynal (2025) appelle à intégrer la composante climatique dans les exercices ALM appliqués à la santé/prévoyance, en distinguant la croissance de fond de la mortalité des chocs extrêmes. Cette distinction n'est pas purement analytique : elle conditionne la construction du capital économique (le chargement de risque sur la composante de fond étant très différent du chargement sur les chocs) et la structuration de la réassurance.

2.5 STRESS TESTS CLIMATIQUES APPLIQUÉS À LA MORTALITÉ

Les stress tests prudentiels actuels (Solvabilité II, ORSA) restent essentiellement centrés sur des chocs financiers ou pandémiques génériques. Or des scénarios climatiques réalistes - canicule prolongée, conjuguée à un pic de pollution et à une saturation hospitalière - peuvent produire des excès de sinistralité équivalents, voire supérieurs à ceux des scénarios pandémiques, en quelques semaines.

Un cadrage de stress test climatique santé doit répondre à quatre exigences :

1. Être construit à partir de scénarios météorologiques physiquement réalistes - par exemple, température de bulbe humide > 30 °C pendant 3 jours consécutifs, ou séquence d'au moins 5 nuits tropicales consécutives combinée à une température maximale diurne supérieure à un seuil régional calibré - plutôt que d'être extrapolé sans contrainte physique ;
2. S'appuyer sur des données météorologiques prospectives spatialisées (projections DRIAS pour les horizons 2050 et 2100, réanalyses SAFRAN à 8 km pour la calibration historique), afin d'identifier les hétérogénéités régionales et les effets d'îlots de chaleur urbains (Lovisolo, 2025) ;
3. Intégrer les interactions avec les autres risques santé (pollution atmosphérique, infections saisonnières, saturation des capacités hospitalières) et traiter explicitement le couple température / humidité nocturnes - une humidité élevée réduisant l'efficacité de la sudation et abaissant les seuils critiques de thermorégulation (Vecellio et al., 2022 ; Zhao et al., 2021) ;
4. Être cohérent avec les scénarios NGFS ou équivalents utilisés côté investissement (cf. livrable INVESTISSEMENT, Partie 2), afin de garantir l'articulation actif-passif sous un même référentiel climatique.

2.6 VERS UNE HYBRIDATION DES CHAÎNES ACTUARIELLES

L'ensemble invite à une hybridation des chaînes actuarielles : il ne s'agit plus seulement d'ajuster les tables de mortalité, mais de modéliser explicitement l'effet du climat sur la sinistralité. Cela suppose de croiser des données de santé (mortalité, ALD, hospitalisations), des données climatiques (température, humidité, pollution), des données d'exposition sociale et territoriale (logement, précarité, densité médicale), et de mettre à jour les outils ALM en conséquence. Cette exigence de croisement est au cœur du cadre de recherche appliquée présenté dans la partie 4, qui vise à identifier, suivre et projeter les vulnérabilités climato-sanitaires à partir de données multi-sources.

03.

AU-DELÀ DU CLIMAT : BIODIVERSITÉ ET DÉPENDANCE GÉOGRAPHIQUE



NEXIALOG
CONSULTING

3.1 LA BIODIVERSITÉ COMME SECOND RISQUE SYSTÉMIQUE

Si le changement climatique constitue le vecteur principal de transformation du risque santé, la perte de biodiversité doit être traitée comme une dimension connexe, structurellement couplée au climat. Le changement climatique altère la répartition des espèces, fragilise les écosystèmes et amplifie les cinq pressions identifiées par l'IPBES : artificialisation et destruction des milieux naturels, surexploitation des ressources, pollutions, espèces invasives, changement climatique lui-même. En retour, la dégradation des écosystèmes réduit leur capacité à réguler le climat : destruction des forêts, des zones humides ou des récifs coralliens, diminution des puits de carbone, perte de résilience écologique. Cette rétroaction négative entre biodiversité et climat a des conséquences directes sur les dynamiques de risque que doivent appréhender les assureurs.

3.2 LE CADRAGE ACPR : UN RISQUE SYSTÉMIQUE ÉMERGENT

L'ACPR a souligné en 2023 que la perte de biodiversité constitue un risque systémique émergent, au même titre que le changement climatique, et qu'elle pourrait compromettre la stabilité financière si elle n'est pas intégrée dans la gestion prudentielle. Les assureurs y sont exposés à travers deux canaux principaux :

- Leurs portefeuilles d'investissement, composés d'entreprises dépendantes des services écosystémiques (agriculture, agroalimentaire, pharmacie, construction).
- Leurs engagements assurantiels, sur les segments sensibles à la dégradation des milieux naturels : agricole, immobilier, industriel, et - côté santé - via les liens entre biodiversité, qualité de l'air et de l'eau, et santé publique.

3.3 IMPACT ET DÉPENDANCE : DEUX MESURES À ARTICULER

Historiquement, les outils développés se sont concentrés sur la mesure de l'impact - la contribution d'un acteur à l'érosion ou à la préservation du capital naturel - via des indicateurs d'empreinte (footprinting). Cette approche est utile mais insuffisante : pour un assureur, comprendre la dépendance de ses contreparties aux services rendus par la nature est tout aussi essentiel, car elle conditionne les pertes potentielles de valeur.

La Taskforce on Nature-related Financial Disclosures (TNFD) et les travaux récents de l'ACPR convergent sur une même conclusion : la mesure de l'impact ne suffit pas à évaluer le risque de biodiversité au sens prudentiel. Les assureurs doivent articuler impact ET dépendance dans leurs cadres de gestion des risques et dans leur stratégie d'investissement durable.

3.4 LA DÉPENDANCE GÉOGRAPHIQUE : QUANTIFIER LA DIFFUSION SPATIALE DES PÉRILS

En parallèle de la biodiversité, une autre dimension s'impose : la dépendance spatiale des événements climatiques. L'analyse granulaire péril par péril, zone par zone, constitue une avancée nécessaire mais insuffisante pour saisir la dimension systémique du risque. Les événements climatiques ne se produisent pas isolément : lorsqu'un péril survient à un endroit donné, il est souvent corrélé à des phénomènes simultanés ou successifs dans son voisinage. Ignorer ces corrélations revient à sous-estimer la portée réelle des événements et à biaiser la mesure du risque agrégé au sein d'un portefeuille.

Un exemple illustre cette dynamique : le phénomène de subsidence / retrait-gonflement des argiles, qui tend à se développer progressivement de la France vers la Belgique, via une même couche argileuse transfrontalière. Cette diffusion a déjà des conséquences financières : l'EIOPA a suggéré l'introduction d'un facteur de risque spécifique attaché au SCR CatNat pour le territoire belge.

Les travaux Nexialog sur la dépendance géographique mobilisent deux types d'outils :

- des copules tridimensionnelles et des surfaces de dépendance, qui permettent de caractériser les interactions entre variables climatiques locales (pluie, température, vitesse du vent) et leur corrélation spatiale ;
- une distinction explicite entre dépendance faible et dépendance forte, la première décrivant la corrélation spatiale des événements fréquents de faible intensité, la seconde capturant les corrélations entre événements extrêmes - dont l'extension spatiale peut générer un fort cumul de sinistres.

Le référentiel géospatial repose sur le croisement de données climatiques publiques (Météo-France, bases satellitaires, API POWER NASA), topographiques et géologiques (structure des sols, pente, couverture végétale), et assurantielles (sinistres observés).

3.5 APPLICABILITÉ À LA DIMENSION TERRITORIALE DE LA VULNÉRABILITÉ SANTÉ

Bien que l'exemple illustratif (de la subsidence) relève du périmètre Non-vie, la méthodologie de dépendance spatiale éclaire directement la dimension territoriale de la vulnérabilité santé :

- les vagues de chaleur présentent une structure spatiale de dépendance forte (synchronisation à l'échelle régionale ou continentale) ;
- les îlots de chaleur urbains créent des corrélations intra-urbaines marquées entre les expositions de sous-populations ;
- la diffusion des risques infectieux sous contrainte climatique obéit à des logiques spatiales similaires (proximité, réseaux de mobilité, conditions environnementales partagées).

Les copules et surfaces de dépendance sont ainsi transposables à la modélisation des chocs climato-sanitaires, en substituant aux variables climatiques pures (pluie, vent) des variables d'exposition sanitaire (chaleur, bulbe humide, pollution), voire des indicateurs de sinistralité santé (admissions hospitalières, taux d'appels au 15). C'est un pont méthodologique naturel vers la Partie 4.

04.

SEGMENTATION DES VULNÉRABILITÉS, CAPACITÉS D'ADAPTATION ET PRÉVENTION

4.1 CADRE GÉNÉRAL ET AMBITION

Cette partie présente un cadre de recherche appliquée proposé par Nexialog pour la segmentation des populations vulnérables au changement climatique et l'étude des inégalités d'adaptation qui en découlent.

Deux constats motivent cette démarche. D'abord, le changement climatique transforme progressivement un risque de santé principalement idiosyncratique en un risque partiellement systémique, corrélé dans l'espace et dans le temps. Ensuite, pour un assureur santé-prévoyance, l'enjeu n'est plus seulement d'anticiper une dérive moyenne de la sinistralité : il est également de caractériser et de suivre l'émergence de populations ou de territoires durablement vulnérables, tout en garantissant la défendabilité, l'auditabilité et l'utilisabilité opérationnelle des segmentations produites.

Le cadre proposé articule un axe méthodologique, fondé sur les graphes spatio-temporels, le Graph Structure Learning et le Temporal Graph Clustering, et un axe économique-actuariel consacré aux déterminants des vulnérabilités, aux inégalités d'adaptation et aux leviers de prévention. Il vise à identifier, suivre et projeter les vulnérabilités climato-sanitaires, puis à en analyser les conséquences économiques, sanitaires et assurantielles.

4.2 PROBLÉMATIQUE

La problématique centrale est double :

- **(P1) AXE MÉTHODOLOGIQUE** : Comment construire une segmentation spatio-temporelle robuste de populations ou de territoires vulnérables lorsque les unités étudiées sont interdépendantes, les expositions climatiques spatialement corrélées, les vulnérabilités évolutives et l'incertitude doit être quantifiée, tout en conservant des résultats interprétables et auditables ?
- **(P2) AXE ÉCONOMIQUE ET ACTUARIEL** : Quels ménages et quels territoires sont susceptibles de voir leur vulnérabilité augmenter, quelles inégalités d'adaptation peuvent en découler et quels leviers de prévention, d'accompagnement ou de couverture peuvent être mobilisés ?

4.3 AXE 1 - SEGMENTATION DYNAMIQUE PAR TEMPORAL GRAPH CLUSTERING

4.3.1 POURQUOI LES GRAPHES ?

Les vulnérabilités climato-sanitaires ne sont pas purement individuelles. Elles dépendent :

- de la localisation,
- des infrastructures de soins,
- des caractéristiques socio-économiques locales,
- des phénomènes climatiques régionaux,
- des interactions territoriales.

Ces dépendances se représentent naturellement sous forme de graphe :

- nœuds : individus, communes, départements, zones assurantielles ;
- arêtes : proximité géographique, similarité socio-économique, mobilité, dépendance sanitaire.

La dynamique temporelle transforme alors ce graphe en graphe temporel.

4.3.2 CŒUR MÉTHODOLOGIQUE : GRAPH NEURAL NETWORKS

Le cadre méthodologique mobilise les avancées du Graph Structure Learning et des Graph Neural Networks (GNN), ainsi que leurs extensions dynamiques, notamment les Temporal GNN.

OBJECTIF

Apprendre des représentations latentes tenant compte simultanément :

- de la structure spatiale,
- de l'évolution temporelle,
- des attributs observés,
- des dépendances entre populations.

Ces embeddings alimentent ensuite un module de Temporal Graph Clustering, permettant d'identifier des groupes de vulnérabilité évolutifs.

4.3.3 VEROUS SCIENTIFIQUES

L'approche proposée ne se limite pas à l'application de modèles existants. Elle soulève quatre verrous scientifiques principaux.

A) UN GRAPHE NON CONNU A PRIORI

La littérature suppose souvent que la structure du graphe est connue à l'avance. Ce n'est pas le cas ici : le graphe pertinent doit combiner plusieurs formes de proximité ou de dépendance — géographique, sanitaire, économique et climatique.

B) UNE FINALITÉ DE SEGMENTATION

La littérature utilise majoritairement les GNN à des fins de prédiction ou de projection. L'objectif est ici d'y ajouter une finalité de segmentation, afin d'identifier des groupes de populations ou de territoires présentant des profils de vulnérabilité homogènes.

C) DES GRAPHERS DYNAMIQUES

L'approche doit tenir compte d'une structure évolutive, afin de suivre les transformations des clusters au cours du temps. Les méthodes de segmentation existantes portent encore fréquemment sur des graphes statiques.

D) L'INTERPRÉTABILITÉ

Les groupes détectés doivent pouvoir être expliqués à partir :

- des variables dominantes ;
- des facteurs territoriaux ;
- de l'exposition climatique ;
- des profils socio-économiques.

4.4 INÉGALITÉS ÉCONOMIQUES D'ADAPTATION, VULNÉRABILITÉS SANITAIRES ET LEVIERS ASSURANTIELS

4.4.1 CADRE ÉCONOMIQUE : CHALEUR, ADAPTATION ET NOUVELLES INÉGALITÉS SANITAIRES

Le second axe du cadre proposé adopte une perspective économique et actuarielle. Il part d'un constat simple : l'exposition climatique ne suffit pas à expliquer les effets sanitaires des vagues de chaleur. Deux ménages ou deux territoires exposés à un même épisode extrême peuvent connaître des conséquences très différentes selon le revenu, l'âge, l'état de santé, la qualité du logement, l'accès à des équipements de refroidissement, le coût de l'énergie, la morphologie urbaine ou l'existence de politiques collectives de prévention.

L'enjeu économique n'est donc pas seulement de mesurer l'exposition aux chaleurs extrêmes, mais de comprendre comment les capacités d'adaptation modulent leurs effets sanitaires. Ces capacités dépendent à la fois de ressources individuelles, comme le revenu ou la qualité du logement, et de ressources collectives, comme la rénovation du bâti, la végétalisation, la réduction des îlots de chaleur urbains, les plans chaleur ou la protection ciblée des populations vulnérables.

Dans ce cadre, l'électricité et la climatisation constituent des objets empiriques importants, mais non exclusifs. Elles permettent d'observer une forme d'adaptation individuelle aux fortes chaleurs, fondée sur le recours à des équipements de refroidissement. Toutefois, cette adaptation peut générer des inégalités d'accès, des surcoûts énergétiques et des externalités négatives. Elle doit donc être comparée à des formes d'adaptation plus collectives et plus structurelles.

4.4.2 MESURE HISTORIQUE DES VULNÉRABILITÉS D'ADAPTATION

Le premier volet économique vise à établir un diagnostic historique des vulnérabilités climato-sanitaires et économiques. Il s'agit d'identifier des groupes de populations ou de territoires cumulant une forte exposition aux chaleurs extrêmes, une vulnérabilité sanitaire élevée et une faible capacité économique d'adaptation.

Ce volet mobilise les méthodes développées dans l'axe 1. Les graphes spatio-temporels et le clustering dynamique permettent de construire des clusters de vulnérabilité à partir de données climatiques, démographiques, socio-économiques, sanitaires, énergétiques et territoriales. L'objectif n'est pas seulement de produire une cartographie statique des vulnérabilités, mais également de suivre l'évolution de ces groupes dans le temps : stabilité des clusters, transitions entre régimes et basculements vers des profils de vulnérabilité plus élevés ou plus faibles.

Ces clusters permettent de dépasser une approche variable par variable. Plutôt que d'analyser séparément l'âge, le revenu, le logement, la température ou la précarité énergétique, ce volet cherche à identifier des configurations de vulnérabilité dans lesquelles ces différentes dimensions se superposent.

4.4.3 DÉTERMINANTS ÉCONOMIQUES ET CLIMATIQUES DE LA MORTALITÉ

Le deuxième volet porte sur l'étude conjointe des déterminants économiques et climatiques de la mortalité. L'objectif est d'analyser dans quelle mesure les variables économiques et territoriales modulent l'effet des expositions climatiques sur les trajectoires de mortalité.

Le revenu, le coût de l'énergie, la qualité thermique du logement, l'accès au refroidissement, la précarité énergétique et les politiques collectives d'adaptation sont étudiés comme des variables susceptibles de modifier les trajectoires de mortalité projetées à partir des seules données démographiques passées. Cette approche permet de relier la littérature sur la mortalité climatique à celle consacrée aux déterminants socio-économiques de la mortalité.

L'intérêt actuariel est direct : les chaleurs extrêmes peuvent produire des risques sanitaires corrélés dans l'espace et dans le temps. Pour l'assurance santé-prévoyance, l'enjeu n'est donc pas seulement de projeter un niveau moyen de mortalité ou de morbidité, mais également d'identifier les groupes dont les profils de risque pourraient évoluer plus rapidement sous l'effet du changement climatique et des inégalités d'adaptation.

4.4.4 PROJECTION DES VULNÉRABILITÉS ET SCÉNARIOS D'ADAPTATION

Le troisième volet est prospectif. Il consiste à projeter les clusters de vulnérabilité identifiés sur données historiques sous différents scénarios climatiques, socio-économiques, énergétiques et d'adaptation.

Une attention particulière est portée à la comparaison entre deux grandes trajectoires. La première correspond à une adaptation principalement individuelle, souvent ex post, fondée sur les capacités propres des ménages et sur le recours accru à des équipements de refroidissement. Cette trajectoire peut réduire rapidement l'exposition de certains ménages, mais elle risque également de renforcer les inégalités d'accès au confort thermique, d'accroître la facture énergétique et d'aggraver la précarité énergétique des populations les plus vulnérables.

La seconde trajectoire correspond à une adaptation plus collective, fondée sur des politiques de rénovation du bâti, de végétalisation, de réduction des îlots de chaleur urbains, de mise en œuvre de plans chaleur, d'aménagement des espaces publics et de protection ciblée des populations vulnérables. Ces politiques peuvent agir comme des biens publics locaux en réduisant l'exposition moyenne à la chaleur et en limitant l'hétérogénéité des expositions entre ménages.

Le rôle potentiel de l'assurance peut également être étudié comme un levier complémentaire de prévention, de mutualisation et d'incitation à l'adaptation.

4.4.5 ARTICULATION AXE 1 – AXE 2 : DES CLUSTERS AUX OBJETS ÉCONOMIQUES ET ASSURANTIELS

L'axe 2 transforme les clusters issus de l'axe 1 en objets économiquement interprétables. Les méthodes de graphes dynamiques permettent d'identifier des groupes de populations ou de territoires présentant des combinaisons spécifiques d'exposition climatique, de vulnérabilité sanitaire, de contraintes économiques et de capacité d'adaptation.

CES CLUSTERS SERVENT À TROIS NIVEAUX :

diagnostic historique : identifier les profils de vulnérabilité climato-sanitaire et économique, leurs déterminants et leurs trajectoires passées ;

analyse économico-actuarielle : étudier comment les caractéristiques économiques, énergétiques et territoriales modulent les effets des chaleurs extrêmes sur la mortalité et les profils de risque en santé-prévoyance ;

projection prospective : comparer l'évolution future des vulnérabilités sous différents scénarios d'adaptation individuelle, collective et assurantielle.

OUVERTURE - PERSPECTIVES ET POINT DE VUE NEXIALOG



NEXIALOG
CONSULTING

TROIS NIVEAUX DE TRANSFORMATION

Le présent livrable met en évidence trois niveaux de transformation pour l'assurance santé/prévoyance sous contrainte climatique :

SCIENTIFIQUE : l'accumulation des données et des modèles (Besancenot, Barigou, Guibert, Raynal) rend désormais intenable l'usage de tables de mortalité stationnaires et de modèles purement démographiques. L'hybridation climat-santé des modèles actuariels est engagée.

MÉTHODOLOGIQUE : la transformation du risque, d'idiosyncratique à partiellement systémique, appelle des outils de segmentation spatio-temporelle interprétable et de projection multi-horizon qui sortent du standard actuariel historique. Le cadre de recherche appliquée présenté dans la partie 4 illustre la manière dont ces outils peuvent être mobilisés pour construire des segmentations dynamiques, interprétables et projetables.

ÉCONOMIQUE ET PRUDENTIEL : la hausse et la spatialisation des corrélations fragilisent la mutualisation et ouvrent la voie à des spirales d'anti-sélection et à un protection gap climato-sanitaire. La réponse relève autant du design de contrats et de la gouvernance des risques que de l'intervention publique (réassurance, risk adjustment, prévention).

BESOINS POUR LES ANNÉES À VENIR

TROIS BESOINS STRUCTURANTS SE DESSINENT :

SUR LES DONNÉES : consolidation de sources appariées (mortalité quotidienne géolocalisée, humidité, pollution, accès aux soins), amélioration de la qualité des données ESG et biodiversité, articulation avec les référentiels publics (Santé publique France, Météo-France, Insee).

SUR LES MODÈLES : développement de modèles hybrides explicables (couplage stochastique multi-populations / épidémiologique), intégration des scénarios climatiques dans les stress tests mortalité, mise à jour des tables de mortalité et des grilles de tarification santé/prévoyance.

SUR LA GOUVERNANCE : intégration précoce des exigences de l'AI Act (usages high-risk) et des principes EIOPA IA, documentation des choix méthodologiques (segmentation, stabilité, interprétabilité), articulation entre validation de modèles, audit interne et supervision.

POINT DE VUE NEXIALOG

Les travaux rassemblés dans ce livrable, articles internes sur la mortalité, la biodiversité et la dépendance géographique, ainsi que le cadre de recherche appliquée présenté dans la partie 4, s'inscrivent dans une même orientation : rendre visible et auditable la recomposition des vulnérabilités sous contrainte climatique, afin de préserver la mutualisation et l'assurabilité sur les segments santé et prévoyance.

La conviction qui sous-tend cette orientation est que la soutenabilité de la couverture santé/prévoyance sous climat dépendra moins d'une révision purement tarifaire que d'une refonte des objets de pilotage : types de vulnérabilité, matrices de transition, structures de corrélation, outils de projection multi-horizon. Cette refonte doit s'ancrer dans des méthodes statistiquement robustes, économiquement interprétables et réglementairement auditables. L'intérêt d'une approche conjointement statistique, économique et actuarielle tient précisément à cette exigence d'articulation.

Les prolongements possibles de ces travaux incluent l'approfondissement des briques méthodologiques (signatures de chemins, Temporal Fusion Transformers et segmentation bayésienne spatio-temporelles), la montée en maturité des stress tests climatiques appliqués à la santé et le renforcement du dialogue avec les superviseurs sur les enjeux d'auditabilité des modèles de vulnérabilité.

SOURCES

- Note interne Nexialog, « Les effets du changement climatique sur la mortalité : implications pour l'assurance santé et prévoyance » (2025).
- Note interne Nexialog, « Biodiversité et changement climatique : un double enjeu systémique pour les assureurs » (2025).
- Note interne Nexialog, « Dépendance géographique dans les risques climatiques : quantifier la force et la nature des liens géospatiaux » (2025).
- Note interne Nexialog, Leo Lovisolo et Hugo Rapior, « Les nuits tropicales en France : un risque à suivre en assurance santé et prévoyance » (2025).

Références académiques externes citées : Besancenot (CNRS, 2004) ; Barigou et al. (2025), Granular mortality modeling with temperature and epidemic shocks: a three-state regime-switching approach ; Guibert et al. (2024), Impacts of Climate Change on Mortality: An extrapolation of temperature effects based on time series data in France ; Raynal (2025), Contributions à la gestion des risques climatiques en assurance ; Bouchama & Knochel (NEJM, 2002) ; Fouillet et al. (2006) ; Kenny et al. (2008) ; Cramer & Jay (2016) ; Harding et al. (2020) ; Vecellio et al. (2022) ; Zhao et al. (Lancet Planet Health, 2021) ; Vicedo-Cabrera et al. (2021) ; Ballester et al. (2023) ; rapports Lancet Countdown, ACPR (2023), IPBES, TNFD, EIOPA, AI Act européen, OMS, Météo-France / DRIAS / SAFRAN.



NEXIALOG
CONSULTING