
Partie 1 :

Introduction générale

Le travail de recherche appliquée présenté dans ce manuscrit s'intéresse aux tempêtes hivernales à fort potentiel d'impact économique en Europe. Il a été réalisé dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE), en collaboration avec le département de gestion des risques IARD (Incendie, Accidents et Risques Divers, ou risques non-vie) du groupe AXA, le Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement (LSCE) et le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD).

En parallèle de l'élaboration du projet de recherche sur la quantification de l'impact du changement climatique sur les tempêtes de vent hivernales en Europe, un projet opérationnel ayant pour objectif l'élaboration d'un outil de détection de tempêtes de vent hivernales à partir de prévisions météorologiques a été lancé au sein de l'entreprise. Le contrat CIFRE prévoyant une séparation du temps de travail entre les laboratoires et l'entreprise, le projet opérationnel m'a donc été confié sur la partie du temps en entreprise puisqu'il s'agit d'un projet de recherche et développement lié au sujet du doctorat.

Le manuscrit comprend 9 chapitres regroupés en 4 parties. La première partie d'introduction générale comprend trois chapitres. Les deux premiers présentent l'intérêt de l'entreprise pour l'étude des tempêtes de vent hivernales en Europe ainsi que le contexte et les enjeux de la recherche dans ce domaine. A partir de ces deux chapitres, les problématiques du doctorat et du projet opérationnel sont formulées dans le chapitre 3. Afin de refléter les problématiques et les approches différentes adoptées pour chacun des projets, les résultats sont présentés dans les deux parties suivantes. La Partie 2 expose les résultats obtenus au cours du travail de recherche et comprend les chapitres 5 et 6. La Partie 3, contenant les chapitres 7 et 8, présente les étapes de développement de l'outil de détection et les résultats obtenus au cours de l'hiver 2013/2014. Le manuscrit s'achève par une conclusion générale, Partie 4, qui propose une vue d'ensemble du travail réalisé et les perspectives.

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| PARTIE 1 : INTRODUCTION GENERALE | 3 |
| CHAPITRE 1 : PRESENTATION DES ENJEUX DU POINT DE VUE DE L'ENTREPRISE..... | 7 |
| DEFINITION DE DEUX NOTIONS CLES : LE RISQUE ET L'ASSURANCE | 9 |
| GESTION DES RISQUES AU SEIN D'UNE COMPAGNIE D'ASSURANCE | 10 |
| GESTION DES SINISTRES EN CAS DE CATASTROPHE NATURELLE – UN POINT DE VUE OPERATIONNEL DES TEMPETES EN EUROPE | 21 |
| CHAPITRE 2 : LES TEMPETES DE VENT HIVERNALES GENERANT DES DOMMAGES EN EUROPE : UNE REVUE..... | 27 |
| INTRODUCTION | 29 |
| LES CYCLONES EXTRATROPICAUX – DYNAMIQUE | 35 |
| LES CYCLONES EXTRATROPICAUX – VARIABILITE ET TENDANCES | 44 |
| CARACTERISATION DES TEMPETES DE VENT HIVERNALES EN EUROPE | 49 |
| CONCLUSION | 51 |
| CHAPITRE 3 : PROBLEMATIQUES DU PROJET DE THESE | 53 |
| INTRODUCTION | 55 |
| QUANTIFICATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES TEMPETES DE VENT HIVERNALES A FORT POTENTIEL D'IMPACTS EN EUROPE : UN ENJEU MAJEUR POUR LES ASSUREURS...56 | 56 |
| DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DETECTION DES TEMPETES DE VENT HIVERNALES EN EUROPE ET DE PREVISION DE PERTES | 59 |
| CALENDRIER DES PROJETS..... | 61 |
| PLAN DU MANUSCRIT | 64 |
| PARTIE 2 : QUANTIFICATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES TEMPETES HIVERNALES EXTREMES EN EUROPE..... | 65 |
| CHAPITRE 4 : DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE DE DETECTION DES TEMPETES HIVERNALES A FORT POTENTIEL D'IMPACT EN EUROPE – APPLICATION A DES REANALYSES..... | 67 |
| INTRODUCTION | 69 |
| DESCRIPTION DES DONNEES DE REANALYSES UTILISEES | 70 |
| ÉTUDE PRELIMINAIRE SUR LES TEMPETES DE VENT HIVERNALES EN EUROPE AYANT CAUSE DES DOMMAGES EN EUROPE | 72 |
| CARACTERISATION DES EVENEMENTS DETECTES AVEC LA VORTICITE RELATIVE | 80 |
| THREE VARIABLES ARE BETTER THAN ONE : DETECTION OF EUROPEAN WINTER WINDSTORMS CAUSING IMPORTANT DAMAGES | 85 |
| CONCLUSIONS..... | 108 |

| | |
|--|------------|
| CHAPITRE 5 : APPLICATION AUX SORTIES DE MODELES DU PROJET CMIP5..... | 113 |
| INTRODUCTION | 115 |
| DETECTION DES TEMPETES A FORT POTENTIEL D'IMPACT EN EUROPE DANS LES SIMULATIONS DE L'EXPERIENCE <i>HISTORICAL</i> – COMPARAISON A ERA INTERIM | 116 |
| ÉVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DES TEMPETES A FORT POTENTIEL DE DOMMAGES EN EUROPE – COMPARAISON DES EXPERIENCES <i>HISTORICAL</i> ET <i>RCP4.5</i> | 124 |
| CONCLUSIONS | 130 |
| <u>PARTIE 3 : DETECTION DES TEMPETES HIVERNALES A FORT POTENTIEL D'IMPACT EN EUROPE A PARTIR DE PREVISIONS METEOROLOGIQUES.....</u> | 131 |
| CHAPITRE 6: DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL SEVERE WINDSTORMS FORECASTING TOOL (SWIFT)..... | 133 |
| INTRODUCTION | 135 |
| MODULE DE DETECTION DES TEMPETES DE VENT HIVERNALES EN EUROPE | 136 |
| MODULE DE VULNERABILITE | 151 |
| CONCLUSIONS | 159 |
| CHAPITRE 7: RESULTATS DE L'OUTIL SUR LA SAISON HIVERNALE 2013 – 2014 | 163 |
| INTRODUCTION | 165 |
| RETOUR D'EXPERIENCE DE LA SAISON 2013 – 2014..... | 171 |
| CES EVENEMENTS APPARTIENNENT-ILS AU CATALOGUE D'EVENEMENTS DETECTES A L'AIDE DE LA METHODE DU PROJET DE RECHERCHE ? | 177 |
| CONCLUSIONS | 181 |
| ANNEXES | 182 |
| <u>PARTIE 4 : CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</u> | 191 |
| VUE D'ENSEMBLE DU TRAVAIL REALISE | 193 |
| VALORISATION DU TRAVAIL DE RECHERCHE | 195 |
| PERSPECTIVES..... | 196 |
| BIBLIOGRAPHIE | 199 |
| TABLE DES FIGURES..... | 204 |

Chapitre 1 :

Présentation des enjeux du point de vue de l'entreprise

| | |
|--|----|
| DEFINITION DE DEUX NOTIONS CLES : LE RISQUE ET L'ASSURANCE | 9 |
| GESTION DES RISQUES AU SEIN D'UNE COMPAGNIE D'ASSURANCE | 10 |
| Transfert du risque et coût du risque | 10 |
| La réglementation Solvabilité II – Cas des risques non-vie | 10 |
| Gestion du risque de catastrophes naturelles – Rôle majeur de la réassurance..... | 13 |
| Évaluation du risque de catastrophes naturelles – Développement des modèles CatNat | 16 |
| Problématiques de l'entreprise – Positionnement du projet de recherche..... | 18 |
| GESTION DES SINISTRES EN CAS DE CATASTROPHE NATURELLE – UN POINT DE VUE | |
| OPERATIONNEL DES TEMPETES EN EUROPE..... | 21 |
| Gestion de sinistres – Entre efficacité opérationnelle et satisfaction du client | 21 |
| Gestion des sinistres en cas de catastrophes naturelles | 23 |
| Problématique de l'entreprise – Outil de prévision de tempête de vent en Europe | 24 |

Définition de deux notions clés : le risque et l'assurance

Les deux notions suivantes sont essentielles pour présenter le contexte du travail de recherche.

Risque : « éventualité d'un événement futur, incertain ou d'un terme indéterminé, ne dépendant pas exclusivement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet ou tout autre dommage. En matière d'assurance le terme désigne souvent l'événement même contre la survenance duquel on s'assure (décès, maladie, incendie, etc.) » (Capitan, 1936).

Assurance : « contrat par lequel un assureur s'engage, moyennant une prime ou une cotisation, à payer à l'assuré ou au bénéficiaire convenu une indemnité, un capital ou une rente, en cas de réalisation d'un risque déterminé : incendie, inondation, grêle, mortalité des bestiaux, maladie, accidents, décès, etc. » (Capitan, 1936).

Comme le souligne ces deux définitions, le mécanisme d'assurance est profondément lié à la nature incertaine du risque. Tout d'abord, un risque appartient au futur et non au passé. Le cycle de production de l'assurance est donc inversé par rapport aux autres activités du secteur industriel : les assurés paient une prime en amont du service associé, soit l'indemnisation en cas de sinistre. Deuxièmement, un risque possède une grande part d'incertitude liée non seulement à son occurrence mais aussi à son intensité. L'assurance incorpore cette incertitude dans l'évaluation du risque et la répercute dans le calcul de la prime et de l'indemnité. Enfin, un risque peut être aussi bien provoqué que subi par l'homme et toucher des personnes ou des biens matériels. Face à une telle variété de risques, les assureurs les catégorisent et différencient en premier lieu les risques touchant les personnes (assurance vie) et les risques touchant les biens matériels (assurance dommages ou non-vie).

Deux activités au cœur du métier des compagnies d'assurance ressortent de la définition de l'assurance: (i) la gestion des risques, qui calcule le coût du risque a priori, et (ii) la gestion de sinistres, qui s'occupe du remboursement des sinistres a posteriori du risque. Ces deux activités ainsi que les enjeux liés spécifiquement au risque des tempêtes de vent hivernales en Europe sont présentés dans la suite du chapitre.

Gestion des risques au sein d'une compagnie d'assurance

Transfert du risque et coût du risque

L'assurance peut être vue comme un transfert du risque de l'assuré vers l'assureur. En cédant son risque, l'assuré se décharge d'une partie des conséquences de ce risque sur lui-même ou sur les autres. En acceptant le risque de ses assurés, une compagnie d'assurance s'engage dans un rôle de gestionnaire du risque : elle doit définir et évaluer l'ensemble des risques liés à son activité. A chaque risque est associé un coût qui peut être décomposé en un coût moyen et en une composante prenant en compte la volatilité. Le coût moyen est estimé à partir des historiques et d'hypothèses qui ne prennent en compte qu'un certain niveau de risque, fonction de la fréquence et de l'intensité du risque tel que survenu par le passé. Cette composante du coût du risque est entièrement prise en charge par la prime payée par chaque assuré. La volatilité associée au coût du risque intègre quant à elle les incertitudes liées aux hypothèses de calcul du coût moyen et correspond à une marge de solvabilité au cas où la réalisation du risque soit plus forte que la moyenne. Ce montant est provisionné par la compagnie d'assurance dans ses capitaux propres qui proviennent à la fois de l'investissement des actionnaires et des bénéfices réalisés au cours de l'exercice des années précédentes.

La réglementation Solvabilité II – Cas des risques non-vie

Le montant minimum de capitaux propres requis ainsi que les postes possibles d'investissement de ces capitaux sont réglementés par la directive européenne Solvabilité I mise en place en 2004 et qui sera remplacée par Solvabilité II au 1^{er} janvier 2016. Ces deux directives, imposées par la Commission Européenne aux assureurs dont le siège de direction se trouve dans un des Etats Membres de l'Union Européenne, n'ont pas eu la même portée. Les exigences en matière de marge de solvabilité, ou montant minimum de capitaux propres associé à la part volatile du coût du risque, ont été mises en place dans les années 1970 et revues au milieu des années 1990. De cette revue est née la réforme Solvabilité I qui n'apportait pas de grands changements. En ce qui concerne l'assurance non-vie, Solvabilité I recommandait d'avoir un montant minimum de capitaux propres supérieurs à un pourcentage des primes annuelles perçues ou des sinistres passés. Cette estimation de la volatilité, réduite à une simple relation proportionnelle et ne prenant aucunement en compte la nature du risque, n'engageait pas suffisamment les assureurs dans leur devoir d'experts et de gestionnaires du risque. C'est pourquoi, dans le sillage de Solvabilité I et dans le contexte de crise économique, un plus grand chantier a vu le jour, celui de Solvabilité II.

L'objectif de cette nouvelle réglementation, qui sera effective au début 2016, est d'inciter les assureurs à approfondir la connaissance des risques qu'ils couvrent de telle manière à pouvoir estimer justement le montant nécessaire de capitaux propres à provisionner, c'est-à-dire en plus des primes perçues par la compagnie d'assurance. Dans le cadre de Solvabilité II, les assureurs ont le choix entre appliquer une formule standard ou développer leur propre modèle de calcul de capital (ou modèle interne). Le calcul du montant minimum de capital à provisionner (ou *Solvency Capital Requirement*, SCR) prend en compte les corrélations entre l'ensemble des risques encourus par la compagnie d'assurance (Figure 1). Plus les risques couverts par une compagnie d'assurance sont diversifiés en termes d'activité et d'exposition, plus ces corrélations sont complexes à calculer. La solution de la formule standard permet alors d'éviter un investissement trop important qui n'est pas nécessaire, par exemple dans le cas d'une compagnie d'assurance avec des activités et une exposition peu diversifiées et/ou concentrées localement sur une région. La solution du modèle interne suppose un investissement important et une expertise poussée des risques encourus, mais garantit un calcul ajusté aux activités engagées par la compagnie d'assurance et à son exposition. Quelle que soit la solution choisie, un long travail de vérification et de validation est réalisé par les instances de régulation nationales.

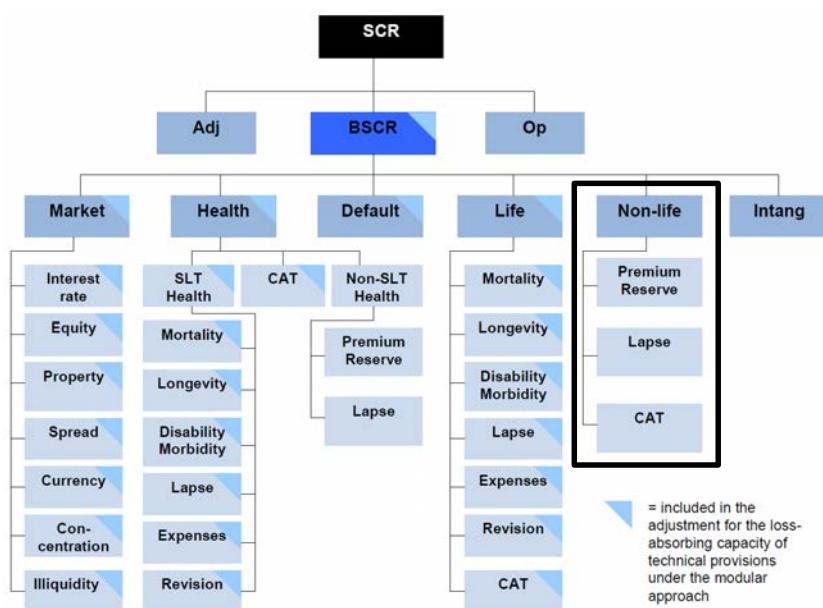


FIGURE 1 : CALCUL DU SOLVENCY CAPITAL REQUIREMENT (SOURCE : QIS5 – TECHNICAL SPECIFICATIONS)

La sélection des risques à prendre en compte dans le calcul du SCR a été réalisée au cours d'études d'impacts (QIS) réunissant les professionnels de l'assurance. En ce qui concerne la branche d'assurance non-vie, trois risques doivent être évalués :

- 1) le risque de prime (premium risk) et le risque de réserve (reserve risk). Le risque de prime correspond au risque que les primes demandées pour l'année à venir A+1 ne suffisent pas à couvrir les sinistres qui surviendront dans cette année A+1. Le risque de prime ne prend pas en compte le risque catastrophe naturelle (voir ci-dessous). Le risque de réserve correspond au risque que les provisions de capital (ou provisions techniques) provenant des primes perçues par le passé ne suffisent pas à couvrir les sinistres déjà survenus.
- 2) le risque de défaillance (lapse risk). Les contrats d'assurance peuvent être interrompus à tout moment ou reconduits avec les mêmes conditions que le précédent contrat. Selon les options du contrat, une interruption ou une reconduite sans modification peut avoir un impact fort sur les provisions techniques. Le calcul de ces dernières repose donc sur des hypothèses sur la valeur des taux d'interruption et de continuation des contrats. Le risque de défaillance correspond au risque que ces hypothèses soient fausses.
- 3) le risque de catastrophes naturelles (CAT risk). Les catastrophes naturelles sont des événements extrêmes et extraordinaires. Le calcul des primes des contrats d'assurance et le calcul des réserves ne prennent en compte qu'un certain niveau de risque qui n'est pas suffisant pour couvrir ce risque. Le risque catastrophe naturelle correspond au risque qu'un événement majeur se produise et que les sinistres engendrés soient nettement supérieurs aux primes perçues pour ce risque.

A chacun de ses risques est associé un niveau de risque minimum à couvrir qui est défini par la réglementation. Contrairement à la réglementation Solvabilité I, le calcul de ce niveau de risque dépend du risque lui-même. Par exemple, le niveau de risque minimum à couvrir pour le risque de prime est défini par un facteur qui prend en compte pour chaque pays et branche d'activité l'historique de pertes et de primes des 15 dernières années. La multiplication de ce facteur par le montant des primes donne le montant de capital propre à provisionner. Pour le risque de catastrophes naturelles, le niveau de risque est défini par la valeur du risque (*Value at Risk, VaR*):

$$VaR_\alpha(L) = \inf\{l \in \mathbb{R} : P(L \geq l) \leq 1 - \alpha\}. \quad (\text{EQ. 1})$$

Étant donné un niveau de confiance α , la VaR associée au portefeuille de l'assureur est donnée par la plus petite valeur de l (perte annuelle associée à un péril) telle que la probabilité que la perte L dépasse l soit au plus $1 - \alpha$. D'après la réglementation, le niveau de confiance α est fixé à 99,5% ce qui conduit à la relation suivante (Eq. 2):

$$VaR_{99.5}(L) = \inf\{l \in \mathbb{R} : P(L \geq l) \leq 0.005\}. \quad (\text{EQ. 2})$$

Les assureurs doivent donc rester solvables après une année au cours de laquelle la somme des sinistres associés à un péril donné dépasse un seuil de pertes l ayant une probabilité d'occurrence égale à 1/200. Le montant de capital propre à provisionner est alors égal à la différence entre l et la somme des primes perçues annuellement. Plus de détails sur l'évaluation du risque catastrophe sont donnés dans la prochaine sous-section.

Gestion du risque de catastrophes naturelles – Rôle majeur de la réassurance

Pour un assureur, une catastrophe naturelle peut être définie comme la combinaison d'un aléa naturel et d'une exposition à ce risque (Figure 2).

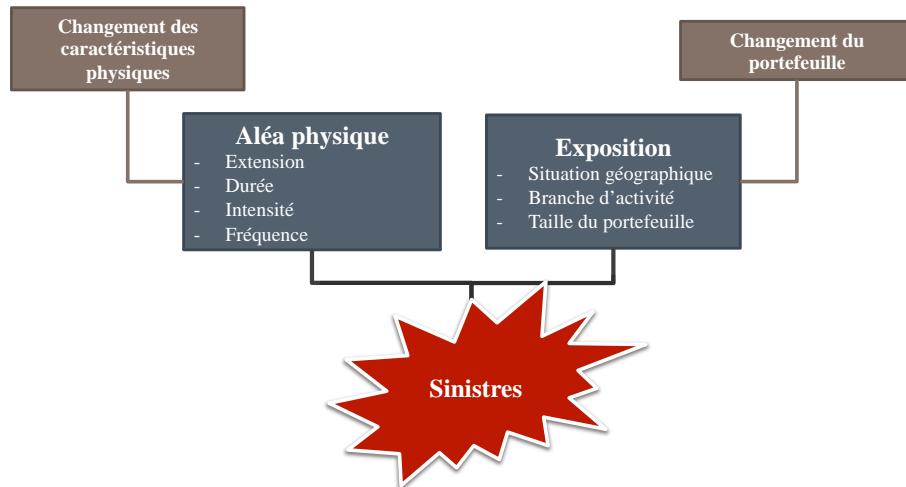


FIGURE 2 : FACTEURS DU RISQUE TEMPÈTE DE VENT HIVERNALES EN EUROPE

L'aléa physique se caractérise par son extension spatiale, sa durée, son intensité et sa fréquence. Ces paramètres peuvent évoluer au cours du temps. Par exemple, les périls météorologiques peuvent présenter une forte variabilité interannuelle ou décennale car ils sont influencés par des phénomènes climatiques qui peuvent intensifier ou atténuer le péril. C'est le cas par exemple de l'Oscillation Nord-Atlantique qui impacte les trajectoires et l'intensité

des tempêtes de vent en Europe. Pour ce qui est de l'exposition, elle est définie par sa localisation géographique, la ou les branches d'activités qui la compose et le nombre de polices d'assurance. L'exposition peut aussi évoluer dans le temps. Par exemple, l'achat ou la vente de certaines branches d'activité peut réduire ou accroître la vulnérabilité de l'exposition face au risque.

Afin de se conformer à Solvabilité II, un assureur doit provisionner un montant de capital permettant de couvrir une perte annuelle exceptionnelle, définie par une probabilité d'occurrence de 1 fois tous les 200 ans. Pour le cas de la tempête de vent en Europe, les montants nécessaires pour couvrir une telle perte, une fois les primes perçues soustraites, peuvent être très importants (de l'ordre de plusieurs milliards d'euros pour un groupe comme AXA) et il n'est pas possible pour une compagnie d'assurance de provisionner entièrement ces montants. L'assureur peut alors se tourner vers un ou plusieurs réassureurs afin d'assurer une partie ou la totalité de ces montants en échange d'une prime annuelle.

La réassurance moderne est apparue vers la fin du 19^e siècle et prend plusieurs formes. Une première différenciation est faite entre la réassurance traditionnelle et la réassurance non-traditionnelle. La réassurance traditionnelle regroupe la réassurance dite proportionnelle et la réassurance dite non-proportionnelle. Dans le premier cas, il s'agit de contrats, ou traités, de type Quote-Part (QP) et Excédent de Plein. Dans un traité QP (Figure 3 a)), l'assureur verse au réassureur un pourcentage prédéfini des primes perçues. Le réassureur s'engage alors à rembourser le même pourcentage des sinistres. Dans un traité Excédent de Plein, seules les polices d'assurance ayant une garantie supérieure à un seuil fixé dans le traité seront indemnisées par le réassureur. La valeur de l'indemnisation par police est fixée par un ratio défini à partir de la garantie de la police elle-même ; c'est pour cela que ce type de traité appartient à la réassurance proportionnelle. Grâce au traité Excédent de Plein, l'assureur conserve les petits risques, i.e. les polices dont la garantie est peu élevée, et confie ses plus gros risques au réassureur.

La réassurance non-proportionnelle comprend les contrats Excédent de Perte (EP) et Excédent de Sinistre (ES). Dans le cas du traité ES (Figure 3 b)), le réassureur s'engage à rembourser à l'assureur une certaine somme, la garantie, si le montant des sinistres liés à un événement ou à l'accumulation de plusieurs événements au cours d'une année dépasse un certain seuil, appelé rétention. La rétention, c'est-à-dire la partie du montant des sinistres qui reste à la charge de l'assureur, est définie par l'assureur lui-même en fonction des capitaux propres. Quant à la

garantie, elle doit couvrir la perte associée au niveau de risque défini par Solvabilité II. Dans un traité EP (Figure 3 c)), un réassureur s'engage à intervenir dans le cas où l'assureur est en perte, c'est-à-dire que les primes perçues ne suffisent pas à couvrir la totalité des sinistres. Par exemple, l'assureur est capable de prendre en charge jusqu'à une perte égale à 110% des primes, il va se couvrir au cas où les sinistres atteignent entre 110% et 130% des primes.

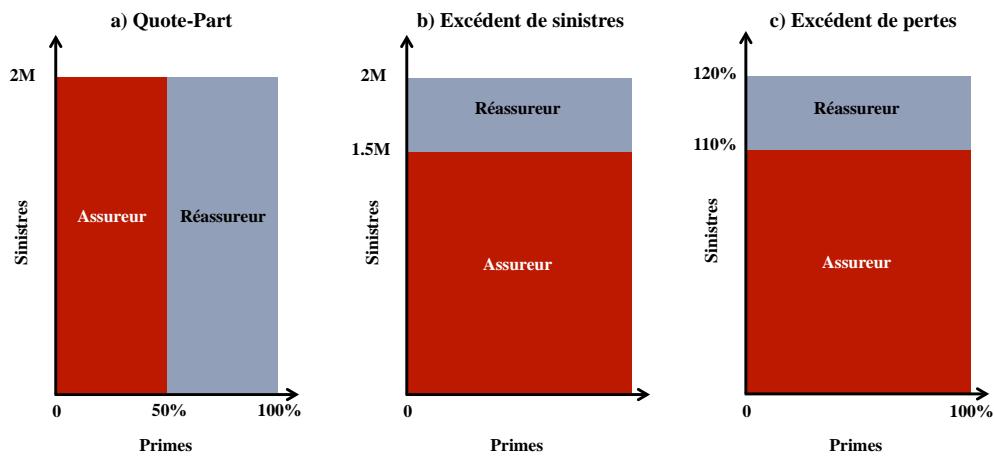


FIGURE 3 : REASSURANCE TRADITIONNELLE – A) TRAITE QUOTE-PART ; B) TRAITE EXCÉDENT DE SINISTRES ; C) TRAITE EXCÉDENT DE PERTES

La réassurance non-traditionnelle fait référence à des outils financiers développés récemment, plus flexibles que les contrats de la réassurance traditionnelle et parfois plus adaptés aux besoins des assureurs. Ces outils ne sont plus uniquement proposés par les réassureurs mais également par d'autres acteurs comme des banques d'investissement ou les assureurs eux-mêmes. L'obligation catastrophe (ou CatBond) est un exemple d'outil de réassurance non-traditionnelle qui s'est répandu au cours des dernières années. Comme toute obligation (au sens financier du terme), un investisseur prête, pour une durée déterminée, une somme d'argent à l'émetteur du CatBond, généralement un assureur ou un réassureur. Cette obligation porte sur un ou plusieurs périls supposés indépendants comme le tremblement de terre en Asie et la tempête de vent en Europe. Tant que le CatBond n'est pas déclenché, c'est-à-dire qu'aucun événement tel que défini dans le CatBond n'est survenu, l'investisseur perçoit chaque année des intérêts liés à son obligation, appelés également coupons. Au terme de l'obligation, l'investisseur récupère sa somme de départ. Ce système permet aux assureurs et réassureurs de faire porter le risque à des tiers et ainsi de réduire leur risque.

La gestion annuelle du risque de catastrophes naturelles s'appuie essentiellement sur la réassurance. Les deux types de réassurance les plus utilisés dans le cas des catastrophes naturelles sont les traités Excédent de Sinistres et les CatBonds. Pour ce qui est du traité ES, la valeur de la garantie, soit le montant de pertes annuelles associées à une probabilité d'occurrence 1/200, est estimée par l'équipe Modélisation des Catastrophes Naturelles du département de Gestion des Risques du Groupe. Cette équipe a pour mission de développer l'expertise et la modélisation du risque catastrophes naturelles, c'est-à-dire tout péril d'origine naturelle pouvant toucher une ou plusieurs des entités du groupe.

Évaluation du risque de catastrophes naturelles – Développement des modèles CatNat

Dès les années 1970, les assureurs commencent à utiliser des modèles de pertes déterministes. L'objectif de ces modèles est double avec, d'une part, la simulation d'un événement historique particulier sur le portefeuille actualisé afin d'estimer les pertes si un tel événement vient à se reproduire. D'autre part, il s'agit de définir et de tester quelques scénarios « imaginaires » qui pourraient fortement impacter le portefeuille de l'assureur. Ces modèles simples représentent l'intensité des événements mais ne prennent pas en compte la fréquence d'occurrence de ces événements. Des modèles simples probabilistes ont ensuite vu le jour intégrant les composantes fréquence et intensité des risques naturels. Cependant, ces modèles étant calibrés sur les historiques de pertes, souvent limités dans le temps à 30 voire 50 ans d'observations, les événements extrêmes ne sont pas correctement représentés. Les premiers modèles de catastrophes naturelles, ou modèles CatNat, sont apparus à la fin des années 1980 et peuvent être vus comme l'intégration des paramètres physiques du risque au sein des modèles probabilistes. Un modèle CatNat est divisé en trois modules, quel que soit le péril considéré (Figure 4) :

- 1) Le module aléa contient un catalogue de plusieurs dizaines de milliers d'événements représentant un ensemble des possibles du péril considéré avec, pour chaque événement, les informations de fréquence et d'intensité ainsi qu'une empreinte physique de l'événement. Une empreinte est une carte représentant en chaque point de la zone touchée l'intensité maximale atteinte par l'événement.
- 2) Le module vulnérabilité contient, pour différents secteurs d'activité, la relation entre l'intensité du péril et les dommages associés.
- 3) Le module financier contient des conditions particulières aux contrats d'assurance qui doivent être prises en compte.

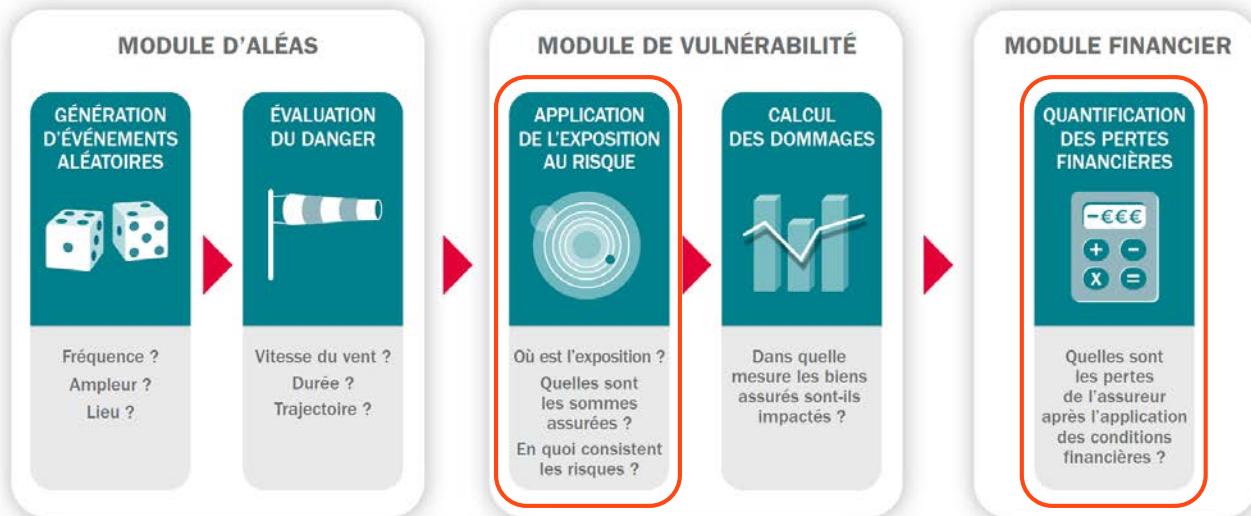


FIGURE 4 : LES TROIS MODULES D'UN MODELE DE CATASTROPHES NATURELLES. EN ORANGE, LES INFORMATIONS SUR L'EXPOSITION FOURNIES PAR L'ASSUREUR ET INTEGREES PAR LE MODELE (SOURCE : AXA WHITE PAPER SUR LES RISQUES CLIMATIQUES)

L'assureur fournit en entrée du modèle CatNat les informations sur ses polices d'assurances (localisation, montants, type de risque et conditions financières) qui sont ensuite intégrées dans les modules de vulnérabilité et financier. En sortie des trois modules, deux courbes sont obtenues: la courbe d'*Occurrence Exceedance Probability* (OEP) et la courbe d'*Annual Exceedance Probability* (AEP). La probabilité de dépassement, ou *Exceedance Probability*, représente la probabilité de dépasser un seuil de pertes. Cette probabilité est généralement exprimée en période de retour. Ainsi il y a 1% de chance que la perte associée à une période de retour de 100 ans soit dépassée. La courbe OEP représente la probabilité que la perte d'un seul événement dépasse un seuil L au cours d'une année (Eq. 3) :

$$F_{OEP}(L) = P(l > L). \quad (\text{EQ. 3})$$

La courbe AEP représente la probabilité que la somme des pertes associées à plusieurs événements survenant au cours d'une année dépasse un seuil L (Eq. 4) :

$$F_{AEP}(L) = P(\sum_i l_i > L). \quad (\text{EQ. 4})$$

C'est à partir de cette courbe qu'est estimée la $VaR_{99.5}$, le niveau de risque à provisionner défini par Solvabilité II.

Les modèles CatNat, initialement développés par trois compagnies (AIR, EQECat et RMS), sont au début peu utilisés par les assureurs et réassureurs. En 1989 et 1992, à la suite notamment des ouragans Hugo et Andrew, les capacités de réassurance ont été fortement diminuées et certaines compagnies d'assurances sont devenues insolubles. Ces événements ont alors mis l'accent sur l'importance de l'évaluation des risques naturels et sur l'utilité des modèles CatNat dans cette démarche. Les modèles CatNat sont désormais des outils d'évaluation du risque naturel très utilisés par les assureurs et les réassureurs mais également par des agences de notation d'assurance et lors de la création de CatBonds.

Problématiques de l'entreprise – Positionnement du projet de recherche

NatCatSERVICE

Munich RE

Significant natural catastrophes 1980 - 2012

10 costliest winter storms in Europe ordered by insured losses

| Period | Event | Affected Area | Overall losses | Insured losses | Fatalities |
|---------------|-----------------------------------|---|-------------------------|----------------|------------|
| | | | US\$ m, original values | | |
| 26.12.1999 | Winter Storm Lothar | France, Germany, Switzerland, Belgium, Austria, Italy | 11,500 | 5,900 | 110 |
| 18-20.1.2007 | Winter Storm Kyrill | United Kingdom, Germany, France, Netherlands, Belgium, Denmark, Austria | 10,000 | 5,800 | 49 |
| 25-26.1.1990 | Winter Storm Daria | Belgium, Denmark, France, Germany, Luxembourg, Netherlands, United Kingdom | 6,850 | 5,100 | 94 |
| 15-16.10.1987 | Winter Storm 87J | France, Norway, Spain, United Kingdom | 3,900 | 3,100 | 18 |
| 26-28.2.2010 | Winter Storm Xynthia, storm surge | France, Germany, Switzerland, Belgium, Spain, United Kingdom, Portugal, Netherlands | 6,100 | 3,100 | 65 |
| 24-27.1.2009 | Winter Storm Klaus | France, Spain, Italy | 5,100 | 3,000 | 26 |
| 7-9.1.2005 | Winter Storm Erwin (Gudrun) | Denmark, Estonia, Germany, Latvia, Lithuania, Sweden, United Kingdom, Finland | 5,800 | 2,600 | 18 |
| 27-28.12.1999 | Winter Storm Martin | France, Spain, Switzerland | 4,100 | 2,500 | 30 |
| 3-4.12.1999 | Winter Storm Anatol | United Kingdom, Denmark, Sweden, Germany, Latvia, Lithuania, Russia, Poland | 3,100 | 2,400 | 20 |
| 25-27.2.1990 | Winter Storm Vivian | United Kingdom, Germany, France, Netherlands, Belgium, Austria, Norway | 3,200 | 2,100 | 52 |

© 2013 Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research, NatCatSERVICE

As at: March 2013

TABLEAU 1 : LES 10 TEMPETES DE VENT HIVERNALES QUI ONT CAUSE LE PLUS DE PERTES AU COURS DES 30 DERNIERES ANNEES (SOURCE : MUNICH RE)

Le projet de recherche présenté dans ce manuscrit s'inscrit dans le cadre de la réglementation Solvabilité II et atteste de la volonté du groupe AXA d'accroître la connaissance du risque, ici le risque naturel de tempête de vent hivernale en Europe. Le choix de ce péril a été fait car c'est celui qui, pour l'instant, cause le plus de dommages en Europe. Au cours des trente dernières années, dix événements ont coûté chacun plus de 2 milliards d'euros de pertes économiques et assurantielles (Tableau 1). C'est également un des périls modélisés par le

Groupe qui pourrait être impacté par le changement climatique. Il s'agit donc d'un premier cas d'étude qui permettra d'entamer une réflexion sur les bonnes pratiques et les limitations de l'évaluation et de la gestion actuelles des risques, lorsque ceux-ci possèdent une variabilité temporelle et spatiale.

Pour l'instant, l'évaluation du risque au sein du Groupe est faite à partir des trois modèles CatNat dont la vision du risque de catastrophes naturelles s'appuie sur des événements historiques et donc passés. En effet, le catalogue de quelques dizaines de milliers d'événements, qui représente un large spectre des possibles de l'aléa physique, est généralement obtenu à partir de la modification, par des méthodes statistiques, des caractéristiques d'événements historiques (Lothar, Martin, Klaus et autres dans le cas des tempêtes en Europe). Chaque nouvel événement majeur pour les compagnies d'assurance est ajouté au fur et à mesure de leur occurrence et un nouveau catalogue d'événements est généré. Ce catalogue reflète donc le risque «tempête de vent hivernale en Europe» tel qu'il est à un moment donné et est fonction du passé. Or, dans le cadre d'un changement climatique, les caractéristiques des tempêtes hivernales en Europe pourraient évoluer. En effet, ces dernières sont généralement associées à des cyclones extratropicaux intenses qui pourraient être impactés par la diminution du gradient de température nord-sud ou l'augmentation de l'humidité (Ulbrich et al., 2009).

Un autre désavantage qui peut être formulé à l'encontre de certains modèles CatNat est l'emploi de méthodes statistiques pour générer des catalogues de plusieurs dizaines de milliers d'événements à partir de quelques centaines d'événements historiques. Ces événements historiques sont définis à partir soit de modèles de climat, soit d'observations de vent. Les méthodes statistiques employées consistent en des transformations plus ou moins complexes du champ de vent de surface de ces événements historiques. Il y a donc un risque de déconnection du péril par rapport à son origine physique. Cela pose alors la question de la crédibilité du catalogue : les conditions météorologiques associées à un événement généré par ces méthodes peuvent-elles réellement se réaliser ? De telles méthodes conduisent également à l'apparition de familles d'événements, c'est-à-dire que les événements issus d'un même événement historique se ressemblent. Les événements du catalogue ne sont donc pas indépendants ce qui peut conduire à une information redondante.

Pour conclure sur cette partie, le travail de recherche, du point de vue de l'entreprise, vise d'une part à approfondir la connaissance sur le risque des tempêtes de vent en Europe, en

étudiant non seulement la dynamique mais également la climatologie de ce phénomène. D'autre part, il s'agit d'explorer les capacités des modèles de climat global à reproduire ce risque dans un climat actuel et à modéliser ce risque dans des simulations projetant un climat différent. Les modèles de climat global représentent la dynamique couplée de l'atmosphère et des océans et sont pour l'instant principalement utilisés par la communauté scientifique. Ils pourraient pourtant être utilisés pour la génération des catalogues d'événements nécessaires à la modélisation des risques naturels. Le Chapitre 2 sera l'occasion de faire le point sur la bibliographie existante sur le sujet des tempêtes de vent en Europe et conduira à poser les problématiques de l'entreprise dans le contexte académique dans le Chapitre 3.

Gestion des sinistres en cas de catastrophe naturelle – Un point de vue opérationnel des tempêtes en Europe

Gestion de sinistres – Entre efficacité opérationnelle et satisfaction du client

L'efficacité de la gestion des compagnies d'assurance est estimée annuellement par le calcul du ratio combiné défini comme le rapport de la somme du coût des sinistres et des frais de gestion sur le total des primes encaissées ((Eq. 5) :

$$RC = \frac{\text{Coût des sinistres} + \text{Frais de gestion}}{\text{Primes encaissées}} \times 100. \quad (\text{Eq. 5})$$

Un ratio combiné inférieur à 100 signifie que les primes encaissées ont été suffisantes pour couvrir l'ensemble des sinistres et frais de gestion survenus au cours de l'année ; la compagnie d'assurance réalise donc un profit. Un ratio combiné supérieur à 100 souligne soit des primes trop faibles, soit une charge de sinistres exceptionnelle survenue au cours de l'année.

L'analyse des trois termes qui composent le ratio combiné mène à la conclusion que, dans le contexte actuel de crise économique, de restriction budgétaire et de compétitivité du marché de l'assurance, le coût des sinistres est un levier intéressant sur lequel vont se concentrer les compagnies d'assurance afin de conserver un ratio combiné inférieur à 100. En effet, étant donné le milieu saturé et concurrentiel dans lequel se trouvent les compagnies d'assurance, il est plus difficile pour ces dernières de jouer sur la tarification des primes au risque de perdre des clients. Par ailleurs, une grande partie des compagnies d'assurance ont déjà mis en place des plans de réduction des frais de gestion sur le long terme. Reste donc le coût des sinistres qui comprend l'indemnisation à l'assuré et les frais liés au traitement du dossier, et qui constitue à lui seul 80% des primes encaissées.

L'importance du département de gestion de sinistres d'une compagnie d'assurance a pendant longtemps été sous-estimée. Pourtant, de par l'interaction directe avec l'assuré, à un moment souvent délicat pour lui, la procédure d'indemnisation est un des moments cruciaux de la relation assureur-assuré, avec la souscription du contrat. Au cours de ces dernières années, les compagnies d'assurance ont pris conscience qu'une gestion de sinistres maîtrisée va dans le sens à la fois de la réduction des coûts imposée par la situation économique actuelle mais aussi du service et de l'amélioration de la relation au client. Ce dernier a d'ailleurs pris une place centrale dans la conception des stratégies des compagnies d'assurance.

La Figure 5 présente les résultats d'un sondage réalisé en 2009 sur la satisfaction des clients par rapport à la gestion des sinistres de leur compagnie d'assurance, mutuelle ou bancassureur. Une procédure d'indemnisation rapide ainsi que l'apport d'information de manière périodique sont pour l'instant des éléments négligés par l'ensemble des acteurs du marché de l'assurance et constituent donc des atouts majeurs pour les compagnies d'assurance permettant d'une part la réduction des coûts d'indemnisation et de traitement et d'autre part un service au client de qualité.

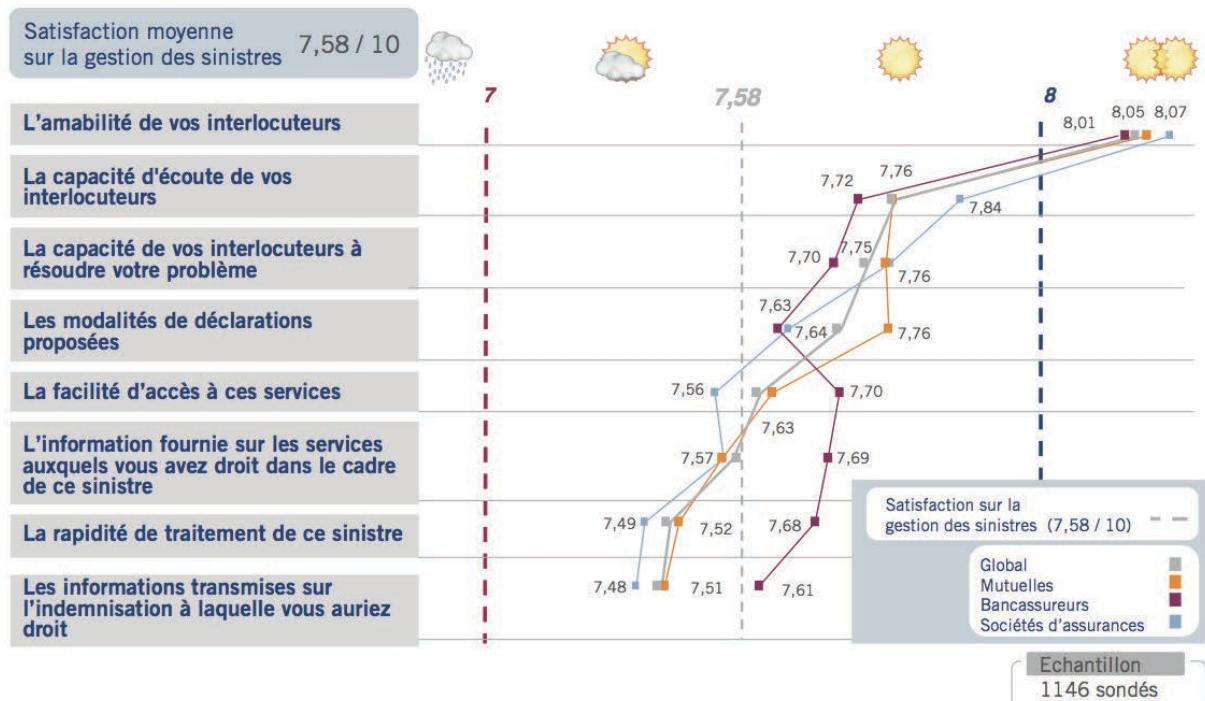


FIGURE 5 : GESTION DES SINISTRES – SATISFACTION DU CLIENT (SOURCE : ENQUETE SOLUCOM 2009)

Néanmoins, pour les compagnies d'assurance, l'indemnisation reste une procédure complexe, pouvant faire intervenir plusieurs acteurs pour un seul sinistre. Un exemple de procédure est schématisé dans la Figure 6. Une fois que l'assuré fait part de son sinistre au service client, preuves à l'appui, différentes équipes prennent en charge le dossier, vérifient qu'il ne s'agit pas d'une fraude et réalisent une estimation de la perte. L'assureur peut également faire appel à un expert pour constater les dégâts sur place. Les principaux facteurs d'un bon déroulement de l'indemnisation sont la communication, aussi bien interne entre les équipes qui s'occupent du dossier qu'externe envers le client, et la répartition du travail entre les différentes équipes du département de gestion de sinistres. Le développement des nouvelles technologiques

(internet, téléphones portables, applications) est un facteur important pour les compagnies d'assurance qui misent sur la déclaration de sinistres via différents canaux de communication et sur les outils informatiques permettant le traitement automatique des dossiers. La mise en place de ces systèmes demande un investissement initial qui pourra être absorbé sur le long-terme.

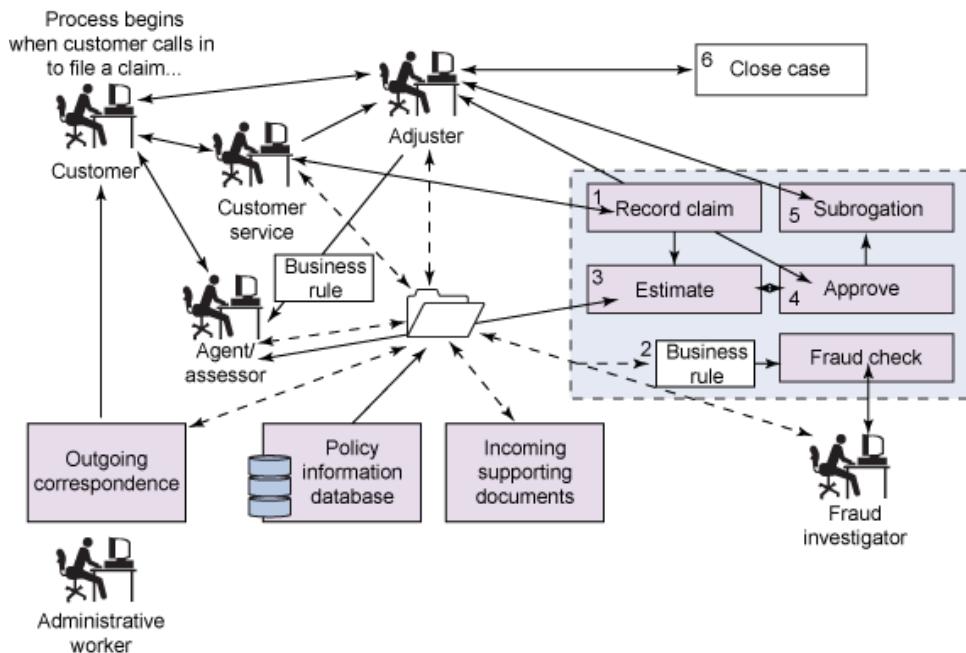


FIGURE 6 : PROCEDURE D'INDEMNISATION D'UN SINISTRE ET SES ACTEURS.

Gestion des sinistres en cas de catastrophes naturelles

Pour les départements de gestion de sinistres, l'occurrence d'une catastrophe naturelle est une situation de crise au cours de laquelle ils se voient confrontés à plusieurs milliers de déclarations de sinistres mettant à l'épreuve leur organisation et leurs outils de gestion. La procédure d'indemnisation se retrouve ralentie à plusieurs niveaux, notamment avec la difficulté pour l'assuré à déclarer son sinistre si les canaux usuels de déclaration ne sont plus accessibles, l'augmentation des tentatives de fraudes qui demande plus de vigilance et le besoin d'un nombre accru d'experts sur place. Le rôle social de l'assureur est d'autant plus crucial lors de la survenance de catastrophes naturelles que les indemnisations versées sont le point de départ de la reconstruction post-événement et permettent la reprise des activités.

Les catastrophes naturelles demandent donc une gestion particulière et l'établissement de plans d'urgence ou d'action signalant les points faibles en cas d'afflux de sinistres ainsi que l'ensemble des possibilités permettant d'adapter la procédure d'indemnisation à la situation de crise en cours. Cependant, même s'il existe des plans dédiés à la gestion de sinistres en de catastrophes naturelles, il reste difficile de prévoir l'imprévisible. En 2004, la saison des ouragans aux Etats-Unis a été particulièrement intense avec, en l'espace de six semaines, quatre ouragans dévastateurs balayant la Floride et les états du Golfe du Mexique. L'accumulation de catastrophes naturelles n'avait été prévue par aucun plan et a généré plusieurs millions de sinistres. Les départements de gestion de sinistres ont dû trouver des solutions au cours de la crise, comme recourir à des gestionnaires de sinistres à la retraite, et s'adapter au fur et à mesure. En France, ce sont les tempêtes Lothar et Martin, survenues en Décembre 1999 en moins de 72h d'écart, qui ont causé des dégâts considérables et qui ont été l'occasion de mettre en avant les déficits de la gestion de sinistres dans le cas d'événements extrêmes.

Problématique de l'entreprise – Outil de prévision de tempête de vent en Europe

La Figure 7 présente, pour l'entité AXA France, la somme par mois du nombre de sinistres ayant déclenché la garantie tempête¹ sur la période 2007-2012. Ce graphique permet de détecter l'ensemble des événements majeurs de cette période. En Janvier 2009, Klaus a frappé le sud de la France, causant de nombreux dégâts dans une zone vulnérable à ce risque. En Janvier 2010, Xynthia a traversé une bonne partie du territoire français, générant moins de dommages liés au vent que la tempête Klaus. Une grande partie des dégâts liés à la tempête Xynthia ont été engendrés par les crues sur le littoral. Les autres événements qui ressortent du graphique sont : Kyrill en Janvier 2007, Quinten en Février 2009, et Joaquin en Décembre 2011.

¹ La garantie tempête fait partie de tout contrat habitation et couvre tous les dommages causés par le vent (chute d'arbre, toit endommagé ou arraché, mobilier détérioré par la pluie suite à un dommage de toiture...).

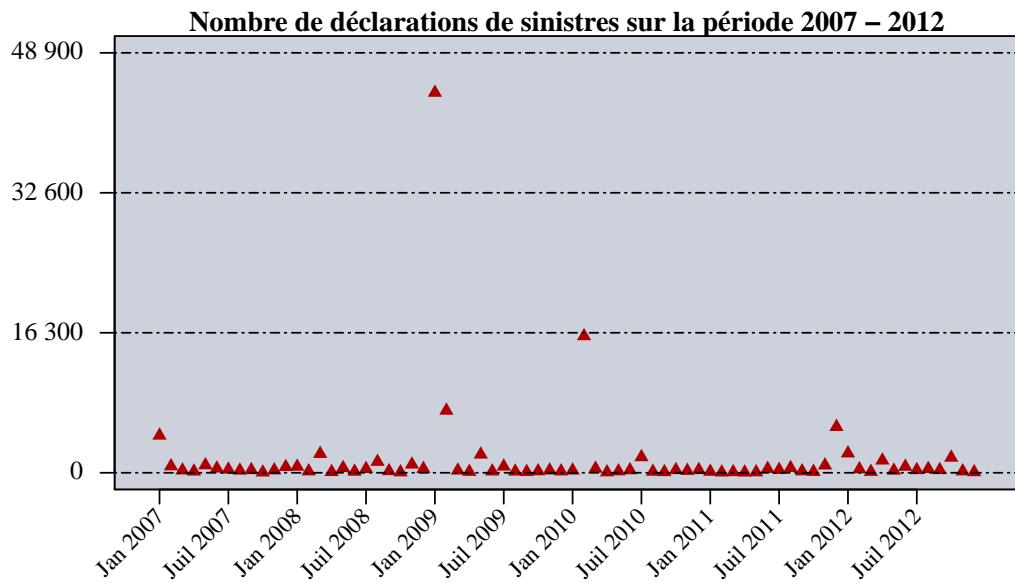


FIGURE 7 : NOMBRE DE SINISTRES PAR MOIS (SOURCE : AXA FRANCE)

Ces événements restent pour l'instant exceptionnels mais il faut tenir compte du contexte de croissance des richesses et des populations assurées, d'une vulnérabilité plus importante à ce risque et de l'impact potentiel d'un changement climatique sur l'intensité et la fréquence des risques climatiques tels que les tempêtes de vent en Europe. C'est pourquoi, l'accès à des prévisions météorologiques et l'investissement dans la conception d'outils d'alerte spécifiques sont des préoccupations récentes mais seront capitales à l'avenir. Ces outils d'alerte précoce permettront à l'assureur d'entamer un plan d'urgence plus tôt et de préserver son rôle économique et social grâce à une gestion proactive, efficace et rapide. A terme, ces outils pourraient également intégrer d'autres informations utiles afin de prévenir de la survenance de périls associés au passage d'une catastrophe naturelle tels que des incendies ou des inondations.

En 2010, le département de Gestion des Risques du Groupe a lancé un projet visant à l'élaboration d'un outil de détection de tempêtes de vent hivernales à fort potentiel d'impact en Europe. L'objectif de l'outil est de détecter les événements à partir de prévisions météorologiques et d'estimer une perte et un nombre de sinistres à partir des vitesses de vent fournies par les prévisions, avant d'émettre une alerte. Le développement de l'outil ainsi que sa mise en place opérationnelle m'ont été confiés au début de la thèse. Ce projet a été l'occasion de développer une approche différente de celle du travail de recherche et

d’investiguer une autre application des méthodes de détection des tempêtes de vent, à partir de prévisions météorologiques et non de données issues de modèles.

Pour l’entreprise, c’est un projet de recherche et développement innovant à forte valeur ajoutée pour deux raisons. Tout d’abord, c’est le premier outil de détection de tempête de vent entièrement internalisé au sein de l’entreprise. Les quelques compagnies d’assurance ayant développé ce type d’outil ont préféré sous-traiter la partie détection des événements à partir de prévisions météorologiques. Ensuite, le développement du module de l’outil qui permet le calcul de pertes a nécessité l’élaboration de courbes de vulnérabilité spécifique au péril « tempête de vent en Europe ». Ces courbes, qui permettent de transformer une vitesse de vent en un pourcentage de dommages, sont des éléments clé de la modélisation des catastrophes naturelles. Le développement de l’outil est présenté dans le Chapitre 6 et les résultats obtenus au cours de la première saison de l’outil sont présentés dans le Chapitre 7.

Chapitre 2 :

Les tempêtes de vent hivernales générant des dommages en Europe : une revue

| | |
|--|----|
| INTRODUCTION..... | 29 |
| Bilan radiatif global – Mécanismes de répartition de la chaleur..... | 29 |
| Cyclones extratropicaux, tempêtes de vent hivernales en Europe et génération de pertes | 31 |
| Représentation numérique de la dynamique de l'atmosphère et des océans..... | 32 |
| Modélisation du changement climatique – Projet CMIP5 | 33 |
| LES CYCLONES EXTRATROPICAUX – DYNAMIQUE | 35 |
| Observations – Modèles conceptuels et classification | 35 |
| Théorie – Approximation quasi-géostrophique – Instabilité barocline..... | 37 |
| Facteurs d'intensification des cyclones extratropicaux..... | 40 |
| Cyclones extratropicaux et facteurs d'intensification – Climat futur..... | 42 |
| LES CYCLONES EXTRATROPICAUX – VARIABILITE ET TENDANCES | 44 |
| Méthodes de détection et de suivi des cyclones extratropicaux..... | 44 |
| Variabilité et tendances des cyclones extratropicaux – Période actuelle | 45 |
| Variabilité et tendances des cyclones extratropicaux – Période future | 47 |
| CARACTERISATION DES TEMPETES DE VENT HIVERNALES EN EUROPE..... | 49 |
| CONCLUSION | 51 |

Introduction

Bilan radiatif global – Mécanismes de répartition de la chaleur

Le bilan radiatif global de la Terre correspond au bilan entre le flux d'énergie entrant provenant du Soleil et le flux de chaleur sortant émis par la Terre. Le graphique a) de la Figure 8 représente une version simplifiée des interactions de ces flux avec l'atmosphère. Le flux solaire incident est en partie réfléchi vers l'espace par effet d'albédo des nuages, de l'atmosphère et du sol (environ 30% du flux) et en partie absorbé par l'atmosphère (environ 20%). Le reste du flux solaire est finalement absorbé au sol par les terres et les océans. Le flux de chaleur émis par la Terre est en partie absorbé par l'atmosphère (effet de serre) et réémis vers la surface par les nuages. Le reste du flux de chaleur terrestre quitte l'atmosphère et correspond donc à une perte de chaleur vers l'espace.

Le graphique b) de la Figure 8 présente la moyenne zonale et annuelle des flux entrant (*Net Shortwave*, en bleu) et sortant (*Net Longwave*, en rouge). L'émission du flux de chaleur de la Terre est relativement uniforme à toutes les latitudes, avec une légère différence positive de 100 Watts.m⁻² entre l'Équateur et les Pôles. Par contre, l'énergie reçue du Soleil est répartie de manière plus inégale avec une différence positive de 250 Watts.m⁻² entre l'Équateur et les Pôles. Le bilan de ces deux flux d'énergie conduit donc à un surplus de chaleur aux Tropiques et un déficit de chaleur aux Pôles.

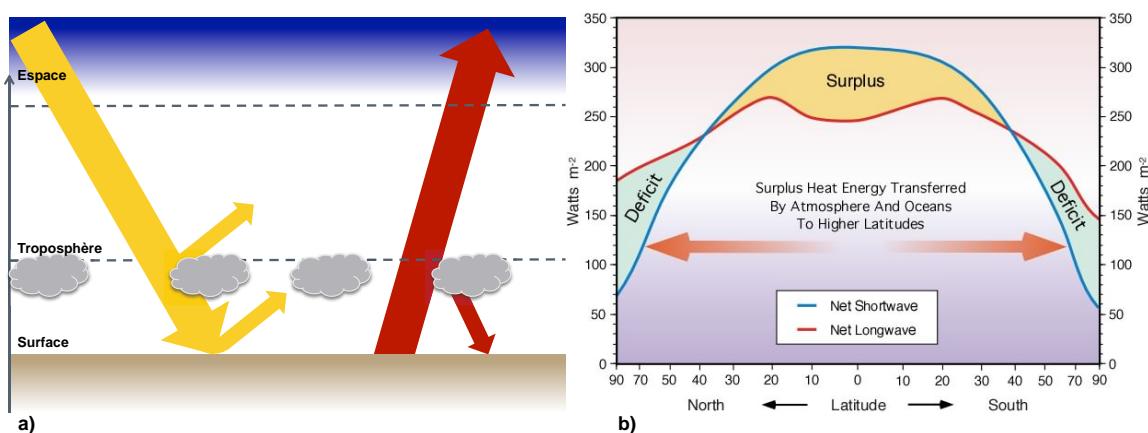


FIGURE 8 : GRAPHIQUE A : FLUX SOLAIRE INCIDENT EN JAUNE ET FLUX TERRESTRE EMIS EN ROUGE. GRAPHIQUE B : BILAN ENTRE LA MOYENNE DU FLUX ENTRANT NET (NET SHORTWAVE) ET DU FLUX SORTANT NET (NET LONGWAVE) ENTRE 90° SUD ET 90° NORD (SOURCE : ERBE).

Cette différence de température, ou gradient de température, entre l'Équateur et les Pôles est à l'origine de la mise en place de mécanismes atmosphériques et océaniques transportant la chaleur entre ces deux régions. Dans l'atmosphère, deux types de circulation sont responsables de la majorité de ce transport de chaleur. Le premier type de circulation se produit aux Tropiques entre 0° et $\pm 30^\circ$: il s'agit des cellules de Hadley (Figure 9). Les vents alizés des deux hémisphères convergent vers la zone intertropicale de convergence proche de l'Équateur et forcent l'air chaud et humide proche de la surface à s'élever dans l'atmosphère, transformant l'énergie cinétique fournie par les alizés en énergie potentielle. L'air chaud et humide est ensuite transporté jusqu'aux latitudes $\pm 30^\circ$ par les vents présents dans la haute troposphère où il est refroidi. Il redescend alors vers la surface et il est transporté vers l'Équateur par les vents de surface. Le transport ne se fait pas strictement le long de l'axe méridien mais il est dévié vers l'est, influencé par la force de Coriolis.

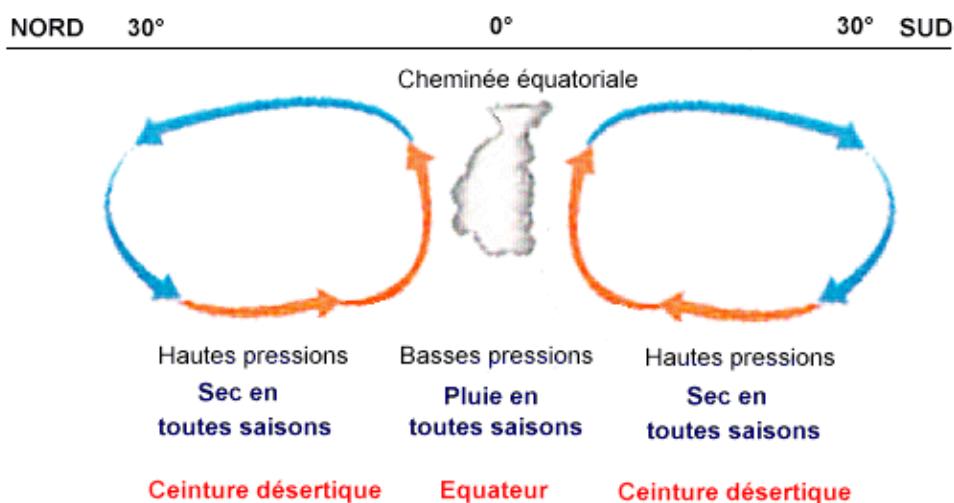


FIGURE 9 : COUPE MERIDIONALE (NORD-SUD) DU MECANISME DES CELLULES DE HADLEY. DE PART ET D'AUTRE DE L'EQUATEUR UN TRANSPORT VERTICAL DES MASSES D'AIR CHAUDES ET HUMIDES EST REALISE VERS LATITUDES $\pm 30^\circ$. L'AIR PLUS FROID DE CES LATITUDES EST ENSUITE TRANSPORTE VERS L'EQUATEUR. LA POSITION DES ZONES DE SUBSIDENCE ET D'ASCENDANCE VARIENT AU COURS DU TEMPS. IL S'AGIT ICI D'UN SCHEMA PRESENTANT L'ETAT MOYEN. (SOURCE : IFREMER)

Le second type de circulation a lieu aux moyennes latitudes entre $\pm 30^\circ$ et $\pm 70^\circ$ Nord : il s'agit d'une succession ininterrompue (ou onde) de tourbillons cycloniques et anticycloniques (Figure 10). Ce transport est horizontal : l'air chaud des Tropiques est advecté vers les Pôles tandis que l'air froid est advecté vers l'Équateur.

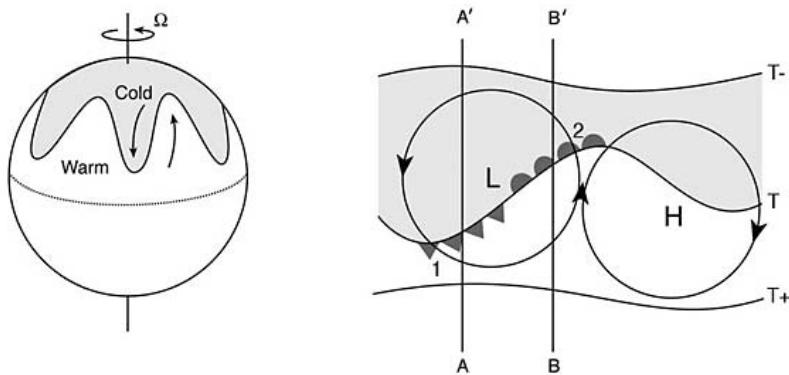


FIGURE 10 GAUCHE : SCHEMA DE L'ONDE QUI TRANSPORTE L'AIR CHAUD TROPICAL VERS LES POLES ET L'AIR FROID POLAIRE VERS LES TROPIQUES PAR ADVECTION. LE MEME TRANSPORT EXISTE AUX DEUX POLES. DROITE : CETTE ONDE EST CARACTERISEE PAR UNE SUCCESSION DE TOURBILLONS CYCLONIQUES ASSOCIES A UN MINIMUM DE PRESSION (OU L POUR LOW PRESSURE) ET DE TOURBILLONS ANTICYCLONIQUES ASSOCIES A UN MAXIMUM DE PRESSION (OU H POUR HIGH PRESSURE). (SOURCE : PAOC, MIT)

Cyclones extratropicaux, tempêtes de vent hivernales en Europe et génération de pertes

Les cyclones extratropicaux (CET) sont l'un des phénomènes atmosphériques caractéristiques des moyennes latitudes. Ce sont des systèmes dits synoptiques, c'est-à-dire que leur diamètre varie entre quelques centaines et quelques milliers de kilomètres et leur durée de vie est d'environ une semaine. En Europe, ils représentent un mécanisme majeur de transport de l'eau nécessaire aux écosystèmes, à la reconstitution des nappes phréatiques et aux activités humaines telles que l'agriculture. Ils sont aussi parfois responsables d'épisodes intenses de pluie et de vent conduisant à des inondations, à des dégâts liés au vent et à des marées de tempête.

La formation des CET nécessite la présence de zones atmosphériques associées à une forte différence de température, appelées fronts, et d'un vent intense en altitude, appelé courant-jet. Ces deux conditions se retrouvent surtout pendant la période d'Octobre à Mars, au moment où la différence de température entre l'Équateur et les Pôles est la plus forte. La Figure 11 représente le *storm track* sur les mois d'Octobre à Mars de la période 1979 – 2012 qui définit l'enveloppe dans laquelle la plupart des cyclones extratropicaux circulent. Cependant il arrive que certains de ces cyclones extratropicaux sortent de cette enveloppe et atteignent l'Europe Occidentale et Centrale parfois accompagnés de vents intenses, ou tempêtes de vent.

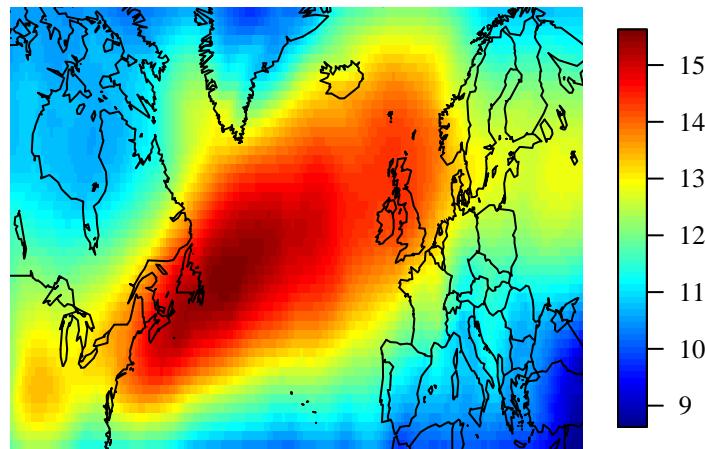


FIGURE 11 : ECART-TYPE DU VENT MERIDIEN SUR LES MOIS D'OCTOBRE A MARS ENTRE 1987 ET 2010 (ECHELLE : M /S) – DONNEES UTILISEES : ERA INTERIM

Il est important de noter que tous les cyclones extratropicaux n'atteignent pas l'Europe et ne génèrent pas des tempêtes de vent, de même que toutes les tempêtes de vent ne causent pas de dégâts. Il est donc crucial de connaître les facteurs aussi bien atmosphériques que socio-économiques qui favorisent d'une part l'intensification d'un cyclone extratropical conduisant à de forts vents de surface, et d'autre part la vulnérabilité de l'exposition au vent expliquant la génération de dommages économiques.

Représentation numérique de la dynamique de l'atmosphère et des océans

Un modèle de climat, ou modèle de circulation générale, calcule l'évolution tridimensionnelle de l'atmosphère et/ou de l'océan au cours du temps. Dans un modèle de climat global, l'atmosphère est divisée en boîtes à l'intérieur desquelles les équations du mouvement sont discrétisées et résolues. Chaque variable météorologique (pression, vitesse du vent, pluie...) est alors représentée par une valeur dans chacune des boîtes. Les processus physiques qui se déroulent à des échelles plus fines que celle de la boîte sont représentés implicitement. La performance des modèles de climat suit l'évolution technologique des superordinateurs, conduisant notamment à des boîtes plus petites et donc à une représentation plus complète des processus atmosphériques. La résolution spatiale d'un modèle est définie par le nombre de boîtes nécessaires pour couvrir la surface de la Terre : plus le nombre de boîtes est grand (petit), plus la résolution spatiale est fine (grossière).

Pour l'étude des processus atmosphériques, il existe deux grandes familles de modèles : les modèles de climat global atmosphériques et les modèles de climat couplés. Le premier type de modèle ne résout pas la dynamique propre de l'océan mais l'intègre sous la forme d'une série temporelle de la température de surface de la mer. Le second type prend en compte la dynamique de l'océan et l'interaction entre l'océan et l'atmosphère. Le travail présenté ici s'appuie sur les données des modèles couplés de climat global.

Un avantage d'utiliser les modèles de climat pour l'étude des tempêtes de vent en Europe est la possibilité d'analyser l'ensemble des facteurs qui contribuent ou empêchent leur formation. La résolution spatiale des nouvelles générations de modèles de climat, dont la largeur d'une boîte est comprise entre 60 et 200 kilomètres, reproduisent les CET de manière tout à fait satisfaisante et offre la possibilité d'étudier les CET et les tempêtes de vent qui leur sont associées (Harvey et al., 2013; Zappa et al., 2013a).

Modélisation du changement climatique – Projet CMIP5

Depuis les années 1990, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) coordonne de manière régulière un exercice international d'évaluation de l'état des connaissances sur le sujet de l'impact de l'évolution du climat sur les processus atmosphériques et océaniques, et l'impact sur les sociétés. Cet exercice consiste en une revue des articles publiés sur le sujet dans des journaux scientifiques.

Une grande partie des études menées repose sur l'utilisation d'ensembles de modèles de climat global développés par des institutions dans le monde entier qui participent à des projets d'inter-comparaison de modèles. Le dernier projet d'inter-comparaison des modèles couplés (CMIP5) est le résultat d'une coordination internationale entre les instituts climatiques qui utilisent leurs modèles dans le but d'évaluer l'impact du changement climatique (Taylor et al., 2012). Les données associées à ce projet ont été diffusées au cours de l'année 2013 en vue du 5^e rapport d'évaluation du GIEC (IPCC, 2013).

La modélisation d'un changement climatique s'effectue en introduisant dans un modèle de climat l'évolution des émissions de gaz à effet-de-serre et d'aérosols ayant un impact sur l'équilibre thermique de la Terre. Dans le cadre de CMIP5, plusieurs expériences ont été réalisées afin d'évaluer l'impact de différents facteurs sur le climat (Moss et. al, 2008). Deux expériences seront utilisées dans ce manuscrit:

-
1. Expérience *historical* : les conditions sur la composition atmosphérique en gaz-à-effet de serre dus aux émissions d'origine anthropogénique et volcanique, sur les émissions et les concentrations des aérosols, sur le forçage solaire et sur l'utilisation des terres suivent l'évolution observée sur la période 1850 – 2005.
 2. Experience *rcp4.5* : l'évolution de la composition atmosphérique en gaz à effet-de-serre et autres particules est projetée selon divers scénarios, définis à partir de la valeur potentielle du forçage radiatif d'ici 2100. Ainsi l'évolution des émissions associée au scénario *rcp4.5* conduit à un forçage radiatif de 4.5 W.m^{-2} à la fin du 21^e siècle.

Malgré l'existence de nombreuses incertitudes à la fois inhérentes aux modèles et dues aux projections de ce que les émissions futures pourraient être, les modèles de climat sont devenus des outils de plus en plus utilisés par la communauté scientifique.

L'objectif de ce chapitre est de présenter une revue de la bibliographie sur les tempêtes de vent hivernales générant des dommages en Europe. Les deux prochaines sections sont consacrées aux cyclones extratropicaux, à leur dynamique et à leur climatologie dans le climat actuel et dans des simulations du climat futur. La dernière section reprend la bibliographie spécifique aux tempêtes de vent et aux facteurs favorisant la génération de dégâts.

Les cyclones extratropicaux – Dynamique

L'étude de la dynamique des cyclones extratropicaux (CET) a été réalisée selon deux courants principaux, l'un utilisant principalement les observations pour en tirer des modèles conceptuels de cyclogenèse ou des classifications des CET, l'autre partant des équations de la dynamique et cherchant l'ensemble des solutions sous des hypothèses plus ou moins simplificatrices. En réalité, la délimitation entre ces deux courants n'est pas aussi nette et ils se sont mutuellement influencés faisant ainsi progresser la compréhension de la cyclogenèse.

Observations – Modèles conceptuels et classification

Une partie de l'étude de la formation et du développement des cyclones extratropicaux (CET) repose sur l'analyse d'observations météorologiques et l'élaboration de modèles conceptuels. Le premier modèle conceptuel de cyclogenèse est proposé par l'école Norvégienne et a été développé à partir de cartes synoptiques au début des années 1920 (Bjerknes and Solberg, 1922). Ce modèle décrit le cycle de vie d'un cyclone extratropical comme la séparation d'une structure frontale stationnaire en un front froid – séparant une masse d'air très froid d'une masse d'air chaud – et un front chaud – séparant une masse d'air chaud d'une masse d'air plus froide (Figure 12a, Phase I & II). Le front froid rattrape le front chaud et une situation d'occlusion apparaît qui marque la fin de la phase d'intensification du CET et sa disparition (Figure 12a, Phases III et IV).

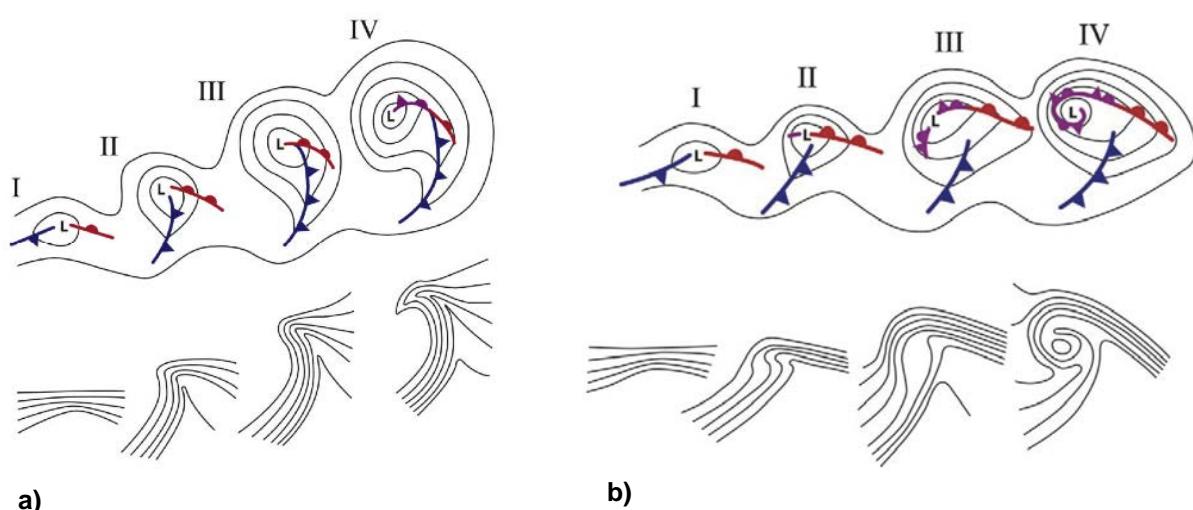


FIGURE 12 : A) MODELE CONCEPTUEL DE L'ECOLE NORVEGIENNE ; B) MODELE CONCEPTUEL DE SHAPIRO-KEYSER (SOURCE : SCHULTZ ET VAUGHAN, 2010)

Ce premier modèle conceptuel constitue une étape importante dans la compréhension de la dynamique des CET et introduit notamment la notion du rail des dépressions associé au front polaire. Cependant, ce premier modèle est déduit d'observations provenant de la région Scandinave, particulièrement impactée par ce type de cyclones. L'existence de CET en dehors de cette zone pose la question de la validité de ce modèle pour d'autres régions.

La découverte du courant-jet dans les années 1930 et la possibilité de récolter des observations à intervalles réguliers sur son état a permis à Sutcliffe et Petterssen de mettre en évidence le couplage entre ce vent fort d'altitude et la formation à la surface d'un cyclone extratropical (Sutcliffe, 1947; Petterssen, 1952). Petterssen and Smebye (1971) proposent une classification des CET en deux classes distinctes A et B, décrites par les conditions atmosphériques en altitude et à la surface. Les CET de type A sont caractérisés par une anomalie en altitude faible mais une anomalie forte en surface qui se creuse et induit alors une anomalie en altitude. Tout au long de la cyclogenèse, les deux anomalies ne se superposent pas et restent à une distance horizontale constante l'une de l'autre. Les CET de type B sont caractérisés par une forte anomalie en altitude et une faible anomalie en surface. Ces deux anomalies se rapprochent au cours de la cyclogenèse avant de former un vortex sur l'axe vertical au moment du maximum d'intensité. Dans les deux cas, la phase finale de la cyclogenèse correspond à une occlusion comme dans le modèle norvégien. Une troisième classe de cyclones a été ajoutée récemment pour prendre en compte le rôle de la chaleur latente dans le développement explosif de certains CET (Deveson et al., 2002).

Dans les années 1980, un accent est mis sur l'étude des cyclones extratropicaux qui se développent au-dessus des océans et dont la phase d'intensification est dite explosive (Sanders and Gyakum, 1980; Uccellini, 1990). De nouvelles campagnes de mesures sont alors réalisées au cours de la formation de ces systèmes dans les océans Atlantique et Pacifique. En 1990, un nouveau modèle conceptuel est proposé (Shapiro and Keyser, 1990). Les phases I et II sont similaires à celles du modèle norvégien sauf pour l'angle entre les deux fronts (Figure 12b). Au cours de la phase III et IV, la structure frontale présente une forme de T. Le front chaud s'enroule autour du centre de la dépression, entourant le front froid et menant à une situation de séclusion de la masse d'air chaud.

Théorie – Approximation quasi-géostrophique – Instabilité barocline

Une autre partie de l'étude de la dynamique des cyclones extratropicaux s'appuie sur les équations générales de la dynamique de l'atmosphère et leur linéarisation dans le cadre de l'approximation quasi-géostrophique. C'est dans les années 1940, avec l'application des méthodes mathématiques de linéarisation des équations, que Charney (1947) puis Eady (1949) développent la théorie de l'instabilité barocline qui correspond au mécanisme principal de cyclogenèse.

Avant d'introduire l'approximation quasi-géostrophique, il est important de présenter l'équilibre géostrophique : équilibre entre la force de Coriolis due à la rotation de la Terre et les forces horizontales de pression (Eq. 6) :

$$f_0 \vec{\mathbf{k}} \times \vec{\mathbf{v}} + \frac{1}{\rho_0} \nabla_h P = 0, \quad (\text{EQ. 6})$$

avec $\vec{\mathbf{v}}$ la vitesse du vent ; f_0 le paramètre de Coriolis ; $\vec{\nabla}_h P$ le gradient horizontal de pression ; ρ_0 la masse volumique de la parcelle fluide, supposée constante (approximation de Boussinesq).

Cet équilibre correspond à un état stationnaire de l'atmosphère et il est bien vérifié au-delà de la couche limite. Le champ de vent associé à cet équilibre, appelé vent géostrophique (Eq. 7), ne possède pas de composante verticale et sa divergence est nulle :

$$\vec{\mathbf{v}}_g = \frac{1}{\rho f_0} \vec{\mathbf{k}} \times \nabla_h P, \quad (\text{EQ. 7})$$

avec $\vec{\mathbf{v}}_g$ le vent géostrophique.

Dans le cadre de l'équilibre géostrophique, il n'y a donc pas de circulation verticale induite, pourtant nécessaire au développement de phénomènes comme les cyclones extratropicaux.

Afin de pouvoir générer une circulation verticale, le vent est divisé en un vent moyen, qui vérifie l'équilibre géostrophique, et une perturbation infinitésimale appelée composante agéostrophique ((Eq. 8) :

$$\vec{\mathbf{v}} = \vec{\mathbf{v}}_g + \vec{\mathbf{v}}_{ag} \text{ tel que } \|\vec{\mathbf{v}}_g\| \gg \|\vec{\mathbf{v}}_{ag}\|, \quad (\text{EQ. 8})$$

avec $\vec{\mathbf{v}}_g = \begin{pmatrix} u_g \\ v_g \\ 0 \end{pmatrix}$ et $\vec{\mathbf{v}}_{ag} = \begin{pmatrix} u_{ag} \\ v_{ag} \\ w \end{pmatrix}$.

C'est l'approximation quasi-géostrophique (QG) qui repose sur les hypothèses (i) de faibles variations du paramètre de Coriolis f et (ii) de profil vertical moyen constant. En introduisant ces deux composantes et en linéarisant les équations de la dynamique, certains termes peuvent être négligés. La mise en place de la circulation verticale peut être expliquée à partir des équations de la vorticité géostrophique ((Eq. 9) et de la continuité ((Eq. 10), simplifiées dans le cadre de l'approximation QG:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}_g \cdot \nabla_h \right) \zeta_g = -f \nabla_h \cdot \vec{v}_{ag}, \quad (\text{EQ. 9})$$

avec $\zeta_g = \frac{\partial v_g}{\partial x} - \frac{\partial u_g}{\partial y} + f$ la vorticité absolue géostrophique, $\frac{\partial v_g}{\partial x} - \frac{\partial u_g}{\partial y}$ la vorticité relative d'une parcelle d'air, f la vorticité planétaire,

$$\nabla_h \cdot \vec{v}_{ag} = -\frac{\partial w}{\partial z}. \quad (\text{EQ. 10})$$

Ces deux équations mettent en avant l'importance du rôle de la circulation agéostrophique dans le développement d'une circulation verticale et dans l'évolution de la vorticité géostrophique. Cette circulation verticale permet l'interaction entre la surface et les hautes altitudes : une anomalie en surface (en altitude) peut générer une anomalie en altitude (en surface), de même que deux anomalies, une en surface et une en altitude peuvent se coupler et conduire à un développement particulièrement intense et rapide. C'est le phénomène d'instabilité (ou interaction) barocline (Figure 13).

Une anomalie en altitude qui joue un rôle important dans la formation des CET intenses est la présence d'une zone de maximum de vent au sein du courant-jet. Un courant-jet apparaît lorsqu'il existe un gradient horizontal de température, de par l'équilibre du vent thermique ((Eq. 11) :

$$\vec{v}_g(p_1) - \vec{v}_g(p_0) = -\left(\frac{R}{f}\right) \int_{p_0}^{p_1} (\vec{k} \times \nabla_h T) \cdot d\log p, \quad (\text{EQ. 11})$$

avec \vec{v}_g le vent géostrophique ; f le paramètre de Coriolis ; R la constante des gaz parfaits ; $\nabla_h T$ le gradient horizontal de température.

Le vent n'est pas uniforme au sein d'un courant-jet et il existe des régions de maximum de vent, ce qui conduit à une accélération des parcelles d'air à l'entrée de ces zones et à une décélération à la sortie. Il existe plusieurs modèles de la dynamique associée à ces zones de maximum de vent (Keyser and Shapiro, 1986). Le plus simple est le modèle à « quatre

quadrants », dans lequel le courant-jet est supposé rectiligne, orienté par exemple d'est en ouest comme c'est le cas dans l'hémisphère Nord.

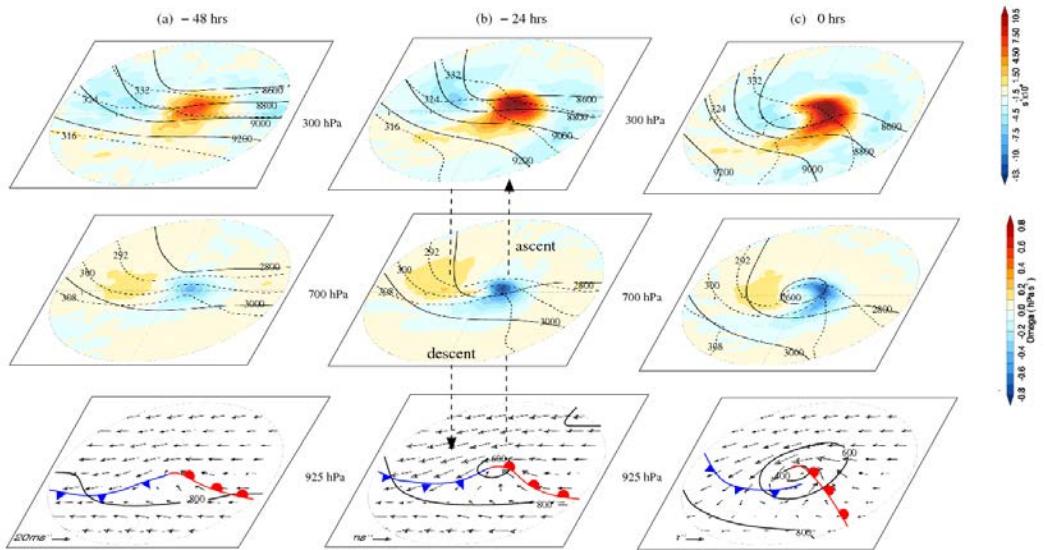


FIGURE 13 : MECANISME D'INSTABILITE BAROCLINE. 48H AVANT LE MAXIMUM D'INTENSITE, EXISTENCE D'ANOMALIES EN SURFACE ET EN ALTITUDE. 24H AVANT, INTERACTION ENTRE LES ANOMALIES DE SURFACE ET D'ALTITUDE, INTENSIFICATION DU SYSTEME. 0H, DEBUT DE L'OCLUSION MARQUANT LA FIN DE LA CYCLOGENÈSE. (SOURCE : EXTRATROPICAL CYCLONE ATLAS, UNIVERSITY OF READING)

Comme le montre l'(Eq. 12, la circulation horizontale agéostrophique est liée à l'accélération de l'écoulement.

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -f_0 \vec{k} \times \overrightarrow{v_{ag}}, \quad (\text{EQ. 12})$$

Ainsi, l'accélération d'est en ouest à l'entrée de la zone ($\frac{du}{dt} > 0$) est associée à un vent agéostrophique orienté vers le nord, tandis que la décélération en sortie ($\frac{du}{dt} < 0$) est associée à un vent agéostrophique orienté vers le sud (Figure 14a). Cette circulation agéostrophique induit des zones de convergence – donc un mouvement vertical descendant – à l'entrée droite et sortie gauche de la zone, et des zones de divergence – donc un mouvement vertical ascendant – à l'entrée gauche et sortie droite de la zone (Figure 14b).

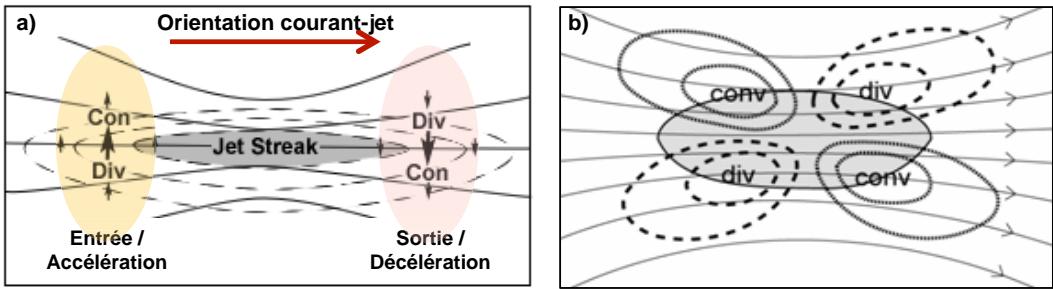


FIGURE 14 : MODELE SIMPLE DE LA DYNAMIQUE INDUIITE PAR LA PRESENCE D'UN MAXIMUM DE VENT (JET STREAK) AU SEIN D'UN COURANT-JET RECTILIGNE. GRAPHIQUE A) : CREATION D'UNE CIRCULATION AGEOSTROPHIQUE A L'ENTREE ET A LA SORTIE DE LA ZONE DU MAXIMUM DE VENT. GRAPHIQUE B) : ZONES DE DIVERGENCE ET DE CONVERGENCE ASSOCIEES A UN MOUVEMENT VERTICAL ASCENDANT (CONTOURS TIRETES) ET DESCENDANT (CONTOURS POINTILLES).

En réalité, le courant-jet est caractérisé par un mouvement ondulatoire dû aux ondes de Rossby. La présence de zones de maximum de vent induit des zones de d'ascendance et de descente mais qui ne sont pas organisées de la même manière qu'un courant-jet rectiligne (Keyser and Shapiro, 1986).

Les circulations verticales engendrées en altitude créent à la surface des circulations agéostrophique horizontales, d'après l'équation de continuité (Eq. 10). Ainsi une zone d'ascendance favorise le développement d'une circulation agéostrophique convergente en surface associée au creusement d'un centre de basse pression. Ces zones de maximum de vent, et plus particulièrement leur configuration, sont favorables au développement des cyclones extratropicaux.

Facteurs d'intensification des cyclones extratropicaux

L'étude des facteurs favorisant l'intensification des cyclones extratropicaux a été menée en considérant soit un groupe de cyclones extratropicaux caractérisés par une rapide décroissance de la pression au centre du système (Pinto et al., 2009), soit un groupe ou des cas particuliers de cyclones extratropicaux ayant causé des dommages importants en Europe de par les vents forts et les pluies intenses qui leur sont associés (Ulbrich et al., 2001; Wernli et al., 2002; Fink et al., 2009; Rivière et al., 2010; Liberato et al., 2011; Hanley and Caballero, 2012a; Liberato et al., 2013).

Dans tous les cas, il a été montré que l’Oscillation Nord-Atlantique (NAO) joue un rôle crucial. Cette dernière est une structure spatio-temporelle caractéristique de la région Nord Atlantique et est définie par le dipôle dépression d’Islande – anticyclone des Açores (Figure 15). La différence de pression entre ces deux structures est utilisée comme indice pour définir la phase de l’oscillation (négative ou positive) et son intensité (Figure 16). Au cours de la phase positive de la NAO, la dépression d’Islande se creuse tandis que l’anticyclone des Açores s’intensifie, favorisant le déplacement des masses d’air chaud et humide vers l’Europe du Nord responsables des hivers doux et pluvieux dans cette région. De plus, l’augmentation de la différence de pression entre la dépression d’Islande et l’anticyclone des Açores conduit à un renforcement du courant-jet et à son déplacement vers le Nord. En phase NAO négative, la pression de la dépression d’Islande augmente tandis que la pression de l’anticyclone des Açores diminue. La circulation est donc affaiblie et conduit à des hivers froids et secs en Europe du Nord, doux et pluvieux dans le bassin méditerranéen.

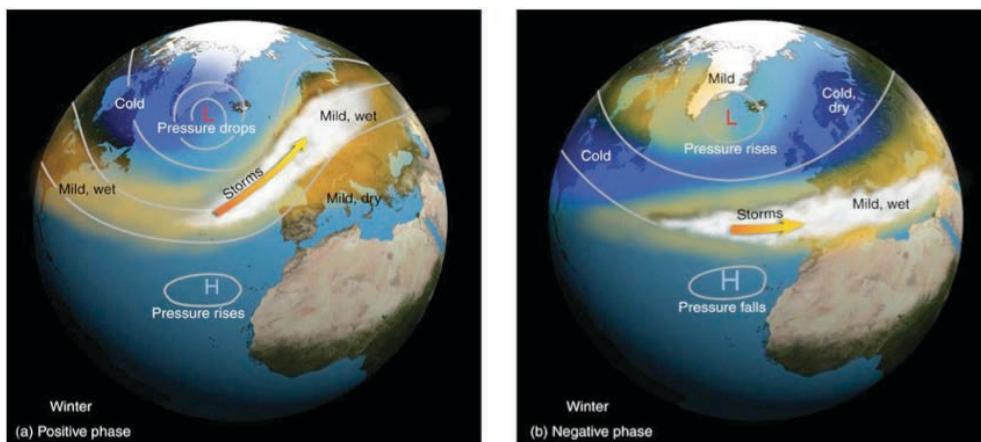


FIGURE 15 : OSCILLATION NORD ATLANTIQUE – PHASES POSITIVE ET NEGATIVE (SOURCE : THOMSON HIGHER EDUCATION)

La NAO est connue pour avoir un impact sur la position et l’orientation des trajectoires des cyclones extratropicaux. Dans une phase positive et particulièrement intense de la NAO, il a été montré que l’étape d’intensification est plus forte et dure plus longtemps ce qui conduit à des cyclones extratropicaux plus intenses et dont le cycle de vie et la trajectoire sont plus longs (Pinto et al., 2009). Une autre conséquence d’une forte phase positive de la NAO est l’existence d’un courant-jet particulièrement intense et orienté vers l’Europe qui guide les cyclones extratropicaux vers l’Europe Occidentale et Centrale. Ce résultat a été mis en

évidence dans les études de cyclones extratropicaux ayant causé d'importants dommages en Europe (Ulbrich et al., 2001; Wernli et al., 2002; Fink et al., 2009; Rivière et al., 2010; Hanley and Caballero, 2012a).

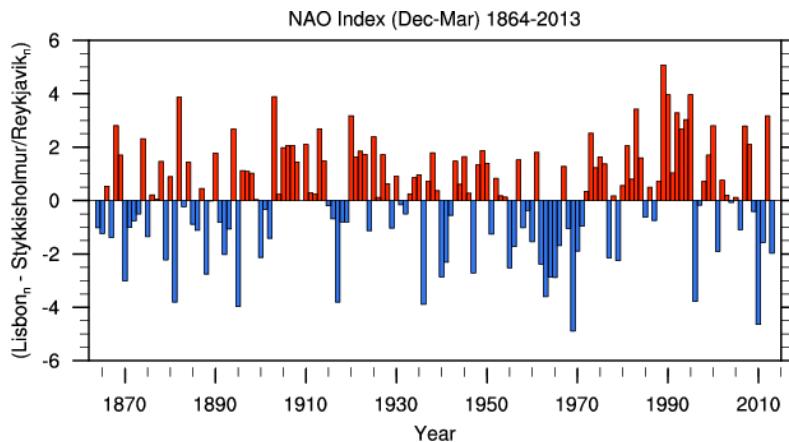


FIGURE 16 : INDICE DE L'OSCILLATION NORD ATLANTIQUE : DIFFÉRENCE DE PRESSION NORMALISÉE ENTRE LISBONNE ET REYKJAVIK. (SOURCE : HURRELL, JAMES & NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH STAFF (EDS). LAST MODIFIED 02 DEC 2013. "THE CLIMATE DATA GUIDE: HURRELL NORTH ATLANTIC OSCILLATION (NAO) INDEX (STATION-BASED)." RETRIEVED FROM [HTTPS://CLIMATEDATAGUIDE.UCAR.EDU/CLIMATE-DATA/HURRELL-NORTH-ATLANTIC-OSCILLATION-NAO-INDEX-STATION-BASED.](https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based.).)

Les études de cas particuliers ont trouvé d'autres facteurs qui expliquent au cas par cas les raisons de l'intensification des cyclones extratropicaux responsables de lourds dégâts en Europe. Notamment l'humidité de l'air joue un rôle crucial de fournisseur d'énergie par la libération de chaleur latente (Dacre and Gray, 2009; Fink et al., 2012, 2009), la présence d'un ou plusieurs maximum de vent dans le courant-jet et l'intrusion d'air froid et sec au début de la cyclogenèse ont également une influence importante sur le développement explosif des CET (Semple, 2003; Fink et al., 2009).

Cyclones extratropicaux et facteurs d'intensification – Climat futur

Une conclusion du dernier rapport du GIEC est l'existence d'effets opposés liés à l'augmentation des émissions et la difficulté à évaluer comment ces effets vont impacter les cyclones extratropicaux (Kirtman et al., 2013). Tout d'abord, l'augmentation de la température associée à l'augmentation des gaz à effet-de-serre conduit à l'intensification du gradient de température en altitude mais à l'affaiblissement de ce gradient à la surface. Par ailleurs, l'humidité contenue dans l'atmosphère devrait augmenter dans un climat plus chaud

et fournir aux cyclones extratropicaux une source d'énergie conséquente sous forme de chaleur latente pour leur développement et leur intensification. Cependant, l'augmentation de l'humidité dans l'atmosphère conduit également à un transport de l'énergie plus efficace vers les Pôles via les cellules de Hadley, diminuant ainsi en moyenne le nombre de cyclones extratropicaux.

Les cyclones extratropicaux – Variabilité et tendances

Cette section regroupe les résultats issues des études sur les variations à long terme des statistiques des CET. L'analyse de ces statistiques peut être menée selon les deux approches couramment utilisées en mécanique des fluides: l'approche Eulérienne et l'approche Lagrangienne. La caractérisation des cyclones extratropicaux dans le cas de l'approche Eulérienne se traduit par la moyenne ou la variance des champs de vent ou de pression sur de longues périodes (entre quelques jours et quelques années) afin d'obtenir des informations sur la localisation, l'intensité et la variabilité de l'activité cyclonique sous la forme du *storm track* (Figure 11). L'application de l'approche Lagrangienne consiste à suivre les cyclones extratropicaux sur l'ensemble de leur cycle de vie et à retirer à chaque pas de temps des informations sur l'intensité, les propriétés physiques et la structure verticale.

Méthodes de détection et de suivi des cyclones extratropicaux

Avec le développement des modèles de circulation générale atmosphérique et l'apparition des données numériques, des méthodes automatiques de détection et de suivi des cyclones extratropicaux ont été développées pour remplacer les méthodes manuelles utilisées avec les cartes synoptiques ou autres données issues d'observations (Ulbrich et al., 2009). L'objectif des études utilisant ces méthodes est l'analyse de la climatologie, de la variabilité et des tendances des caractéristiques des cyclones extratropicaux aussi bien dans des modélisations du climat actuel que dans des projections du climat futur.

Dans un premier temps, les méthodes automatiques sont le reflet des méthodes manuelles. La variable utilisée est la pression de surface et un centre de CET est défini comme un minimum local de pression (Le Treut and Kalnay, 1990; Murray and Simmonds, 1991; Blender et al., 1997 ; Pinto et al., 2005; Hanley and Caballero, 2012b), avec parfois des conditions supplémentaires comme l'existence d'une isobare fermée ou d'un maximum du Laplacien de la pression (équivalent de la vorticité relative). Puis, avec l'évolution des modèles de circulation générale, la vorticité relative au niveau 850 hPa a été utilisée comme variable principale de détection (Hodges, 1994; Hoskins and Hodges, 2002; Hodges et al., 2003).

Le choix de la variable de détection dépend de l'objectif de l'analyse et impacte la conception de la méthode (Ulbrich et al., 2009). En effet, les méthodes utilisant la vorticité relative à 850 hPa détectent plus de petits systèmes et détectent les CET plus tôt dans leur cycle de vie qu'une méthode utilisant la pression comme variable principale. Cependant, la vorticité

relative est un champ sensible à la résolution spatiale, c'est-à-dire que la structure du champ varie avec la résolution spatiale du modèle. Cela a pour conséquence l'apparition de plus fines structures qui ne sont pas forcément associées à un CET et constituent alors un bruit pour les méthodes de détection. Pour pallier à cet effet, les méthodes utilisant la vorticité relative commencent par filtrer le champ afin d'éliminer les petites structures (Hoskins and Hodges, 2002).

L'utilisation de la pression demande également certains traitements du champ initial. Tout d'abord, dans les modèles, les valeurs de la pression au niveau de la mer sont généralement extrapolées au-dessus des zones montagneuses et peuvent alors ne pas être représentatives de la réalité. Certaines méthodes rejettent les centres détectés au-dessus d'une certaine altitude, généralement 1000 m ou 1500 m (Murray and Simmonds, 1991; Pinto et al., 2005; Hanley and Caballero, 2012b). Deuxièmement, les CET évoluent dans un environnement grande échelle dont la signature dans le champ de pression peut les masquer. Un filtre spatial ou temporel est souvent utilisé pour faire ressortir les CET et enlever les biais liés aux variations à plus grande échelle de la pression à la surface de la mer (Hoskins and Hodges, 2002).

L'ensemble des choix réalisés au cours de la conception d'une méthode de détection et de suivi des CET rend chaque méthode unique et les résultats issus de l'application d'une méthode dépendent largement de celle-ci. Une étude d'inter-comparaison de plusieurs méthodes existantes a été menée (Neu et al., 2013). Les résultats ont montré que l'évolution du nombre de CET est bien capturé par les différentes méthodes, bien que la valeur de ce nombre diverge selon les méthodes. Les résultats les plus robustes sont obtenus pour les CET intenses qui présente une signature distincte dans les différentes variables de détection utilisées par les méthodes.

Variabilité et tendances des cyclones extratropicaux – Période actuelle

Les données disponibles pour étudier le passé récent sont les observations des stations météorologiques, qui peuvent offrir des relevés remontant jusqu'au début du 20^{ème} siècle, et les réanalyses, assimilations d'observations au sein d'un modèle de circulation générale. Les observations sont les données qui sont le plus proche de la réalité. Cependant, des biais peuvent exister et conduire à l'apparition de tendances fortuites. Par exemple, les observations sont particulièrement sensibles aux méthodes de mesures et à la position des outils de mesures qui peuvent varier dans le temps. Pour ce qui est des réanalyses, elles offrent des données réparties de manière homogène sur l'ensemble du globe. Cependant, elles aussi sont

dépendantes des techniques de mesures et de la qualité des observations. La manière d'assimiler les données a aussi évolué au cours du temps, ce qui a eu un impact sur la qualité des données issues des réanalyses et a pu donné lieu à l'apparition de fausses tendances.

Les variables issues des stations météorologiques et qui sont utilisées pour évaluer l'activité des cyclones extratropicaux sont la pression et le vent. Toutefois, c'est généralement la pression qui est utilisée car sa mesure est moins sensible aux conditions environnantes que la mesure du vent. Par ailleurs, il est possible d'obtenir une approximation de la vitesse du vent à partir du gradient de pression. Un projet réalisé à la fin du 20^{ème} siècle a montré que le maximum d'activité a été atteint dans les années 1990, époque où les tempêtes Daria, Herta, Vivian et Wiebke ont touché l'Europe en l'espace d'un mois (The WASA Group, 1998). Il a également été montré que les valeurs atteintes au début du 21^{ème} siècle sont équivalentes à celles observées à la fin du 19^{ème} siècle (The WASA Group, 1998; Matulla et al., 2008; Wang et al., 2009). Il faut toutefois noter que la mesure de la variabilité et des tendances est fortement dépendante de la longueur de la période d'enregistrement et de la fenêtre spatiale considérée. Ainsi des études réalisées sur des périodes plus courtes et sur l'échelle d'un pays, ne mènent pas toujours aux mêmes conclusions que les études réalisées à partir de stations réparties sur l'ensemble de la région Nord Atlantique – Europe (Alexander, 2005; Smits et al., 2005).

Les études de l'activité des CET à partir de réanalyses retrouvent la même variabilité que celle observée (Leckebusch et al., 2008; Donat et al., 2011b; Tilinina et al., 2013). Pour ce qui est des résultats obtenus à l'aide des méthodes de détection et de suivi des CET, ils mettent en évidence la capacité des réanalyses à reproduire les systèmes petites échelles et leur intensité. Ainsi, plus la résolution spatiale est fine, meilleure est la reproduction de ces systèmes (Akperov and Mokhov, 2010; Hodges et al., 2011; Tilinina et al., 2013).

La variété de données, de variables et de méthodes utilisées conduit à une variété de résultats sur les tendances observées qui sont parfois difficiles à interpréter et à comparer. Cela conduit à un niveau de confiance faible quant à ces résultats (Hartmann et al., 2013). Cependant, une conclusion qui peut être tirée de l'ensemble de ces études est la variabilité importante qui caractérise ce phénomène et qui peut être plus grande que les changements induits par un changement des conditions atmosphériques.

Variabilité et tendances des cyclones extratropicaux – Période future

Les études sur l'évolution des caractéristiques des cyclones extratropicaux dans un climat futur s'appuient sur les données issues de modèles de climat global (GCM). Ces modèles sont forcés par des conditions sur la composition de l'atmosphère en gaz-à-effet de serre d'origine anthropique ou volcanique, en aérosols et sur l'utilisation des sols, qui reproduisent le passé ou simulent des conditions futures possibles. Les données issues des simulations réalisées à partir de conditions historiques sont comparées aux données d'observations ou de réanalyses afin d'évaluer la capacité des GCM à reproduire des phénomènes donnés comme les CET. Les données issues des simulations s'appuyant sur des conditions futures offrent ensuite la possibilité d'évaluer l'impact potentiel d'un changement de la composition atmosphérique sur les phénomènes étudiés.

Au cours des trente dernières années, plusieurs exercices de ce type ont été menés, généralement associés à la production des rapports du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. L'étude des cyclones extratropicaux dans le contexte de changement climatique n'a été rendue possible qu'au cours des derniers exercices en raison de l'amélioration de la résolution spatiale des GCM utilisés (Ulbrich et al., 2009; Catto et al., 2011). Dans cette revue de littérature, seuls les résultats issus des projets CMIP3 (2005) et CMIP5 (2013) seront évoqués. Entre ces deux projets, la modélisation des processus physiques a évolué et la résolution spatiale horizontale et verticale s'est améliorée, ce qui peut rendre difficile l'interprétation des résultats et l'évolution des conclusions d'un exercice à l'autre (Chang et al., 2012; Zappa et al., 2013a). A cela s'ajoute par ailleurs les différentes métriques utilisées pour étudier la variabilité des CET, selon l'approche eulérienne ou lagrangienne choisie, et qui peuvent mener à des résultats différents.

Les données issues des simulations historiques sont d'abord comparées aux réanalyses. Les modèles de CMIP3 et CMIP5 présentent un *storm track* Nord-Atlantique pendant les mois d'hiver plus au sud, plus zonal et plus faible que celui des réanalyses (Ulbrich et al., 2008; Chang et al., 2012; Zappa et al., 2013a). Ces biais sont toutefois plus faibles dans les modèles de CMIP5. En ce qui concerne les résultats obtenus à partir des simulations de projections du projet CMIP5, il y a une dissociation entre les effets observés dans la haute troposphère (intensification et déplacement vers le nord du *storm track*) et dans la basse troposphère (diminution d'intensité). Le nombre de cyclones extratropicaux extrêmes, définis par une anomalie de pression inférieure à -40 hPa, et de systèmes de type « bombes » diminue (Chang et al., 2012). Les résultats restent cependant sensibles à la métrique utilisée pour étudier la

variabilité des CET (Harvey et al., 2012). Une étude comparant les résultats de plusieurs méthodes de détection et suivi des cyclones extratropicaux appliquées aux données issues d'une simulation future d'un seul modèle a trouvé une augmentation du nombre de CET intenses dans l'hémisphère Nord (Ulbrich et al., 2013).

Au vu des effets opposés engendrés par l'augmentation de la température, discutés dans la section dynamique de ce chapitre, il est difficile d'évaluer les potentielles évolutions des CET. La conclusion du dernier rapport du GIEC est une confiance faible quant aux changements dans les *storm tracks* de l'hémisphère nord dans les projections futures (Collins et al., 2013).

Caractérisation des tempêtes de vent hivernales en Europe

Les tempêtes de vent hivernales en Europe sont associées aux cyclones extratropicaux qui se développent dans le bassin Nord-Atlantique et atteignent l'Europe, accompagnés de vents particulièrement intenses. Ces événements ne sont pas nécessairement associés aux CET les plus intenses. Il est donc nécessaire de définir une métrique pour extraire ces événements et faciliter l'étude de leurs caractéristiques, en particulier leur intensité et leur fréquence. Les études sur les tempêtes de vent sont généralement dissociées des études sur les CET, à l'exception d'une analyse sur la relation entre les cyclones et les tempêtes de vent extrêmes en Europe dans le contexte du changement climatique (Leckebusch and Ulbrich, 2004).

Une forte demande de la part des (ré)assureurs pour l'étude de l'évolution de ce risque dans le climat futur a conduit à la définition d'indices caractérisant le potentiel de dégâts dus au vent à partir des données de vitesses de vent disponibles. Pour se rapprocher des dommages et d'une valeur de perte, certaines études intègrent la densité de population comme proxy de l'exposition au risque. La première étude d'estimation de pertes associées aux tempêtes de vent en Europe a été réalisée à partir d'observations des rafales de vent issues de stations météorologiques (Klawa and Ulbrich, 2003). Le proxy utilisé combine le ratio de la vitesse de vent sur son 98^e percentile et la densité de population. Le proxy de pertes a ensuite été adapté pour les données issues de réanalyses ou de modèles de climat global (Heneka et al., 2006; Leckebusch et al., 2007; Donat et al., 2011a). La conclusion principale de ces études est l'augmentation probable des pertes associées aux tempêtes en Europe si aucune mesure d'adaptation n'est mise en place. Cependant, il est délicat de conclure quant à l'évolution des pertes dans le futur étant donné les incertitudes liées non seulement aux modèles de climat et aux projections mais également à l'évolution de la population assurée. D'autres indices sont apparus prenant en compte la durée et l'extension d'un événement ou utilisant la moyenne ou les percentiles de la distribution du vent (Leckebusch et al., 2008; Della-Marta et al., 2009, 2010; Pinto et al., 2012). Ces indices permettent d'étudier les tempêtes de vent en Europe d'un point de vue physique mais restent dépendants de la résolution spatiale des modèles et de leur capacité à reproduire les champs de vent à la surface, et plus particulièrement les rafales de vent.

Par ailleurs, les tendances croissantes de pertes générées par les tempêtes de vent en Europe au cours des dernières décennies pourraient être dues à l'augmentation de la vulnérabilité des populations et des environnements naturels, plus qu'à l'intensification des vents de surface.

En effet, la croissance des populations assurées dans des régions exposées à ce risque ainsi que l'augmentation des richesses peut expliquer l'augmentation des pertes économiques associées aux tempêtes de vent en Europe (Berz, 2005; Barredo, 2010). Un climat plus chaud peut également avoir un impact sur les environnements naturels, les rendant ainsi plus vulnérables aux tempêtes. Par exemple, des conditions climatiques plus chaudes et plus humides ont été observées en Suisse au cours des dernières années, impactant la qualité des sols et favorisant les dommages forestiers au cours des événements de tempêtes de vent (Usbeck et al., 2010). D'après le rapport spécial du GIEC paru en 2012, il est probable que les pertes générées par les cyclones extratropicaux, et les événements de vent et de pluies qui les accompagnent, augmentent dans le futur (IPCC, 2012).

Conclusion

Cette revue de littérature a permis de présenter l'origine des cyclones extratropicaux ainsi que leur mécanisme de cyclogenèse. Les conditions atmosphériques associées aux phases positives de l'Oscillation Nord-Atlantique constituent un environnement favorable pour le développement des cyclones extratropicaux intenses. Au cours de ces phases, le courant-jet est particulièrement intense et étendu vers l'Europe, entraînant les cyclones extratropicaux dans cette direction. D'autres facteurs comme un pourcentage élevé d'humidité relative peuvent aussi favoriser le développement explosif d'un CET au cas par cas.

Les études sur la mesure de l'activité des cyclones extratropicaux à partir d'observations et de réanalyses ont mis en évidence la grande variabilité de cette activité, avec un minimum vers 1960 et un maximum dans les années 1990. Pour ce qui est de l'évolution des tempêtes de vent en Europe, l'analyse simple des données de pertes pourrait conduire à la conclusion d'une croissance du nombre d'événements intenses alors qu'il s'agit plutôt d'une croissance de la vulnérabilité des populations et des milieux naturels.

Les méthodes de détection et de suivi des CET sont pour la plupart séparées des études sur les tempêtes de vent en Europe. Les premières utilisent la pression au niveau de la mer et la vorticité relative à 850 hPa comme variable de détection et définissent les CETs extrêmes par rapport au minimum/maximum atteint au cours de la durée de vie ou du taux de creusement de la dépression. Les méthodes de caractérisation des tempêtes de vent en Europe utilisent généralement un le ratio du vent de surface par rapport à son 98^e percentile pour extraire les événements les plus intenses.

Bien que les modèles de climat reproduisent en moyenne les caractéristiques des cyclones extratropicaux dans la période actuelle, certains biais existent et peuvent s'amplifier au cours des simulations de projections. Les impacts potentiels du changement climatique sont le déplacement et une atténuation du *storm track* vers le Pôle et un nombre de CET intenses plus faible. Aucune étude n'a été pour l'instant réalisée sur les tempêtes de vent en Europe dans les simulations des modèles CMIP5.

Chapitre 3 :

Problématiques du projet de thèse

| | |
|--|----|
| INTRODUCTION..... | 55 |
| QUANTIFICATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES TEMPETES DE VENT | |
| HIVERNALES A FORT POTENTIEL D'IMPACTS EN EUROPE : UN ENJEU MAJEUR POUR LES | |
| ASSUREURS..... | 56 |
| Objectif du travail de recherche – Valeur ajoutée pour l'entreprise et la communauté | |
| scientifique | 56 |
| Plan du travail de recherche | 57 |
| DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DETECTION DES TEMPETES DE VENT HIVERNALES EN EUROPE | |
| ET DE PREVISION DE PERTES | 59 |
| Objectif du projet opérationnel – Valeur ajoutée pour l'entreprise et la communauté | |
| scientifique | 59 |
| Plan du travail opérationnel..... | 60 |
| CALENDRIER DES PROJETS..... | 61 |
| Calendrier du projet de recherche | 61 |
| Calendrier du projet opérationnel..... | 62 |
| PLAN DU MANUSCRIT | 64 |

Introduction

L'ensemble du travail réalisé au cours du doctorat porte sur les tempêtes de vent hivernales à fort potentiel d'impact en Europe. La définition de « potentiel d'impact » a occupé une place importante dans ce travail et a été fonction non seulement des problématiques spécifiques à chacun des deux projets mais aussi des données disponibles.

Dans le cadre du projet de recherche, l'objectif est de quantifier l'impact du changement climatique sur les tempêtes de vent hivernales à fort potentiel d'impact en Europe. Les données utilisées pour répondre à cet objectif sont issues des modèles de climat participant au projet CMIP5 et intègrent des incertitudes liées d'une part à la reproduction de certaines variables comme le vent de surface et d'autre part aux hypothèses réalisées sur l'évolution du climat futur. L'estimation du potentiel d'impact d'un événement à l'aide d'un indice ou du calcul de pertes impliquant des hypothèses sur l'évolution de l'exposition devient délicate et ajoute de l'incertitude à celle des données issues des modèles. L'enjeu majeur du projet de recherche a donc été de caractériser le potentiel de dommage d'une tempête de vent à partir de variables météorologiques et d'évaluer l'intensité des événements recherchés à partir de séries temporelles extraites des modèles de climat global.

L'objectif du projet opérationnel est d'estimer la perte potentielle associée à une tempête de vent à venir. Les données utilisées pour ce travail sont des prévisions météorologiques, actualisées toutes les six heures. Ces données sont fournies par le modèle Global Forecast System (GFS) du centre américain de prévisions météorologiques (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) et ont une résolution spatiale de 50 km. De plus, la variable rafale de vent, qui est une meilleure variable que le vent à la surface pour le calcul de pertes, est disponible comme sortie standard du modèle. L'utilisation de ces données a conduit à des problématiques différentes que celles rencontrées pour le projet de thèse, notamment pour ce qui est de la gestion du flux d'information toutes les 6 heures. Par ailleurs, la volonté de calculer une perte a soulevé un deuxième enjeu, celui de développer des courbes de vulnérabilité permettant de traduire une vitesse de vent en une valeur de perte. Ce type d'étude n'avait encore jamais été réalisée au sein de l'entreprise.

Les deux premières sections de ce chapitre présentent les objectifs et le plan de travail pour chacun des projets. La troisième sections expose le calendrier des deux projets et le plan du manuscrit est annoncé dans la dernière section.

Quantification de l'impact du changement climatique sur les tempêtes de vent hivernales à fort potentiel d'impacts en Europe : un enjeu majeur pour les assureurs

Objectif du travail de recherche – Valeur ajoutée pour l'entreprise et la communauté scientifique

L'objectif général du travail de recherche est d'apporter une vision moyen-terme de ce que pourraient être les tempêtes de vent hivernales en Europe au cours du 21^e siècle. Ce travail vient compléter la vision pour l'instant principalement court-terme du risque proposée par les modèles de catastrophes naturelles, utilisés par les (ré)assureurs pour connaître le coût du risque sur leur portefeuille.

Du point de vue de l'entreprise, il s'agit d'appréhender et d'intégrer des outils pour l'instant principalement utilisés par la communauté scientifique. Une grande partie du travail repose sur les données issues des modèles de climat global participant au projet CMIP5. Les modèles de climat global sont une représentation discrétisée de l'atmosphère et de l'océan dans laquelle les équations de la physique sont résolues à plusieurs pas de temps successifs. La discrétisation joue un rôle important : plus elle est fine, plus des processus atmosphériques de petite échelle peuvent être pris en compte. L'avantage majeur des modèles de climat pour l'étude des risques liés au climat est l'opportunité d'analyser l'ensemble des facteurs contribuant ou défavorisant le développement des phénomènes atmosphériques responsables des impacts sur la société. L'amélioration constante des modèles de climat au cours des dernières décennies en fait désormais des outils potentiels pour la génération de catalogues d'événements.

D'un point de vue académique, le travail de recherche présenté dans ce manuscrit propose une nouvelle méthode pour définir le potentiel de dommages associés à une tempête de vent en Europe. Jusqu'à présent, les études sur les tempêtes en Europe et leur potentiel de génération de dommages n'utilisent que la variable de vent de surface parce que physiquement la plus proche des dégâts. Cependant, le calcul des pertes n'est pas évident et les indices proposés pour le moment dans la littérature ne permettent d'avoir qu'un ordre de grandeur approximatif de la perte réelle d'un événement. Les sources d'incertitudes présentes dans ce type de formule vient d'une part de la représentation du vent, dépendante du modèle considéré, et d'autre part de l'information sur l'exposition, qui ne peut être résumée qu'à une densité de population. L'avantage de l'utilisation de ce type d'indice est d'une part de pouvoir comparer

sa valeur ou son rang aux valeurs de pertes assurées et d'autre part la possibilité d'associer une période de retour aux événements détectés. Cependant, le cadre d'une étude multimodèles, courante lors de l'étude de l'impact du changement climatique, pose la question de la possibilité de comparer ces indices et la qualité des résultats qui en découlent. Par exemple, deux événements de valeurs d'indice comparables mais issus de deux modèles différents pourraient être associés à des périodes de retour très différentes, rendant l'interprétation délicate.

L'idée originale développée au cours du projet est l'utilisation de plusieurs variables capturant différentes échelles spatio-temporelles et prenant en compte la relation entre plusieurs variables caractéristiques d'un même cyclone extratropical. L'objectif n'est donc plus de caractériser un événement par une valeur mais de faire ressortir l'ensemble des événements partageant des caractéristiques similaires. Les informations sur le nombre de ces événements et leur intensité peuvent apporter des réponses suffisantes aux compagnies d'assurance sur l'évolution de ce risque dans un climat dont les conditions atmosphériques sont différentes de celles d'aujourd'hui.

Plan du travail de recherche

La première étape du projet de recherche a été de développer une méthode de détection des tempêtes de vent associé à des cyclones extratropicaux intense et ayant un potentiel de dommages élevé. Dix événements qui ont causé des dégâts majeurs au cours des trente dernières années ont été analysés afin de définir des critères de détection et de suivi propres à ces événements. L'analyse a abouti à une méthode multi-variable inspirée des études de détection et de suivi des cyclones extratropicaux et des études d'impacts des tempêtes en Europe. La méthode, élaborée à partir des réanalyses ERA Interim, a été appliquée aux réanalyses de plus basse résolution NCEP2. Un article décrivant la méthode et son élaboration a été publié dans le journal *Natural Hazard and Earth Science Systems*.

La seconde étape du travail a porté sur l'application de la méthode sur une sélection de modèles couplés de climat global participant au projet CMIP5. La sélection des modèles s'est faite selon la résolution spatiale et la disponibilité des variables, quinze modèles ont ainsi été retenus pour notre étude. Dans cette seconde étape, il s'agit tout d'abord de quantifier la capacité des modèles couplés de climat global à reproduire les tempêtes de vent à fort potentiel d'impact. La méthode a donc été appliquée aux données issues de l'expérience *historical* du projet CMIP5 et les résultats ont été comparés avec ceux obtenus avec les

réanalyses ERA Interim. La deuxième partie du travail avec les modèles CMIP5 a été l’application de la méthode aux données issues de l’expérience *rcp4.5*, scénario dans lequel le forçage radiatif atteint une valeur de 4.5 W.m^{-2} d’ici 2100. La comparaison avec les données issues de l’expérience *historical* permet d’évaluer si les caractéristiques des tempêtes de vent à fort potentiel d’impact en Europe, telles que définies par la méthode, sont impactées par la modification des conditions atmosphériques.

Développement d'un outil de détection des tempêtes de vent hivernales en Europe et de prévision de pertes

Objectif du projet opérationnel – Valeur ajoutée pour l'entreprise

L'objectif du projet opérationnel Severe WIndstorms Forecasting Tool (SWIFT) est de développer un outil permettant, à partir de prévisions météorologiques issues toutes les six heures, de détecter un événement type tempête de vent pouvant causer des dégâts majeurs en Europe et de proposer aux entités du groupe AXA concernées une estimation du montant des pertes et du nombre de sinistres associés à l'événement à venir ainsi que leurs localisations. De leur côté, les entités peuvent ensuite prendre contact avec leurs assurés et les orienter vers les sites d'alerte et de prévention. Un outil similaire a déjà été développé par Covéa (groupement des mutuelles GMF, MAAF et MMA). Cependant la partie concernant la détection d'événement est réalisée par un prestataire extérieur.

Du point de vue de l'entreprise, cet outil pourrait être un support pour les entités du groupe afin d'améliorer le processus de gestion de sinistres efficace dans le cas d'un événement de grande ampleur, comme peut l'être une tempête de vent. L'idée de ce projet est de pouvoir proposer aux entités intéressées une alerte sur les tempêtes de vent à venir ainsi que sur les pertes et le nombre de sinistres potentiels associés. En plus de cet aspect opérationnel, les travaux réalisés au cours du développement de l'outil ont permis à l'entreprise d'approfondir les connaissances sur ce péril, sous un angle différent de celui pris pour le projet de recherche. Enfin, ce projet a également conduit à l'élaboration de courbes de vulnérabilité spécifiques au portefeuille d'exposition, initiative encore jamais engagée au sein de l'entreprise.

Du point de vue de académique, il n'y a pas d'études publiées sur l'utilisation des méthodes de détection et de suivi développée pour l'analyse de la variabilité et des tendances des cyclones extratropicaux. Ce projet sera donc l'occasion de réaliser cette étude, sachant que cela soulève plusieurs enjeux, notamment celui de la comparaison des prévisions successives fournies par le modèle Global Forecast System utilisé (GFS). Un autre apport de cette étude pour la communauté scientifique est la combinaison des données fournies par le modèle de prévision et des courbes de vulnérabilité dans le but de calculer une perte potentielle associée à un événement à venir. Ce type d'étude n'a pas été réalisé, faute d'accès à des données de pertes de qualité.

Plan du travail opérationnel

Au début de la thèse, le projet opérationnel avait déjà partiellement débuté, notamment le choix de la méthode de détection était fait. La première étape pour moi a été, à partir des prévisions météorologiques de deux événements récents, Klaus (2009) et Xynthia (2010), de définir les seuils de détection adéquates, les critères de suivi des centres de ces événements ainsi que la manière d'intégrer l'apport d'une nouvelle prévision météorologique toutes les six heures. Il s'agit de la partie « Détection » de l'outil.

Une fois la partie « Détection » achevée, il a fallu développer la partie « Vulnérabilité et Pertes » de l'outil. Cette partie a été effectuée en collaboration avec une équipe de l'entité AXA France qui nous a transmis les pertes de l'ensemble de ses polices d'assurance Multi-Risque Habitation (MRH). Des courbes de vulnérabilité ont été définies et permettent de traduire une vitesse de vent en un pourcentage de dommage pour un code INSEE donné.

Enfin, l'élaboration de l'outil a pu être complétée par une phase de test entre les mois d'Octobre 2013 à Mars 2014, mois au cours desquels il a fonctionné de manière automatique.

Calendrier des projets

L'objectif de cette section est de présenter le cadre du travail de doctorat réalisé au cours de ces trois ans. La spécificité du contrat CIFRE est la possibilité de séparer le temps de travail entre les laboratoires et l'entreprise, et d'intégrer une partie opérationnelle au travail de recherche. Dans le cas de ce projet, le temps de travail a été partagé en trois jours par semaine dans les deux laboratoires consacrés au projet de recherche et deux jours par semaine mis à profit pour le projet opérationnel au sein de l'entreprise. La Figure 17 présente les différentes phases des deux projets décrites plus en détails ci-dessous.

Calendrier du projet de recherche

Le travail de recherche sur les tempêtes de vent à fort potentiel d'impact en Europe a débuté au cours du stage de trois mois effectué à la fin du cycle de Master au sein du Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement et du Laboratoire de Météorologie Dynamique (Phase I). Il s'agit d'une étude préliminaire s'appuyant sur les réanalyses ERA Interim et ayant pour objectif de développer une méthode de détection et de suivi spécifique aux tempêtes de vent associées aux cyclones extratropicaux intenses et pouvant potentiellement générer des dommages en Europe. Cette étude a conduit à l'élaboration d'une première méthode de détection et de suivi d'événements à fort potentiel d'impact à l'aide de la vorticité relative à 850 hPa.

Le doctorat a débuté en Février 2011, soit six mois après la fin du stage. Cette période de six mois a été mise au profit de l'élaboration et de la soumission du projet de recherche à l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie, qui l'a accepté au mois de Janvier 2011. Au début du doctorat, il a été nécessaire d'ajuster la méthode développée au cours du stage, suite à l'extension des réanalyses ERA Interim à la période 1979 – 2010 et à la possibilité d'intégrer deux autres événements historiques dans la définition des seuils de détection de la méthode. Une fois la méthode finalisée avec ERA Interim, elle a été appliquée à d'autres réanalyses afin de vérifier la robustesse de la méthode par rapport à la résolution spatiale (Phase II).

La dernière phase du projet de recherche (Phase III) est l'application de la méthode aux données issues des modèles CMIP5 et simulant la réponse du système climatique à une modification des conditions atmosphériques. Cette phase a pour objectif de répondre à la

problématique du travail de recherche, soit l'évaluation des modèles CMIP5 et la quantification de l'impact du changement climatique.

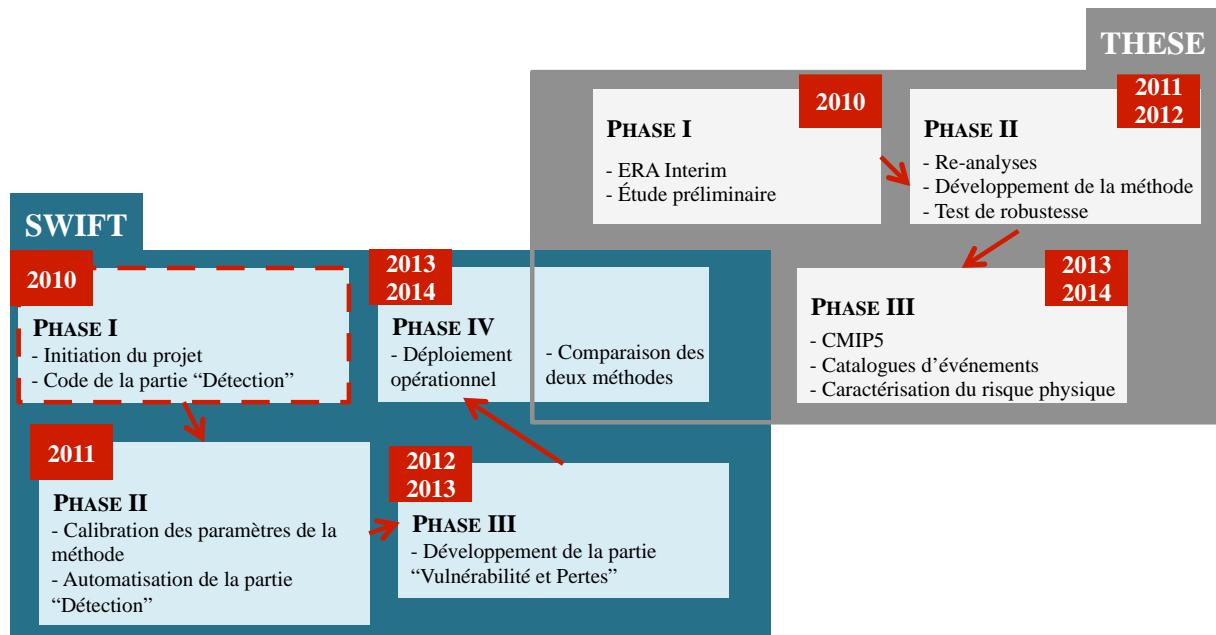


FIGURE 17 : CALENDRIER DES PROJETS SUR LES TROIS ANS. LA LIGNE TIRETÉE ROUGE INDIQUE LA PARTIE DE SWIFT COMMENCEE AVANT LA THESE.

Calendrier du projet opérationnel

Le projet SWIFT a été initié au cours de l'année 2010, avant le début du projet de doctorat. Cette première phase a consisté en l'élaboration d'un premier algorithme de détection de cyclones extratropicaux à partir de prévisions météorologiques du modèle GFS (Phase I). La deuxième étape du projet a été de calibrer les critères de détection de l'algorithme afin d'extraire les cyclones extratropicaux intenses, d'ajouter un algorithme de suivi sur plusieurs pas de temps successifs de ces événements et d'intégrer le flux continu d'informations fournies par le modèle GFS (Phase II). A la fin de cette phase, cette partie de l'outil appelée « module de détection » était opérationnelle et fonctionnait automatiquement.

La troisième étape a consisté en l'élaboration du « module vulnérabilité et pertes » de l'outil. Cette partie comprend d'une part les courbes de vulnérabilité qui permettent, pour un vent

donné, d'estimer un pourcentage dommage pour un code INSEE², et d'autre part un algorithme qui, à partir de l'empreinte de vent d'un événement, calcule les pertes et le nombre de sinistres potentiels d'un événement à venir (Phase III). Enfin, l'outil a été fonctionné de manière opérationnelle et automatique au cours de la saison hivernale 2013/2014, ce qui constitue une phase de test pour l'outil (Phase IV). Les résultats obtenus pour cette saison ont été comparés à ceux de la méthode développée au cours du travail de recherche.

² Code commune à 5 chiffres répertoriant les 36 700 communes françaises.

Plan du manuscrit

La suite du manuscrit est divisée en deux parties. La première partie présente le travail relatif au projet de recherche. Le développement de la méthode et les études de sensibilité sont présentés dans le Chapitre 4. Les résultats de l'évaluation des modèles à partir de l'expérience *historical* et des réanalyses ERA Interim ainsi que la comparaison des résultats issus de l'application de la méthode aux expériences *historical* et *rcp4.5* sont décrits dans le Chapitre 5.

La deuxième partie du manuscrit présente le projet opérationnel. Les différents modules de l'outil et les résultats des études de cas Klaus et Xynthia sont montrés dans le Chapitre 6. Le retour d'expérience de la première mise en route de l'outil au cours de la saison 2013-2014, particulièrement riche en événements, est présenté dans le Chapitre 7.

Enfin, la conclusion générale reprend l'ensemble du travail réalisé au cours du projet de thèse et propose les perspectives pour chacun des projets.

Partie 2 :

Quantification de l'impact du changement climatique sur les tempêtes hivernales extrêmes en Europe

Chapitre 4 :

Développement d'une méthode de détection des tempêtes hivernales à fort potentiel d'impact en Europe – Application à des réanalyses

| | |
|---|-----|
| INTRODUCTION | 69 |
| DESCRIPTION DES DONNEES DE REANALYSES UTILISEES | 70 |
| ÉTUDE PRELIMINAIRE SUR LES TEMPETES DE VENT HIVERNALES EN EUROPE AYANT CAUSE DES DOMMAGES EN EUROPE | 72 |
| Données et variables | 72 |
| Détection et suivi des tempêtes de vent hivernales en Europe | 73 |
| Environnement grande échelle associé à ces événements | 76 |
| Conclusions de l'étude préliminaire | 79 |
| CARACTERISATION DES EVENEMENTS DETECTES AVEC LA VORTICITE RELATIVE | 80 |
| Prise en compte de nouvelles données au début de la thèse – Conséquence pour la méthode | 80 |
| De la classification des événements à la méthode multi-variable | 80 |
| THREE VARIABLES ARE BETTER THAN ONE : DETECTION OF EUROPEAN WINTER WINDSTORMS CAUSING IMPORTANT DAMAGES | 85 |
| CONCLUSIONS | 108 |

Introduction

Le travail de recherche sur les tempêtes de vent à fort potentiel d'impact en Europe a commencé par une étude préliminaire des caractéristiques de neuf tempêtes historiques pour le secteur de l'assurance sur la période 1989 – 2009, période couverte par les réanalyses ERA Interim. Cette étude a conduit à l'élaboration d'une première méthode de détection et de suivi d'événements à fort potentiel d'impact à l'aide de la vorticité relative à 850 hPa. Ce travail sera résumé dans la première section de ce chapitre.

A la suite de cette première étude, il a été nécessaire d'ajuster la méthode développée au cours du stage, suite à l'extension des réanalyses ERA Interim à la période 1979 – 2010 et à la possibilité d'intégrer deux autres événements historiques dans la définition des seuils de détection de la méthode. Les ajustements apportés ont conduit à la détection de plus du double du nombre d'événements détectés au cours du stage. La suite du travail de recherche a donc consisté en la caractérisation des événements détectés avec la vorticité relative à l'aide d'autres variables. L'objectif de ce travail est d'extraire les événements dont le potentiel de dommages est équivalent à celui des tempêtes de vent historiques. Une classification a d'abord été envisagée à l'aide d'indices définis à partir de trois variables météorologiques. Cependant, les valeurs prises par ces indices ne sont pas suffisamment hétérogènes et ne permettent donc pas de faire ressortir les tempêtes de vent historiques des autres événements détectés à l'aide de la vorticité relative. Cette partie du travail est présentée plus en détail dans la deuxième section du chapitre.

L'approche utilisée pour la vorticité relative a finalement été appliquée à deux autres variables utilisées pour la classification : l'anomalie de pression au niveau de la mer et le ratio du vent sur son 98^e percentile, toutes deux particulièrement intenses au cours des événements historiques. La dernière section du chapitre contient l'article « Three variables are better than one : Detection of European Winter Windstorms Causing Important Damages », publié dans le journal *Natural Hazards and Earth System Science*. Cet article reprend l'ensemble de la démarche conduisant à la définition des étapes constituant la méthode multi-variable, cœur du travail de recherche, ainsi que les études de sensibilité de la méthode par rapport à la résolution spatiale du jeu de donnée utilisé et à la taille de la fenêtre spatiale choisie.

Description des données de réanalyses utilisées

Les données utilisées dans cette partie du travail de recherche sont les réanalyses ERA Interim (Dee et al., 2011) et les réanalyses NCEP2 (Kanamitsu et al., 2002). Les réanalyses sont des données issues de l'assimilation de données observées aux sorties d'un modèle. Les caractéristiques des deux réanalyses sont présentées dans le Tableau 2.

| | ERA Interim | NCEP2 |
|---|--|--|
| Source | European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) | National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) |
| | 0.75°x0.75° | 2.5°x2.5° |
| Résolution spatiale | 60 niveaux verticaux | 28 niveaux verticaux |
| Résolution temporelle utilisée pour la méthode | 6h | 6h |
| | Avant 2011 : 1989 – présent | |
| Période | | 1979 – présent |
| | A partir de 2011 : 1979 – présent | |
| Schéma d'assimilation | 4D-Var | 3D-Var |

TABLEAU 2 : TABLEAU RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES DES REANALYSES ERA INTERIM ET NCEP2.

La Figure 18 présente les cartes de la pression, de la vorticité relative, du vent à la surface et du vent à 300 hPa au 26 décembre 1999 06h, au moment de la survenance de la tempête Lothar. Il est possible de détecter des différences d'intensité, de structure et de localisation des maxima des variables de surface. Le vent à 300 hPa est pratiquement identique dans les deux réanalyses. La résolution spatiale du modèle, la qualité et la disponibilité des données d'observations utilisées ainsi que le schéma d'assimilation employé expliquent les différences observées entre les deux jeux de données.

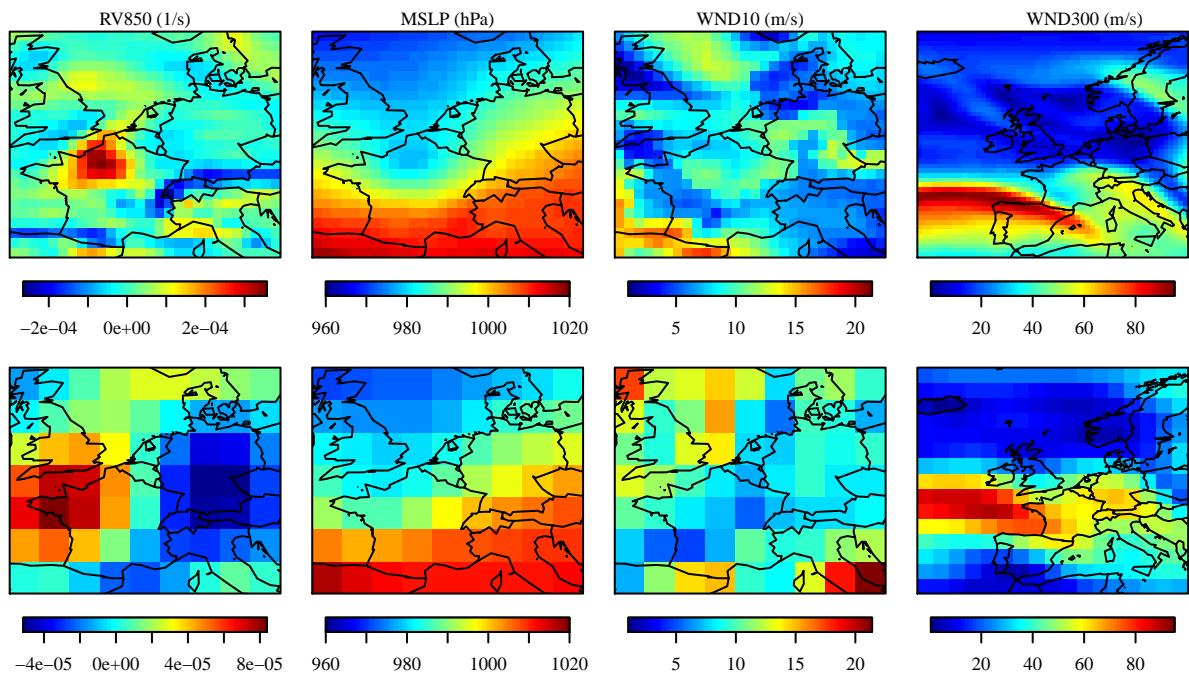


FIGURE 18 : CARTES DE VORTICITE RELATIVE (RV850), PRESSION AU NIVEAU DE LA MER (MSLP), VENT A LA SURFACE (WND10) ET A 300 hPa (WND300) POUR ERA INTERIM (GRAPHIQUES DU HAUT) ET NCEP2 (GRAPHIQUES DU BAS).

La méthode de détection a été élaborée à partir des données de ERA Interim puis appliquée aux données de NCEP2 afin de vérifier l'adaptabilité de la méthode à des jeux de données de résolution spatiale plus grossière. Afin de pouvoir séparer les différences dues au modèle et celles dues à la résolution, les données ERA Interim dégradées à la résolution 2.5° seront également utilisées.

Étude préliminaire sur les tempêtes de vent hivernales en Europe ayant causé des dommages en Europe

Données et variables

Au début du stage de Master 2, neuf événements ayant causé des dégâts importants pour le groupe AXA depuis les années 1990 ont été sélectionnés (Tableau 3). Les données météorologiques utilisées sont les réanalyses ERA Interim qui, à l'époque, couvrent les années 1989 à 2009 avec un pas de temps de 6 heures. Pour le sujet du stage, la période hivernale considérée s'étend de Décembre à Mars, mois au cours desquels les événements sélectionnés sont survenus.

| Nom | Dates | Pays touchés | Dommages assurés (milliards d'euros) |
|--------|---------------------|--------------------|--------------------------------------|
| Daria | 24–26 janvier 1990 | DE, FR, UK | 4.8 |
| Vivian | 25–27 février 1990 | UK, FR, NL, BE, DE | 2.8 |
| Wiebke | 28 fév.-1 mars 1990 | DE, CH, OST | 0.8 |
| Anatol | 2–4 décembre 1999 | DK, DE, UK, SW | 1.2 |
| Lothar | 24–27 décembre 1999 | FR, DE, CH | 4.8 |
| Martin | 25–28 décembre 1999 | FR, CH | 2. |
| Erwin | 7–9 janvier 2005 | UK, NO, DK, SW | 1.6 |
| Kyrill | 18 janvier 2007 | DE, NL, UK, BE | 4.9 |
| Klaus | 23–25 janvier 2009 | FR, ES | 2.9 |

TABLEAU 3 : CATALOGUE DES TEMPÈTES DE RÉFÉRENCE. FR = FRANCE , SW = SUÈDE, CH = SUISSE, UK=ANGLETERRE, DK=DANEMARK, ES=ESPAGNE, DE = ALLEMAGNE, OST = AUTRICHE, NO = NORVÈGE. (SOURCE : SWISS RE)

Les variables considérées au cours du stage sont à la fois des variables caractéristiques des cyclones extratropicaux comme la pression au niveau de la mer, la vorticité relative et le vent à la surface, et des variables décrivant l'environnement grande échelle dans lequel ces événements se sont développés comme le vent à 700 hPa et à 300hPa.

Détection et suivi des tempêtes de vent hivernales en Europe

L'objectif de cette partie du stage est de développer une méthode de détection des tempêtes de vent hivernales à fort impact en Europe. La fenêtre spatiale choisie est centrée sur la France et couvre une partie de l'Europe de l'ouest, zone où la densité de population assurée et exposée à ce risque est importante (Figure 19).

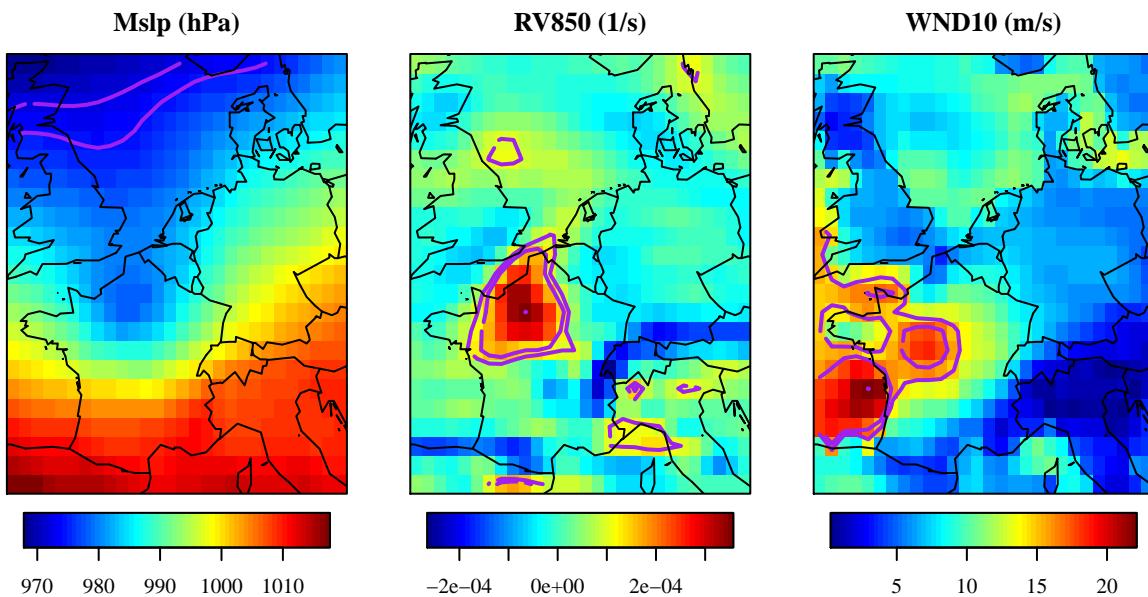


FIGURE 19 DE GAUCHE A DROITE : PRESSION AU NIVEAU DE LA MER, DE VORTICITE RELATIVE A 850 hPa ET DU VENT A 10M AU 26 DECEMBRE 1999 06h. LES CONTOURS CORRESPONDENT AUX 90 ET 95 PERCENTILES DES VALEURS PRISES A CET INSTANT PAR CHACUNE DES VARIABLES.

La première étape a été le choix de la variable détection et la représentation des cartes de pression au niveau de la mer, de vorticité relative à 850 hPa et du vent à 10m au moment de la survenance des neuf événements en Europe. La Figure 19 présente les cartes à un pas de temps de la tempête Lothar (26 Décembre 1999 06h). Les contours correspondent aux percentiles 90 et 95 des valeurs atteintes à cet instant par chaque variable.

Le signal observé dans le champ de vent à la surface est également intense à l'endroit où se trouve l'événement mais le maximum du champ se trouve au-dessus de l'océan Atlantique. Ceci s'explique par les forces de friction, plus grandes à la surface des continents que sur les océans, qui ralentissent la vitesse du vent. Le graphique de gauche de la Figure 20 représente la climatologie, ou la moyenne en chaque point de grille, sur la période considérée du champ de vent à 10m. Elle rend visible l'effet de la rugosité du sol sur la vitesse du vent : cette

dernière est inférieure à 5 m/s à l'intérieur des terres et supérieure à 8 m/s au-dessus des océans.

Pour ce qui est du champ de pression à la surface de la mer, l'empreinte d'un phénomène grande échelle, dont l'évolution est plus lente que celle de l'événement, masque l'événement. Ce phénomène est décrit par la moyenne de la pression sur 8 jours autour du 26 Décembre 1999 06 dans le graphique du milieu de la Figure 20, et comparé à la climatologie du champ de pression, graphique de droite. Sur cette période de huit jours, la zone dépressionnaire au nord-ouest de la fenêtre spatiale, et liée au déplacement de la dépression d'Islande vers l'Europe, est particulièrement intense.

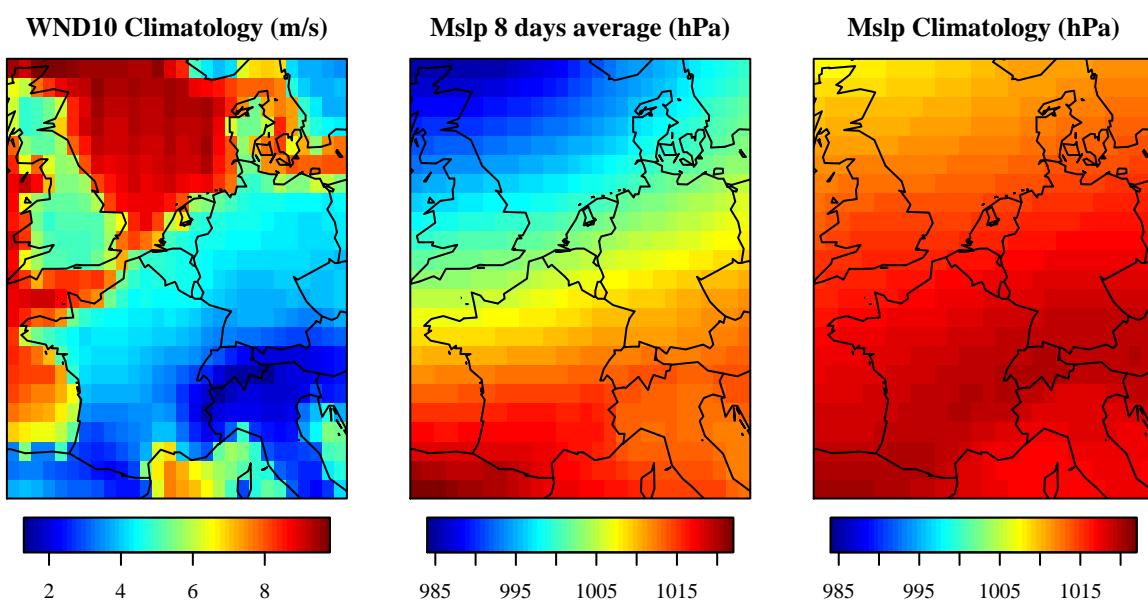


FIGURE 20 DE GAUCHE A DROITE : CLIMATOLOGIE DU VENT A 10M, MOYENNE DE LA PRESSION SUR LES 8 JOURS AUTOUR DU 26 DECEMBRE 1999 06H, CLIMATOLOGIE DE LA PERIODE SUR LA PERIODE HIVERNALE OCTOBRE A MARS.

Le signal observé dans le champ de vorticité relative est le plus intense et l'événement peut être détecté simplement, en recherchant le maximum global sur la fenêtre spatiale. La vorticité relative se révèle être la variable avec la signature la plus intense, sans traitement préalable nécessaire. Après l'étude des cartes pour l'ensemble des pas de temps des neuf événements, c'est donc cette variable, ou plus exactement le maximum global sur la fenêtre spatiale, qui a été choisie pour détecter les événements souhaités.

Une fois le maximum global de vorticité relative détecté à chaque pas de temps de 6 heures sur l'ensemble de la période considérée, une distribution de probabilité est obtenue. La

deuxième étape a été de comparer l'intensité des valeurs du maximum de vorticité relative atteintes au cours des neuf événements à la distribution de probabilité des maxima détectés sur l'ensemble de la période. La Figure 21 représente l'histogramme des valeurs des maxima de vorticité relative. Les points de couleurs indiquent la valeur prise au pas de temps du maximum de chacun des événements. Les percentiles 96 et 98 de la distribution des maxima sont également représentés et mettent en évidence l'intensité particulière de ces événements.

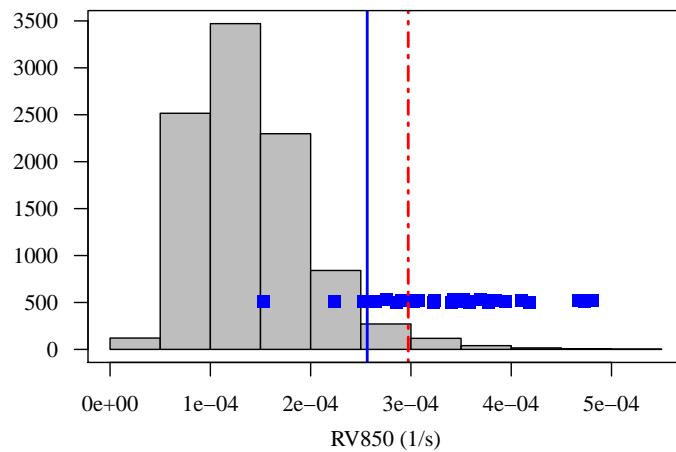


FIGURE 21 : HISTOGRAMME DES MAXIMA DE VORTICITE RELATIVE A 850 hPa DETECTES SUR LA PERIODE HIVERNALE CONSIDEREE. LES POINTS INDUIENT LES VALEURS PRISES AU MOMENT DES NEUF EVENEMENTS. LE TRAIT PLEIN BLEU INDIQUE LE 96^e PERCENTILE DE LA DISTRIBUTION ET LE TRAIT TIRETÉ ROUGE INDIQUE LE 98^e PERCENTILE.

A partir de ces observations, deux algorithmes ont été élaborés et comparés. Le premier forme des événements à partir d'au moins deux maxima consécutifs supérieurs au 98^e percentile de la distribution. Le second algorithme forme des événements à partir d'au moins deux maxima consécutifs supérieurs au 96^e percentile et sélectionne ceux qui ont un maximum supérieur au 98^e percentile de la distribution. Pour les deux méthodes, deux (ou plus) maxima consécutifs forment un événement s'il y a un déplacement vers l'est et si la distance entre deux maxima consécutifs est inférieure à 900 km. En effet, les cyclones extratropicaux sont généralement guidés par le courant-jet en altitude, dirigé vers l'ouest, et la vitesse de déplacement est rarement supérieure à 150 km/h. Ces deux critères sont imposés afin de séparer les événements qui surviennent successivement dans un court intervalle de temps comme Vivian et Wiebke en 1990, et Lothar et Martin en 1999.

Au cours de l'élaboration de ces deux méthodes il a été décidé de masquer les points de grilles de la fenêtre au-dessus du golfe de Gênes. En effet, une forte activité cyclonique existe dans cette région et perturbe la détection des maxima associés aux cyclones extratropicaux provenant de la région Nord-Atlantique. Cette activité est associée aux cyclones extratropicaux méditerranéens et n'entre pas dans le cadre de l'étude.

Le Tableau 4 présente le nombre d'événements détectés à l'aide de chacune des méthodes. La première méthode est trop restrictive et certaines des neuf tempêtes ne sont pas détectées. La seconde méthode permet la détection de toutes les tempêtes définies dans le Tableau 3. C'est donc la deuxième méthode qui a été retenue.

| Méthode | Critères | Nombre d'événements |
|-----------|---|------------------------------|
| Méthode 1 | seuil = 98e percentile | 35 (7 tempêtes du Tableau 3) |
| Méthode 2 | seuil = 96e percentile max \geq 98e percentile | 63 (9 tempêtes du Tableau 3) |

TABLEAU 4 : COMPARAISON DES RESULTATS DES DEUX METHODES.

Environnement grande échelle associé à ces événements

Sur 63 événements détectés avec la vorticité relative, neuf ont causé des dégâts majeurs. Afin de mieux définir les conditions qui, à vorticité équivalente, peuvent favoriser le développement d'une tempête de vent en Europe, l'environnement grande échelle a été analysé à l'aide de la moyenne glissante sur 8 jours des vents à 700 hPa et 300 hPa. Le calcul de la moyenne glissante permet de faire ressortir la structure spatiale de ces champs sur la durée de l'occurrence de ces événements, généralement comprise entre 6 et 8 jours.

Le vent à 700 hPa reflète l'intensité du gradient de température à la surface, tandis que le vent à 300 hPa, renseigne sur le gradient de température de la troposphère. Il peut être relier à la baroclinicité de l'environnement : plus le cisaillement vertical du vent est intense, plus l'environnement est barocline, et donc propice au développement d'événements extrêmes

pouvant causer des dommages. Le vent en altitude joue également un rôle de guide d'onde et la trajectoire des cyclones extratropicaux dépend de sa structure.

Dans un premier temps, les cartes de la climatologie de ces deux champs ont été comparées au composite calculé sur l'ensemble des événements détectés (Figure 22). La climatologie d'une variable correspond à la moyenne du champ sur l'ensemble de la période considérée, tandis qu'un composite est la moyenne du champ sur une partie de la période ou certains pas de temps spécifiques. La comparaison des deux cartes permet de mettre en évidence les structures spatiales caractéristiques d'une situation météorologique particulière. Aux deux niveaux, la structure du vent est étendue vers l'Europe et particulièrement intense au cours des 63 événements détectés.

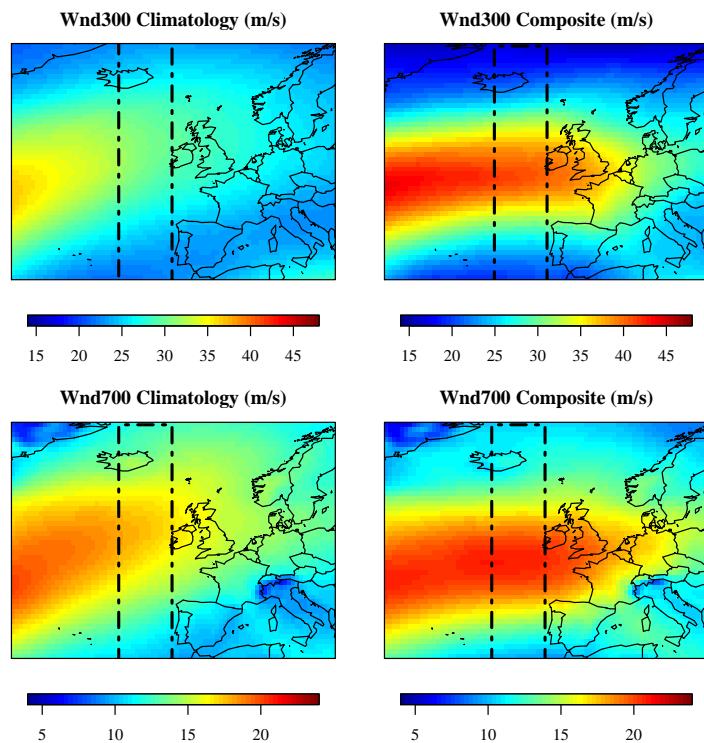


FIGURE 22 GRAPHIQUES SUPERIEURS : CLIMATOLOGIE DU CHAMP DE VENT A 300 hPa (A GAUCHE) ET LE COMPOSITE SUR LES EVENEMENTS DE VORTICITE RELATIVE (A DROITE). GRAPHIQUES INFERIEURS : CLIMATOLOGIE DU CHAMP DE VENT A 700 hPa (A GAUCHE) ET LE COMPOSITE SUR LES EVENEMENTS DE VORTICITE RELATIVE (A DROITE)

Dans un second temps, comme cette extension semble être caractéristique des événements détectés avec la vorticité relative, la moyenne zonale sur la bande $[-20:-10]^\circ\text{E}$ de longitude est

calculée sur toute la période ERAI. La distribution du maximum de la moyenne zonale est représentée dans la Figure 23, pour l'ensemble de la période. Une valeur tous les huit jours est prise en compte pour assurer l'indépendance des points, soit un total de 607 points. Les valeurs atteintes au cours des événements détectés avec la vorticité relative sont également représentées.

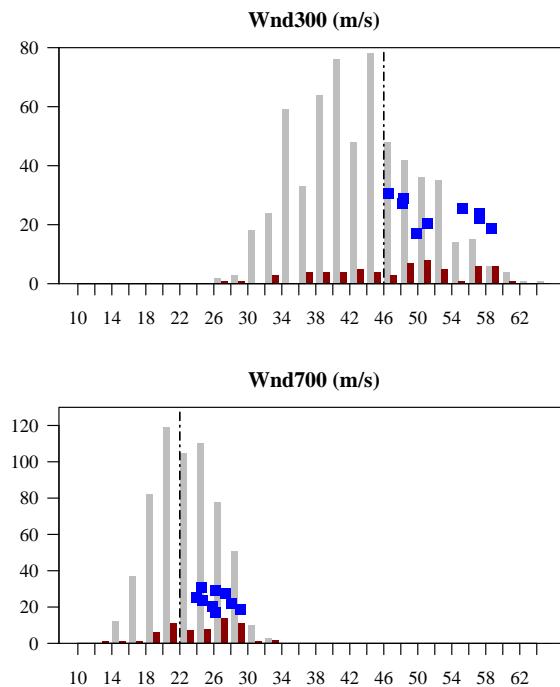


FIGURE 23 : HISTOGRAMMES DU MAXIMUM DE VENT A 300 hPa (EN HAUT) ET A 700 hPa (EN BAS). LES DEUX CHAMPS ONT ETE MOYENNES SUR LA BANDE DE LONGITUDE -20°E : -10°E, ET SEUL UN MAXIMUM SUR 8 JOURS EST UTILISE. EN GRIS, L'ENSEMBLE DES MAXIMA SUR LA PERIODE CONSIDEREE, EN ROUGE, LES VALEURS ASSOCIEES AUX EVENEMENTS DE VORTICITE RELATIVE, ET LES CARRÉS BLEUS CORRESPONDENT AUX NEUF EVENEMENTS DU TABLEAU 1.

Les événements détectés, extrêmes en terme de vorticité relative, ne sont pas tous des extrêmes des distributions de vent à 700 hPa et 300 hPa. Pour chaque niveau de vent, deux groupes sont définis selon un seuil indiqué par la ligne noire verticale sur les deux graphiques. Les événements (sauf un) qui appartiennent au groupe de vent à 700 hPa supérieur à 22 m/s appartiennent aussi au groupe de vent à 300 hPa supérieur à 46 m/s. Le composite de chaque groupe est représenté dans la Figure 24. Les tempêtes de vent hivernales sélectionnées au début du travail appartiennent à un groupe de 38 événements caractérisé par un vent à 700 hPa supérieur ou égal à 22 m/s, un vent à 300 hPa supérieur ou égal à 46 m/s et une extension zonale jusqu'à l'Europe pour les deux champs de vent.

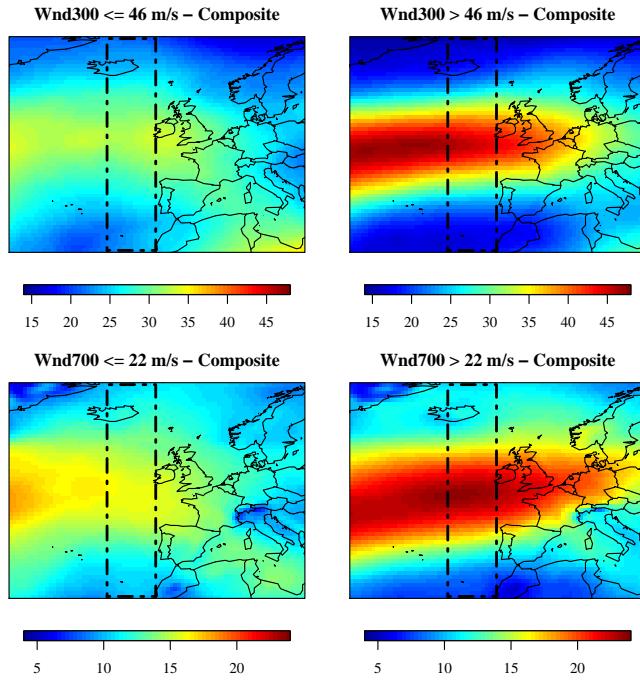


FIGURE 24 : GRAPHIQUES SUPERIEURS : COMPOSITES DU CHAMP DE VENT A 300 hPa POUR LES EVENEMENTS AYANT UN VENT INFERIEUR A 46 m/s (A GAUCHE) , UN VENT SUPERIEUR A 46 m/s (A DROITE). GRAPHIQUES INFÉRIEURS : COMPOSITES DU CHAMP DE VENT A 700 hPa POUR LES EVENEMENTS AYANT UN VENT INFERIEUR A 22 m/s (A GAUCHE) , UN VENT SUPERIEUR A 22 m/s (A DROITE).

Conclusions de l'étude préliminaire

Cette première étude sur les tempêtes de vent hivernales ayant causé des dégâts en Europe a été l'occasion de se familiariser avec le phénomène physique, aussi bien la signature proche surface de ces événements que l'environnement grande échelle associé. Une conclusion de cette étude est le fait que les tempêtes de vent sélectionnées comme étant extrêmes du point de vue des assureurs peuvent aussi être considérées comme des extrêmes de la distribution des maxima de vorticité relative à 850 hPa.

Une méthode de détection spécifique à ces événements a été développée. Les paramètres de cette méthode ont été définis à partir des caractéristiques communes aux tempêtes de vent historiques. Cette méthode permet d'établir une correspondance entre événement extrême assurantiel et événement extrême météorologique. Par ailleurs, les paramètres de la méthode sont relatifs au jeu de données, c'est-à-dire qu'ils s'adaptent aux valeurs reproduites par le modèle. Ceci sera un avantage pour l'objectif final de l'étude des tempêtes de vent hivernales en Europe à fort potentiel d'impact dans les modèles de climat global du projet CMIP5.

Caractérisation des événements détectés avec la vorticité relative

Prise en compte de nouvelles données au début de la thèse – Conséquence pour la méthode

Au cours des six mois séparant la fin du stage de Master 2 et le début du doctorat, les données ERA Interim ont été prolongées jusqu'en 1979 et produites pour l'année 2010. Ceci permet donc d'étendre la période d'étude aux années comprises entre 1987 et 2010, et de prendre en compte les tempêtes 87J et Xynthia dans la définition des seuils de détection et de sélection de la méthode. La tempête 87J étant survenue en Octobre, la période hivernale considérée inclut désormais les mois d'Octobre à Mars.

Par ailleurs, la compagnie de réassurance Munich Re a publié une liste des dix tempêtes de vent hivernales les plus coûteuses pour le secteur de l'assurance survenues au cours des trente dernières années en Europe. Ce classement comprend l'ensemble des tempêtes de vent choisies pendant le stage, à l'exception de Wiebke (1990), ainsi que les tempêtes 87J (Octobre 1987) et Xynthia (Février 2010). Cette liste, produite par un acteur important de l'assurance, servira de référence pour la suite du travail de thèse, à la place de la liste du stage. Les tempêtes de vent contenues dans cette liste sont appelées « tempêtes de référence » dans la suite du manuscrite.

L'allongement de la période hivernale et l'utilisation de deux nouvelles tempêtes dans la définition des seuils ont eu un impact sur la valeur du seuil de détection qui devient le 95^e percentile de la distribution des maxima à la place du 96^e percentile. Le seuil de sélection quant à lui n'est pas modifié. L'application de la méthode actualisée au jeu de données ERA Interim étendu conduit à la détection de 148 événements, dont les dix tempêtes de référence. La proportion entre le nombre d'événements détectés et les dix tempêtes de référence est trop élevée et l'impact en terme de dommages de l'ensemble des événements détectés n'est plus évident. De plus, la vorticité relative étant un champ bruité, certains maxima peuvent être générés sans être associés à un cyclone extratropical. Pour séparer les événements pouvant causer des dommages des autres événements détectés, la première idée a été de caractériser chaque événement détecté par des indices et de réaliser une classification.

De la classification des événements à la méthode multi-variable

L'objectif de la classification est d'extraire les événements intenses de vorticité relative associés à un cyclone extratropical pouvant générer des vents intenses en surface, des autres

événements plus faibles. Le choix des indices pour la classification s'appuie sur le couplage qui existe entre différentes variables au cours de la cyclogenèse. En effet, la caractérisation de ce couplage pourrait permettre de distinguer entre un événement type « cyclone extratropical intense » avec un réel potentiel de dommages et un événement associé au bruit présent du champ de vorticité.

Trois variables sont calculées pour caractériser chaque événement détecté avec la vorticité relative :

1. Au cours de l'étude préliminaire, il a été montré que la variable définie par la moyenne glissante sur 8 jours du vent à 300 hPa moyennée sur la bande de longitude - 20 : 10 °E atteint des valeurs particulièrement intenses au cours des tempêtes de vent considérées. Le maximum de cette variable atteint au cours de l'événement définit le premier indice de la classification.
2. La pression étant une variable utilisée dans les méthodes de détection et de suivi, elle sera également envisagée pour la classification sous la forme d'une anomalie par rapport à sa moyenne glissante sur 8 jours. Le second indice est défini comme le minimum atteint au cours de l'événement.
3. Le troisième indice s'appuie sur l'indice de sévérité de tempête présenté dans Leckebusch et al (2008). Il est défini comme la somme sur la durée de l'événement du ratio du vent à 10m sur son 98^e percentile pour les points de grille où ce ratio est supérieur à 1.

Une classification à l'aide des nuées dynamiques, méthode de regroupement par classes qui maximise les distances interclasses et minimise les distances intra-classes autour de centres initiaux, est réalisée à l'aide de ces trois indices (MacQueen , 1967). A partir d'un nombre de classes défini a priori, l'algorithme de classification sélectionne arbitrairement des centres, un pour chaque classe, et calcule la distance de l'ensemble des autres points à ces centres. Ce processus est répété un certain nombre de fois pour obtenir la meilleure répartition des points entre les classes. Le nombre de classes est fixé à deux puisque l'objectif est de séparer les événements pouvant causer des dommages des autres. Enfin, avant de réaliser la classification, les indices sont centrés et réduits afin de leur donner un poids équivalent au moment du calcul de la distance.

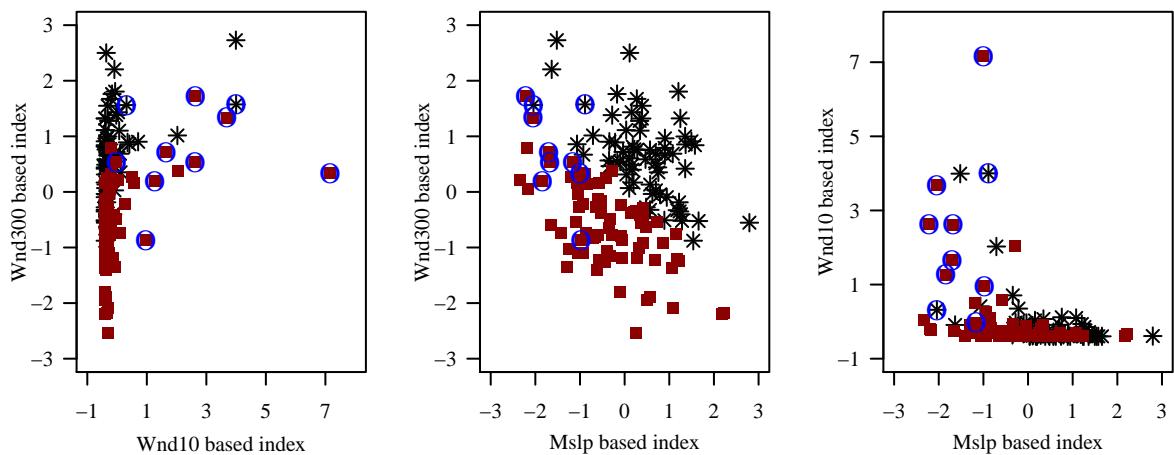


FIGURE 25 : RESULTAT DE LA CLASSIFICATION A PARTIR DES TROIS INDICES. LES CARRÉS ROUGES APPARTIENNENT A LA CLASSE 1, LES ETOILES NOIRES A LA CLASSE 2. LES POINTS ENTOURÉS INDUIENT LES DIX TEMPETES DE REFÉRENCE.

La Figure 25 présente les événements détectés avec la vorticité relative en fonction de la valeur de leurs indices, les couleurs indiquent leur classe et les points entourés correspondent aux indices des tempêtes de référence. Sur les dix tempêtes de référence, 8 sont dans la classe 1 (carrés rouges) et 2 sont dans la classe 2 (étoiles noires). Il ressort de cette figure qu'il est possible, dans le plan des indices de vent à 300 hPa et de pression, de séparer le nuage de points en deux classes. Cependant, la distance entre les points des deux classes est faible, ce qui traduit un niveau de confiance faible quant à la répartition obtenue.

Ceci est confirmé par le calcul de la silhouette, paramètre qui permet de juger a posteriori du choix du nombre de classes fait a priori et de la qualité de la classification obtenue. Ce paramètre est calculé pour chaque point à classer et mesure la similarité entre ce point et les autres points du groupe. Pour un point donné, une silhouette proche de 0 signifie que ce point pourrait appartenir ou non à ce groupe tandis qu'une silhouette proche de 1 signifie que ce point appartient au bon groupe. La moyenne de la silhouette sur la Classe 1 est égale à 0.18 et celle de la Classe 2 à 0.33, ce qui confirme qu'une grande partie des événements pourraient aussi bien appartenir à une autre classe que la sienne. Ce résultat peut s'expliquer par les valeurs des indices des événements qui ne sont pas suffisamment hétérogènes pour séparer l'ensemble en deux groupes distincts.

Les résultats obtenus avec la classification ne répondent pas à l'objectif souhaité. Cependant, ce travail a permis de mettre en évidence les valeurs particulièrement intenses prises par les

indices de pression et de vent à 10m au cours des tempêtes de référence. C'est pourquoi la même approche utilisée pour la vorticité relative a alors été appliquée aux deux indices. Comme cette approche suppose de pouvoir détecter un déplacement du maximum de la variable sur la fenêtre spatiale centrée sur l'Europe, la variable définie à partir du vent à 300 hPa ne sera donc pas considérée comme variable de détection.

Les deux autres variables utilisées pour la classification ont été modifiées au cours de ce travail. Tout d'abord, puisque la méthode détecte des maxima d'une variable donnée, l'anomalie de pression au niveau de la mer est remplacée par son opposée, soit la différence entre la moyenne glissante sur 8 jours et le champ de pression au niveau de la mer. Ensuite, l'indice de sévérité est simplifié : seul le ratio du vent à 10m sur son 98^e percentile sur les points de terre est considéré. En effet, bien que l'indice de sévérité de tempête permette de prendre en compte l'extension spatiale et la durée d'un événement (facteurs importants dans la génération des dégâts), ces derniers dépendent fortement du modèle et de la résolution spatiale.

L'ensemble de la démarche conduisant à la méthode multi-variable, la quantification de la qualité des résultats obtenus et les études de sensibilité de la méthode par rapport à la résolution spatiale du jeu de donnée utilisé et à la taille de la fenêtre spatiale choisie sont présentés en détail dans l'article « Three variables are better than one : Detection of European Winter Windstorms Causing Important Damages ». Cet article a été publié dans le journal *Natural Hazards and Earth System Science* et est inclus dans la prochaine section de ce chapitre.

Three variables are better than one : Detection of European Winter Windstorms Causing Important Damages

M-S. DEROCHE^(1, 2, 3), M. CHOUX⁽³⁾, F. CODRON⁽²⁾, P. YIOU⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, UMR CEA-CNRS-UVSQ, CE Saclay l'Orme des Merisiers, 91191 Gif-sur-Yvette, France

⁽²⁾ Laboratoire de Météorologie Dynamique, UMR CNRS-UPMC-ENS-X, Place Jussieu, Paris, France

⁽³⁾ AXA Group Risk Management Department, Paris, France

Abstract:

In this paper, we present a new approach for detecting potentially damaging European winter windstorms from a multi-variable perspective. European winter windstorms being usually associated with extra-tropical cyclones (ETCs), there is a coupling between the intensity of the surface wind speeds and other meso-scale and large-scale features characteristic of ETCs. Here we focus on the relative vorticity at 850 hPa and the sea-level pressure anomaly, that are also used in ETCs detection studies, along with the ratio of the 10-m wind speed to its 98th percentile. When analysing ten events known by the insurance industry to have caused extreme damages, we find that they share an intense signature in each of the three fields. This shows that the relative vorticity and the mean sea level pressure have a predictive value of the intensity of the generated windstorms. The ten major events are not the most intense ones in any of the three variables considered separately, but we show that the combination of the three variables is an efficient way of extracting these events from a reanalysis dataset.

Deroche, M.-S., Choux, M., Codron, F., and Yiou, P.: Three variables are better than one: detection of european winter windstorms causing important damages, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 981-993, doi:10.5194/nhess-14-981-2014, 2014.

1. Introduction

Extra-Tropical Cyclones (ETCs) are an important component of the mid-latitude atmospheric circulation. Some of the North Atlantic ETCs reach Europe, where they are responsible for strong wind and rainfall episodes. During the winter season, some of them can be particularly intense and generate damaging windstorms over Europe. Munich Reinsurance Company (Munich Re) recently released a ranking of the ten costliest European winter windstorms over the last thirty years (Table 1). Each of them generated more than 2 thousand million USD (United States Dollar) of economic losses. European insurers are highly exposed to these extreme events, leading them to buy significant reinsurance covers in order to mitigate their risks. Therefore, and especially in a context of climate change, there is a need to characterize ETCs associated with windstorms leading to important damages and to measure the potential evolution in the next decades of their surface signature in terms of intensity and frequency.

The study of ETCs in current and future climate has been along two main lines. The first one is the analysis of statistics of ETCs such as areas of genesis and lysis, cyclones density and cyclones intensity. In this kind of analysis, all ETCs are detected and tracked thanks to automated algorithms. Ulbrich et al., (2009) provide a review of the existing cyclone definitions, leading to different detection and tracking schemes and an inter-comparison of their performance can be found in Neu et al. (2012). These automated algorithms are based on the two-dimensional field of the following variables: the mean sea-level pressure (MSLP), the relative vorticity at 850 hPa (RV850) or the Laplacian of the MSLP. The detection is performed by looking for either simple maxima of RV850 or minima of MSLP, or more complex features such as opened or closed isobars (Murray and Simmonds, 1991; Sinclair, 1997; Gulev et al., 2001; Hanley and Caballero, 2012). ETCs tracking is then achieved by linking features at successive time steps thanks to a probabilistic prediction of feature movement. All the choices and assumptions made to develop a scheme offer an analysis of the ETC characteristics from different angles but also introduce uncertainties (Neu et al., 2012). Once ETCs are detected their intensity is usually determined by the value of the detection variable over the ETC lifetime. Extreme ETCs are defined as a particular class of cyclones, i.e. the ones with the highest intensity, but are not necessarily associated with strong winds or losses.

TABLE 1: LIST OF THE EUROPEAN WINTER WINDSTORM THAT CAUSED MORE THAN 1 THOUSAND MILLION US DOLLAR OVER THE LAST 30 YEARS. IN BOLD ARE THE TEN REFERENCE STORMS USED IN OUR STUDY (SOURCE: COMPILED BY EARTH POLICY INSTITUTE FROM MUNICH RE, "NATURAL DISASTERS: BILLION-\$ INSURANCE LOSSES," IN LOUIS PERROY, "IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON FINANCIAL INSTITUTIONS' MEDIUM TO LONG TERM ASSETS AND LIABILITIES," PRESENTED TO THE STAPLE INN ACTUARIAL SOCIETY, 14 JUNE 2005; MUNICH RE, TOPICS GEO: NATURAL CATASTROPHES 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, AND 2009 (MUNICH: 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, AND 2010)).

| Year | Winter storm name | Insured Losses | Economic Losses |
|-------------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| US\$ m, original values | | | |
| Oct. 1987 | 87J | 3 100 | 3 700 |
| Jan. 1990 | Daria | 5 100 | 6 800 |
| Feb. 1990 | Herta | 1 300 | 1 950 |
| Feb. 1990 | Vivian | 2 100 | 3 200 |
| Feb. 1990 | Wiebke | 1 300 | 2 250 |
| Dec. 1999 | Anatol | 2 350 | 2 900 |
| Dec. 1999 | Lothar | 5 900 | 11 500 |
| Dec. 1999 | Martin | 2 500 | 4 100 |
| Oct. 2002 | Jeanett | 1 500 | 2 300 |
| Jan. 2005 | Erwin | 2 500 | 5 800 |
| Jan. 2007 | Kyrill | 5 800 | 10 000 |
| Feb. 2008 | Emma | 1 500 | 2 000 |
| Jan. 2009 | Klaus | 3 000 | 5 100 |
| Feb. 2010 | Xynthia | 3 100 | 6 100 |

The second type of studies aims at evaluating the severity and losses associated with European winter windstorms (Leckebusch et al., 2007; Leckebusch et al., 2008; Pinto et al., 2007; Della-Marta et al., 2009; Schwierz et al., 2010; Donat et al., 2011; Pinto et al., 2012). In all these studies, the 10-m wind speed is used as the primary meteorological variable, either alone or together with the population density in order to assess losses. The studies of Leckebusch et al. (2007), Pinto et al. (2007), Donat et al. (2011) and Pinto et al. (2012) compute a loss function from the daily maximum 10-m wind speed and the population density. In addition, Pinto et al. (2012) separate the event severity, measured by a

“meteorological index”, from the economic exposure. The “meteorological index” is close to the storm severity index defined in Leckebusch et al. (2008) which takes into account the spatial extension and the duration of an event with surface wind speeds exceeding a threshold. Della-Marta et al. (2009) also derive several indices, based either on the mean or on percentiles of the wind speed field, and compute return periods of extreme wind events using the extreme value theory. Schwierz et al. (2010) use the ratio of the 10-m wind speed over its local 98th percentile to detect events with criteria on intensity and spatial extension. The catalogue of events obtained is then used as an input of an insurance loss model.

The approach we present in this paper mixes both types of analysis: we aim to detect the ETCs with the highest wind-related damage potential using a triplet of meteorological variables. Our methodology is designed and calibrated through the analysis of the characteristics of ten major events known for having caused important losses (Table 1). The detection relies on the 10-m wind speed, which is used in the second type of analysis, as well as the 850-hPa relative vorticity and the mean sea-level pressure (variables used in the first type of analysis). Indeed, the ten major events were primarily extreme extra-tropical cyclones, with an intense signature in the three variables, and became major economic events when crossing high-populated areas. Looking for similar intense meteorological signatures should thus lead to the detection of events with a potential for similarly high damages. Since the methodology is meant to be applied to the output of varied models, another key aspect is the adaptability of the detection and tracking criteria.

The paper is structured as follows: in Section 2, an overview of the data and the variables is given. In Section 3, we present the methodology and the choice of detection parameters. Finally, in Section 4, we compare the results in different reanalysis datasets. Conclusions are drawn in Section 5.

2. Data and variables

2.1. Data

2.1.1. Meteorological datasets

Three datasets are used in this paper. The detection methodology is developed with the ERA Interim (ERA5) reanalysis dataset (Dee et al., 2011) in section 3. ERA5 is a 6-hourly dataset at a 0.75°x0.75° spatial resolution covering the period from 1979 to 2011, provided by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. In Section 4, two other datasets are

used along with ERAI to complete the analysis and test the robustness of the methodology. First, we use the NCEP-DOE (NCEP2) reanalysis from NCEP/NCAR, a 6-hourly data from 1979 to 2011 with a $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ spatial resolution (Kanamitsu et al., 2002). Second, we compute a spatial average of ERA Interim on the NCEP2 2.5° resolution (ERAI-2.5).

The geographical window used for the detection of events is restricted to Western Europe where most of the exposure to the windstorm peril is localised; this enables to check our detected events against databases of insured damages. The grid-points over the Genoa Gulf are masked in order to avoid the detection of Mediterranean ETCs or local lows occurring in this part of the spatial window and that are not in the scope of this study (Figure 1).

2.1.2 Catalogues of extreme windstorms

We consider the ten most damaging events since 1987 ranked by Munich Re (Table 1). These events, called “reference storms” hereafter, are used as case studies in order to develop the methodology (Section 3). They cover a time period from 1987 to 2010 and are concentrated in the winter season from October to March. As a result, we choose to work with the 6-month winters (October – March) from 1987 to 2010 and not the whole period covered by ERA Interim or NCEP2.

In order to quantify the quality of the results, we compare the events detected with our method to the ones of the eXtreme Wind Storm (XWS) database³. The XWS catalogue gathers 50 European winter windstorms from 1981 to 2012. Among those 50 windstorms, 16 are associated to a loss (called insurance storms hereafter) and 34 storms are not associated to a loss (named non-insurance storms). The selection of XWS events was performed with a wind-based index computed with ERA Interim at 0.25° resolution over a wider geographical window than the one we consider. The 44 events with the highest index values were automatically selected, and 6 other events including one insurance storm (Emma, 2008) were manually added.

The XWS events are considered over the period 1987-2010 shared with our study. The database contains 38 storms over the period with 14 insurance storms including the ten reference events from the Munich Re (MR) ranking and four others: Herta (1990), Wiebke (1990), Gero (2005) and Emma (2008). The remaining 24 non-insurance storms have an index value as high as the insurance storms, although they did not cause as much damages.

³ <http://www.met.reading.ac.uk/~extws/>

The ratio of events that actually caused damages, i.e. 14 insurance storms, over the total number of events over the period, i.e. 38 storms, is 0.37. The performance of our methodology in detecting events with high damage-potential within a reduced number of non-insurance events is thus quantified by both the number of insurance storms of the XWS catalogue that are detected with our method and the ratio of this number over the total number of detected events.

2.2. Variables

Because damages are ultimately caused by surface winds, studies on damage potential mostly rely on wind-based indices measuring either a proxy of loss or the severity of the event. However, the accurate reproduction of local wind maxima varies according to the considered reanalysis datasets or general circulation model. The surface winds depend on boundary-layer parameterizations, and the low spatial resolution of some datasets may not capture smaller-scale dynamical or topographical features that lead to extreme winds. Therefore, we choose here to define the damage potential of an event through the combined information content available from the 10-m wind speed and other variables that are not directly linked to damages, but that may have a predictive value on the physical strength of events.

In order to characterize extra-tropical cyclones with a high potential of wind-related damages over Europe, several variables at different levels of the troposphere have been analysed. We favour variables that are standard outputs from models or that only require simple computation from the initial data. Among all the variables considered, three are retained: the relative vorticity at 850 hPa, the mean sea-level pressure and the 10-m wind speed. These variables are commonly used either to detect and track ETCs (Ulbrich et al., 2009; Neu et al., 2012) or to assess potential impacts of ETCs (Leckebusch et al., 2008; Pinto et al., 2012). We briefly illustrate in Figure 1 the spatial patterns of these three variables in the case of the major storm Lothar (December 1999).

The relative vorticity at 850 hPa (RV850) is either directly provided in the reanalysis dataset or model run, or computed as the curl of the velocity field at 850 hPa. The vorticity field is very sensitive to the spatial resolution; it becomes noisy at finer resolutions, leading to the detection of numerous and intense local-scale features (Hoskins and Hodges, 2002; Ulbrich et al., 2009; Hodges et al., 2011).

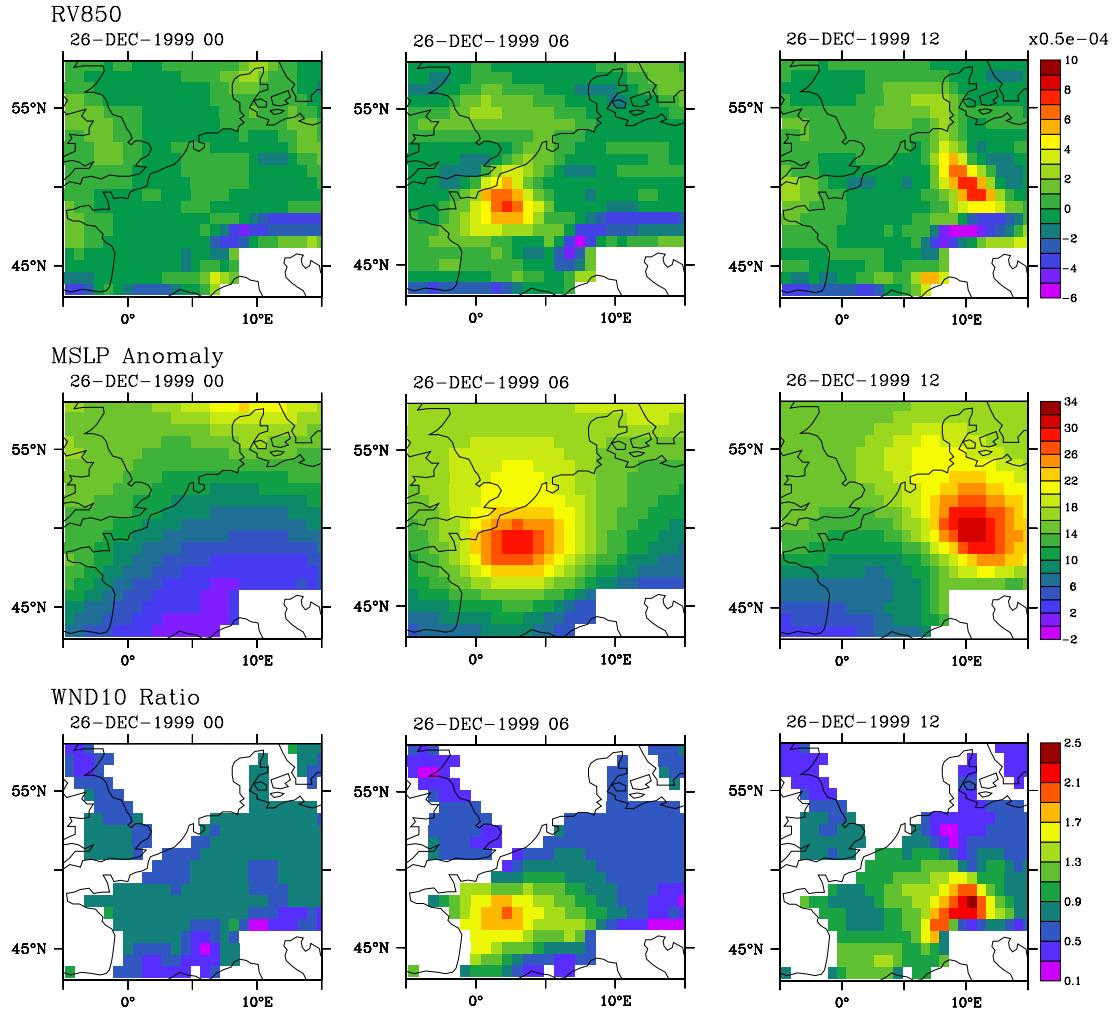


FIGURE 1: MAPS FOR THE THREE VARIABLES' FIELDS DURING THE OCCURRENCE OF LOTHAR (FROM 1999/12/26 00H UTC TO 1999/12/26 12 UTC) IN ERA INTERIM: FIRST ROW, RELATIVE VORTICITY AT 850 hPa (1/s); SECOND ROW THE MEAN SEA-LEVEL PRESSURE ANOMALY (hPa); LAST ROW, THE 10-M WIND SPEED RATIO (ONLY GRID POINTS OVER LAND ARE CONSIDERED). WE MASKED THE MEDITERRANEAN AREA OF THE DOMAIN.

We also use the anomaly of the mean sea-level pressure defined, at each time step, as the difference between the MSLP and its running average over eight days $\overline{MSLP^{8 \text{ days}}}$, see Equation (1). The mean sea level pressure is a large-scale field that is much less dependent of the spatial resolution than the relative vorticity at 850 hPa, i.e. the pattern of the MSLP field remains roughly the same when upgrading the spatial resolution. Moreover, it is strongly constrained in reanalysis datasets due to the large number and quality of observation data, especially over continents. The rationale for considering the anomaly of MSLP is that ETCs

evolve on a more slowly varying background flow that also has large MSLP gradients. A spatial or temporal filter is often used to remove the small-scale features and the biases due to variations of the background MSLP (Hoskins and Hodges, 2002). A simple temporal filter is used in our study. We first tried removing the climatology of MSLP but it was not enough to bring out some of the targeted events. We thus chose to work with the running average of MSLP over eight days, which represents the signature of the weather regime surrounding the occurrence of ETCs (Feldstein, 2000) and has also been used by Rivière and Joly (2006). $\overline{MSLP^{8\ days}}$ is computed at a given time step t as the average of the MSLP over sixteen time steps preceding and sixteen time steps following time step t (i.e. over 32 time steps or 8 days, see Equation 2).

$$MSLP_{\text{anom}}(i, j, t) = -[MSLP(i, j, t) - \overline{MSLP^{8\ days}}(i, j, t)] \quad (1)$$

$$\overline{MSLP^{8\ days}}(i, j, t) = \frac{1}{32} \cdot \sum_{t-16}^{t+16} MSLP(i, j, t) \quad (2)$$

where (i, j) are the grid points coordinates and t the 4-time daily time steps.

The third variable considered is the ratio of the 10-m wind speed to its 98th percentile (WND10₉₈), computed for continental grid points only:

$$WND10_{\text{ratio}}(i, j, t) = \frac{WND10(i, j, t)}{WND10_{98}(i, j, t)} \quad (3)$$

The 10-m wind speed strongly depends on the modelling of boundary layer processes, even in the reanalyses, as well as on the time and space resolution of the outputs. Using the ratio over the 98th percentile alleviates some of these biases. This specific ratio is also often used in studies on European winter windstorms as a measure of potential damages, the 98th percentile being the threshold above which a building is at risk of being partially damaged or totally destroyed (Klawa and Ulbrich, 2003; Leckebusch et al., 2008; Schwierz et al., 2010).

Each of the three variables described captures specific spatio-temporal scales and thus accounts for different aspects of extra-tropical cyclones associated with windstorms. The relative vorticity at 850 hPa captures local and fast meso-scale structures whereas the MSLP anomaly captures larger and slower-evolving systems. The ratio of the 10-m wind speed measures, at a local scale, a wind intensity that is strongly correlated with the damage potential.

3. Case study and methodology

This section presents a new method for detecting events with high wind-related damage potential in Europe. Such a method applied to a reanalysis dataset should ensure the detection of events that actually generated damages and a reduced number of events that did not, for the reason that they fulfilled the intensity criteria but did not cross densely exposed areas.

The method itself and the choice of parameters are based on the case study of the ten reference storms, using the ERA Interim dataset. We describe hereafter the process from the development of the detection methodology for a single variable to the combination of the resulting per-variable events (Figure 2). The events obtained at different stages of the process are then compared to the ones of the XWS database.

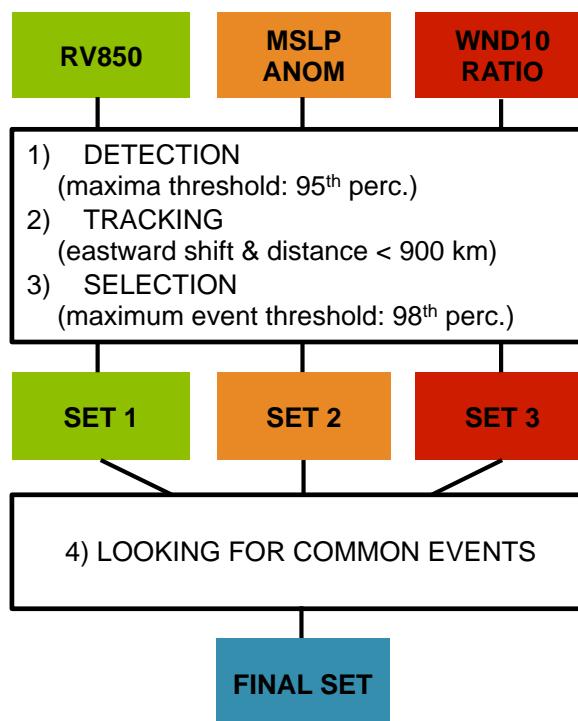


FIGURE 2 ILLUSTRATION OF THE PROCEDURE. THE RELATIVE VORTICITY AT 850 hPa (RV850), THE MEAN SEA-LEVEL PRESSURE ANOMALY (MSLP_ANOM) AND THE 10-M WIND SPEED RATIO (WND10 RATIO) ARE USED SEPARATELY TO DETECT, TRACK AND SELECT EVENTS. THE FINAL STEP CONSISTS IN COMPARING THE THREE SETS AND LOOKING FOR COMMON EVENTS. AN EVENT IS DEFINED AS COMMON TO THE THREE SETS IF IT IS DETECTED SIMULTANEOUSLY IN THE THREE SETS DURING AT LEAST ONE TIME STEP. THE FINAL SET CONTAINS EVENTS THAT WE DEFINE AS EVENTS WITH HIGH DAMAGE POTENTIAL.

3.1. Working with each variable separately

We first consider the three variables separately in our case study of the reference storms, which aims at answering the following questions: do major events with important economic losses share some meteorological characteristics? How extreme is their signature within each variable? Are their economic damages reflected in the values of any of the three variables? The answers to these questions lead us to the definition of criteria specific to the detection of the ten events.

3.1.1. Definition of the detection and selection thresholds

A preliminary examination of maps of the three variables at the time of occurrence of the ten reference storms reveals that all ten events display, in each of the three considered variables, a strong signature that singles them out from their surrounding environment when they pass across Western Europe (the example of Lothar is shown in Figure 1). Usually, ETCs detection methods select all the local maxima above a specified low threshold because they aim to detect all cyclones that are present at a given time step within a wide region (Hoskins and Hodges, 2002). Here, since the considered area is small and we target extreme events, we choose to only retain the global maximum of each variable at each 6-hour time step.

The intensity of the ten reference storms is compared to the distribution of the global maxima in Figure 3. In the first row, time series of the maxima of the three variables are shown together with their respective 95th percentile (red dashed line) and 98th percentile (blue line). Most of the maximum values at the time of occurrence of the ten reference storms (coloured in green) reach the highest values. The second row of Figure 3 shows again the maximum values of each variable, but focusing on the ten reference storms. Most values are above the 95th percentile of their respective distributions. Therefore, the 95th percentile is used as detection threshold and only maxima higher than this threshold will be detected.

Another conclusion that can be drawn from the second row of Figure 3 is that for each reference storm and each variable at least one value of the maxima is above the 98th percentile. This percentile is used as selection threshold once events are formed. We will restrict our events set to events having a maximum value above the 98th percentile.

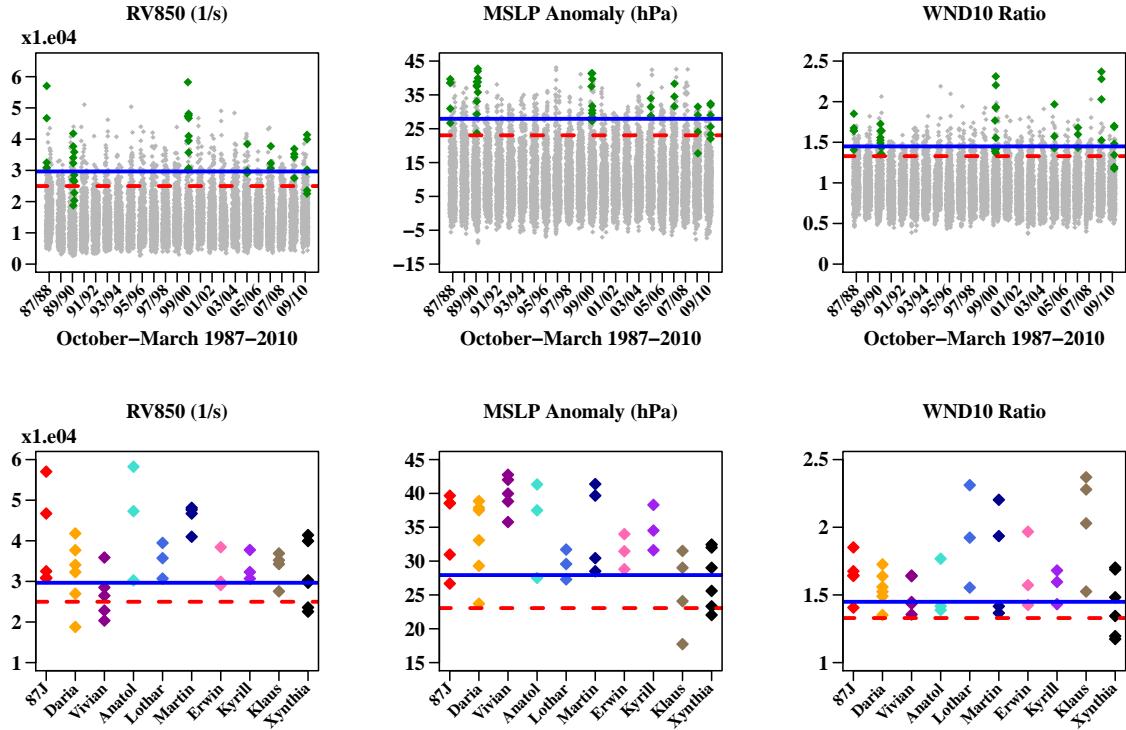


FIGURE 3 THE FIRST ROW SHOWS THE TIME SERIES OF THE DETECTED MAXIMA OF EACH VARIABLE OVER THE TIME PERIOD (SIX-HOURLY TIME STEPS OVER OCTOBER – MARCH FROM 1987 TO 2010, I.E. 16768 MAXIMA) AND GEOGRAPHICAL WINDOW. THE HORIZONTAL LINES ARE THE 95TH (DASHED RED LINE) AND 98TH (BLUE LINE) QUANTILES OF THE DISTRIBUTION OF THE MAXIMA OF EACH VARIABLE. THE SECOND ROW REPRESENTS THE VALUES OF THE MAXIMA OF EACH VARIABLE AT THE TIME OF OCCURRENCE OF THE TEN REFERENCE STORMS. EACH POINT FOR A GIVEN STORM CORRESPONDS TO A DIFFERENT 6-HOURLY TIME STEP DURING ITS PASSAGE.

3.1.2. Single-variable methodology

The first step of the method consists in detecting maxima that have values as high as or higher than those reached by the reference storms. The maximum of each variable over the spatial window is detected at every time step; maxima with values above the 95th percentile of the time series' distribution are retained. With ERA Interim, over the considered period, 840 maxima of each variable exceed this threshold.

ETCs being advected by the westerly jet stream, they usually follow an eastward trajectory and their travelling speed rarely exceeds 150 km per hour. Two or more consecutive maxima above the 95th percentile are thus gathered into one same event if they follow an eastward shift and if the distance between two consecutive maxima is lower than 900 km. These two conditions enable to separate events such as Vivian and Wiebke (1990) or Lothar and Martin (1999) that occurred closely in time. From the 840 maxima per variable detected with ERA

Interim, this second step leads to the generation of 214 events of relative vorticity, 203 events of mean sea level pressure anomaly and 121 events of 10-m wind speed ratio.

Finally, the selection of events with at least one maximum value above the 98th percentile further reduces the number of events per single-variable catalogues: 149 events with the relative vorticity, 117 events with the pressure anomaly and 91 events with the 10-m wind speed. The ten reference storms are included in each set of events, but the number of events obtained in total in each single-variable catalogues remains large.

3.2. The added value of a multi-variable approach

It is difficult to further reduce the total number of single-variable events while keeping the reference storms. For example, raising either the detection or selection threshold is inadequate since some reference storms would not be detected afterwards. Another way to reduce the number of detected events would be to retain the top-ranked events selected with one variable. However, the reference storms are not top-ranked in any of the three variables and their ranking does not follow the one of the damages they caused (Table 2). This is also the case in the XWS database where the insurance storms are not the 50 most extreme events with Emma is ranked 63rd, below events that did not cause damages. The use of a threshold on the ranking would thus be hazardous with the perspective of using other models. This result was also highlighted in Pinto et al. (2012) who showed that the ranking of the storms intensity is model-dependent.

Even though the ten reference storms are not the top-ranked events of any variable, they are selected with each of them. This is not always the case for other events of the single-variable catalogues. The complementarity of the three variables is further analysed in the first panel of Figure 4, which shows the number of events common to sets generated with different variables. The definition of common event between two variables is as follow: if two events generated and selected separately with two variables share a common time step, we consider that they actually exhibit the signature of the same event in each variable respectively.

TABLE 2: THE TEN REFERENCE STORM, RANKED IN THE SECOND COLUMN ACCORDING THE INSURED LOSSES (MUNICH RE), AND FROM THE THIRD TO THE FIFTH COLUMN, THEIR RANKING ACCORDING TO THE MAXIMUM VALUE THEY REACH IN ERA INTERIM IN TERMS OF RELATIVE VORTICITY AT 850 hPa (RV850), ANOMALY OF THE MEAN SEA-LEVEL PRESSURE (MSLP ANOM) AND 10-M WIND SPEED RATIO (WND10 RATIO). FOR EXAMPLE, WITH THE RELATIVE VORTICITY AT 850 hPa (RV850), WE DETECT 149 EVENTS THAT WE RANKED ACCORDING TO THE MAXIMUM OF RV850 REACHED DURING THE PERIOD THEY ARE DETECTED OVER THE WINDOW.

| Event | MunichRe | RV850 | MSLP_ANOM | WND10_RATIO |
|----------------|----------|-------|-----------|-------------|
| Lothar | 1 | 32 | 57 | 2 |
| Kyrill | 2 | 43 | 15 | 30 |
| Daria | 3 | 19 | 12 | 25 |
| 87J | 4 | 2 | 9 | 11 |
| Xynthia | 5 | 22 | 49 | 28 |
| Klaus | 6 | 51 | 59 | 1 |
| Martin | 7 | 6 | 6 | 3 |
| Erwin | 7 | 39 | 38 | 8 |
| Anatol | 8 | 1 | 7 | 19 |
| Vivian | 9 | 62 | 2 | 39 |

In ERAI, the number of common events between pair-wise variables is less than half the number of events selected with each variable separately. Considering events common to the three variables further reduces that number to 24 including the ten reference storms (see Figure 4, first panel). Figure 5 shows three of the 24 final events: one XWS insurance storm (87J, 1987), one XWS non-insurance storm (Quinten, 2009) and one non-insurance storm detected with our method (Dec 1998). We show for each event detected the position of the maximum of the relative vorticity (grey points) and of the anomaly of mean sea level pressure (red stars), as well as the footprint of the 10-m wind speed ratio with values above 1. The footprint is computed at each grid-cell of the spatial window as the maximum of the 10-m wind speed ratio over the time period the event is detected with this variable. Final events are not necessarily detected at each time step with each of the three variables. For example,

Quinten (2009) is first detected with both the relative vorticity and the anomaly of mean sea level pressure before being detected with the three variables over two time steps, and finally with the anomaly of mean sea level pressure and 10-m wind speed over the fourth time step. The three events reached the same intensity but they affected different areas with different exposures to the peril and thus caused different levels of damages.

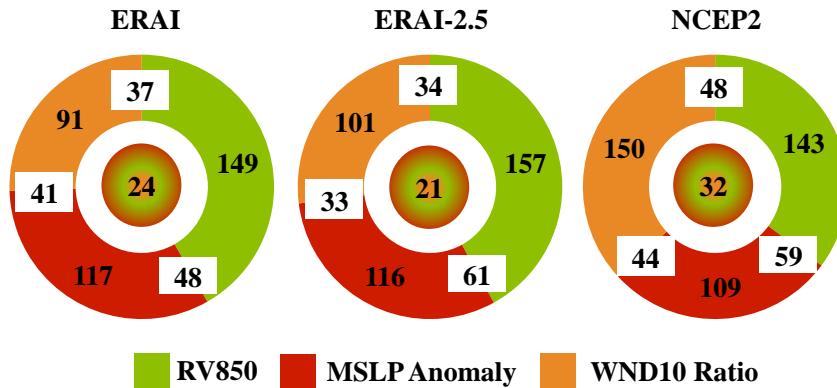


FIGURE 4 FOR EACH REANALYSIS DATASET: TOTAL NUMBER OF EVENTS DETECTED WITH EACH VARIABLE, NUMBER OF EVENTS COMMON TO PAIRS OF VARIABLES AND NUMBER OF EVENTS COMMON TO THE THREE VARIABLES. FOR EXAMPLE, WITH ERAI, 149 EVENTS ARE DETECTED WITH THE RELATIVE VORTICITY AT 850 hPa (RV850), 117 WITH THE MEAN SEA-LEVEL PRESSURE ANOMALY (MSLP ANOM) AND 91 WITH THE 10-M WIND SPEED RATIO. 48 EVENTS ARE COMMON TO RV850 AND MSLP ANOM, 41 TO MSLP ANOM AND WND10 RATIO, 37 TO WND10 RATIO AND RV850. FINALLY, 24 EVENTS ARE COMMON TO THE THREE VARIABLES (I.E. THEY ARE DETECTED SIMULTANEOUSLY WITH THE THREE VARIABLE DURING AT LEAST ONE TIME STEP).

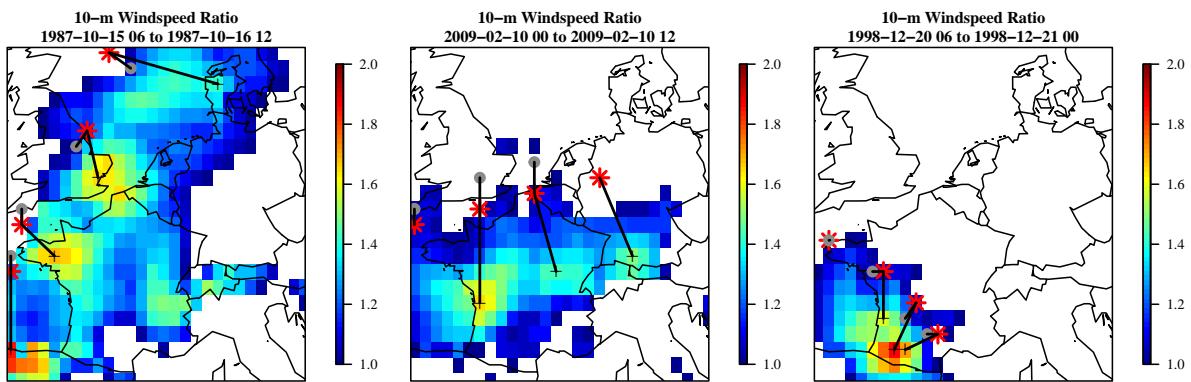


FIGURE 5 THREE OF THE FINAL EVENTS DETECTED WITH THE METHOD IN ERA INTERIM: ONE XWS INSURANCE STORM (87J, 1987), ONE XWS NON-INSURANCE STORM (QUINTEN, 2009) AND ONE NON-INSURANCE STORM DETECTED (DEC 1998). GREY DOTS REPRESENTS THE MAXIMA DETECTED WITH THE RELATIVE VORTICITY, THE RED STARS THE MAXIMA DETECTED WITH THE ANOMALY OF MEAN SEA LEVEL PRESSURE AND THE COLOURED SHADE IS THE FOOTPRINT OF 10-M WIND SPEED RATIO OVER THE DETECTION DATES, ONLY VALUES ABOVE 1 ARE REPRESENTED. MAXIMA OF VARIABLES HAPPENING AT THE SAME TIME ARE LINKED BY A BLACK LINE.

3.3. Comparison to the XWS catalogue

Table 3 summarizes the comparison between the events generated for each variable, the final common events and the insurance storms of the XWS database. The ratio of detected insurance storms over the total number of detected events is also presented.

TABLE 3 NUMBER OF EVENTS DETECTED WITH ONE VARIABLE (RV850, MSLP, WND10), AND EVENTS COMMON TO THE THREE CATALOGUES (MULTI). COLUMNS SHOW THE XWS INSURANCE EVENTS, THE TOTAL NUMBER OF EVENTS AND THE RESULTING RATIO. THE ERAI, ERAI-2.5 AND NCEP2 DATASETS ARE USED, AND THE XWS CATALOGUE NUMBERS ARE SHOWN FOR COMPARISON.

| Dataset | Variable | XWS insurance events | Total number of events | Ratio |
|-----------------|----------|----------------------|------------------------|-------|
| ERAI | | | | |
| | RV850 | 12 | 149 | 0.08 |
| | MSLP | 12 | 117 | 0.10 |
| | WND10 | 14 | 91 | 0.15 |
| | MULTI | 11 | 24 | 0.46 |
| ERAI-2.5 | | | | |
| | RV850 | 12 | 157 | 0.08 |
| | MSLP | 12 | 116 | 0.10 |
| | WND10 | 14 | 101 | 0.14 |
| | MULTI | 11 | 21 | 0.52 |
| NCEP2 | | | | |
| | RV850 | 12 | 140 | 0.09 |
| | MSLP | 11 | 121 | 0.09 |
| | WND10 | 13 | 150 | 0.09 |
| | MULTI | 9 | 33 | 0.27 |
| XWS | | | | |
| | | 14 | 38 | 0.37 |

The results show that the 14 insurance storms of the XWS database are detected with the 10-m wind speed ratio. However, the ratio of insurance storms over the total number of events is then 0.15, which is much lower than the XWS ratio 0.37. With the relative vorticity and the anomaly of mean sea level pressure, 12 insurance storms are detected, with a ratio of 0.08 and

0.10 respectively. The missing insurance storms within the relative vorticity set of events are Gero (2005) and Emma (2008) because their trajectory is further north than the spatial window we consider. Within the set of events derived from the anomaly of mean sea level pressure, Herta (1990) and Gero (2005) are missing: Herta because the values of the anomaly of mean sea level pressure are lower than the detection thresholds, Gero because its track is further north than our spatial window and we see the values at the boundary of the event which are lower than our thresholds.

Among the final common events, there are 11 insurance storms of the XWS catalogue and the ratio over the total number of detected events is now up to 0.46. It should be noted that the spatial window used to select the XWS events is wider than ours, which partly explains the lower value of the XWS ratio. Hence it is more likely to detect non-insurance events within a wide window than within a small one. Three insurance storms are missed: Herta (1990), Gero (2005) and Emma (2008), as anticipated with the events generated with the single-variable methodology. The other 13 events of the 24 final events include 5 XWS non-insurance storms and 8 other events. Among these 8 events are one in December 1998 referenced in Mayencon (2000), the event that lead to the Prestige oil spill (13 Nov. 2002) and Johanna (10 March 2008).

3.4. Sensitivity to the size of the spatial window

The comparison with the XWS storms showed the impact of the spatial offset that exists between a low-pressure system and its associated maximum wind speed. The spatial window was chosen to minimise that effect, i.e. it should extend enough northward to capture the low-pressure centres associated with extreme winds over areas of Western Europe with high exposition, roughly Great Britain, France and Germany. However the detection of two storms, Gero (2005) and Emma (2008), is affected by this effect since both are detected with the 10-m wind speed while missing within one of the other two variables.

We therefore test the robustness of the methodology by using a much wider window encompassing Portugal, Spain, Ireland and the Scandinavian region. It includes most of the storm track over Europe, but with less-exposed areas. The strong activity occurring in the north-western part of the larger window leads to the detection of maxima of both relative vorticity and anomaly of mean sea level pressure that reach higher values than within the smaller window. In order to still detect all the reference storms, we thus lower the thresholds to the 90th and 95th percentiles. In addition to our previous damaging events, we now detect

Gero (2005) but still miss Herta (1990) and Emma (2008) because their intensity is lower than our thresholds. Widening the spatial window therefore reduces the risk of offset, at the expense of lowering the ratio between the number of insurance storms and non-insurance storms (Table 4). A large fraction of the non-insurance events detected with the large window are localised over Scandinavia where, for now, there is little exposure.

TABLE 4 SAME AS TABLE 3, BUT FOR A WIDER SPATIAL WINDOW GOING FROM SPAIN TO SCANDINAVIA.

| Dataset | Variable | XWS insurance events | Total number of events | Ratio |
|-------------|----------|----------------------|------------------------|-------|
| ERA1 | | | | |
| | RV850 | 13 | 331 | 0.04 |
| | MSLP | 13 | 250 | 0.05 |
| | WND10 | 14 | 220 | 0.06 |
| | MULTI | 12 | 62 | 0.19 |
| XWS | | | | |
| | | 14 | 38 | 0.37 |

The benefit of widening the spatial window, i.e. detecting one more insurance storm, seems small compared to the drawback of detecting much more events in total, with no possible comparison with damage databases. For the current climate and exposure, we consider that the initial window is enough to capture most of the insurance storms.

To conclude on the results of section 3, taking the intersection of event sets generated with three separate variables gives more satisfying results than using a single one. Indeed, the selection of 24 events with potential for wind-related damages over the last thirty years is consistent with records from insurance companies of major damages over the area considered. The final events have been compared to the XWS database. We show that the approach is robust when considering a wider window: once the thresholds are defined from the new maxima PDFs to fit the values of the reference storms, we still detect events that generated large economic damages along with events sharing the same intense meteorological signature but crossed areas with lower exposure. The robustness of the method with regard to the spatial resolution and dataset is now tested in Section 4.

4. Sensitivity to dataset and spatial resolution

The ultimate objective of this work is to apply the method to the outputs of general circulation models such as the ones participating to the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5). Most of those models have a spatial resolution coarser than ERAI, especially when run over long periods of time. In order to validate its robustness against spatial resolution, the methodology is applied to the coarser reanalysis datasets NCEP2 and ERAI downgraded to the 2.5° spatial resolution. This will partially separate the resolution effect (ERAI versus ERAI-2.5) from the model effect (ERAI-2.5 versus NCEP2), with the caveat that downgrading to 2.5° the output of a model run at 0.75° is different from taking the output of a model run at 2.5° .

In this section, we aim at pointing out the added value of the approach presented in section 3 when dealing with models run at different spatial resolutions. We first present the distributions of the maxima of the three variables in order to analyse the differences and similarities between the reanalysis datasets. Then we compare single-variable and multivariable catalogues of both ERAI-2.5 and NCEP2 to the XWS database. Finally we analyse the catalogue of final events of each reanalysis datasets in order to determine how many common events they share and conclude on the performance of the methodology.

4.1. Probability Distribution Functions

The Probability Distribution Functions (PDFs) obtained from the maxima time-series of each variable are plotted in Figure 6 for ERAI, ERAI-2.5 and NCEP2. While the distributions of MSLP anomaly and 10-m wind speed ratio are nearly identical from one dataset to the other, the relative vorticity distributions differ: a first shift towards lower values is observed when downgrading the resolution (from ERAI to ERAI-2.5), a second one when changing the model (from ERAI-2.5 to NCEP2). This stresses out the added value of using intensity thresholds based on percentiles rather than absolute values in order to ensure the adaptability of the detection to different kinds of datasets.

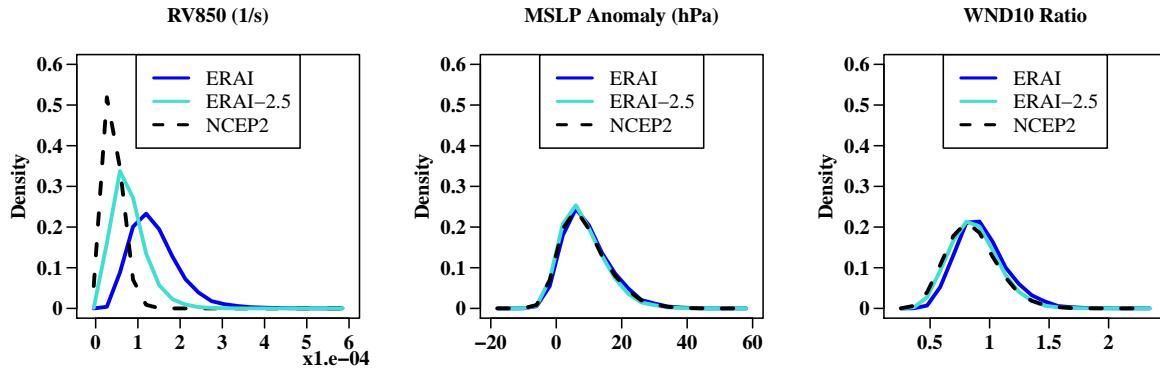


FIGURE 6 PROBABILITY DISTRIBUTIONS OF THE MAXIMA OF RELATIVE VORTICITY AT 850 hPa (RV850), MEAN SEA-LEVEL PRESSURE ANOMALY (MSLP ANOMALY) AND 10-M WIND SPEED RATIO (WND10 RATIO). ERA INTERIM DISTRIBUTION CURVES ARE REPRESENTED BY A DARK BLUE LINE, ERAI-2.5 DISTRIBUTION CURVES BY A LIGHT BLUE LINE AND THE BLACK – DASHED LINES REPRESENT NCEP2 DISTRIBUTIONS.

4.2. Single-variable and multi-variable catalogues

The results of the methodology are first shown in Figure 4 with, for each reanalysis datasets, the number of events generated with each of the variables, the number of common events to pair-wise variables and the number of events in the final set (i.e. events common to the three variables). The number of events common to the three variables is always reduced compared to the number of events within the catalogues of individual variable: 24 events with ERAI, 21 with ERAI-2.5 and 33 with NCEP2. Table 3 summarizes the number of insurance storms within each single-variable and multivariable catalogues as well as the total number of detected events and the resulting ratio. In terms of selectivity, the intersection of the three variables still leads to a higher ratio than the single-variable ones. With ERAI-2.5, we get the same insurance storms and also miss Herta (1990), Gero (2005) and Emma (2008) for the same reasons as with ERAI. With NCEP2, the ratio is lower than the XWS ratio but remains higher than the single-variable ratios. This is explained by the fact that five insurance storms are not detected: Herta (1990), Wiebke (1990), Lothar (1999), Gero (2005) and Emma (2008).

These results highlight two issues that prevent the detection of all the insurance storms with our methodology. The first one is linked to the spatial resolution: a model run at a low resolution may not be able to reproduce small-scale systems such as Wiebke (1990) and Lothar (1999). The underestimation of Lothar in NCEP2 was also mentioned in Pinto et al. (2012). Thus there is little that can be done to allow the detection of these events in such a

dataset. The second issue relates to the choice of the spatial window and the risk of missing events because of the offset between a low-pressure core and its maximum wind speed. The method has been applied to a wider window and lead to the detection of Gero (2005) and Emma (2008) but also a higher number of total events and a ratio of 0.15. The benefit of gaining two more insurance events is then lost because of the detection of a large number of final events.

4.3. Comparison of the final events between reanalysis datasets

Finally, we estimate the ability of the method to detect the same events from different datasets by computing the ratio of common events between two reanalysis datasets over the total number of events. The definition of common event between two datasets is as follow: if two final events generated and selected in two different datasets share a common time step, we consider that they actually exhibit the signature of the same event in each dataset respectively. Between ERAI and ERAI-2.5, the ratio value is 0.71: 15 common events divided by 21 events of ERAI-2.5. Between ERAI-2.5 and NCEP2, there are 16 common events within the 33 events of NCEP2; the resulting ratio is thus equal to 0.48. This means that almost half of the final events of NCEP2 are the same ones as those of ERAI-2.5. Although the two reanalysis datasets do not provide the same information in terms of extremes (e.g. small-scale systems), we succeed in detecting almost 50% of common extreme events. To compare, Pinto et al. (2012) selected the ten top-ranked events detected with a wind-based loss index in two reanalysis datasets, ERA40 and NCEP. They found that only two events were present in both cases. They highlight the difficulty of comparing extreme events, in particular because because the location of high wind speeds may differ from one dataset to the other.

It would not be possible to get our result by considering the most intense events in one variable only. We show in Figure 7 that the ten reference storms are not the ten most extreme events in any pair of reanalysis datasets and variables, which generalizes the result obtained with ERAI only. Additionally, the ranks of the ten reference storms vary with the dataset. For example, in order to select the ten reference storms with the anomaly of mean sea-level pressure, we must take the 55 first events with ERAI, the 110 first ones with ERAI-2.5 and the 100 first ones with NCEP2.

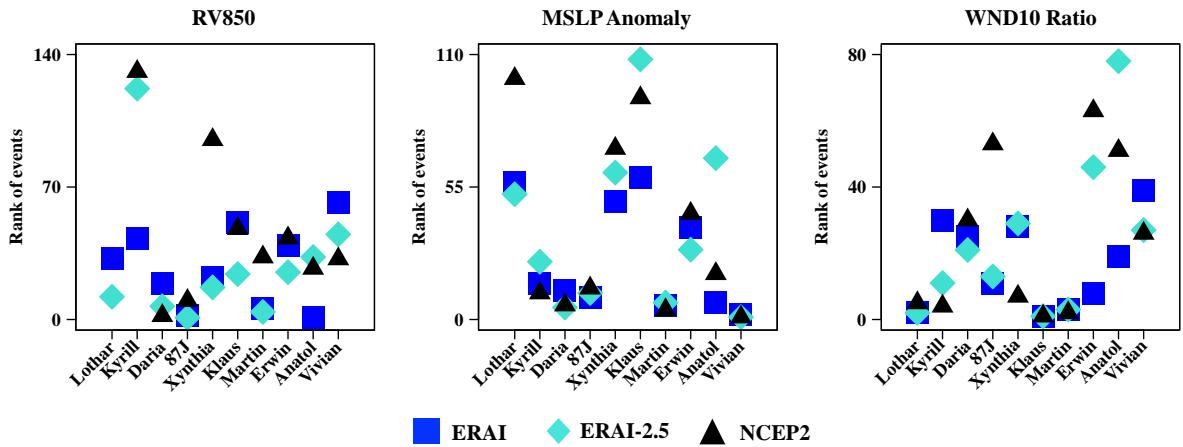


FIGURE 7 RANKING OF THE TEN REFERENCE STORMS USING RESPECTIVELY THE RELATIVE VORTICITY AT 850 HPA (RV850), THE MSLP ANOMALY (MSLP ANOMALY) AND THE 10-M WIND SPEED RATIO (WND10 RATIO). THE NAMES OF THE REFERENCE STORMS ARE RANKED ACCORDING TO THE MR DAMAGES.

5. Conclusions

The methodology presented in this paper enables the detection of windstorms with high damage potential. It is easily adaptable to different datasets or model outputs with different spatial resolutions. The method's novelty lies in its ability to target European winter windstorms with a potential impact on insurance policies by using exclusively meteorological variables.

Its robustness comes from two main factors: the definition of thresholds relative to the dataset and the use of other meso- and large-scale variables in addition to the surface wind speed. The use of thresholds based on percentiles of the distribution of the variables ensures the adaptability to different datasets, especially with varying resolutions. More originally, we show that a simple approach based on several variables of different scales is as efficient as approaches using only wind-based indices in selecting European winter windstorms with damage potential. First, in term of selectivity of events, we show that by taking the intersection of events selected with different variables separately, we not only reduce the total number of events but above all we retain most of the damaging ones. Second, when comparing the final events obtained with two different reanalysis datasets displaying important discrepancies in the reproduction of small-scale events, half of the final events are common to the two datasets, which suggests the robustness of the method. We still miss some

of the insurance storms either for intensity reason (1 or 3 events according to the dataset) or because of the offset effect (2 events). However the modification of the criteria in order to include those events leads to a depreciation of the overall results.

The methodology has been developed for the ETCs associated with windstorms that could generate important damages in Europe. Therefore the choice of the window and the fact that we focus on extremes allow us to make assumptions that would not be possible in other regions. However the approach we used to define the methodology can be applied to other regions and hazards. We hope this analysis will provide a new perspective on the quantification of damage potential of natural hazards.

References

- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., Van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, L., Källberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., De Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F., 2011. The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137, 553–597.
- Della-Marta, P.M., Mathis, H., Frei, C., Liniger, M.A., Kleinn, J., Appenzeller, C., 2009. The Return Period of Wind Storms Over Europe. *Int J Climatol* 29, 437–459.
- Donat, M.G., Leckebusch, G.C., Wild, S., Ulbrich, U., 2011. Future Changes in European Winter Storm Losses and Extreme Wind Speeds Inferred from GCM and RCM Multi-Model Simulations. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11, 1351–1370.
- Feldstein, S.B., 2000. The Timescale, Power Spectra, and Climate Noise Properties of Teleconnection Patterns. *Journal of Climate* 13, 4430–4440.
- Gulev, S.K., Zolina, O., Grigoriev, S., 2001. Extratropical Cyclone Variability in the Northern Hemisphere Winter from the NCEP/NCAR Reanalysis Data. *Clim Dyn* 17, 795–809.
- Hanley, J., Caballero, R., 2012. Objective Identification and Tracking of Multicentre Cyclones in the ERA-Interim Reanalysis Dataset. *Q J R Meteorol Soc* 138, 612–625.
- Hodges, K.I., Lee, R.W., Bengtsson, L., 2011. A Comparison of Extratropical Cyclones in Recent Reanalyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25. *J Climate* 24, 4888–4906.
- Hoskins, B.J., Hodges, K.I., 2002. New Perspectives on the Northern Hemisphere Winter Storm Tracks. *J Atmos Sci* 59, 1041–1061.

Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.-K., Hnilo, J.J., Fiorino, M., Potter, G.L., 2002. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society* 83, 1631–1643.

Klawa, M., Ulbrich, U., 2003. A Model for the Estimation of Storm Losses and the Identification of Severe Winter Storms in Germany. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 3, 725–732.

Leckebusch, G.C., Renggli, D., Ulbrich, U., 2008. Development and Application of an Objective Storm Severity Measure for the Northeast Atlantic Region. *Met Zeit* 17, 575–587.

Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., Fröhlich, L., Pinto, J.G., 2007. Property Loss Potentials for European Midlatitude Storms in a Changing Climate. *Geophys Res Lett* 34.

Mayencon, R., 2000. La violente tempête du 20 décembre 1998. *La Météorologie* 8, 32.

Murray, R., Simmonds, I., 1991. A Numerical Scheme for Tracking Cyclone Centres from Digital Data. I. Development and Operation of the Scheme. *Aust Met Mag* 39, 155–166.

Neu, U., Akperov, M.G., Bellenbaum, N., Benestad, R., Blender, R., Caballero, R., Cocozza, A., Dacre, H.F., Feng, Y., Fraedrich, K., Grieger, J., Gulev, S., Hanley, J., Hewson, T., Inatsu, M., Keay, K., Kew, S.F., Kindem, I., Leckebusch, G.C., Liberato, M.L.R., Lionello, P., Mokhov, I.I., Pinto, J.G., Raible, C.C., Reale, M., Rudeva, I., Schuster, M., Simmonds, I., Sinclair, M., Sprenger, M., Tilinina, N.D., Trigo, I.F., Ulbrich, S., Ulbrich, U., Wang, X.L., Wernli, H., 2012. IMILAST – a community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms: assessing method-related uncertainties. *Bulletin of the American Meteorological Society* 120919072158001.

Pinto, J., Karremann, M., Born, K., Della-Marta, P., Klawa, M., 2012. Loss potentials associated with European windstorms under future climate conditions. *Climate Research* 54, 1–20.

Pinto, J.G., Fröhlich, E.L., Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2007. Changing European storm loss potentials under modified climate conditions according to ensemble simulations of the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. *Natural Hazards and Earth System Science* 7, 165–175.

Rivière, G., Joly, A., 2006. Role of the Low-Frequency Deformation Field on the Explosive Growth of Extratropical Cyclones at the Jet Exit. Part I: Barotropic Critical Region. *Journal of the Atmospheric Sciences* 63, 1965–1981.

Sinclair, M.R., 1997. Objective Identification of Cyclones and Their Circulation Intensity, and Climatology. *Weather Forecast* 12, 595–612.

Ulbrich, U., Leckebusch, G.C., Pinto, J.G., 2009. Extra-Tropical Cyclones in the Present and Future Climate: A Review. *Theor Appl Climatol* 96, 117–131.

Conclusions

L'objectif fixé au début de ce travail de recherche était de développer une méthode pour extraire les tempêtes de vent hivernales à fort potentiel d'impact en Europe. Un facteur important de cette méthode est son adaptabilité à des données issues de modèles différents et de résolutions spatiales différentes. En effet, la finalité du travail de doctorat est, à partir des modèles participant au projet CMIP5, l'estimation de l'impact du changement climatique sur les tempêtes de vent hivernales extrêmes en Europe.

La méthode élaborée s'appuie sur la détection d'événements à l'aide de trois variables météorologiques capturant des échelles spatiotemporelles différentes : la vorticité relative à 850 hPa, la pression au niveau de la mer et le vent de surface. Un événement est considéré comme ayant un fort potentiel d'impact en Europe si sa signature dans les trois champs est particulièrement intense, les seuils d'intensité étant fixés à partir de dix événements historiques. En utilisant les réanalyses ERA Interim, 24 événements sont sélectionnés. L'analyse de ces 24 événements montre qu'il s'agit soit d'événements ayant réellement causé des dommages (dont 10 événements historiques), soit d'événements qui ont traversé des régions de faible exposition et n'ont donc pas causé de dommages aussi importants. Il n'est pas possible d'éviter de détecter ces événements qui partagent la même signature intense que les événements historiques ou d'autres événements ayant causé des dommages. Ce résultat se retrouve également dans les études s'appuyant sur des indices de type sévérité de tempête ou proxy de pertes.

L'adaptabilité de la méthode à des données de résolution spatiale plus faible a été vérifiée en l'appliquant aux réanalyses NCEP2, de résolution spatiale $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. Les résultats ont montré que la méthode permet, dans une certaine mesure, d'extraire les événements ayant causé des dommages dans le passé. Cependant, la résolution spatiale du modèle ne permet pas de reproduire l'intensité de certains systèmes de petite échelle pouvant générer des dommages importants, comme la tempête Lothar en Décembre 1999. Ce point a également été souligné dans des études utilisant des indices de vent. Une des conséquences de ce constat est que les modèles CMIP5 ayant une résolution spatiale inférieure à 2.5° ne seront pas considérés dans l'étude sur l'impact de l'évolution des conditions atmosphériques sur les tempêtes de vent hivernales à fort potentiel d'impact en Europe.

La méthode a également été appliquée à une fenêtre spatiale plus grande que celle considérée initialement. Ce travail a mené à des résultats concluants : une fois les seuils adaptés aux

valeurs des événements historiques, un nombre réduit d'événements (64) est extrait. Cependant, une grande partie de ces événements sont situés dans la région Scandinave, et augmente ainsi le nombre d'événements détectés avec la méthode mais n'ayant pas causé de dommages. Cette étude a tout de même permis de montrer que la méthode peut être appliquée à une plus grande fenêtre, ce qui sera important pour la suite du travail. En effet, un déplacement des trajectoires a déjà été montré dans des études traitant de l'impact de l'évolution des concentrations atmosphériques sur les cyclones extratropicaux. L'application de la méthode aux données issues des modèles CMIP5 pourrait donc nécessiter l'utilisation d'une fenêtre spatiale plus grande.

Enfin, la méthode a également été appliquée aux données du modèle WRF-IPSL exécuté dans le cadre du projet EUROCORDEX à deux résolutions spatiales (0.44° et 0.11°) sur un domaine spatial couvrant la région Nord-Atlantique / Europe et sur une période de 1989 à 2008 (Jacob et al., 2013 ; Vautard et al., 2013). Au cours de l'étude, les données issues du modèle à 0.11° ont été utilisées. Lors de cette étude, seules les données de l'expérience CTRL étaient disponibles. Pour cette expérience, le modèle WRF-IPSL est guidé aux bords du domaine par les réanalyses ERA Interim.

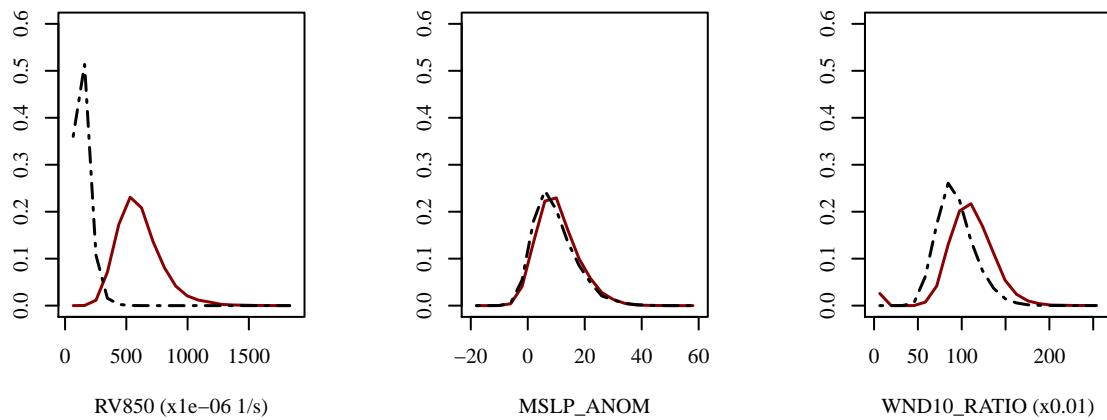


FIGURE 26 : DENSITE DE PROBABILITE DES MAXIMA DE VORTICITE RELATIVE (RV850), D'ANOMALIE DE PRESSION (MSLP ANOM) ET DE RATIO DE VENT A 10M (WND10 RATIO) POUR ERA INTERIM (COURBE TIREE GRISE) ET WRF-IPSL (COURBE TIREE ROUGE).

La Figure 26 présente les PDFs pour ERA Interim (courbe tiretée grise) et WRF-IPSL (courbe pleine rouge). La vorticité relative est la variable la plus sensible au changement de résolution: plus la résolution spatiale est fine, plus les valeurs atteintes sont élevées. L'anomalie de pression atteint des valeurs comparables dans les deux jeux de données tandis que le ratio de vent à 10m présente des valeurs légèrement plus élevées dans ERA Interim.

L'application de la méthode à ce jeu de données a conduit à la détection de 10 événements avec un fort potentiel de dommages en Europe sur la période 1989 – 2008, dont 3 tempêtes de référence (Lothar, Martin et Kyrill). Sur ces 10 événements communs aux trois variables, 5 sont également en commun avec les 24 événements d'ERA Interim. WRF-IPSL, guidé uniquement aux bords du domaine par ERA Interim, est donc capable de produire des tempêtes de vent comme définies par notre méthode mais ne reproduit pas forcément les mêmes que celles obtenues avec ERA Interim. Ce résultat est mis en valeur par la comparaison des maxima supérieurs au 98^e percentile de chaque distribution entre WRF-IPSL et ERA Interim (Figure 27).

En considérant les maxima supérieurs au 98^e percentile de chacune des distributions, il est possible d'extraire ceux qui surviennent au même pas de temps dans les deux jeux de données. Ainsi, seulement 18% des 285 maxima de vorticité relative supérieurs au 98^e percentile surviennent au même pas de temps dans les deux jeux de données. Ils sont respectivement 60% et 20% pour l'anomalie de pression et le ratio de vitesse de vent. Pour les maxima survenant à un même pas de temps, les graphiques de la première ligne indiquent la différence de rang, tandis que les graphiques de la seconde ligne renseignent sur la distance entre deux maxima. WRF-IPSL ne reproduit donc pas exactement l'intensité d'ERA Interim, mais lorsque c'est le cas il reproduit le maximum au même endroit. Ce résultat est le plus visible pour la pression et la vorticité relative. Pour la première variable, un grand nombre de maxima supérieurs au 98^e percentile de la distribution sont retrouvés dans les deux jeux de données à une distance inférieure à 250 kms, indiquée par la ligne rouge. Pour la vorticité relative, peu de maxima sont retrouvés en commun, mais pour les 18% qui le sont, leur distance est inférieure à 250 kms.

Cette étude avec les données de WRF-IPSL a permis de mettre en évidence la limitation de la méthode vis-à-vis de la résolution spatiale. En effet, plus la résolution spatiale est fine, plus la structure du champ de vorticité relative s'affine et prend la forme de filaments qui ne sont pas capturés à l'aide de la méthode. Il est alors délicat de détecter un maximum global sur la

fenêtre spatiale. L'étude à l'aide de la méthode a cependant montré que WRF-IPSL, guidé seulement aux bords du domaine, est capable de reproduire à l'intérieur du domaine des tempêtes de vent intenses.

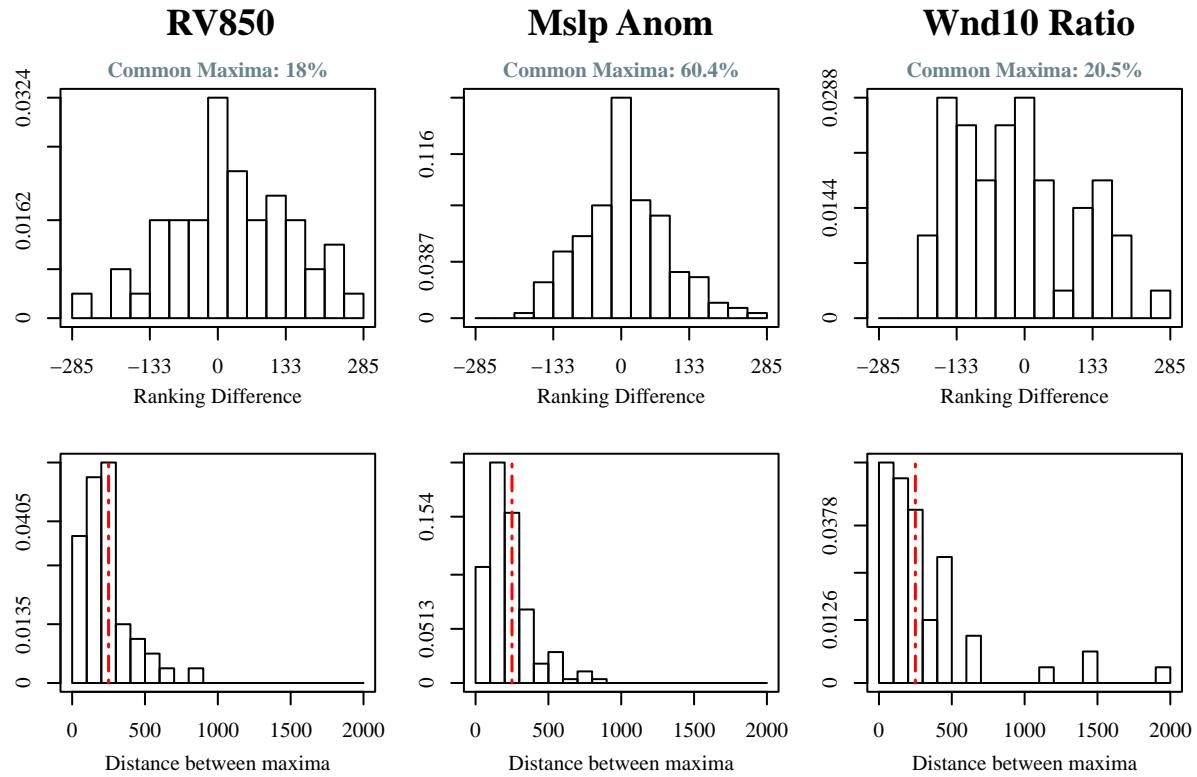


FIGURE 27 : COMPARAISON DES MAXIMA DETECTES AU MEME PAS DE TEMPS DANS ERA INTERIM ET WRF-IPSL POUR CHACUNE DES TROIS VARIABLES. SEULS LES MAXIMA SUPERIEURS AU 98^E PERCENTILE SONT CONSIDERES. LES GRAPHIQUES EN HAUT PRESENTENT LES DIFFERENCES DE RANG ENTRE LES MAXIMA TANDIS QUE LES GRAPHIQUES DU BAS PRESENTENT LA DISTANCE ENTRE DEUX MAXIMA. LA LIGNE ROUGE INDIQUE UNE DISTANCE DE 250 KMS.

Le prochain chapitre présente le travail mené à partir des données issues des modèles de climat participant au projet CMIP5. L'objectif sera dans un premier temps d'évaluer la capacité de ces modèles à reproduire les tempêtes de vent hivernale à fort impact en Europe à l'aide de la méthode. L'estimation de l'impact d'une modification des conditions atmosphériques sera ensuite réalisée.

Chapitre 5 :

Application aux sorties de modèles du projet CMIP5

| | |
|--|-----|
| INTRODUCTION | 115 |
| DETECTION DES TEMPETES A FORT POTENTIEL D'IMPACT EN EUROPE DANS LES SIMULATIONS DE L'EXPERIENCE <i>HISTORICAL</i> – COMPARAISON A ERA INTERIM | 116 |
| Densité de probabilité | 117 |
| Caractérisation des événements détectés avec la méthode | 119 |
| ÉVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DES TEMPETES A FORT POTENTIEL DE DOMMAGES EN EUROPE – COMPARAISON DES EXPERIENCES <i>HISTORICAL</i> ET <i>RCP4.5</i> | 124 |
| Présentation du cadre de l'analyse | 124 |
| Résultats de l'analyse | 125 |
| CONCLUSIONS | 130 |

Introduction

Comme annoncé dans le Chapitre 3, l'étude des simulations des modèles CMIP5 s'effectue en deux étapes. Il s'agit tout d'abord d'évaluer la capacité des modèles à reproduire les caractéristiques et les statistiques des événements détectés avec la méthode multi-variable. Dans un second temps, il s'agit d'évaluer l'impact d'un changement climatique sur ces caractéristiques. Les données utilisées pour répondre à cet objectif sont issues des simulations réalisées par les modèles de climat global participant au projet CMIP5 (Taylor et al., 2012). Dans le cadre de ce projet, plusieurs expériences sont réalisées afin de capturer au mieux les effets de l'évolution de la composition de l'atmosphère en gaz à effet-de-serre, aérosols et autres particules sur les mécanismes atmosphériques et océaniques (Moss et al., 2010).

Le choix des modèles considérés pour cette étude s'appuie tout d'abord sur la résolution spatiale qui doit être au moins aussi fine que celle des données NCEP2, de résolution T62 projetée sur une grille régulière $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. Une seconde condition liée à la disponibilité des variables en sortie du modèle a d'abord été envisagée. En effet, la méthode présentée dans le Chapitre 4 utilise la vorticité relative à 850 hPa, l'anomalie de pression et le ratio de vent à la surface, toutes les trois à une résolution temporelle de 6 heures. Cependant, le vent de surface à cette résolution temporelle n'est pas une sortie standard des simulations CMIP5, et seulement 5 modèles la proposent. C'est pourquoi il a été décidé de remplacer le champ de vent à la surface par le champ de vent à 850 hPa, soit une altitude d'environ 1.5 km, sortie standard des modèles CMIP5. Afin de s'assurer que l'utilisation de cette nouvelle variable n'impacte pas les résultats obtenus précédemment, la méthode intégrant la vitesse du vent à 850 hPa a été appliquée à ERA Interim. Les résultats seront détaillés dans la première section de ce chapitre. Finalement, 15 modèles CMIP5 sont utilisés dans l'étude (Tableau 5). Suite à des difficultés rencontrées au cours de leur téléchargement, les données du modèle MIROC5 ne sont pas intégrées dans l'analyse présentée dans ce manuscrit.

La première section du chapitre présente les résultats de la méthode avec les modèles CMIP5 sur la période historique 1979 – 2005 et la comparaison à ceux obtenus avec ERA Interim sur la même période. La seconde section contient l'évaluation de l'impact d'un changement des conditions atmosphériques actuelles sur les caractéristiques des événements détectés avec la méthode. Les projections futures simulées par les modèles CMIP5 sont divisées en trois périodes de 30 hivers chacune (2006 – 2036, 2036 – 2066 et 2066 – 2096) et les résultats pour chaque période sont comparés à ceux de la période 1975 – 2005 de l'expérience *historical*.

Détection des tempêtes à fort potentiel d'impact en Europe dans les simulations de l'expérience *historical* – Comparaison à ERA Interim

L'objectif de ce travail est d'évaluer la capacité des modèles à reproduire les caractéristiques des tempêtes de vent en Europe, telles que définies par la méthode présentée précédemment. Les données utilisées sont issues d'une part des réanalyses ERA Interim sur la période 1979 – 2005 et qui servent de référence pour l'évaluation des modèles CMIP5, et d'autre part des simulations des modèles CMIP5 pour l'expérience *historical*, extraites sur la période 1979 – 2005. Les modèles considérés pour l'étude sont indiqués dans le Tableau 5. Les modèles couvrent pour la plupart la période 1950 – 2005, sauf MIROC5, IPSL-CM5A-MR, GFDL-ESM2G et GFDL-ESM2M qui remontent jusqu'à la moitié du 19^e siècle.

| Modèle | Institution | Longitude (°) | Latitude (°) | Niveaux verticaux | historical | rcp4.5 |
|--------------|--|---------------|--------------|-------------------|------------|-----------|
| MIROC4h | Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Tokyo | 0,6 | 0,6 | 57 | 1950-2005 | 2006-2035 |
| CCSM4 | NCAR, United States | 1,3 | 0,9 | 27 | 1950-2005 | 2006-2100 |
| MRI-CGCM3 | Meteorological Research Institute, Japan | 1,1 | 1,1 | 48 | 1950-2005 | 2006-2100 |
| ACCESS1.3 | Commonwealth Scientific and Industrial | 1,9 | 1,2 | 38 | 1950-2005 | 2006-2100 |
| ACCESS1-0 | Commonwealth Scientific and Industrial | 1,9 | 1,2 | 38 | 1950-2005 | 2006-2100 |
| HadGEM2-CC | Met Office Hadley Centre, United Kingdom | 1,9 | 1,2 | 38 | 1949-2005 | 2006-2100 |
| HadGEM2-ES | Met Office Hadley Centre, United Kingdom | 1,9 | 1,2 | 38 | 1950-2005 | 2009-2099 |
| IPSL-CM5A-MR | IPSL, France | 2,5 | 1,3 | 39 | 1850-2005 | 2006-2100 |
| CNRM-CM5 | CNRM - CERFACS, France | 1,4 | 1,4 | 31 | 1950-2005 | 2006-2100 |
| MIROC5 | MIROC, Japan | 1,4 | 1,4 | 40 | 1850-2012 | 2006-2100 |
| MPI-ESM-LR | MPI, Germany | 1,9 | 1,9 | 47 | 1950-2005 | 2006-2100 |
| MPI-ESM-MR | MPI, Germany | 1,9 | 1,9 | 95 | 1950-2005 | 2006-2100 |
| NorESM1-M | Norwegian Climate Centre, Norway | 2,5 | 1,9 | 26 | 1950-2005 | 2006-2300 |
| GFDL-ESM2G | GFDL, United States | 2,5 | 2,0 | 24 | 1861-2005 | 2006-2100 |
| GFDL-ESM2M | GFDL, United States | 2,5 | 2,0 | 24 | 1861-2005 | 2006-2100 |

TABLEAU 5 : LISTE DES QUINZE MODELES CMIP5 UTILISES POUR L'ETUDE. MIROC5 EST SURLIGNE EN ROUGE POUR INDICER QUE LES DONNEES NE SONT PAS COMPLETES POUR CETTE ETUDE.

La méthode a été appliquée aux deux fenêtres spatiales déjà utilisées lors de l'élaboration de la méthode multi-variable (Figure 28). Dans le Chapitre 4, il a été montré que la taille de la fenêtre a un impact sur la valeur des seuils de détection et de sélection de la méthode et qu'il

nécessaire d'ajuster ces seuils. Pour la fenêtre réduite sur l'Europe de l'ouest (graphique de gauche de la Figure 28), les seuils sont définis par les 95^e et 98^e percentiles, tandis que pour la fenêtre étendue aux péninsules ibérique et scandinave (graphique de droite de la Figure 28), les seuils sont définis par les 90^e et 95^e percentiles. Dans ce chapitre, les résultats seront présentés pour la fenêtre étendue à cause du plus grand nombre d'événements détectés.

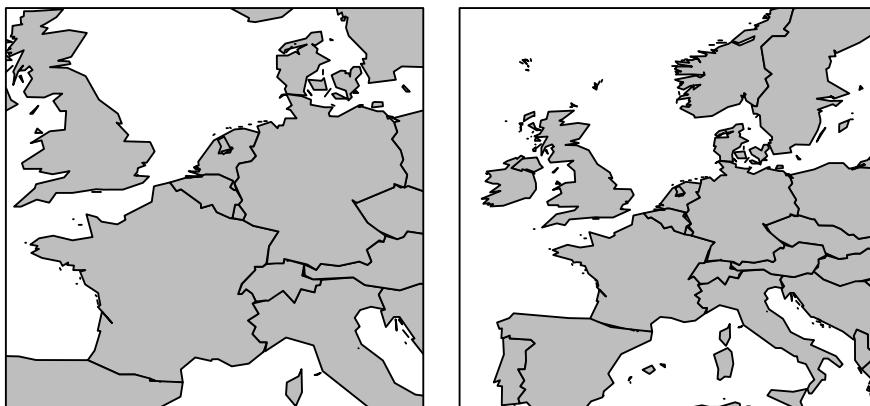


FIGURE 28 : PETITE (GAUCHE) ET GRANDE (DROITE) FENETRES UTILISEES POUR L'ETUDE.

La méthode utilisant le vent à 850 hPa à la place du vent de surface a été appliquée à la fenêtre étendue et sur la période 1987 – 2010 considérée dans le Chapitre 4. Au total, le même nombre d'événements a été sélectionnés, soit 62 événements. Les tempêtes de référence, à l'exception de Wiebke (1990), sont sélectionnées et sur les 62 événements, 45 sont en commun avec ceux sélectionnés avec le vent de surface et 21 événements sont en commun avec ceux du catalogue XWS utilisé dans le Chapitre 4 pour évaluer les résultats.

Densité de probabilité

Les seuils de détection et de sélection s'appuient sur les percentiles des distributions de probabilité des trois variables. La première étape de l'étude est donc de comparer les densités de probabilité (PDF) des modèles CMIP5 à celles de ERA Interim. La Figure 29 présente, pour chacune des variables utilisées par la méthode, la densité de probabilité dans les graphiques supérieurs ainsi que le ratio entre les modèles et ERA Interim de la valeur des 90^e et 95^e percentiles des distributions dans les graphiques inférieurs.

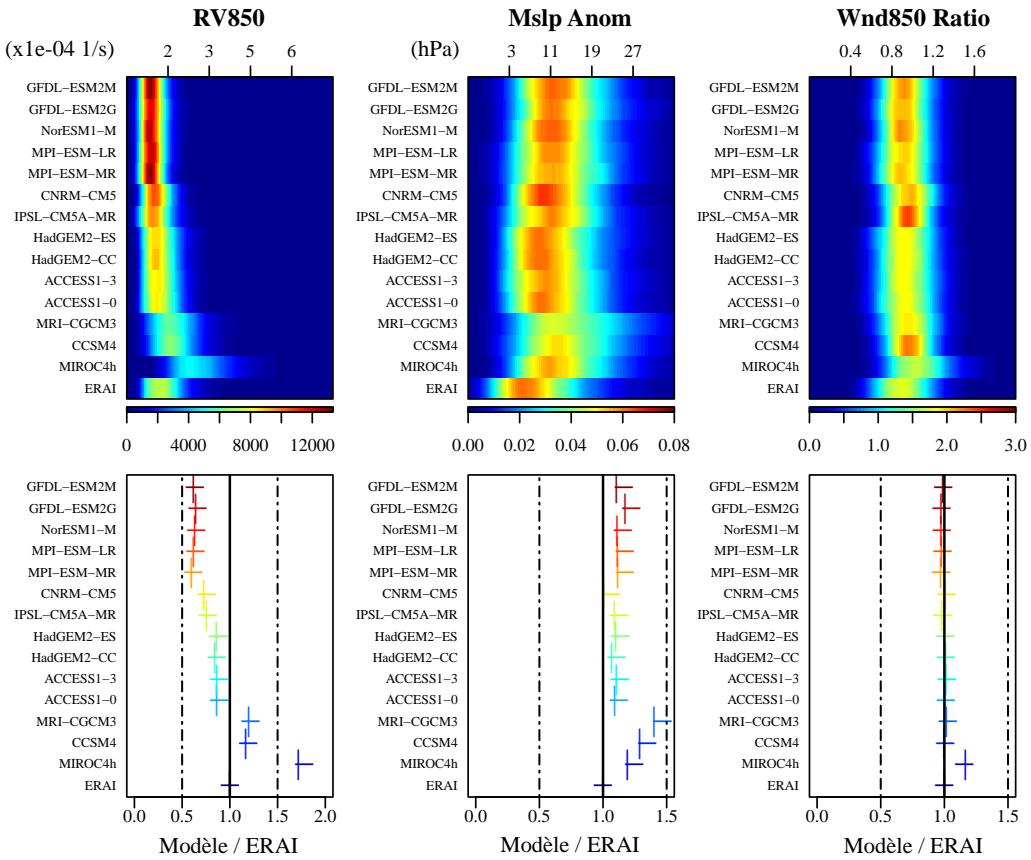


FIGURE 29 : EN HAUT : DISTRIBUTIONS DE PROBABILITE POUR ERA INTERIM ET LES QUATORZE MODELES CMIP5 POUR LA VORTICITE RELATIVE A 850 hPa, L'ANOMALIE DE PRESSION ET LE RATIO DE VENT A 850 hPa (DE GAUCHE A DROITE). EN BAS : RATIO ENTRE CHAQUE MODELE ET ERAI DU 95^e (LIGNE VERTICALE) ET DU 90^e (LIGNE HORIZONTALE) PERCENTILE DE LA DISTRIBUTION.

L'impact de la résolution spatiale sur la vorticité relative, déjà observé avec les réanalyses, est visible : plus la résolution spatiale est fine (MRI-CGCM3, CCSM4 et MIROC4), plus les valeurs atteintes par la vorticité relative sont élevées. Sur les trois variables, les modèles ACCESS et HadGEM2 ont des distributions proches de celles d'ERA Interim. MIROC4h, modèle dont la résolution spatiale est plus fine que celle d'ERA Interim, présente une intensité plus élevée qu'ERA pour les trois variables. Le ratio du vent à 850 hPa est la variable pour laquelle les modèles ont les valeurs les plus proches de celles d'ERA. Ce résultat est dû à la définition de la variable comme le rapport entre le vent à 850 hPa et son 98^e percentile.

Caractérisation des événements détectés avec la méthode

Seules les caractéristiques des événements détectés simultanément dans les trois variables seront présentées. Ces caractéristiques regroupent les aspects de fréquence et d'intensité des événements mais également leur répartition temporelle par an et sur les mois d'hiver.

La Figure 30 présente la fréquence annuelle et l'intensité des événements détectés pour chacune des trois variables. La fréquence annuelle est définie par le nombre d'événements détectés par la méthode divisé par le nombre d'hivers de la période 1979 – 2005, soit 26 hivers. Dans les graphiques supérieurs, les différentes caractéristiques sont présentées pour chaque modèle (cercles de couleur) et ERA Interim (point bleu), et les graphiques inférieurs reprennent cette information sous la forme du ratio entre la valeur de chaque modèle et celle d'ERA Interim.

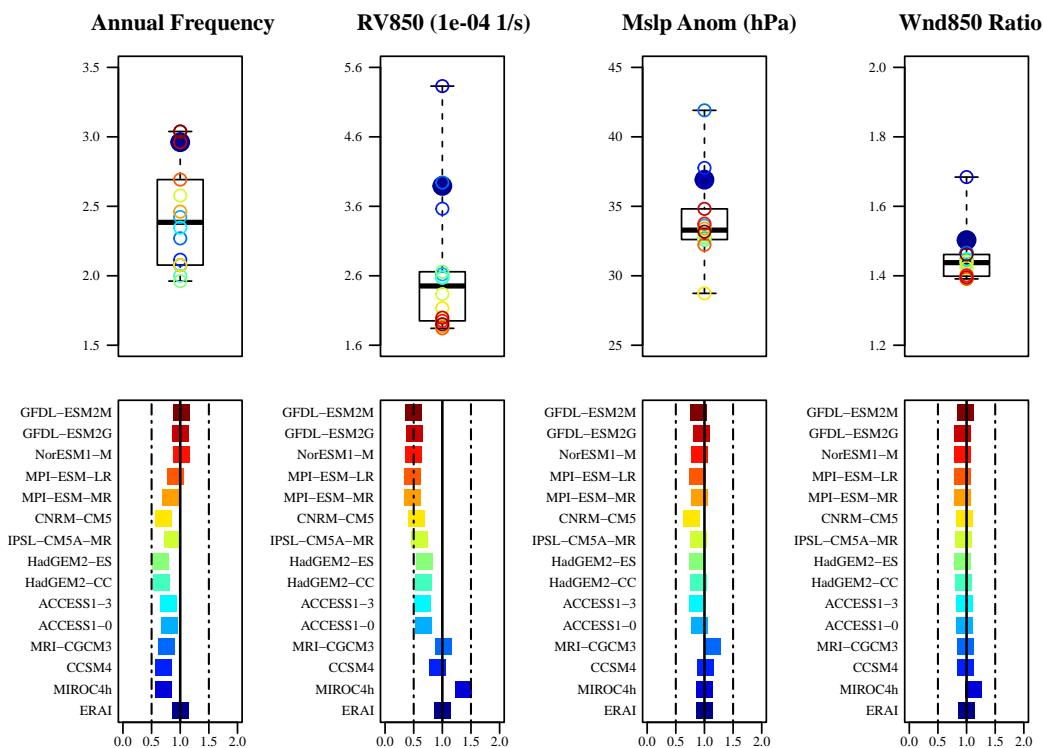


FIGURE 30 : FREQUENCE ANNUELLE ET MOYENNE DE LA VORTICITE RELATIVE A 850 hPa, L'ANOMALIE DE PRESSION ET LE RATIO DE VENT A 850 hPa SUR L'ENSEMBLE DES EVENEMENTS DETECTES PAR LA METHODE. LES BOXPLOTS DU HAUT PRESENTENT LA DISTRIBUTION POUR L'ENSEMBLE DES MODELES (LA VALEUR POUR ERA INTERIM EST INDIQUEE PAR UN POINT BLEU FONCE) ET LES GRAPHIQUES DU BAS PRESENTENT LE RATIO MODELE / REANALYSE POUR CHAQUE MODELE.

Les quatorze modèles CMIP5 sous-estiment la valeur de la fréquence annuelle, ce qui traduit un nombre d'événements détectés sur la période 1979 – 2005 plus faible que celui obtenu avec ERA Interim. Ainsi, mis à part NorESM1-M et les modèles GFDL-ESM2, entre 10 et 33% d'événements en moins sont détectés dans les modèles. Cette sous-estimation du nombre d'événements atteignant la zone Européenne peut être expliquée par le biais des modèles CMIP5 sur la position du *storm track*, situé plus proche de l'Équateur dans les modèles que dans les observations (Chang et al., 2012; Zappa et al., 2013a). Par ailleurs, les modèles dont la résolution spatiale est plus grossière produisent plus d'événements que les modèles à fine résolution, ce qui avait déjà été observé avec les réanalyses ERA Interim et NCEP2.

La capacité des modèles CMIP5 à reproduire la répartition temporelle des événements détectés par la méthode a également été évaluée. Le graphique supérieur de la Figure 31 présente le cycle saisonnier pour l'ensemble des modèles CMIP5 (cercles de couleur) et pour ERA Interim (point bleu), et le graphique inférieur indique le ratio de chaque modèle CMIP5 par rapport à ERA Interim. Il ressort de cette figure qu'en moyenne, la majorité des événements détectés dans les modèles CMIP5 survient en Janvier alors qu'avec ERA Interim ce maximum d'activité se produit en Décembre. Par ailleurs, en moyenne, le nombre d'événements détectés au cours des trois premiers mois de la saison hivernale sont sous-estimés tandis qu'au cours des mois de Janvier et Février, ce nombre est surestimé. Seul la valeur du pourcentage d'événements survenant au mois de Mars est bien reproduite en moyenne par les modèles CMIP5.

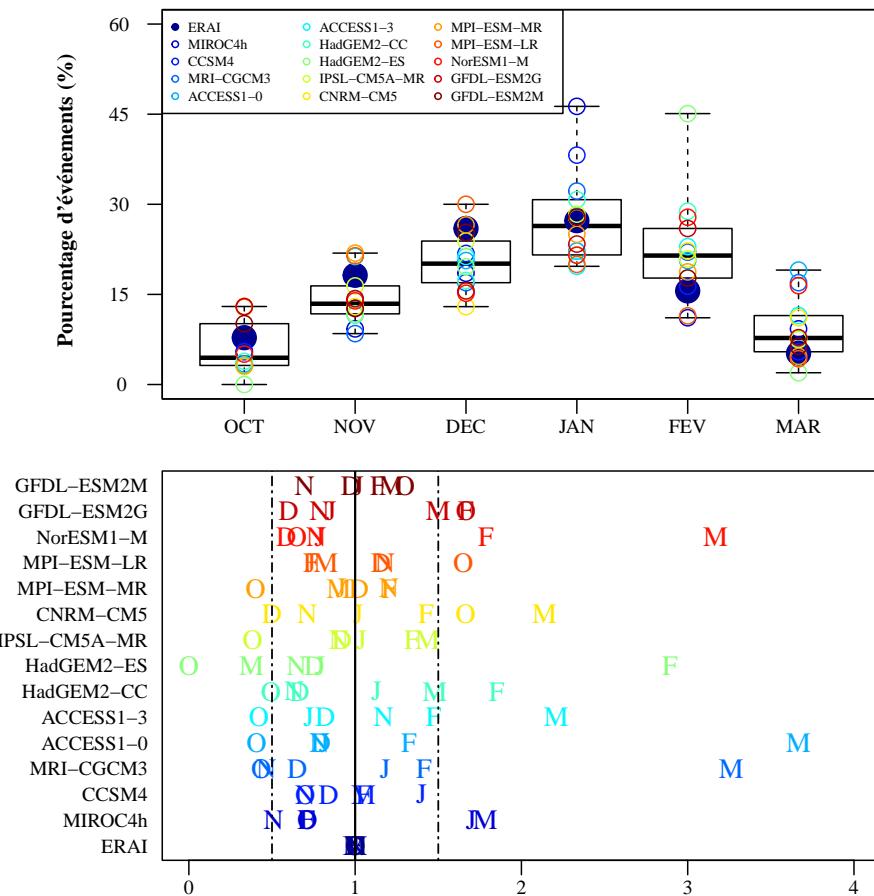


FIGURE 31 : REPARTITION TEMPORELLE DES EVENEMENTS DETECTES PAR LA METHODE. LE GRAPHIQUE DU HAUT PRESENTE, POUR CHAQUE MOIS, LA DISTRIBUTION POUR L'ENSEMBLE DES MODELES. LE GRAPHIQUE DU BAS PRESENTE LE RATIO MODELE / REANALYSE POUR CHAQUE MODELE. L'AXE HORIZONTAL DU GRAPHIQUE DU BAS INDIQUE LA VALEUR DU RATIO MODELE / REANALYSE ET LES LETTRES INDIQUENT LE MOIS D'OCCURRENCE.

Enfin, une caractéristique des tempêtes de vent en Europe qui est importante pour les assureurs est l'occurrence de plusieurs événements dans la même année. La répartition des hivers en 6 classes, de 0 événements à plus de quatre événements par hiver, est présentée dans la Figure 32. Les modèles CMIP5 reproduisent bien cette fréquence d'occurrence en moyenne pour les classes de 0 à 3 événements. Le nombre d'hivers à 4 ou plus événements est sous-estimé en moyenne par rapport à ERA Interim.

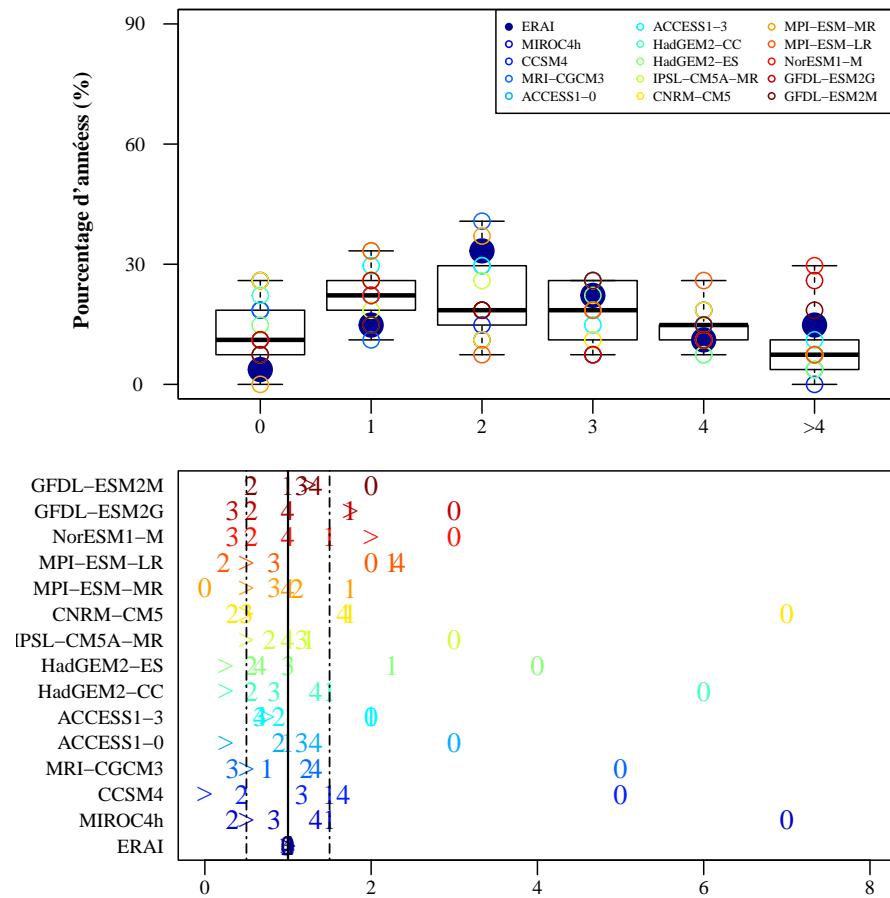


FIGURE 32 : NOMBRE D'EVENEMENTS PAR AN DETECTES PAR LA METHODE. LE GRAPHIQUE DU HAUT PRESENTE LA DISTRIBUTION POUR L'ENSEMBLE DES MODELES. L'AXE HORIZONTAL INDIQUE LE NOMBRE D'EVENEMENTS PAR HIVER. LE GRAPHIQUE DU BAS PRESENTE LE RATIO MODELE / REANALYSE POUR CHAQUE MODELE. L'AXE HORIZONTAL INDIQUE LA VALEUR DU RATIO MODEL / REANALYSE ET LES CHIFFRES SUR LE GRAPHIQUE RAPPELLENT LE NOMBRE D'EVENEMENTS PAR HIVER.

Par ailleurs, l'impact de la taille de la fenêtre spatiale considérée est particulièrement important sur la distribution annuelle des événements (Figure 33). En effet, alors que les hivers à 1 événement sont plus fréquents en utilisant la fenêtre spatiale étendue, ce sont les hivers sans événements qui sont le plus fréquents avec la fenêtre centrée sur l'Europe de l'Ouest. Ce sont d'ailleurs pour les classes 0 et 1 événement que la moyenne des modèles est la plus éloignée de la valeur issue de ERA Interim, sur la fenêtre réduite. Les modèles CMIP5 pour lesquels des années à plus de 4 événements surviennent sont ceux dont la résolution spatiale est la plus faible.

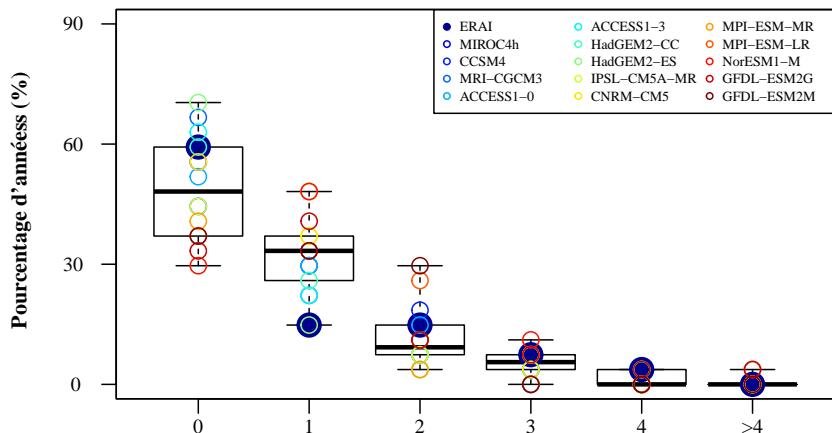


FIGURE 33 : NOMBRE D'EVENEMENTS PAR AN DETECTES PAR LA METHODE SUR LA FENETRE CENTREE SUR L'EUROPE DE L'OUEST.

Pour conclure sur cette première analyse, les modèles CMIP5 reproduisent les caractéristiques des événements détectés avec la méthode. La fréquence annuelle est sous-estimée de 25% en moyenne. La vorticité relative est fortement impactée par la résolution spatiale et cela se traduit par une intensité plus forte dans les modèles dont la résolution spatiale est de l'ordre de $1^\circ \times 1^\circ$. L'anomalie de pression et le ratio du vent à 850 hPa semblent être moins sensibles à la résolution spatiale, avec un ratio modèle sur réanalyses en moyenne égale à 1. Enfin, la répartition annuelle et saisonnière des événements est bien reproduite en moyenne par les modèles. Cependant, une sous-estimation (surestimation) peut être observée pour le pourcentage d'événements survenant en Décembre (Février). La résolution spatiale semble également avoir un impact sur la répartition du nombre d'événements par hiver, les modèles avec une résolution spatiale plus grossière produisant plus d'hivers à 4 et plus d'événements.

Évolution des caractéristiques des tempêtes à fort potentiel de dommages en Europe – Comparaison des expériences *historical* et *rcp4.5*

Présentation du cadre de l'analyse

Pour cette analyse, les données issues des expériences *historical* et *rcp4.5* simulées par les modèles CMIP5 sont comparées. L'expérience *rcp4.5* est divisée en trois périodes de 30 hivers : 2006 – 2036, 2036 – 2066 et 2066 – 2096. Seul MIROC4h n'est disponible que pour la période 2006 – 2036. Les résultats obtenus pour chacune des trois périodes sont comparés aux résultats obtenus pour la période 1975 – 2005 de l'expérience *historical*. Afin de faciliter la comparaison des résultats entre les périodes, les seuils de détection et de sélection sont fixés à ceux de la période *historical*.

Pour chacune des caractéristiques étudiées, les distributions des modèles pour chaque période sont tout d'abord représentées et permettent de mesurer l'écart entre les modèles (écart inter-modèle) pour chacune des périodes. Ensuite, pour chaque modèle, la moyenne et la variance de chaque caractéristique sont calculées sur les quatre périodes considérées et moyennées sur les quatorze modèles. Ces deux paramètres obtenus, la moyenne des moyennes (appelée moyenne intra-modèle par la suite) et la moyenne des variances (appelée variance intra-modèle ou écart-type intra-modèle lorsque la racine carrée de la variance intra-modèle est utilisée), donnent une estimation de l'évolution intra-modèle moyenne et seront utilisés pour caractériser la variabilité naturelle. Cette dernière sera définie par la suite par l'intervalle intra-modèle égal à deux fois l'écart-type intra-modèle. MIROC4h ne simulant pas l'ensemble des périodes futures considérées il n'est pas intégré dans le calcul de ces paramètres.

Lorsqu'une tendance est observée entre la période historique et les périodes futures, un test de Mann-Whitney (Mann and Whitney, 1947) est réalisé entre la distribution des valeurs des modèles CMIP5 de la période historique et celle de la période 2066 - 2096. Il s'agit d'un test non paramétrique, sans hypothèse sur la distribution sous-jacente, qui permet de tester si deux échantillons ont la même moyenne. L'hypothèse nulle est l'égalité des moyennes des deux échantillons et l'obtention d'une valeur *p* (*p-value*) inférieure à 0.05 revient à rejeter cette hypothèse. Le résultat du test peut être jugé statistiquement significatif.

Résultats de l'analyse

La première étape de l'étude est la comparaison des seuils de détection et de sélection de la méthode multi-variable entre les trois périodes futures et la période historique. La Figure 34 présente les valeurs des 90^e et 95^e percentiles des distributions des trois variables, pour chacun des quatorze modèles CMIP5, sur chaque période considérée. L'intervalle défini par la moyenne et l'écart-type intra-modèle est représenté par une barre verticale rouge, de part et d'autre des *boxplots* de chaque graphique. Il ressort de cette figure qu'un changement des conditions atmosphériques n'a pas d'impact sur l'intensité des trois variables. En effet, l'intervalle indiquant l'écart intra-modèle est pratiquement réduit à la valeur de la moyenne intra-modèle. Cela traduit donc une dispersion faible des valeurs des modèles entre chaque période. L'écart entre les modèles pour chacune des périodes, bien supérieur à l'écart intra-modèle, peut être expliqué par la résolution spatiale puisque les modèles dont les valeurs sont les plus élevées sont ceux dont la résolution spatiale est la plus fine.

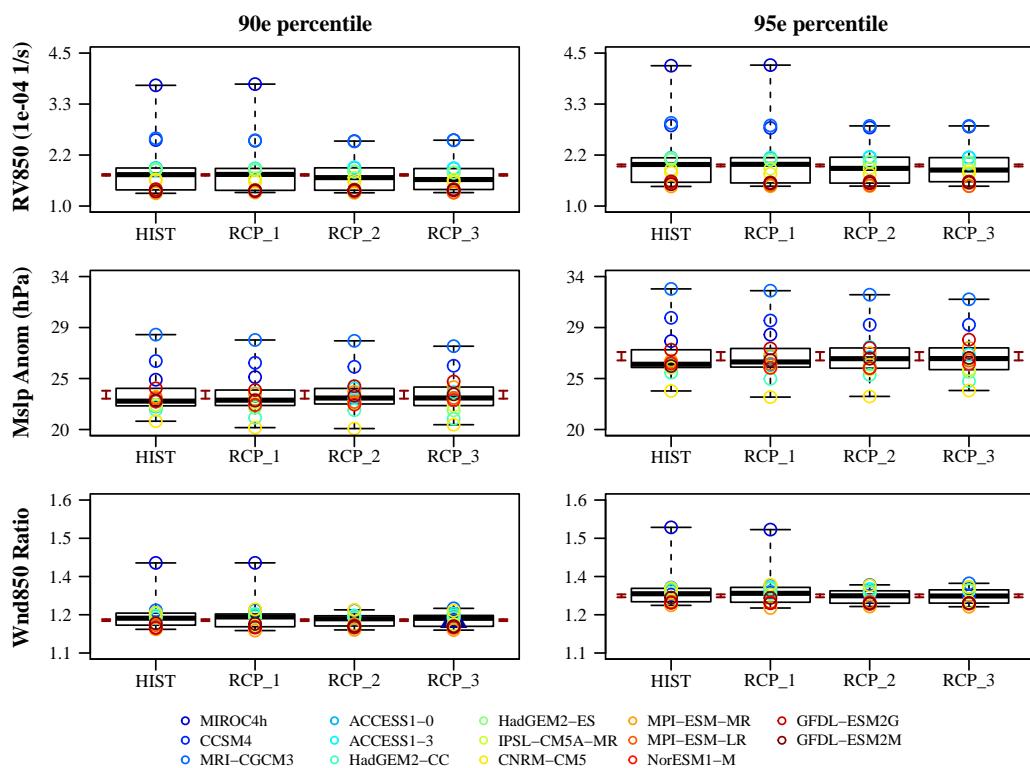


FIGURE 34 : DISTRIBUTIONS DES PERCENTILES 90 (GAUCHE) ET 95 (DROITE) POUR LA VORTICITE RELATIVE A 850 hPa (EN HAUT), L'ANOMALIE DE PRESSION (AU MILIEU) ET LE RATIO DE VENT (EN BAS), POUR LES QUATRE PERIODES CONSIDERES POUR L'ETUDE. LES LIGNES HORIZONTALES TIREES ROUGE INDIQUENT L'EVALUATION INTRA-MODELE MOYENNE AU COURS DES QUATRE PERIODES. LES TRIANGLES BLEUS REPRESENTENT LA MOYENNE DES MODELES CMIP5.

La deuxième étape de l'étude est l'analyse des caractéristiques des événements sélectionnés avec la méthode. La Figure 35 présente les résultats obtenus pour la fréquence annuelle, la moyenne sur l'ensemble des événements détectés du maximum de vorticité relative à 850 hPa, d'anomalie de pression et du ratio de vent à 850 hPa. L'intervalle indiquant la dispersion intra-modèle est de nouveau indiqué par une barre verticale rouge, de part et d'autre des *boxplots* de chaque graphique.

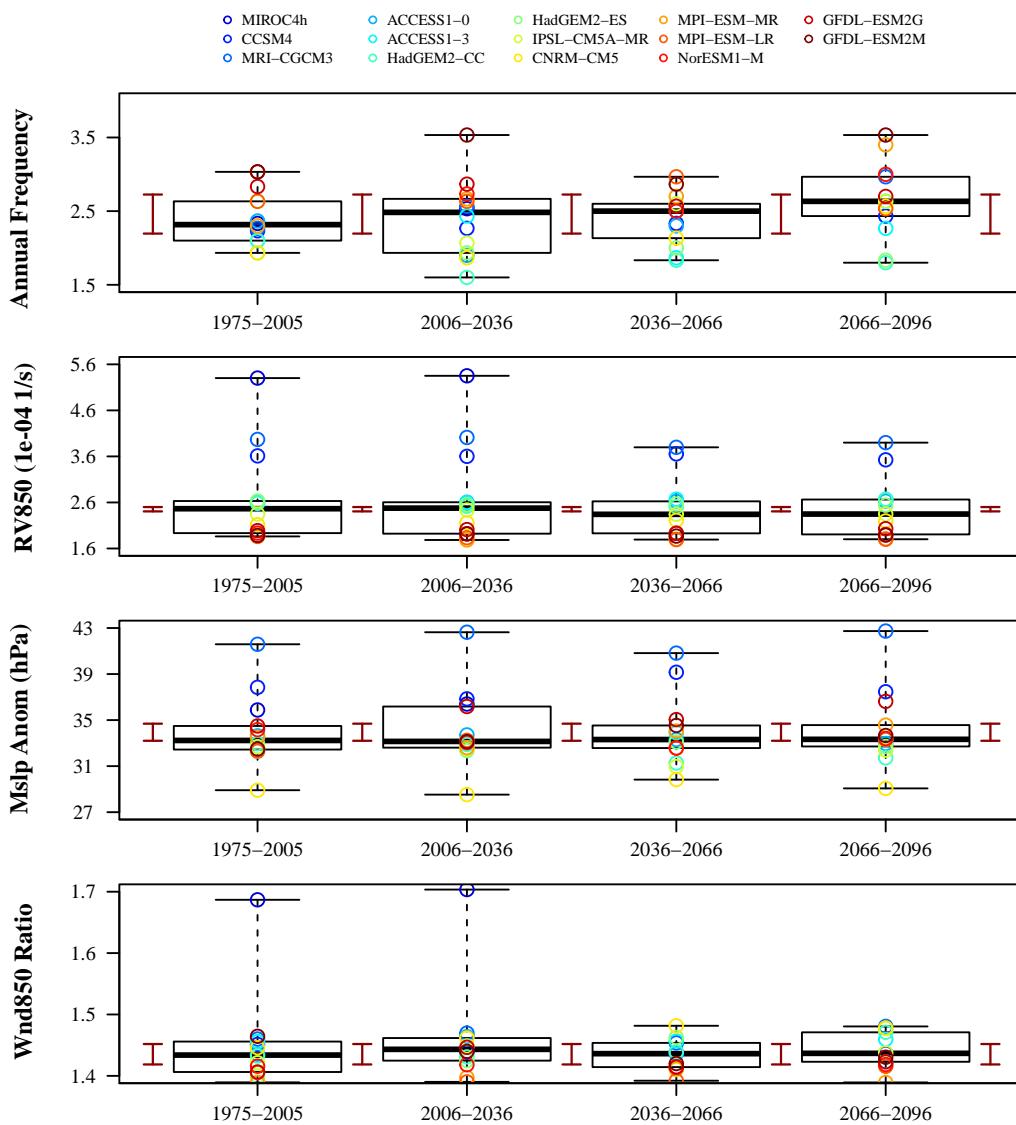


FIGURE 35 : DISTRIBUTION DES VALEURS DE FREQUENCE ANNUELLE (EN HAUT), DE VORTICITE RELATIVE A 850 hPa (MILIEU-HAUT), D'ANOMALIE DE PRESSION (MILIEU-BAS) ET DU RATIO DE VENT A 850 hPa (EN BAS) POUR LES QUATRE PERIODES CONSIDERES DANS L'ETUDE. LES LIGNES HORIZONTALES TIREES ROUGE INDIQUENT L'EVALUATION INTRA-MODELE MOYENNE AU COURS DES QUATRE PERIODES. LES TRIANGLES BLEUS REPRESENTENT LA MOYENNE DES MODELES CMIP5.

En moyenne, les valeurs des paramètres d'intensité restent constantes et comprises dans l'intervalle intra-modèle. Ce résultat traduit le faible impact d'un changement des conditions atmosphériques sur ces variables. Pour la fréquence annuelle, une augmentation du nombre d'événements entre la période 1975 – 2005 et la période 2066 – 2096 peut être observée. La dispersion intra-modèle est également plus importante pour cette variable, traduisant une variabilité plus grande. Cependant, l'application du test de Mann-Whitney entre les valeurs atteintes sur ces deux périodes conduit à une valeur p (*p-value*) de 0.28, et donc supérieure à 0.05. L'hypothèse d'égalité des moyennes des deux échantillons représentant chacune des périodes ne peut donc pas être rejetée. L'augmentation du nombre d'événements par an observée entre la période actuelle et les périodes futures peut donc faire partie de la variabilité naturelle du phénomène.

La Figure 36 montre la répartition des événements détectés par la méthode dans les 14 modèles, pour les quatre périodes, sur les mois d'Octobre à Mars. Chaque graphique représente, pour un mois donné, le pourcentage d'événement survenant au cours de ce mois en fonction de la période actuelle et de la période future. La médiane du nombre d'événements survenant au mois de Décembre (Février) augmente (diminue) entre la période historique et les périodes futures. Bien que comprise dans l'intervalle intra-modèle, l'augmentation de la médiane traduit une augmentation des valeurs prises par l'ensemble des modèles CMIP5. L'application du test de Mann-Whitney aux distributions de la période historique et de la période future 2066 – 2096 conduit à une valeur p de 0.012 pour le mois de Décembre et à une valeur p de 0.014 pour le mois de Février. Ces deux valeurs sont bien inférieures à 0.05, ce qui permet de rejeter l'hypothèse nulle des moyennes égales entre les échantillons. Pour conclure, soit cette augmentation significative fait partie de la variabilité naturelle telle que définie par l'écart intra-modèle, soit la variabilité naturelle est surestimée par cet écart et cette augmentation est liée à l'impact du changement des conditions climatiques simulées pour la période future.

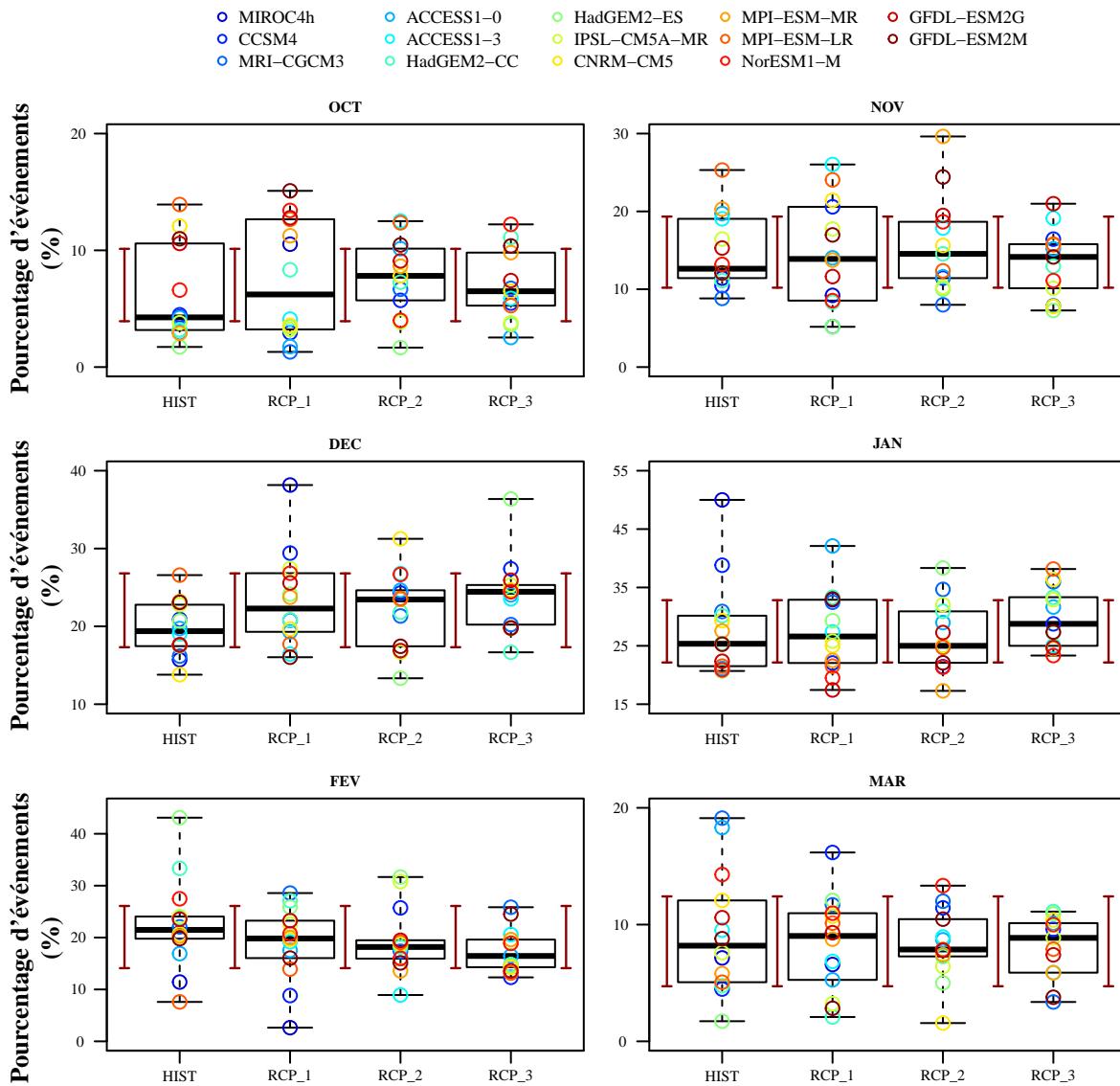


FIGURE 36 : DISTRIBUTION PAR MOIS DES EVENEMENTS DETECTES PAR LA METHODE POUR L'ENSEMBLE DES MODELES CMIP5. LES LIGNES HORIZONTALES TIREES ROUGE INDIQUENT L'EVALUATION INTRA-MODELE MOYENNE AU COURS DES QUTRE PERIODES. LES TRIANGLES BLEUS REPRESENTENT LA MOYENNE DES MODELES CMIP5.

L'analyse de la distribution du nombre d'événements par hiver au cours des différentes périodes considérées ne révèle pas de tendances, à l'exception de la classe à 4 ou plus événements par an (Figure 37). Les écarts entre les modèles sont du même ordre que ceux observés au cours de l'analyse de la période 1979 – 2005 et la comparaison à ERA Interim. Ce sont les modèles dont la résolution spatiale est la plus grossière qui produisent le plus d'hivers avec 4 ou plus d'événements. L'application du test de Mann-Whitney à la classe de plus de 4 événements par hiver pour les distribution de la période actuelle et celle de la

période 2066 – 2096 conduit à une valeur p de 0.22. L’hypothèse nulle ne peut donc pas être réfutée et la tendance observée n’est donc pas significative.

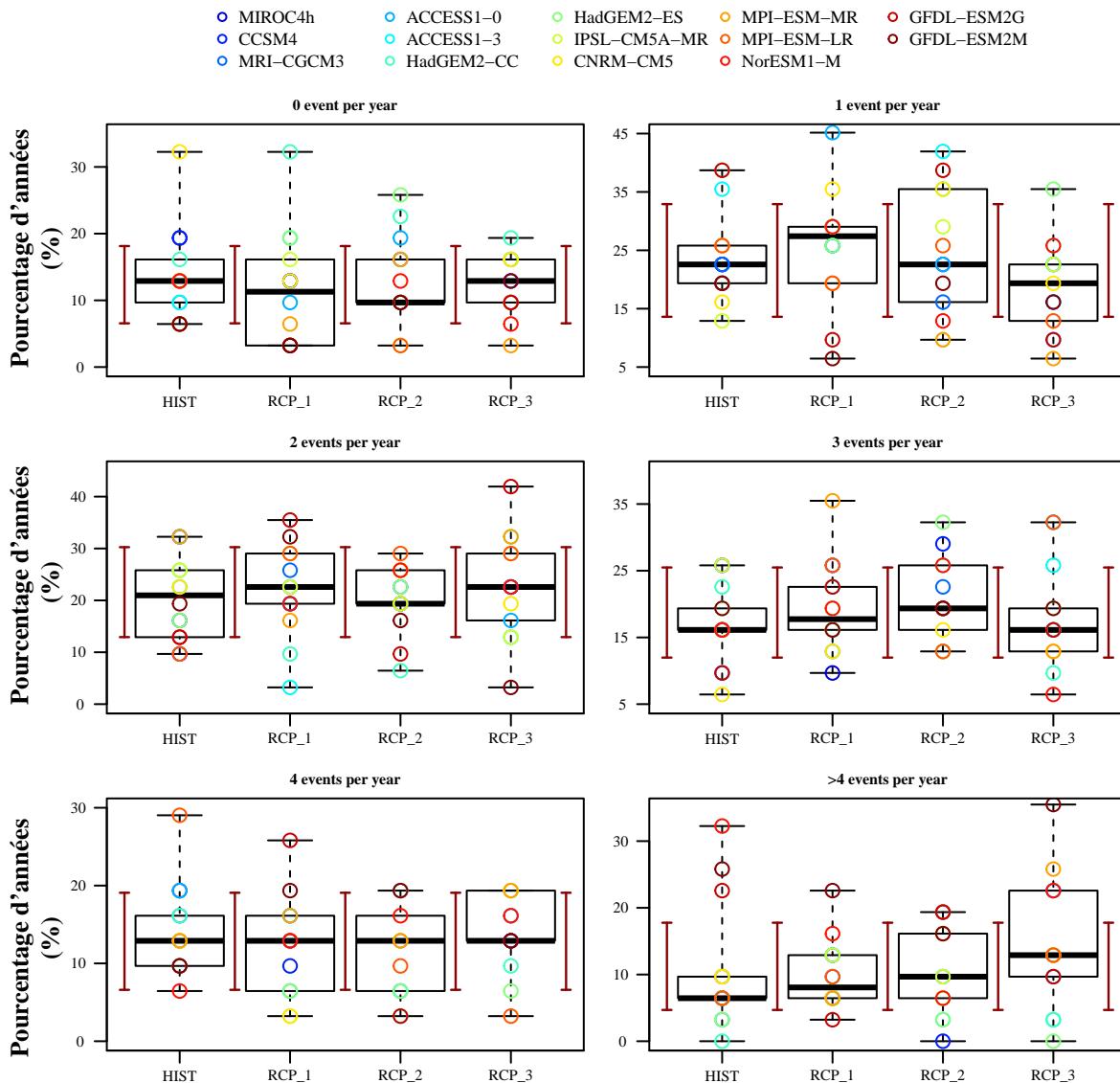


FIGURE 37 : DISTRIBUTION PAR HIVER DU NOMBRE D’ÉVÉNEMENTS DÉTECTÉS PAR LA MÉTHODE POUR L’ENSEMBLE DES MODÈLES CMIP5. LES LIGNES TIRETTES ROUGE INDIQUENT LES ÉCARTS TYPES DE LA DISTRIBUTION ASSOCIÉE À LA PÉRIODE HISTORIQUE.

Conclusions

La méthode multi-variable a été appliquée aux données issues de plusieurs modèles CMIP5 afin d'évaluer d'une part leur capacité à reproduire les caractéristiques des événements de tempêtes de vent à fort potentiel d'impact en Europe et d'autre part l'impact d'un changement de conditions atmosphériques.

La comparaison de la période 1979 – 2005 de l'expérience *historical* à celle de ERA Interim a montré que les modèles reproduisent en moyenne les distributions des trois variables utilisées pour la méthode. L'impact de la résolution est important pour la vorticité relative qui atteint des valeurs plus intenses pour les modèles les mieux résolus. Certaines caractéristiques comme la fréquence annuelle et le nombre d'événements survenant au cours des premiers mois d'hiver sont sous-estimées en moyenne. La distribution du nombre d'événement par an et la distribution saisonnière sont bien représentées dans les modèles CMIP5, même si le maximum d'activité est atteint en Décembre dans les modèles et en Janvier pour ERA Interim.

La deuxième partie de l'étude consiste en l'évaluation de l'impact d'un changement de conditions atmosphériques sur les tempêtes de vent à fort potentiel d'impact en Europe. La comparaison de périodes futures à la période actuelle n'a pas montré de tendances croissantes ou décroissantes significatives, sauf pour le nombre d'événements survenant au cours du mois de Décembre. Les caractéristiques des événements détectés par la méthode multi-variable ne sont donc pas modifiées de manière significative dans les projections futures, telles que simulées par l'expérience *rcp4.5* du projet CMIP5. Cependant, certaines de ces conclusions dépendent des outils statistiques et de la définition de la variabilité naturelle utilisée au cours de l'analyse. D'autres définitions de la variabilité naturelle seront testées afin de mieux estimer la sensibilité des résultats.

Partie 3 :

Détection des tempêtes hivernales à fort potentiel d'impact en Europe à partir de prévisions météorologiques

Chapitre 6:

Développement de l'outil Severe WIndstorms Forecasting Tool (SWIFT)

| | |
|--|-----|
| INTRODUCTION | 135 |
| MODULE DE DETECTION DES TEMPETES DE VENT HIVERNALES EN EUROPE | 136 |
| Présentation des données de prévisions..... | 136 |
| Étude préliminaire | 137 |
| Présentation des tempêtes Klaus (2009) et Xynthia (2010) | 138 |
| Détection des centres et formation des événements au sein d'une prévision de GFS..... | 140 |
| Comparaison de prévisions successives de GFS | 142 |
| Déclenchement d'une alerte | 144 |
| Structure finale du module de détection..... | 145 |
| Résultats du module de détection pour les tempêtes Klaus (2009) et Xynthia (2010) | 146 |
| Impact de la partie comparaison des prévisions GFS sur les trajectoires et sur le déclenchement des alertes pour les tempêtes Klaus et Xynthia | 149 |
| MODULE DE VULNERABILITE..... | 151 |
| Calibration des courbes de vulnérabilité | 151 |
| Calcul des pertes à partir d'une empreinte de vent issue du module de détection | 154 |
| Résultats du module de vulnérabilité et de pertes pour les tempêtes Klaus (2009) et Xynthia (2010) | 155 |
| CONCLUSIONS | 159 |

Introduction

Le travail présenté dans cette partie a été réalisé dans le cadre d'un projet initié au cours de l'année 2010 au sein du département de Gestion des Risques du groupe AXA. L'objectif de ce projet est de développer un outil qui, à partir de prévisions météorologiques, détecte les tempêtes de vent hivernales à fort potentiel d'impact et donne une estimation des pertes et du nombre de sinistres associés.

L'outil finalisé est composé de deux modules. Le premier module est le module de détection dans lequel les tempêtes de vent particulièrement intenses sont détectées dans les prévisions météorologiques provenant du modèle GFS (Global Forecast System) développé par le National Weather Service aux Etats-Unis. Pour chaque tempête de vent suffisamment intense pour déclencher une alerte, une empreinte de vent est calculée et transférée au deuxième module, le module de vulnérabilité et de pertes. Ce dernier contient les courbes de vulnérabilité spécifiques au portefeuille du groupe AXA qui traduisent une vitesse de vent en un pourcentage de destruction. A partir des informations sur les valeurs des contrats d'assurance, la perte et le nombre de sinistres agrégés au code INSEE sont déterminés.

Différents types de données ont été utilisés pour développer les deux modules de l'outil. Pour le premier module, ce sont des observations et les prévisions de GFS des sept jours précédents les tempêtes de vent Klaus (Janvier 2009) et Xynthia (Février 2010) – les archives des prévisions de GFS remontant jusqu'en 2006 – qui ont été utilisées. Ces données ont servi à définir d'une part les seuils de détection des tempêtes de vent intenses et d'autre part les seuils définissant l'état d'alerte. Pour le deuxième module, l'élaboration des courbes de vulnérabilité a nécessité des observations de vitesses de vent et de pertes. L'ensemble du processus d'obtention des données de vent utilisées pour ce module ne sera pas présenté dans ce manuscrit car cela fait partie de l'expertise développée au sein de plusieurs départements du groupe et soumise à une clause de confidentialité. Pour ce qui est des données de pertes, ce sont des données fournies par l'entité AXA France qui ont été utilisées. Ces archives de sinistres remontant à 2007, seules les pertes associées aux événements Klaus et Xynthia sont considérées.

Dans la suite de ce chapitre, je présenterai le développement des deux modules à partir des études de cas des tempêtes Klaus et Xynthia.

Module de détection des tempêtes de vent hivernales en Europe

Présentation des données de prévisions

Les données de prévisions utilisées proviennent du modèle GFS (Global Forecast System), modèle de prévision numérique développé par le National Weather Service aux Etats-Unis. Le modèle est initialisé et exécuté quatre fois par jour et fournit toutes les 6 heures un ensemble de prévisions météorologiques, soit un ensemble de simulations du modèle aux conditions initiales légèrement différentes les unes des autres. Chaque simulation délivre une prévision sur l'état de l'atmosphère pour les 16 jours à venir, à un pas de temps de trois heures (Figure 38). Par exemple, l'exécution du modèle le 14 janvier 2009 à 06h délivre un ensemble de prévisions pour le 14 janvier 2009 à 09h, à 12h, à 15h... jusqu'au 30 janvier 2009. Dans le cadre du projet, seules les prévisions jusqu'à 7 jours (ou 180 heures) seront utilisées car au-delà les prévisions sont moins fiables et sont généralement utilisées pour définir des tendances. Par ailleurs, c'est la moyenne de l'ensemble des simulations qui est utilisée dans un premier temps pour développer l'outil. La grille du modèle GFS couvre l'ensemble du globe avec une résolution spatiale de 50 km.

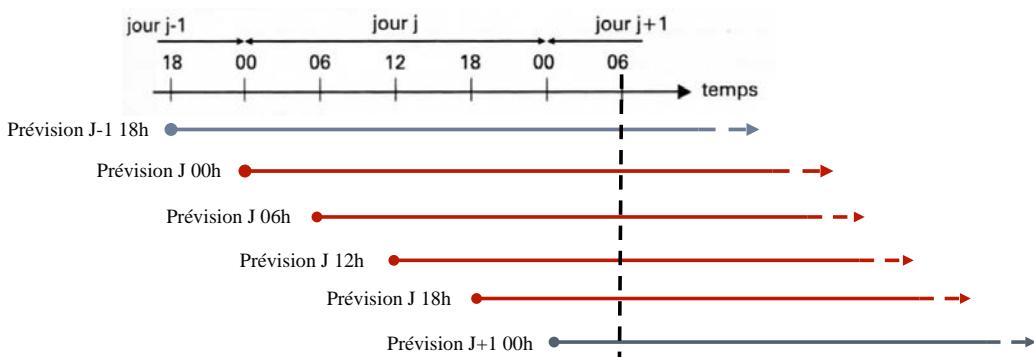


FIGURE 38 : SCHEMA DE L'EMISSION DES PREVISIONS. UNE PREVISION EST PRODUITE TOUTES LES 6 HEURES ET COUVRE LES 180 HEURES (7 JOURS) A VENIR, A UN PAS DE TEMPS DE 3 HEURES.

L'actualisation toutes les 6 heures des prévisions pour les 180 heures à venir est une propriété importante des données utilisées pour le projet SWIFT. Cette propriété implique d'adopter une approche différente de celle adoptée dans le cadre du projet de recherche qui s'appuie sur des données issues de réanalyses et de modèles CMIP5. La manière d'intégrer ce flux d'information sera détaillée dans la suite de cette section.

Étude préliminaire

Réalisée au cours de l'année 2010, avant le début du doctorat, cette étude est une première approche pour l'entreprise des données météorologiques et des logiciels nécessaires à leur analyse. L'objectif est de mettre en évidence des critères qui pourront ensuite être utilisés pour la détection des tempêtes de vent à fort potentiel d'impact en Europe. Une première version de l'outil SWIFT (Severe WIndstorms Forecasting Tool) a été élaborée. Elle comprend le téléchargement des données depuis le serveur du NWS, leur transformation du format initial GRIB au format NetCDF (format utilisé par les logiciels d'analyse de données), la visualisation des champs d'intérêt dans le cadre de l'étude des cyclones extratropicaux et un premier algorithme de détection. Dans ce dernier, l'ensemble des paramètres, de la taille de la fenêtre aux critères de détection, peuvent être modulés afin de faciliter l'étude de la sensibilité de l'algorithme (Figure 39).

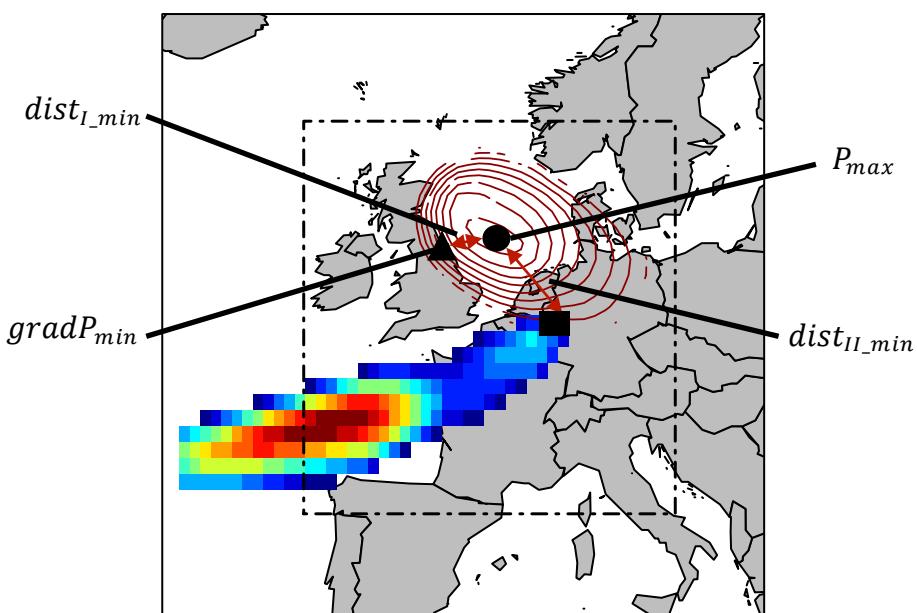


FIGURE 39 : EXEMPLE ILLUSTRE LES CRITERES ENVISAGES POUR LA DETECTION DE TEMPETES A FORT POTENTIEL D'IMPACT EN EUROPE DANS LA PREMIERE VERSION DE L'ALGORITHME. LES CONTOURS REPRESENTENT LES ISOBARS. EN COULEUR LE VENT A 300 hPa. LE POINT INDIQUE LE CENTRE DE LA ZONE DEPRESSIONNAIRE, LE TRIANGLE LE MAXIMUM DU GRADIENT DE PRESSION. LE CARRE NOIR INDIQUE L'EXTREMITE DU VENT A 300 hPa.

L'algorithme de détection relève les valeurs de plusieurs paramètres et recherche à un instant donné les zones de la fenêtre spatiale caractérisées par:

-
1. un ensemble de points autour d'un centre dont la pression est inférieure à un seuil P_{\max} . Dans la Figure 39, le centre de pression est indiqué par un point et la zone de dépression est caractérisée par les contours de pression.
 2. un maximum du gradient de pression, indiqué par un triangle dans la Figure 39, supérieur à un seuil $\text{grad}P_{\min}$ et situé à une distance du centre inférieure à un seuil $\text{dist}_{\text{I_min}}$,
 3. une distance entre l'extrémité du vent à 300 hPa, indiqué par un carré dans la Figure 39, et le centre de pression inférieure au seuil $\text{dist}_{\text{II_min}}$.

L'ensemble des points de grille constituant la zone de dépression est ensuite masqué et l'algorithme passe à un autre centre de pression inférieur au seuil P_{\max} .

Cette première version de l'outil est appliquée à un seul ou une succession de pas de temps issus de la prévision d'une seule exécution de GFS. Aucune valeur des paramètres n'est fixée et il est nécessaire de les préciser à chaque exécution de l'outil. Par ailleurs, il n'y a pas de suivi des zones dépressionnaires détectées avec l'algorithme sur les 61 pas de temps constituant les 180 heures d'une prévision, ni de comparaison entre les prévisions successives produites par GFS. Enfin, il manque également la définition des conditions de déclenchement d'une alerte.

Présentation des tempêtes Klaus (2009) et Xynthia (2010)

La première étape de mon travail a été de rendre l'algorithme opérationnel spécifiquement pour la détection des cyclones extratropicaux intenses pouvant causer des dommages en Europe. De la même manière que pour le projet de recherche, les seuils d'intensité sont définis à partir de l'étude d'événements passés connus pour avoir causé des dommages importants. L'historique des prévisions réalisées par GFS remontant à 2006, j'ai utilisé les prévisions issues des exécutions des sept jours précédent la survenance de deux tempêtes ayant causé d'importants dommages en France sur cette période : Klaus le 24 Janvier 2009 et Xynthia les 27-29 Février 2010.

Klaus, Janvier 2009

La tempête de vent Klaus est survenue les 23 et 24 Janvier 2009 et a principalement touché le sud de la France et le nord de l'Espagne, deux zones particulièrement vulnérables. Les forêts ont été fortement touchées avec environ 42 millions de m³ de dégâts en France pour les forêts des régions Aquitaine, Languedoc-Roussillon et Midi-Pyrénées. Pour le secteur de l'assurance, les pertes d'élèvent à 3 milliards d'euros d'après PERILS. La Figure 40

représente la trajectoire de la tempête ainsi que les vitesses de vent observées dans les stations Météo France.

Pour l'étude de cas de cet événement, les prévisions issues des exécutions de GFS réalisées entre le 18 Janvier 2009 00h et le 24 Janvier 2009 18h sont considérées.

Xynthia, Février 2010

La tempête Xynthia est survenue entre le 27 Février et le 1^{er} Mars 2010. Elle a touché une grande partie de la France et a causé des dégâts dus non seulement aux vents forts mais aussi aux inondations côtières qui ont accompagné l'événement. Les pays les plus touchés sont le Portugal, l'Espagne, la France et le Royaume-Uni. Pour le secteur de l'assurance, elle a généré 3.1 milliards d'euros de pertes. La Figure 40 présente la trajectoire de l'événement ainsi que les vitesses maximum de vent observées dans les stations Météo France.

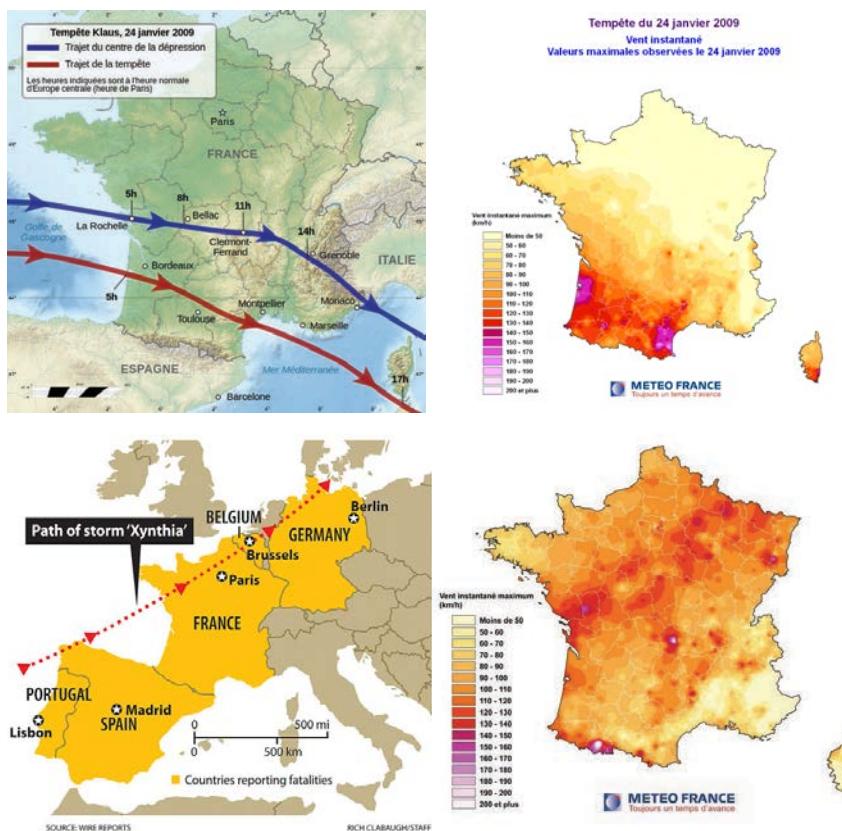


FIGURE 40 : TRAJECTOIRE DU CENTRE DE LA DEPRESSION ET DU MAXIMUM DE VENT (EN HAUT A GAUCHE) ET VITESSES DE VENT MAXIMALES OBSERVEES LE 24 JANVIER 2009 (EN HAUT A DROITE) (SOURCE : METEO-FRANCE). TRAJECTOIRE DU CENTRE DE LA DEPRESSION (EN BAS A GAUCHE) ET VITESSES DE VENT MAXIMALES OBSERVEES LE 24 JANVIER 2009 (EN BAS A DROITE).

Pour l'étude de cas de Xynthia, les prévisions utilisées s'étendent du 23 Février 2010 00h au 1^{er} Mars 2010 18h.

Détection des centres et formation des événements au sein d'une prévision de GFS

L'application de l'algorithme de détection aux prévisions de Klaus et Xynthia m'a permis de mettre en évidence les paramètres les plus adéquats pour sélectionner les centres des deux tempêtes de vent à un instant donné. Désormais, une zone dépressionnaire est sélectionnée si le minimum de pression est inférieur à P_{\max} et le maximum du gradient de pression est supérieur à $\text{grad}P_{\min}$. L'estimation de la valeur de ces deux seuils a été faite à partir des valeurs issues de GFS et validée à l'aide d'observations, quand celles-ci étaient disponibles. Le paramètre P_{\max} est fixé à 990 hPa et $\text{grad}P_{\min}$ est fixé à 0.000055 hPa/m. Les critères sur les distances entre les différents paramètres ont été éliminés car sensibles et délicats à estimer. L'objectif de l'algorithme de détection est de détecter les tempêtes de vent hivernales intenses et d'estimer leur trajectoire. La deuxième étape de ce travail a donc été de développer la procédure pour lier les zones de dépression détectées à chaque pas de temps d'une prévision et former ainsi un événement.

La Figure 41 illustre les étapes de formation d'un événement pour une prévision de GFS donnée, celle du 23 Janvier 2009 à 06h. Le graphique a) de la Figure 41 indique, pour l'échéance du 24 Janvier 2009 à 00h, que trois centres de pression répondent aux critères du minimum de pression et du maximum de gradient de pression. Si, à une échéance donnée, plusieurs zones dépressionnaires satisfont les critères de l'algorithme de détection, seule celle associée au minimum de pression est conservée. Le centre finalement sélectionné pour cette échéance du 24 Janvier 2009 à 00h est entouré en rouge. Le graphique b) présente le résultat de l'étape de sélection de centres de pression pour l'ensemble des échéances de la prévision du 23 Janvier 2009 à 06h, les couleurs indiquent l'échéance à laquelle le centre est détecté. Celui sélectionné pour l'échéance du 24 Janvier 2009 à 00h est de nouveau entouré en rouge. Sur ce graphique, les centres sélectionnés pour les échéances entre le 23 Février 21h et le 24 Janvier 18h révèlent la trajectoire de Klaus. Il reste à définir les critères qui permettront effectivement de regrouper ces centres en un événement.

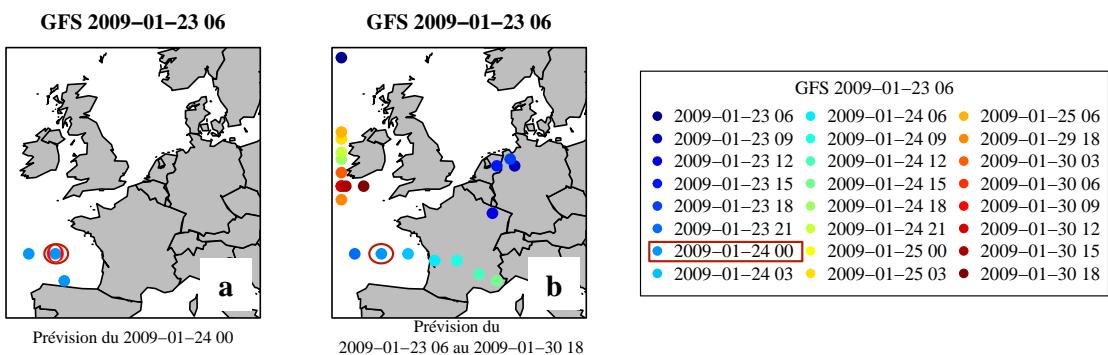


FIGURE 41 GRAPHIQUE A: LES CENTRES DE PRESSION DETECTES POUR L'ECHEANCE DU 24 JANVIER 2009 00H QUI REPONDENT AUX CRITERES DE MINIMUM DE PRESSION ET DU MAXIMUM DU GRADIENT DE PRESSION. GRAPHIQUE B: L'ENSEMBLE DES CENTRES DETECTES SUR L'ENSEMBLE DES ECHEANCES DE LA PREVISION.

La procédure de suivi des centres de dépression élaborée dans le travail de recherche pour une résolution temporelle de 6 heures a été adaptée à la résolution temporelle de 3 heures des données GFS. Ainsi, deux (ou plus) centres de dépression sélectionnés à des pas de temps successifs d'une prévision appartiennent au même événement s'il y a un déplacement vers l'est et si la distance parcourue en 3 heures est inférieure à 450 km, soit une vitesse de déplacement inférieure à 150 km/h. Ces deux critères permettent de séparer des événements qui surviennent successivement dans un court intervalle de temps. La Figure 42 reprend les centres sélectionnés pour l'ensemble des échéances de la prévision du 23 Janvier 2009 à 06h dans le graphique a). Le graphique b) présente le résultat de l'étape de suivi des centres de pression pour la prévision du 23 Janvier 2009 à 06h. Ainsi, de tous les centres sélectionnés pour cette prévision (graphique a), seuls ceux survenant entre le 23 Janvier 23h et le 24 Janvier 18h répondent aux critères de suivi et forment ainsi un événement. Au 23 Janvier 2009 06h, l'outil prévoit donc un événement atteignant la côte française le 24 Janvier à 03h et le golfe de Gênes le 24 Janvier à 15h.

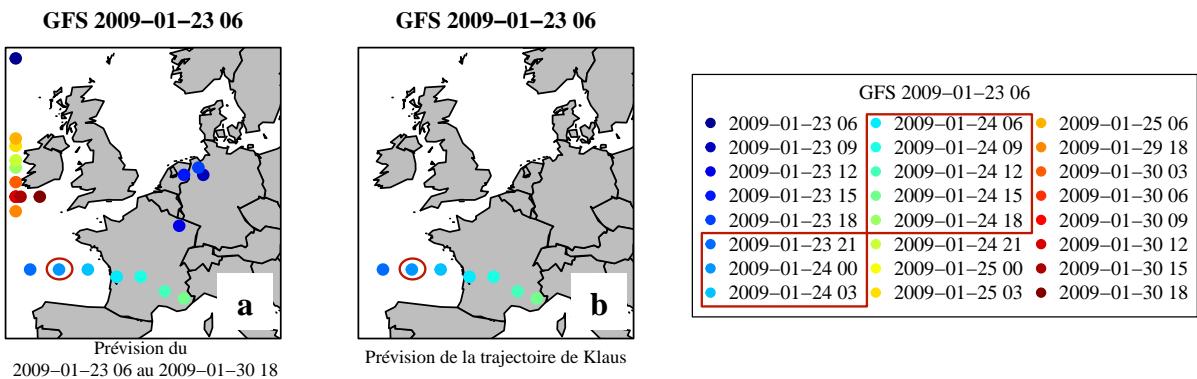


FIGURE 42 GRAPHIQUE A: L'ENSEMBLE DES CENTRES DETECTES SUR L'ENSEMBLE DES ECHEANCES DE LA PREVISION DU 23 JANVIER A 06H. GRAPHIQUE B: TRAJECTOIRE FORMEE A PARTIR DES CENTRES DE PRESSION REPONDANT AUX CRITERES DE SUIVI D'EVENEMENT.

Comparaison de prévisions successives de GFS

Contrairement aux réanalyses et aux modèles utilisés dans le cadre du travail de recherche, GFS produit toutes les 6 heures une nouvelle prévision des 180 heures à venir. Afin de prendre en compte l'ensemble des prévisions réalisées pour une échéance à venir, une nouvelle partie a été intégrée. Avant de former un événement, c'est-à-dire avant l'étape de suivi des centres sélectionnés au cours des échéances composant une prévision, les centres sélectionnés pour chaque pas de temps de la dernière prévision sont comparés à l'ensemble des centres sélectionnés dans les prévisions précédentes pour le même pas de temps. Si le dernier centre sélectionné est à une distance inférieure à 250 km d'au moins 3 centres détectés auparavant, il remplace le centre choisi au cours de l'analyse précédente. Si ce n'est pas le cas, l'algorithme le rejette et conserve le centre choisi au cours de l'analyse précédente.

La Figure 43 propose en exemple l'analyse de la prévision du 22 Janvier 2009 00h. Le graphique a) présente l'ensemble des centres sélectionnés par l'algorithme pour les échéances de la prévision, les couleurs indiquent les échéances de la prévision. Ainsi, le centre sélectionné au 24 Janvier 2009 à 12h et entouré d'un cercle bleu, se situe bien plus au nord que la trajectoire de l'événement. Or, des centres de pression ont été sélectionnés à cette échéance dans des analyses précédant le 22 Janvier 2009 00h. Le graphique b) indique les positions successives de ces centres avec le centre détecté au cours de la prévision du 22 Janvier 2009 00h entouré par un cercle bleu et le centre sélectionné dans la prévision du 21 Janvier 2009 18h entouré par un cercle rouge. Les traits rouges relient les centres séparés par une distance inférieure ou égale à 250 km. Il apparaît donc que le centre détecté au cours de la

prévision du 22 Janvier 2009 00h se situe à une distance supérieure à 250 km des centres précédemment sélectionnés, tandis que le centre détecté au cours de l'analyse de la prévision du 21 Janvier 2009 18h est situé à une distance inférieure à 250 km de trois autres centres. Ce centre de pression remplace donc celui sélectionné en premier lieu. Le graphique c) présente les centres finalement sélectionnés à l'issue de cette comparaison avec les prévisions antérieures.

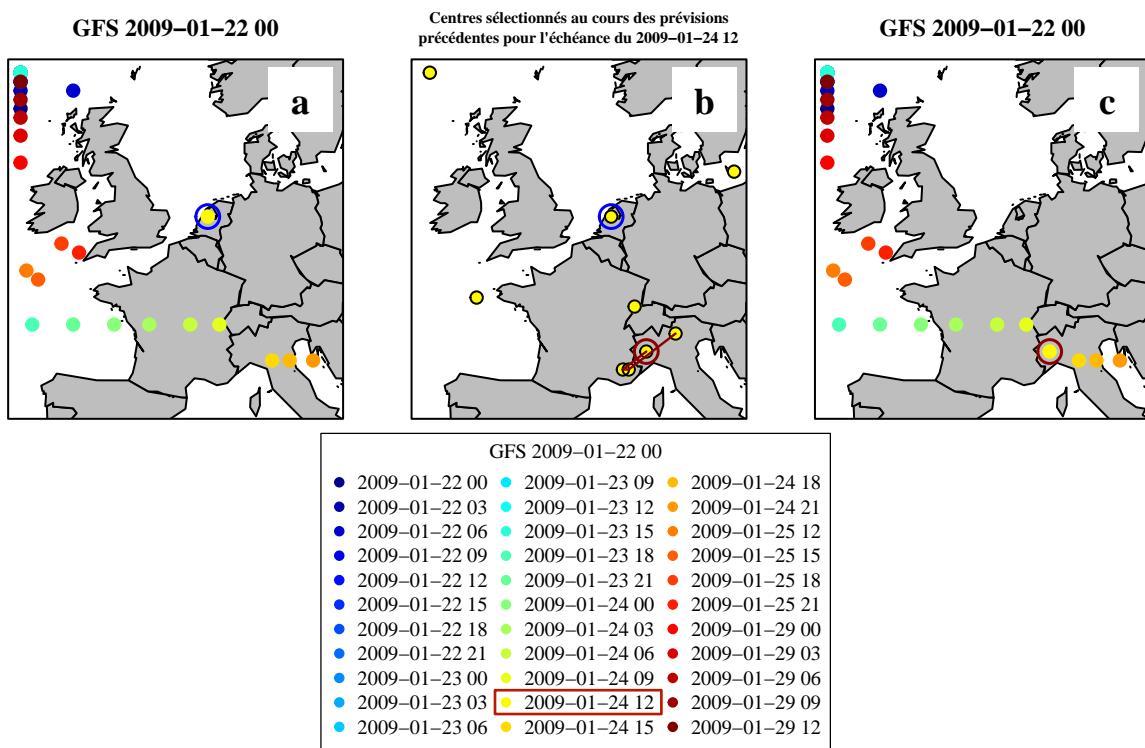


FIGURE 43 : GRAPHIQUE A : CENTRES DE PRESSION SELECTIONNES A L'ISSUE DE L'ANALYSE DE LA PREVISION DU 22 JANVIER 2009 A 00H. LE CENTRE ENTOURE CORRESPOND AU CENTRE SELECTIONNE A L'ECHEANCE DU 24 JANVIER 2009 12H. GRAPHIQUE B : CENTRES DE PRESSION SELECTIONNES AU COURS DE PREVISIONS PRECEDANT CELLE DU 22 JANVIER 2009 00H. LE CENTRE EN CERCLE EN BLEU INDIQUE LE CENTRE SELECTIONNE A L'ISSUE DE LA PREVISION DU 22 JANVIER 2009 00H, TANDIS QUE LE CENTRE EN CERCLE EN ROUGE INDIQUE CELUI SELECTIONNE A L'ISSUE DE LA PREVISION DU 21 JANVIER 2009 18H. LES CENTRES RELIES PAR UN TRAIT ROUGE SONT A DISTANCE INFERIEURE A 250 KM. GRAPHIQUE C : CENTRES FINALEMENT CONSIDERES, APRES COMPARAISON AVEC LES PREVISIONS PRECEDENTES.

L'événement est ensuite formé à partir des centres actualisés après la comparaison avec les prévisions précédentes. Cependant, le fait d'utiliser des centres de pression issus de prévisions différentes pour former un événement a un impact sur la procédure de suivi. En effet, deux

centres consécutifs peuvent désormais être issus de deux prévisions différentes et ne plus vérifier les critères de la procédure, notamment celui sur la distance entre les deux centres. Afin de prendre en compte un décalage possible de 250 km par rapport au centre initial issu de la prévision en cours d'analyse, le seuil sur la distance entre deux centres consécutifs est réévalué de 450 km à 700 km.

Cette procédure permet de donner du poids à l'historique des analyses des prévisions et de corriger des erreurs de détection liées à la méthode et à l'évolution des prévisions de GFS. Cette partie, ajoutée initialement pour rectifier les trajectoires, va également jouer un rôle important dans la définition de l'état d'alerte.

Déclenchement d'une alerte

La dernière partie de mon travail sur le module de détection a été la définition des critères qui définissent un état d'alerte, toujours à partir de l'analyse des prévisions des deux tempêtes Klaus et Xynthia.

Une forte activité cyclonique existe dans la région nord-ouest de la fenêtre spatiale et l'algorithme peut former des événements à partir de ces centres. Pour éviter de déclencher une alerte pour ces événements, qui restent localisés dans cette région, deux critères sont imposés : (i) la trajectoire doit comprendre au moins 7 centres, (ii) trois des centres de la trajectoire doivent être situés au-delà de la longitude -5°E. Un troisième critère s'appuie sur le nombre de fois que les centres composant la trajectoire ont été détectés au cours de l'historique des prévisions. Ce critère est fixé à 4 prévisions de GFS, soit 24h.

Une fois qu'un événement répond à ces trois critères, deux empreintes sont calculées et tracées (Figure 44). La première empreinte, appelée empreinte de vent, est définie par le maximum de vent en chaque point de grille sur la durée de l'événement. La définition de la durée de l'événement s'appuie sur les dates de début et de fin de la trajectoire détectée et intègre les 12 heures avant et après. Cette empreinte sera ensuite fournie au module de vulnérabilité et de pertes présenté dans la section suivante. La deuxième empreinte, appelée empreinte temporelle, indique, pour chaque point de grille, la date à laquelle les rafales de vent de plus de 80 km/h de l'empreinte de vent surviennent.

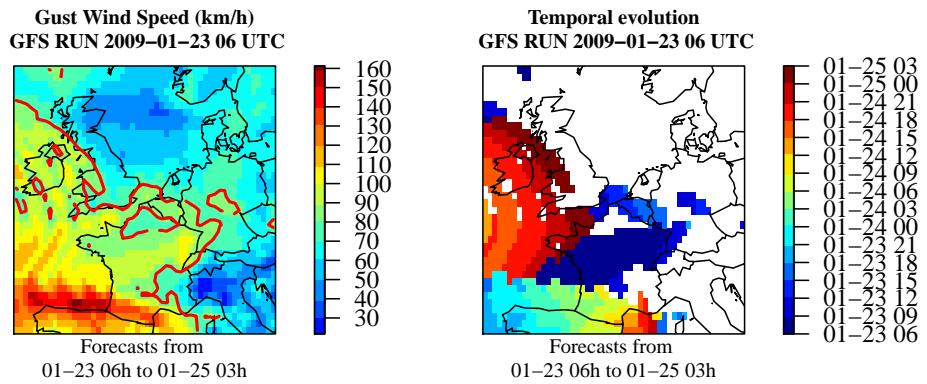


FIGURE 44 A GAUCHE : EMPREINTE DE VENT CALCULEE LE 23 FEVRIER 2009 A 06H EN PREVISION DE KLAUS. LE CONTOUR INDIQUE LES VITESSES DE VENT SUPERIEURES A 80 KM/H. A DROITE : PREVISION DE LA DATE A LAQUELLE DES VENTS ATTEINDRONT DES VITESSES SUPERIEURES A 80 KM/H.

Structure finale du module de détection

Avant de présenter les résultats du module de détection pour les tempêtes Klaus et Xynthia, la Figure 45 présente un schéma du module tel qu'il est actuellement. Initialement développé intégralement à l'aide du logiciel R dans un environnement Windows au sein de l'entreprise avec peu de mémoire disponible, l'outil est désormais installé sur un serveur Linux et une partie du module de détection est sous BASH. Cela permet notamment un téléchargement plus rapide des données depuis le serveur du NWS ainsi qu'une manipulation plus facile des fichiers NetCDF. L'analyse des données et l'algorithme de détection sont quant à eux toujours en R.

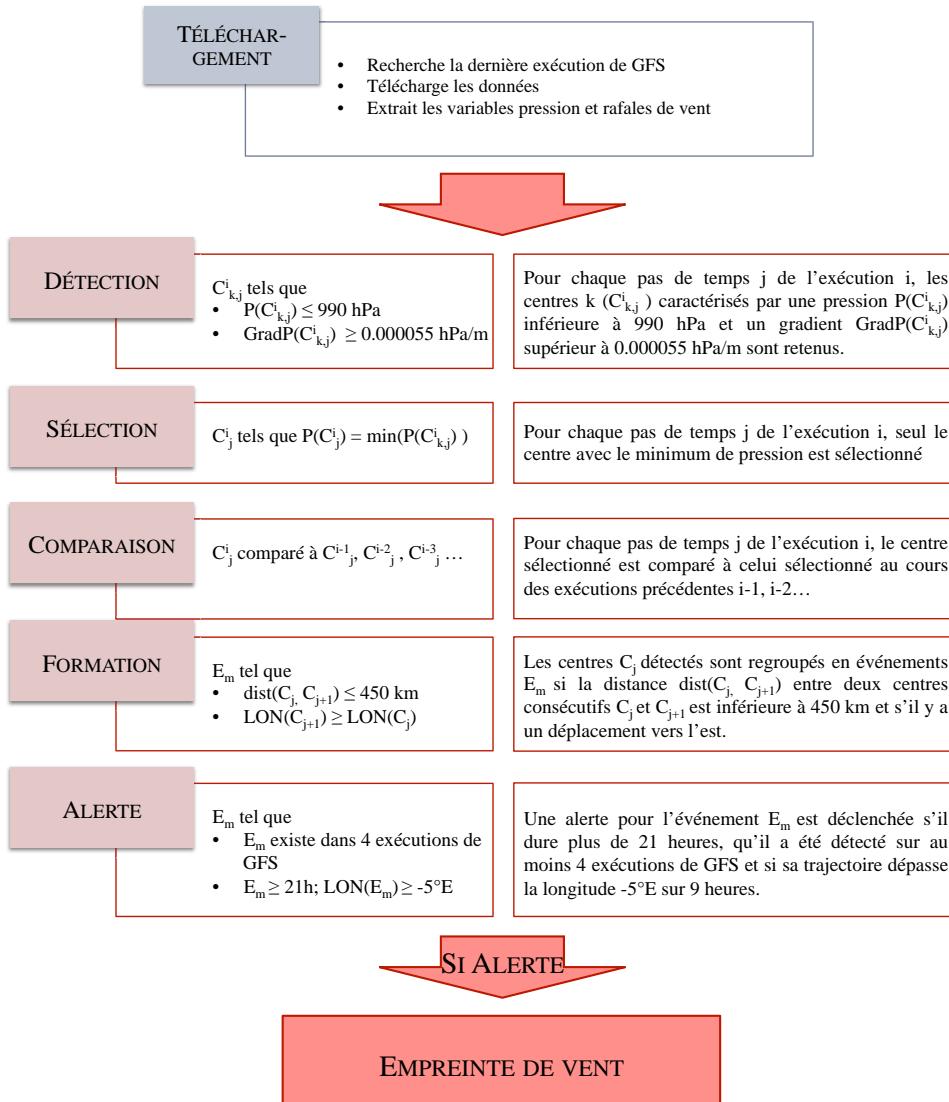


FIGURE 45 : STRUCTURE DU MODULE DE DETECTION. LA PARTIE TELECHARGEMENT EN BASH RECUPERE LES DONNEES GFS DEPUIS LE SERVEUR DU NWS. L'ALGORITHME D'ANALYSE DES PREVISIONS EN R COMPREND 5 ETAPES DE LA DETECTION DES CENTRES AU DECLENCHEMENT D'UNE ALERTE SI UN EVENEMENT REOND AUX DIFFERENTS CRITERES.

Résultats du module de détection pour les tempêtes Klaus (2009) et Xynthia (2010)

Klaus, Janvier 2009

La première alerte est déclenchée à l'issue de l'analyse de la prévision du 22 Janvier 2009 06h, puis toutes les 6 heures jusqu'à la prévision du 23 Janvier 2009 18h incluse. Les 7 alertes, une par prévision, concernent toutes l'événement Klaus, les dates de début et de fin variant légèrement d'une prévision à l'autre.

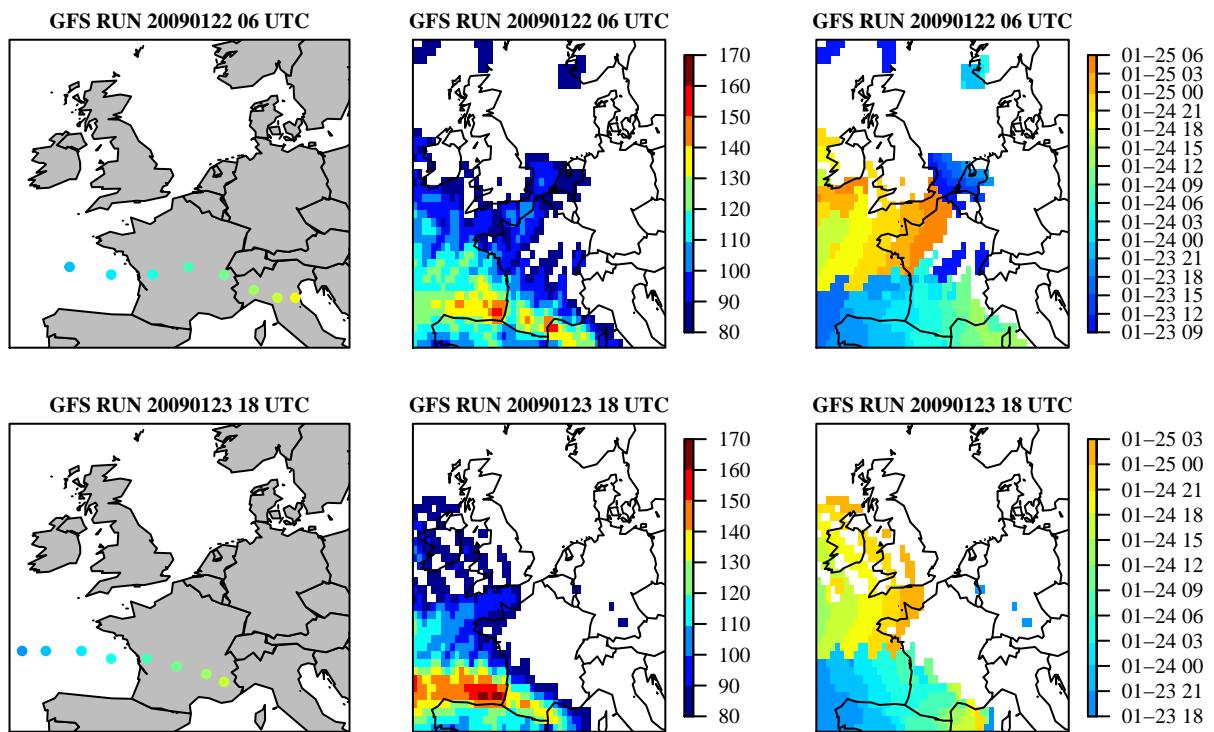


FIGURE 46 : RESULTATS DES ALERTES ISSUES DE L'ANALYSE DES PREVISIONS DU 22 JANVIER 2009 06 (GRAPHIQUES SUPERIEURS) ET DU 23 JANVIER 2009 18 (GRAPHIQUES INFERIEURS) : LA TRAJECTOIRE DE L'EVENEMENT (GAUCHE), L'EMPREINTE DE VENT (MILIEU) ET L'EMPREINTE TEMPORELLE DES VENTS SUPERIEURS A 80 KM/H (DROITE).

La Figure 46 présente la trajectoire, l'empreinte de vent et l'empreinte temporelle issues des prévisions du 22 Janvier 2009 06h et du 23 Janvier 2009 18h. A l'issue de la prévision du 23 Janvier 2009 18h, la trajectoire débute le 23 Janvier à 18h, plus tôt que la trajectoire prévue au 22 Janvier 2009 06h, et s'achève le 24 Janvier à 15h, alors que celle du 22 Janvier 2009 06h se prolonge jusqu'au 24 Janvier à 21h. La perte des deux derniers centres est due à la forte activité cyclonique survenant dans la région nord-ouest de la fenêtre spatiale considérée. Les centres sélectionnés à ces échéances sont situés dans la région nord-ouest et ne sont donc plus associés à l'événement Klaus.

La comparaison des deux empreintes de vent représentées dans les deux graphiques du milieu révèle des vitesses de vent plus intenses dans le golfe de Gascogne dans la prévision du 23 Janvier 2009 18h et de même intensité à l'intérieur des terres. Quant aux deux graphiques de gauche qui représentent l'empreinte temporelle, ils n'indiquent pas de modifications quant à la prévision de l'heure de survenance des vents supérieurs à 80 km/h.

Xynthia, Février 2010

Une alerte est lancée par l'outil une première fois à l'issue de l'analyse de la prévision du 24 Février 2010 18h, puis toutes les 6 heures jusqu'à la prévision du 28 Février 2010 18h inclusive.

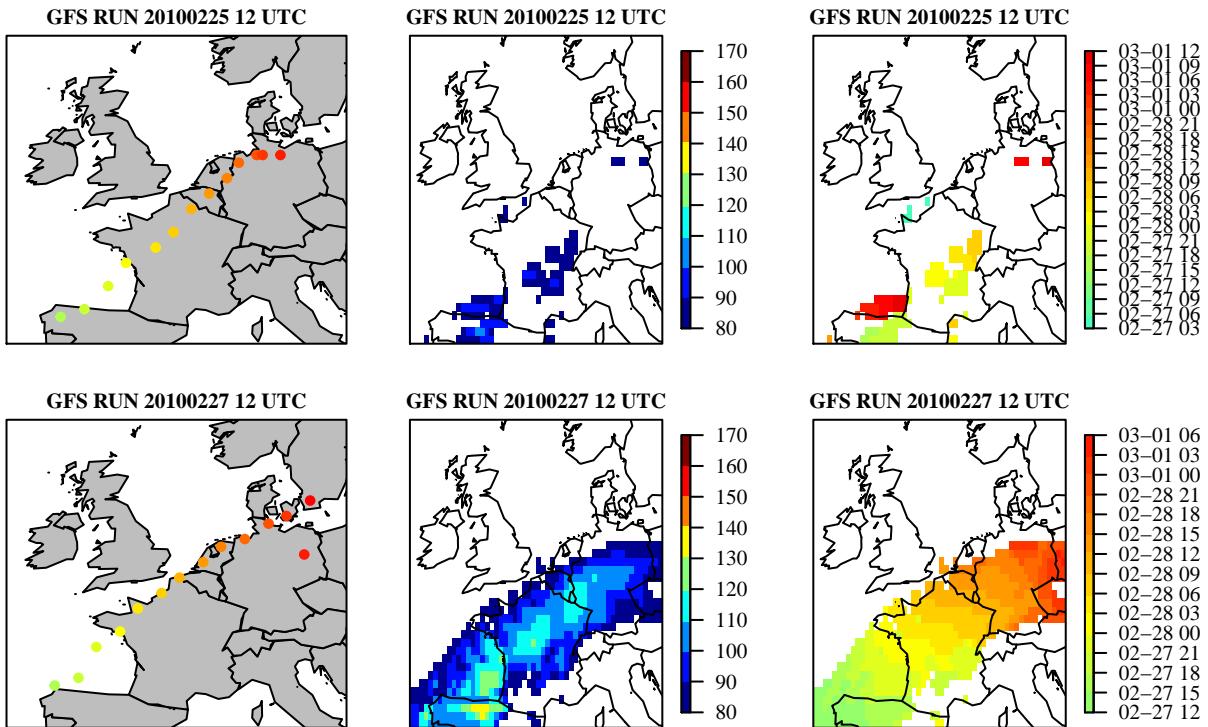


FIGURE 47 : RESULTATS DES ALERTES ISSUES DE L'ANALYSE DES PREVISIONS DU 25 FEVRIER 2010 12H (GRAPHIQUES SUPERIEURS) ET DU 27 FEVRIER 2010 12H (GRAPHIQUES INFERIEURS) : LA TRAJECTOIRE DE L'EVENEMENT (GAUCHE), L'EMPREINTE DE VENT (MILIEU) ET L'EMPREINTE TEMPORELLE DES VENTS SUPERIEURS A 80 KM/H (DROITE).

La Figure 47 présente les résultats de la prévision environ 48h avant l'événement (25 février 2010 12h) et de celle la plus proche du début de la tempête Xynthia (27 février 2010 12h). Au cours de la prévision du 25 Février 2010 12h, une première trajectoire de l'événement est obtenue, située légèrement plus au sud que la trajectoire réellement observée. Les rafales de vent sont sous-estimées, avec des valeurs maximales à seulement 100 km/h pour des rafales de vent observées entre 130 et 140 km/h. A l'issue de la prévision du 27 Février 2010 12h, la trajectoire est plus proche de la trajectoire réelle et les rafales de vent atteignent des vitesses comprises entre 110 et 120 km/h, donc une meilleure estimation de l'événement à venir.

Impact de la partie comparaison des prévisions GFS sur les trajectoires et sur le déclenchement des alertes pour les tempêtes Klaus et Xynthia

L'ajustement de la trajectoire à partir de la comparaison des prévisions GFS est un élément important du module de détection. Afin de montrer son impact sur les résultats de ce module et le déclenchement des alertes, une version de l'outil, dans laquelle cette partie de comparaison est enlevée, est appliquée aux prévisions de GFS. Dans cette version, les événements d'une prévision sont formés directement à partir des centres issus de la sélection avec les conditions de déplacement vers l'est et de distance entre deux centres inférieure à 450 km. Le déclenchement d'une alerte est également légèrement modifié puisqu'il n'y a plus de décompte du nombre de prévisions au cours desquelles un centre a été sélectionné. Dans cette version de l'outil, un événement déclenche donc une alerte si sa trajectoire comprend au moins 7 centres dont au moins 3 se situent au-delà de la longitude -5°E.

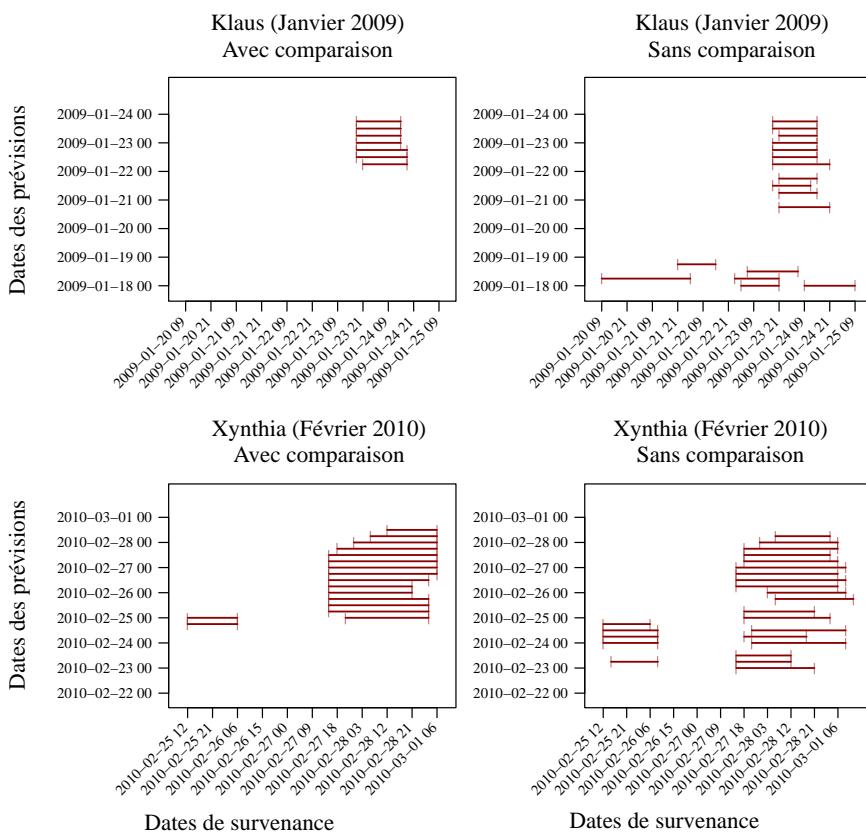


FIGURE 48 : COMPARAISON DES VERSIONS AVEC (GRAPHIQUES DE GAUCHE) ET SANS (GRAPHIQUES DE DROITE) COMPARAISON DES RESULTATS DES PREVISIONS DISPONIBLES POUR KLAUS (GRAPHIQUES SUPERIEURS) ET XYNTHIA (GRAPHIQUES INFÉRIEURS). A CHAQUE EVENEMENT AYANT DÉCLENCHE UNE ALERTE AU COURS D'UNE PRÉVISION (AXE DES ORDONNÉES), SA PÉRIODE EST INDICUÉE (AXE DES ABSCISSES).

La Figure 48 présente, pour chaque version de l'outil, les prévisions précédant la survenance des événements Klaus et Xynthia, et pour lesquelles un ou plusieurs événements ont déclenché une alerte. Ainsi, le graphique en haut à gauche reproduit les résultats présentés dans la partie précédente pour la détection de Klaus. Dans cette version avec comparaison, une première alerte est émise à l'issue de la prévision du 22 Janvier 2009 06h en vue d'un événement survenant le 24 Janvier 2009 entre 00h et 21h. Dans le cas de la version sans comparaison, graphique en haut à droite, des alertes sont émises dès les prévisions du 18 Janvier 2009 00h au 18 Janvier 2009 18h. Les événements qui déclenchent ces alertes surviennent à différentes périodes entre le 20 et le 25 Janvier et ne correspondent pas à Klaus. Pour cette version de l'outil, les alertes pour Klaus sont émises entre le 20 Janvier à 18h et le 23 Janvier à 18h. La prise en compte des résultats obtenus au cours de l'ensemble des prévisions existantes permet donc d'estimer le nombre de fois qu'un événement a été détecté et de définir un filtre pour éviter le déclenchement d'alertes trop fréquent et limiter la gestion des fausses alertes, aspect important des systèmes d'alerte précoce.

Pour Xynthia, l'impact de la partie de comparaison est visible sur la stabilité des dates de début et de fin de survenance de l'événement. Alors que la version de l'outil sans comparaison, graphique en bas à droite, prévoit un événement dont la période de survenance varie d'une prévision à l'autre, la version de l'outil avec comparaison des prévisions antérieures prévoit une période d'occurrence équivalente sur plusieurs prévisions et inclut la période prévue par la version sans comparaison. Cela permet donc de capturer une plus grande fenêtre temporelle autour de l'événement et de définir une empreinte de vent qui recouvre la totalité de l'événement.

Le fait d'attendre qu'au moins quatre prévisions confirment cet état d'alerte introduit un délai entre la date à laquelle un événement est détecté pour la première fois par l'outil et la date à laquelle l'outil déclenche l'alerte. Cependant, à partir de l'étude de ces deux événements, cela ne pose pas de problèmes puisque l'alerte est déclenchée pour la première fois plus de 24 heures avant le début de l'événement, ce qui est un intervalle de temps acceptable pour la préparation de la situation de crise à venir. Pour des événements qui peuvent s'intensifier de manière plus rapide, cela pourrait être un critère limitant conduisant à une alerte tardive de l'événement à venir. Cependant, il n'a pas encore été possible de tester l'outil sur ce type d'événement.

Module de vulnérabilité

Calibration des courbes de vulnérabilité

Une courbe de vulnérabilité traduit l'intensité d'un péril en un pourcentage de dommages, qui, une fois multiplié par l'exposition, résulte en une perte. Dans un cas idéal, chaque bâtiment aurait sa propre courbe de vulnérabilité qui prendrait en compte des paramètres liés à la structure du bâtiment lui-même, à son environnement proche mais aussi à la structure du péril responsable des dommages, par exemple le champ de vent. Cela demande un détail des informations sur le bâtiment et le péril ainsi qu'un historique conséquent des dommages qui ne sont pas accessibles aujourd'hui. Cependant, grâce à la disponibilité de données de dommages et de vent à une échelle plus grande que celle du cas idéal, mais qui permet tout de même d'obtenir une estimation raisonnable des pertes, le projet SWIFT a été l'occasion d'initier l'élaboration de courbes de vulnérabilité spécifiques au portefeuille du groupe.

L'élaboration des courbes de vulnérabilité s'appuie sur des données de vitesses de vent, dont la résolution spatiale est du même ordre que celle des données d'exposition et de pertes. Ces données ont été obtenues à la suite de plusieurs analyses qui ont conduit à une empreinte de vent sur la France des événements Klaus et Xynthia, respectivement pour les dates du 24 Janvier 2009 et des 27-28 Février 2010.

Le travail réalisé sur les courbes de vulnérabilité s'appuie également sur les données de pertes collectées par les équipes d'AXA France pour chaque police d'assurance de la branche d'activité Multi Risques Habitation (MRH) ayant déclenché la garantie tempête sur la période 2007 – 2012. La branche d'activité MRH a été choisie parmi les autres branches d'activité comme le risque industriel ou l'automobile car c'est celle pour laquelle le plus d'information est disponible. Les données d'observation de vitesses de vent n'étant disponibles que pour les événements Klaus et Xynthia, seules les pertes survenues aux dates de ces deux tempêtes ont été considérées. Afin de capturer la majorité des pertes associées aux deux événements et de prendre en compte l'incertitude liée à la date de survenance, les pertes sont extraites sur trois jours. Pour Klaus, les pertes générées entre le 23 et le 25 Janvier 2009 sont considérées, et pour Xynthia, ce sont les pertes générées entre le 27 Février et le 1^{er} Mars 2010 qui sont utilisées.

Un portefeuille de l'exposition d'AXA France, contenant l'information sur les polices d'assurance de la branche MRH de l'année 2009, est ensuite créé. Les pertes par police extraites de la base de données de pertes d'AXA France et la valeur de la vitesse du vent la

plus proche géographiquement de la police sont associées à la valeur de l'exposition de la police.

Bien que les données de pertes et de vent disponibles pour le développement des courbes de vulnérabilité soient de résolution spatiale particulièrement fine, elles seront ensuite appliquées à l'empreinte de vent du modèle GFS, d'une résolution spatiale de 50 km. Etant donné que les données de vent prennent en compte intrinsèquement l'environnement local dans leur mesure, elles portent donc plus d'information que les données issues du modèle qui ne contient pas le détail de l'environnement en-dessous de 50 km. Développer des courbes de vulnérabilité à une échelle plus fine que la résolution spatiale du modèle n'apporte pas de valeur ajoutée mais risque au contraire d'être une source d'incertitudes. Le choix a donc été fait d'agréger les données de pertes au code INSEE et d'associer à chaque code INSEE la valeur de la vitesse de vent observée la plus proche du code INSEE.

Une première étude sur l'exposition et les pertes générées par les deux événements a montré que les plus petites expositions, associées à des ratios de dommages particulièrement élevés, ne sont pas représentatives de la vulnérabilité du reste des expositions (Figure 49, graphique de gauche). Ainsi, seuls les codes INSEE avec une exposition d'une valeur supérieure à 1 million d'euros sont utilisés pour élaborer les courbes de vulnérabilité.

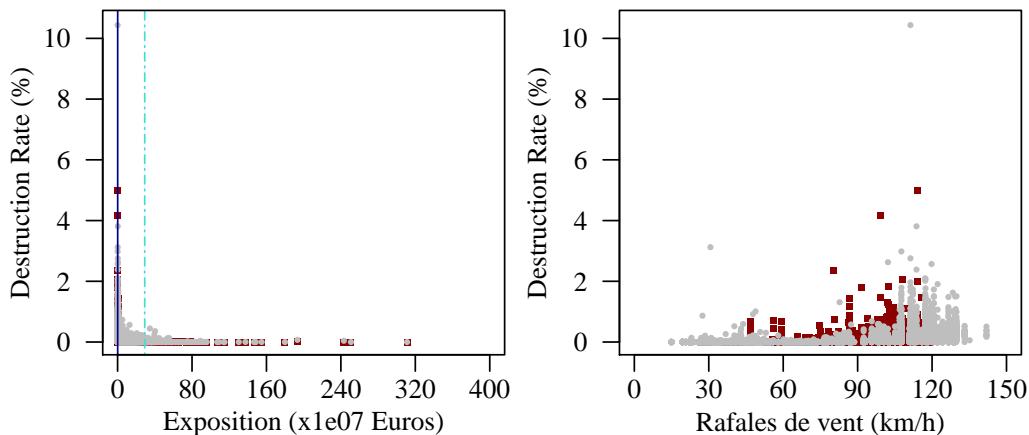


FIGURE 49 GAUCHE : TAUX DE DESTRUCTION EN FONCTION DE L'EXPOSITION POUR LES TEMPETES KLAUS (POINTS GRIS) ET XYNTHIA (CARRES ROUGE). LA LIGNE PLEINE BLEU FONCE INDIQUE LE SEUIL D'EXPOSITION 1 MILLION D'EUROS ET LA LIGNE EN TIRET TURQUOISE LE SEUIL QUI SEPARE LES CODES INSEE NON-URBAINS DES CODES INSEE URBAINS. DROITE : TAUX DE DESTRUCTION EN FONCTION DES RAFALES DE VENT OBSERVEES POUR LES DEUX TEMPETES KLAUS (POINTS GRIS) ET XYNTHIA (CARRES ROUGE).

De plus, les codes INSEE avec les plus grosses expositions ont un pourcentage de dommages moins élevé que les codes INSEE avec des expositions plus faibles. Les expositions sont donc divisées en deux classes selon leur valeur, afin de rendre compte des vulnérabilités différentes entre les codes INSEE non-urbains, caractérisés par une faible concentration d'habitations donc une exposition plus faible (Expo Inf), et les zones urbaines caractérisées par une concentration élevée d'habitations donc une exposition plus forte (Expo Sup).

Le graphique de droite de la Figure 49 représente l'ensemble des pertes générées au cours des deux événements en fonction de la vitesse de vent observée. Le choix a été fait de diviser les vitesses de vent en 9 classes de 0 à 150 km/h. Les distributions de probabilité sont donc définies à partir des valeurs disponibles pour chaque couple classe d'exposition et classe de vitesse de vent. La Figure 50 présente, pour chacune des deux classes d'exposition, les courbes de vulnérabilité des classes de vent 0 – 70 km/h et 100 – 110 km/h. Il s'agit de courbes de fréquence cumulée indiquant la probabilité d'occurrence du pourcentage de dommages, ou taux de destruction, pour une classe de vent donnée. Ainsi, la probabilité que le pourcentage de dommages, associé à une exposition appartenant à la classe Expo Inf, dépasse 0,1% est de 0,02 pour un vent compris entre 100 – 110 km/h. Il apparaît également de ces deux graphiques que le rapport entre les pourcentages de dommages associés aux expositions des classes Expo Inf sur ceux associés à la classe Expo Sup est d'environ 10. Les variations de la courbe gris tiretée du graphique de droite révèlent le manque de données utilisées pour construire la courbe.

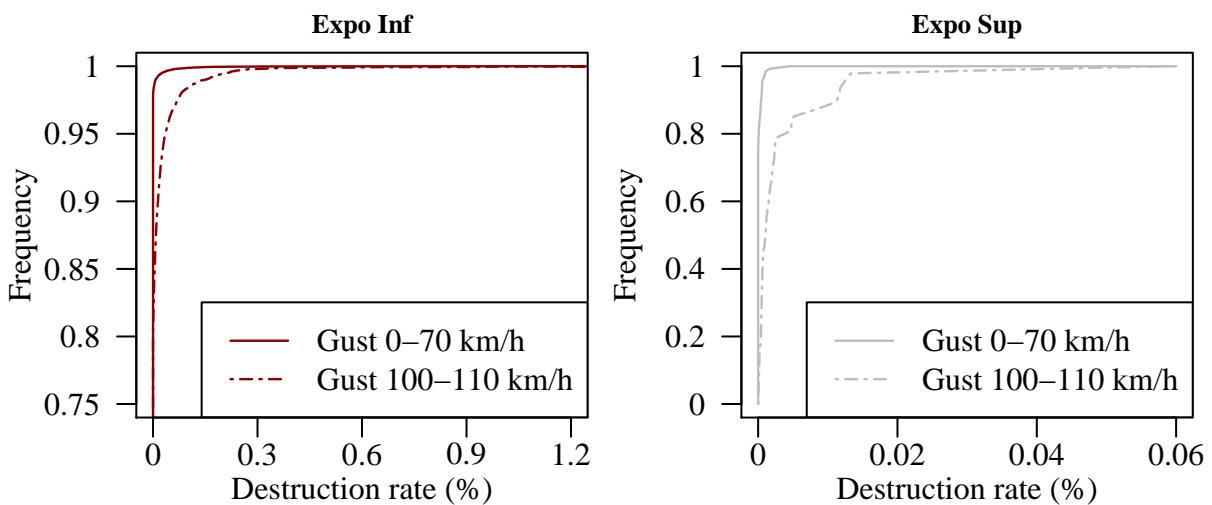


FIGURE 50 : COURBES DE VULNERABILITE POUR LES CLASSES DE VENT 0-70 KM/H ET 100-110 KM/H POUR LA CLASSE D'EXPOSITION INFÉRIEURE AU SEUIL FIXE (GAUCHE) ET LA CLASSE D'EXPOSITION SUPERIEURE AU SEUIL FIXE (DROITE).

Calcul des pertes à partir d'une empreinte de vent issue du module de détection

Le calcul de la perte pour un code INSEE est schématisé dans la Figure 51. Pour chaque code INSEE, une valeur de la vitesse de vent est extraite de l'empreinte de vent d'un événement ayant déclenché une alerte. Les valeurs de l'exposition et de la vitesse de vent déterminent la courbe de vulnérabilité dans laquelle 1000 tirages sont effectués. La somme sur l'ensemble des pertes des codes INSEE conduit à 1000 estimations de la perte totale pour le portefeuille de la branche d'activité MRH d'AXA France.

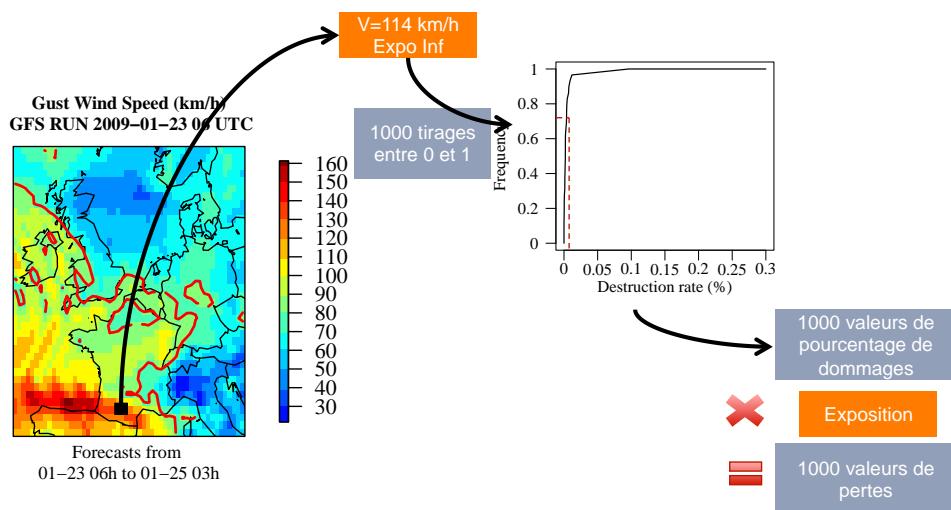


FIGURE 51 : SCHEMA DU CALCUL DE LA PERTE POUR UN CODE INSEE DONNE.

A l'issue du calcul de perte pour l'ensemble des codes INSEE, deux graphiques sont obtenus. Le premier représente la densité de probabilité de la perte totale sur la France et le second l'évolution des pertes au cours de l'événement. La Figure 52 présente les deux graphiques issus de la prévision du 23 Janvier 2009 à 06h dans les graphiques de gauche. A la fin de l'analyse de cette prévision, l'outil estime une perte maximum de 50 millions d'Euros pour le portefeuille MRH d'AXA France, avec un maximum des pertes survenant le 24 Janvier 2009 entre 06h et 09h. Les graphiques de droite représentent la densité de probabilité du nombre de sinistres pour l'ensemble des codes INSEE et l'évolution de ce nombre au cours de l'événement.

Pour plus de clarté, seule la partie estimation de pertes du module de vulnérabilité a été présentée dans cette section. La même méthode a été appliquée à la variable « nombre de

sinistres » qui est également importante pour l'entité pour estimer la volumétrie des déclarations de sinistres à venir et ainsi le nombre de gestionnaires de sinistres, d'experts et de centres d'appel à prévoir. D'après la Figure 52, le nombre de sinistres pourrait atteindre un maximum de 16 500, avec un pic survenant le 24 Janvier 2009 entre 06h et 09h.

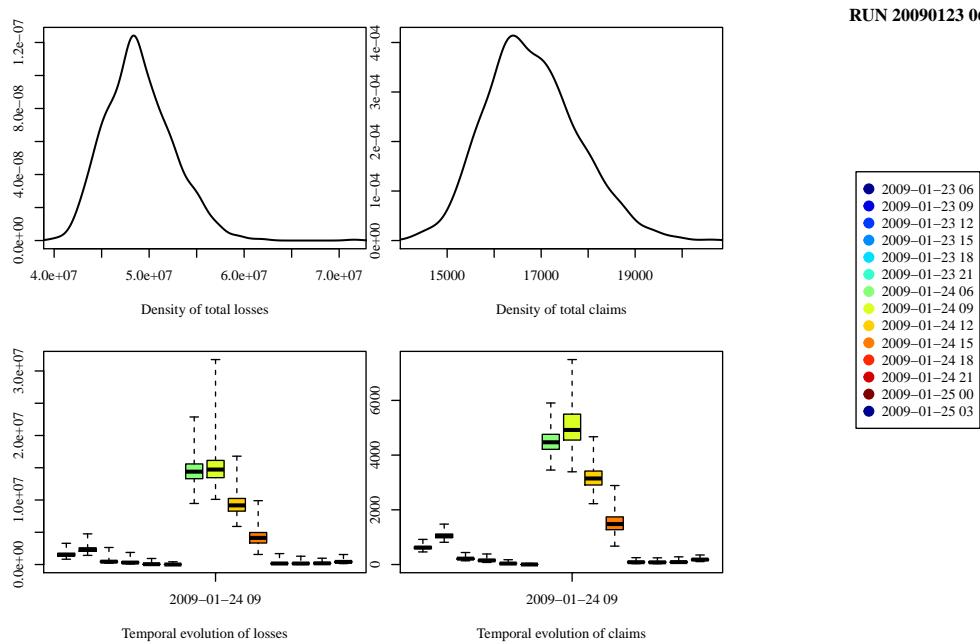


FIGURE 52 : DENSITE DE PROBABILITE ET EVOLUTION TEMPORELLE DES PERTES POUR LE PORTEFEUILLE D'AXA FRANCE (GRAPHIQUES DE GAUCHE) ET DU NOMBRE DE SINISTRES (GRAPHIQUES DE DROITE).

Résultats du module de vulnérabilité et de pertes pour les tempêtes Klaus (2009) et Xynthia (2010)

La Figure 53 montre pour chaque événement l'estimation maximale de la perte totale et du nombre de sinistres associés à l'événement à venir pour l'ensemble des prévisions au cours desquelles une alerte a été déclenchée. Les valeurs réellement observées pour la branche MRH d'AXA France sont indiquées par la ligne pleine rouge pour la perte totale observée et la ligne tiroir bleue pour le nombre de sinistres.

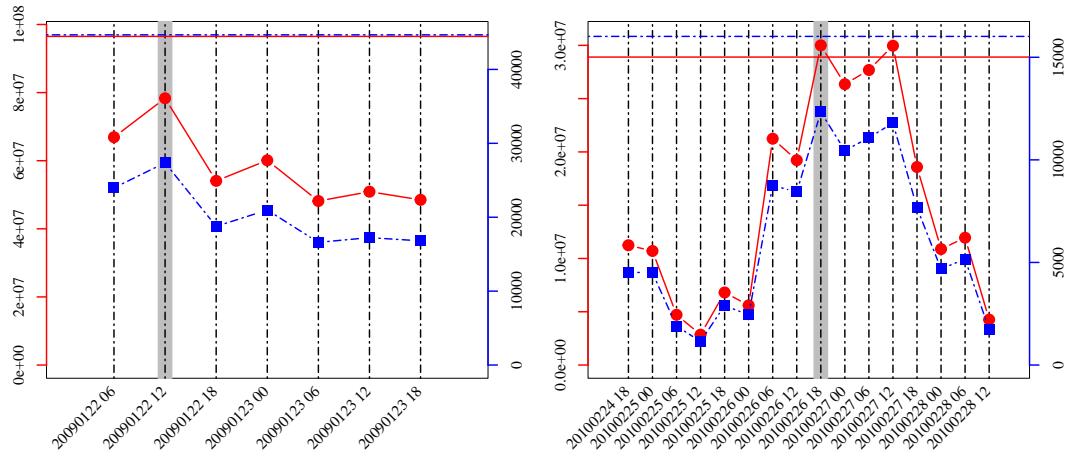


FIGURE 53 : POUR KLAUS (GAUCHE) ET XYNTHIA (DROITE), ESTIMATION DU TOTAL DE PERTES (COURBE PLEINE ROUGE) ET DU NOMBRE DE SINISTRES (COURBE TIREE BLEUE) POUR CHAQUE EVENEMENT AYANT DECLENCHE UNE ALERTE. LES VALEURS REELLES DES PERTES SONT INDIQUEES PAR LA LIGNE PLEINE ROUGE (PERTE TOTALE) ET LA LIGNE TIREE BLEUE (NOMBRE DE SINISTRES).

Pour la tempête Klaus, l'estimation de la perte la plus proche de la réalité est fournie par la prévision du 22 Janvier 2009 12h. Afin de mieux comprendre l'évolution de l'estimation des pertes potentielles, la différence entre les rafales de vent de GFS et les observations du maximum de vent pour chaque alerte déclenchée a été calculée (Figure 54). Seules les vitesses de vent survenant le 24 Janvier sont considérées pour coïncider avec les observations de vent. Le maximum de l'estimation des pertes atteint à la prévision du 22 Janvier 2009 12h correspond à la date à laquelle l'empreinte de vent issue du modèle surestime le plus les vitesses de vent observées, en moyenne +30 m/s. Cependant, malgré des vitesses de vent de GFS en moyenne plus élevées que les observations, les pertes estimées atteignent 80% de la valeur de la perte totale réellement observée. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que l'élaboration des courbes de vulnérabilité des classes de vent les plus élevées s'appuie sur un nombre réduit de pertes disponibles. Les ratios de dommages sont donc sous-estimés pour ces classes de vent. Cette estimation, même si inférieure à la perte réelle, reste acceptable comparée à des résultats antérieurs obtenus à partir d'autres méthodes et données, non présentés ici.

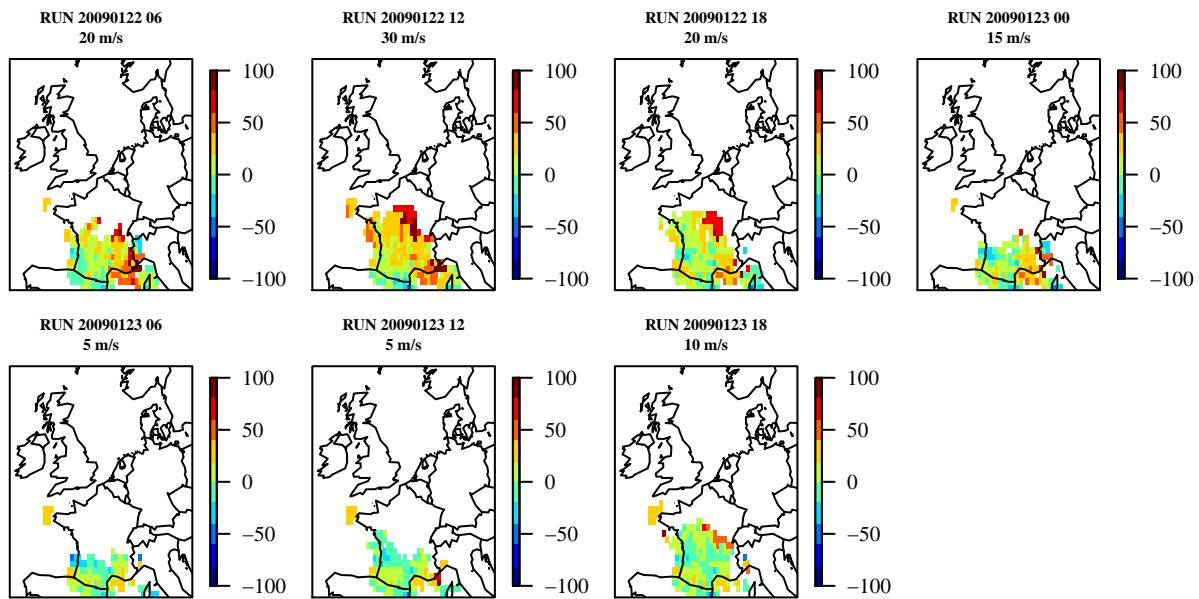


FIGURE 54 : DIFFERENCE ENTRE L’EMPREINTE DE VENT DE GFS DU 24 JANVIER 2009 ET LES OBSERVATIONS, POUR CHACUNE DES PREVISIONS AU COURS DESQUELLES UNE ALERTE A ETE DECLENCHEE. LA MOYENNE DES DIFFERENCES EST INDIQUEE POUR CHAQUE CARTE, SOUS LA DATE DE L’EXECUTION DE GFS.

Pour la tempête Xynthia, une estimation de la perte totale proche de la réalité est obtenue à l’issue des prévisions réalisées entre le 26 Février 2010 18h et le 27 Février 2010 06h. De même que pour Klaus, la différence entre les rafales de vent de GFS et les observations du maximum de vent pour chaque alerte déclenchée a été calculée (Figure 55). Pour Xynthia l’évolution de l’estimation des pertes suit l’évolution de la prévision des vents. En effet, les meilleures estimations des pertes sont réalisées entre le 26 Février à 18h et le 27 Février à 12h, dates auxquelles la différence entre l’empreinte de vent de GFS et les observations est nulle en moyenne. Les vents atteints au cours de Xynthia étant plus faibles que ceux survenus au cours de Klaus, les courbes de vulnérabilité, mieux définies pour les classes de vent faibles, permettent de mieux reproduire cet événement en terme de pertes, lorsque l’estimation des vents est la plus proche de la réalité.

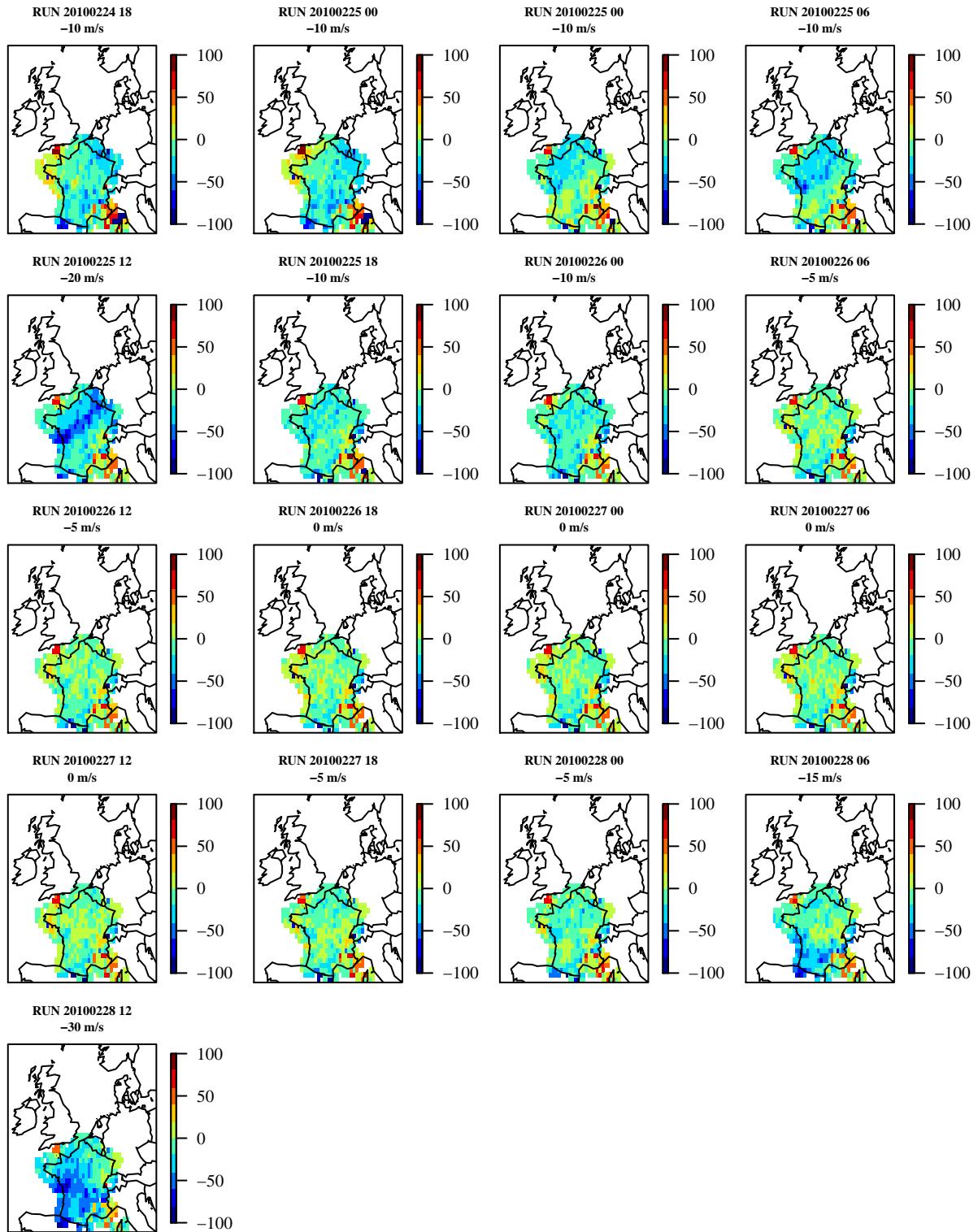


FIGURE 55 : DIFFERENCE ENTRE L'EMPREINTE DE VENT DE GFS POUR LES 27 ET 28 FEVRIER 2010 ET LES OBSERVATIONS, POUR CHACUNE DES PREVISIONS AU COURS DESQUELLES UNE ALERTE A ETE DECLENCHEE POUR XYNTHIA. LA MOYENNE DES DIFFERENCES EST INDIQUEE POUR CHAQUE CARTE, SOUS LA DATE DE L'EXECUTION DE GFS.

Conclusions

L'outil de détection et de calcul des pertes SWIFT a été présenté dans ce chapitre. Composé de deux modules, son objectif principal est de fournir une estimation des pertes et du nombre de sinistres associés à une tempête de vent à venir détectée dans des prévisions météorologiques.

Le premier module, ou module de détection, a pour objectif d'extraire les événements qui peuvent potentiellement causer des dommages importants en Europe. La définition de tels événements s'appuie sur le champ de pression au niveau de la mer. Le travail réalisé pendant la thèse a conduit au développement de l'algorithme de détection. Tout d'abord, les centres de zones dépressionnaires ayant une signature particulièrement intense sont sélectionnés et comparés aux résultats des analyses précédentes. Des événements sont ensuite formés à partir de ces centres et peuvent déclencher une alerte s'ils vérifient certains critères. Un critère important définissant l'état d'alerte est le nombre de prévisions au cours desquelles l'événement a été détecté. Bien que ce critère retarde l'annonce d'un événement potentiel à venir, c'est un compromis qui a été choisi pour éviter l'émission trop fréquente d'alertes et une diminution de la fiabilité de l'outil.

Suite à une demande d'AXA France, le module de détection a été appliqué à la saison hivernale 2008/2009 afin d'évaluer la qualité de l'alerte. Pour cet exercice, seules les données de pression ont été analysées. Les résultats sont présentés dans la Figure 56. Pour chaque événement ayant déclenché une ou plusieurs alertes au cours de cette période, la trajectoire moyenne est tracée ainsi que l'écart-type de la position de chaque centre, indiqué par un cercle. Au cours de cette saison, neuf événements ont déclenché une ou plusieurs alertes. Pour AXA France, seules les informations liées à la tempête Klaus et à la tempête Quinten (8 – 13 Février 2009) auraient été transmises. Les autres événements qui ont déclenché des alertes n'ont pas causé de dégâts connus.

Le second module, ou module de vulnérabilité et de pertes, permet de traduire l'empreinte de vent calculée pour un événement ayant déclenché une alerte en une perte et un nombre de sinistres. La principale difficulté rencontrée au cours de l'élaboration de ce module a été le choix des données de vent pour les courbes de vulnérabilité. Plusieurs tests ont été menés avec différents types de données de vent et différentes méthodes. La version du module de vulnérabilité présentée dans ce chapitre a été achevée au cours de l'année 2013 et a été intégrée à l'outil pendant sa phase opérationnelle entre Octobre 2013 et Mars 2014.

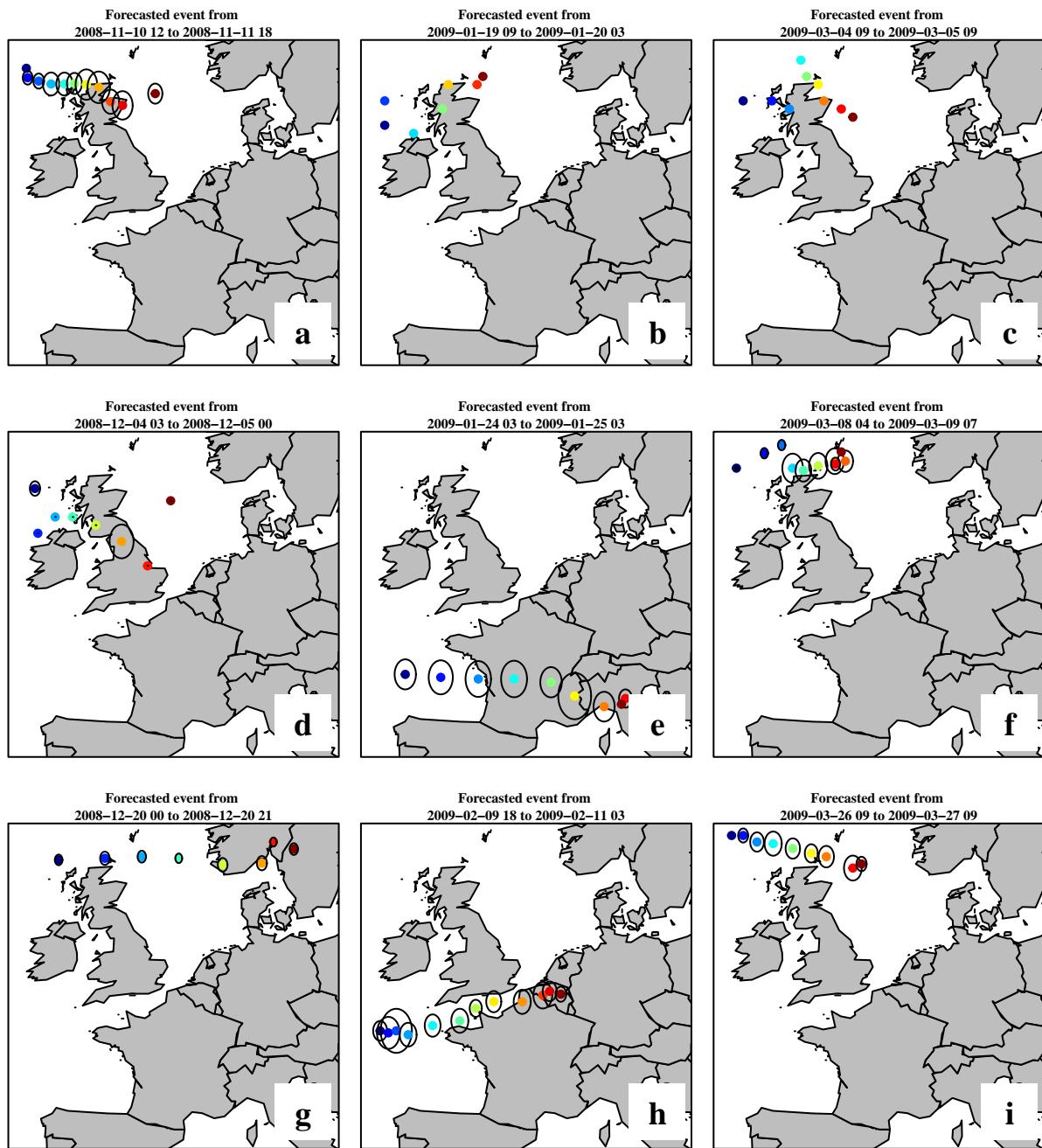


FIGURE 56 : ÉVÉNEMENTS AYANT DÉCLENCHÉ UNE ALERTE AU COURS DE LA PÉRIODE HIVERNALE ENTRE OCTOBRE 2008 ET MARS 2009. POUR CHAQUE ÉVÉNEMENT, LA TRAJECTOIRE MOYENNE EST TRACÉE AINSI QUE L'ÉCART-TYPE DE LA POSITION DE CHAQUE CENTRE. LES DEUX ÉVÉNEMENTS KLAUS ET QUINTEN ONT BIEN ÉTÉ DÉTECTÉS, RESPECTIVEMENT GRAPHIQUE E ET H.

De par la disponibilité des données, aussi bien de GFS que des observations de vent et de pertes, l'outil a été entièrement développé à partir de deux événements historiques : Klaus (2009) et Xynthia (2010). L'ensemble est donc destiné à évoluer, au fur et à mesure que de nouveaux cas se présenteront et demanderont des modifications des différents algorithmes qui

composent l'outil. La partie vulnérabilité et pertes sera revue, notamment en modifiant les classes d'exposition et de vent définies au cours de l'élaboration des courbes de vulnérabilité. Une autre perspective d'étude envisagée est la mise en évidence de zones de vulnérabilité en France. En effet, les bâtiments construits sur les littoraux résistent en moyenne mieux au vent que les bâtiments construits dans le centre de la France, et ont donc un ratio de dommage plus faible pour une vitesse de vent donnée.

L'outil a fonctionné automatiquement au cours de l'hiver 2013 – 2014. Le prochain chapitre présente les résultats de l'outil au cours de cette première saison opérationnelle de détection et d'évaluation des pertes.

Chapitre 7:

Résultats de l'outil sur la saison hivernale 2013 – 2014

| | |
|---|-----|
| INTRODUCTION..... | 165 |
| Description de la situation météorologique au cours de l'hiver 2013/2014 – Synthèse du rapport « The Recent Storms and Floods in the UK » du MetOffice..... | 165 |
| Le point de vue des assureurs sur les événements survenus au cours de cet hiver | 167 |
| Première saison en temps réel de l'outil..... | 168 |
| RETOUR D'EXPERIENCE DE LA SAISON 2013 – 2014 | 171 |
| Evénements détectés par l'outil et qui appartiennent à la base PERILS..... | 171 |
| Evénements non détectés par l'outil et qui appartiennent à la base PERILS..... | 174 |
| Evénements détectés par l'outil et qui n'appartiennent pas à la base PERILS | 176 |
| CES EVENEMENTS APPARTIENNENT-ILS AU CATALOGUE D'EVENEMENTS DETECTES A L'AIDE DE LA METHODE DU PROJET DE RECHERCHE ?..... | 177 |
| CONCLUSIONS | 181 |
| ANNEXES..... | 182 |
| Evénements détectés par l'outil et qui appartiennent à la base PERILS..... | 182 |
| Evénements détectés par l'outil et qui n'appartiennent pas à la base PERILS | 188 |

Introduction

Description de la situation météorologique au cours de l'hiver 2013/2014 – Synthèse du rapport « The Recent Storms and Floods in the UK » du MetOffice

Au cours de cet hiver une quinzaine d'événements de type « tempête de vent » ont touché l'Europe et plus particulièrement l'Irlande, la Grande Bretagne et le nord-ouest de la France. Cette inhabituelle succession d'événements d'intensité modérée a coïncidé avec une période de fortes marées, générant des marées de tempêtes et causant de nombreuses inondations côtières et d'importants dommages aux infrastructures de défense maritime. Les événements étaient également accompagnés d'épisodes de pluie particulièrement intenses et persistants. Cela a eu pour effet de saturer les sols et d'élever le niveau des fleuves et des rivières, augmentant ainsi le risque d'inondation. Le rapport indique d'ailleurs qu'il s'agit du mois de Janvier le plus humide depuis 1910 pour le sud de l'Angleterre.

L'analyse de l'environnement grande échelle des mois de Décembre et Janvier révèle que le courant-jet Nord Atlantique, qui joue un rôle essentiel dans la cyclogenèse des cyclones extratropicaux, présente une structure spatiale et une intensité inhabituelle au cours de ces deux mois. Le rapport du MetOffice présente, la climatologie sur la période 1980-2001 du courant-jet et les composites sur chacun des deux mois de cet hiver (Figure 57). Cette comparaison met en évidence la déviation vers le Nord du courant-jet au niveau de la côte ouest des Etats-Unis qui conduit à un apport d'air polaire vers le nord-est des Etats-Unis et du Canada. Cette intrusion inhabituelle d'air polaire, responsable de l'hiver particulièrement froid survenu dans ces régions, a également renforcé le gradient de température entre les masses d'air polaire et les masses d'air tropical. Cela a eu pour effet d'intensifier le courant-jet à l'entrée de la région Nord-Atlantique et de favoriser le développement de cyclones extratropicaux dans la région. En moyenne, le courant-jet Nord-Atlantique a été 30% plus intense que la climatologie. Une autre composante grande échelle particulière à cet hiver est l'intensité et la persistance du mode positif de l'oscillation Nord Atlantique qui favorise un écoulement zonal, la formation de cyclones extratropicaux intenses et leur propagation vers l'Europe.

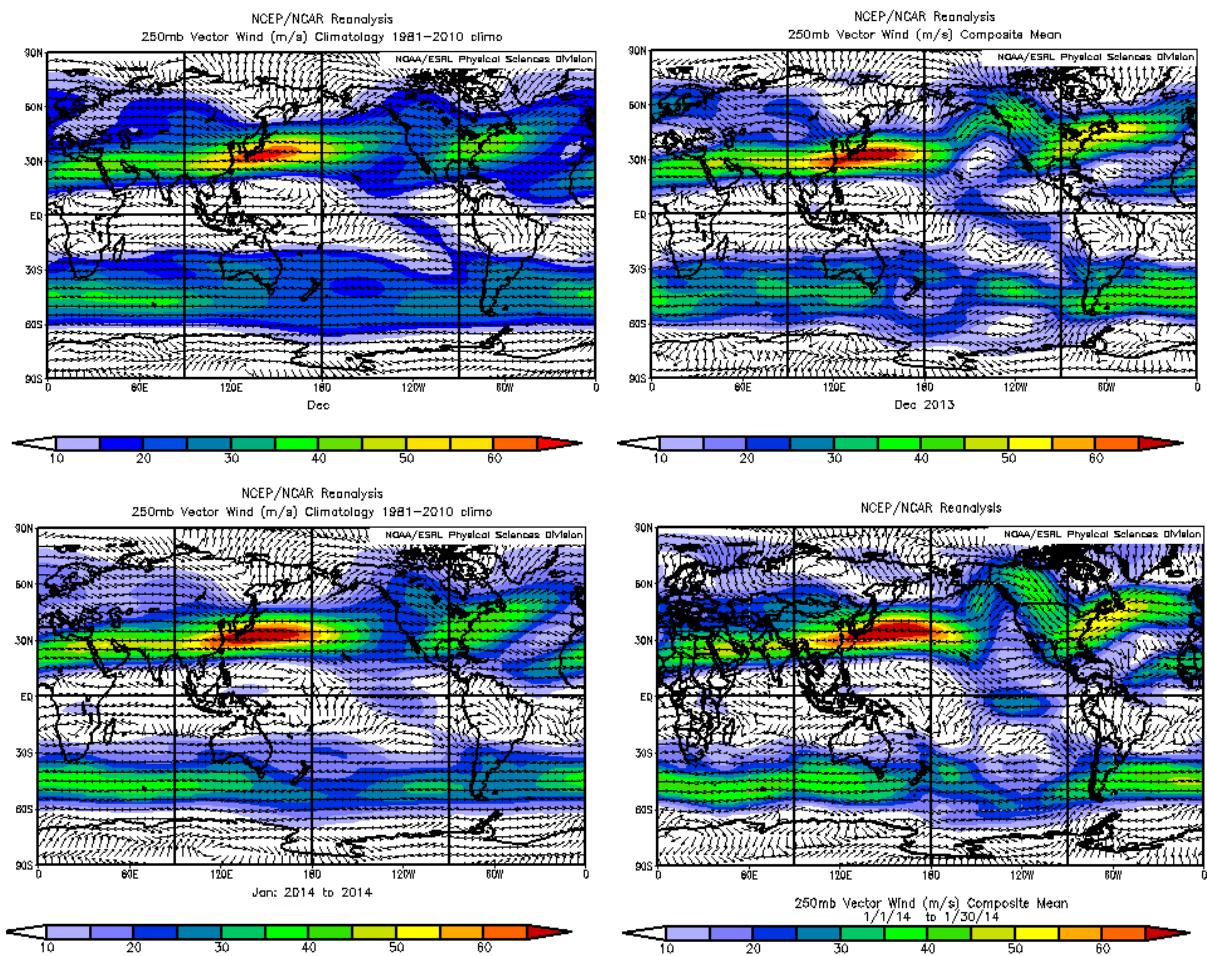


FIGURE 57 : CLIMATOLOGIE DU VENT A 250 hPa AU COURS DES MOIS DE DECEMBRE (EN HAUT A GAUCHE) ET JANVIER (EN BAS A GAUCHE) DE 1961 A 2010. COMPOSITES DES MOIS DE DECEMBRE 2013 (EN HAUT A DROITE) ET DE JANVIER 2014 (EN BAS A DROITE).

En ce qui concerne l'humidité exceptionnelle observée au cours de cet hiver, le rapport du MetOffice présente la climatologie et les composites sur les mois de Décembre et Janvier du vent à 850 hPa (Figure 58). De cette comparaison ressort que les vents proches de la surface dans la région de l'Equateur (entourée en rouge dans la Figure 58) sont inhabituellement intenses et orientés vers le nord-ouest, plus particulièrement au cours du mois de Janvier. Les masses d'air chaud et humide provenant des Tropiques sont donc transportées vers la région de cyclogenèse des cyclones extratropicaux. Ces masses d'air fournissent non seulement aux CET de l'énergie sous forme de chaleur latente, mais elles augmentent également la quantité d'humidité qui sera ensuite transportée par les CET et libérée en Europe au cours des épisodes de pluie.

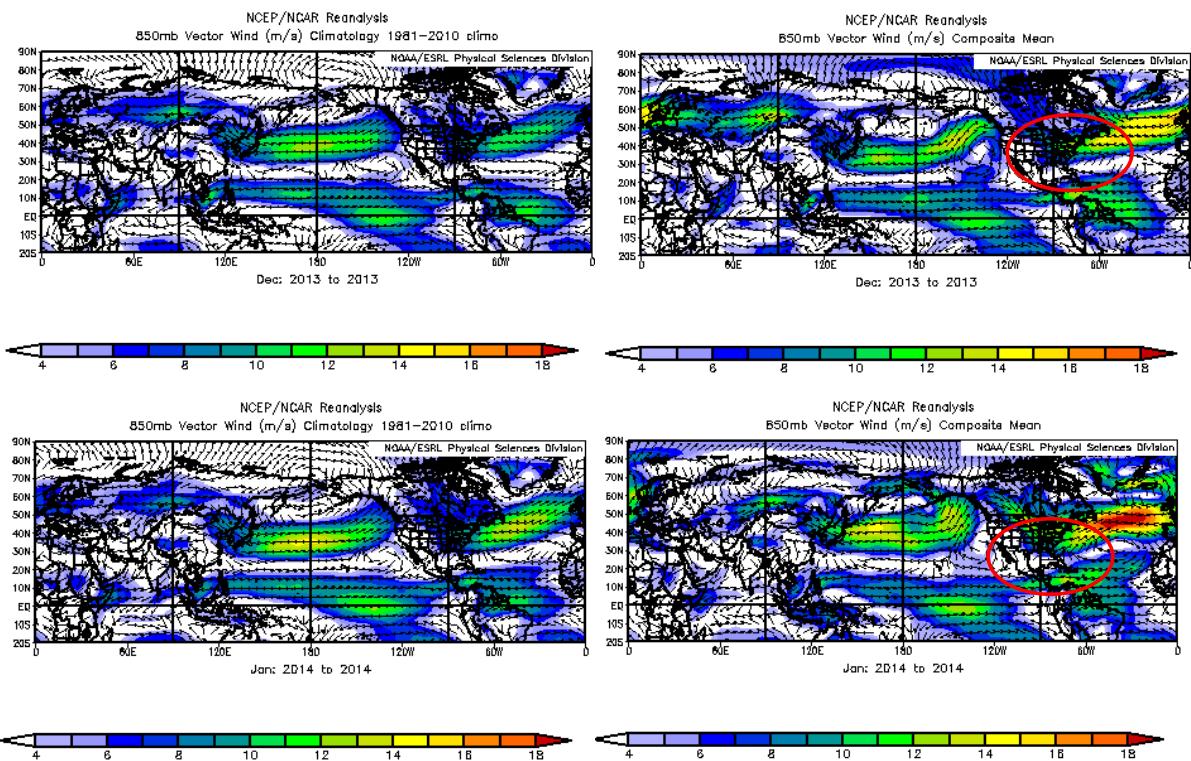


FIGURE 58 : FIGURE 59 : CLIMATOLOGIE DU VENT A 850 hPa AU COURS DES MOIS DE DECEMBRE (EN HAUT A GAUCHE) ET JANVIER (EN BAS A GAUCHE) DE 1961 A 2010. COMPOSITES DES MOIS DE DECEMBRE 2013 (EN HAUT A DROITE) ET DE JANVIER 2014 (EN BAS A DROITE).

Le point de vue des assureurs sur les événements survenus au cours de cet hiver

PERILS, initiative lancée en 2009, a pour mission de récolter les données de pertes dues à des catastrophes en cours de survenance et pouvant potentiellement avoir un impact important pour la branche IARD du secteur de l'assurance. Trois périls sont considérés : la tempête de vent en Europe, l'inondation au Royaume-Uni et le tremblement de terre en Italie. Les catastrophes pouvant générer un certain montant de dommages importants sont placés sous surveillance et une veille sur les pertes est effectuée. Si l'événement ne génère pas autant de dommages que prévus, la veille s'arrête et l'événement est dit « non-qualifié ». Si le montant des pertes générées par l'événement dépasse le seuil, un processus de quantification est mis en place. Les compagnies d'assurance qui participent à cette initiative fournissent alors leurs données de pertes au fur et à mesure que les sinistres sont déclarés. Un événement de type tempête de vent en Europe est placé sous surveillance si la perte potentielle pour le marché dépasse 200 millions d'euros.

Au cours de la saison hivernale 2013 – 2014, 15 événements de type tempête de vent ont été placé sous surveillance (Tableau 6). Jusqu'à présent, seulement 4 événements ont été reportés pour avoir générer des pertes supérieures à 200 m€ : Christian (Octobre 2013), Xaver (Décembre 2013), Dirk (Décembre 2013) et Tini (Février 2014). Les autres événements sont non-qualifiés.

| Nom | Date du début | Statut |
|------------------|---------------|----------------|
| Christian | 27 Oct 2013 | €1.068 billion |
| Xaver | 05 Dec 2013 | €727 million |
| Bernd | 18 Dec 2013 | Non qualifié |
| Dirk | 23 Dec 2013 | €275 million |
| Erich | 26 Dec 2013 | Non qualifié |
| Felix | 30 Dec 2013 | Non qualifié |
| Gerhard | 01 Jan 2014 | Non qualifié |
| Anne | 02 Jan 2014 | Non qualifié |
| Christina | 05 Jan 2014 | Non qualifié |
| Nadja | 31 Jan 2014 | Non qualifié |
| Petra | 04 Feb 2014 | Non qualifié |
| Qumaira | 06 Feb 2014 | Non qualifié |
| Ruth | 08 Feb 2014 | Non qualifié |
| Tini | 12 Feb 2014 | €245 million |
| Ulla | 14 Feb 2014 | Non qualifié |

TABLEAU 6 : LISTE DES EVENEMENTS DE TYPE TEMPETE DE VENT PLACES SOUS SURVEILLANCE. LES PERTES DE MARCHE SUPERIEURES A 200 MILLIONS D'EUROS SONT EGALEMENT INDIQUEES (SOURCE : PERILS)

Première saison en temps réel de l'outil

L'outil SWIFT a été mis en place de manière opérationnelle à partir de la mi-septembre 2013 et a lancé sa première alerte pour la tempête Christian, survenue à la fin du mois d'Octobre et qui marque le début de la saison des tempêtes de vent hivernales en Europe. Au cours de la saison quelques modifications mineures ont été apportées au module de détection, notamment

pour la génération de figures et l'envoi des informations par courrier électronique lors d'une alerte. Par ailleurs, le module de vulnérabilité a été intégré à l'outil opérationnel vers la mi-décembre et appliqué aux alertes survenues avant.

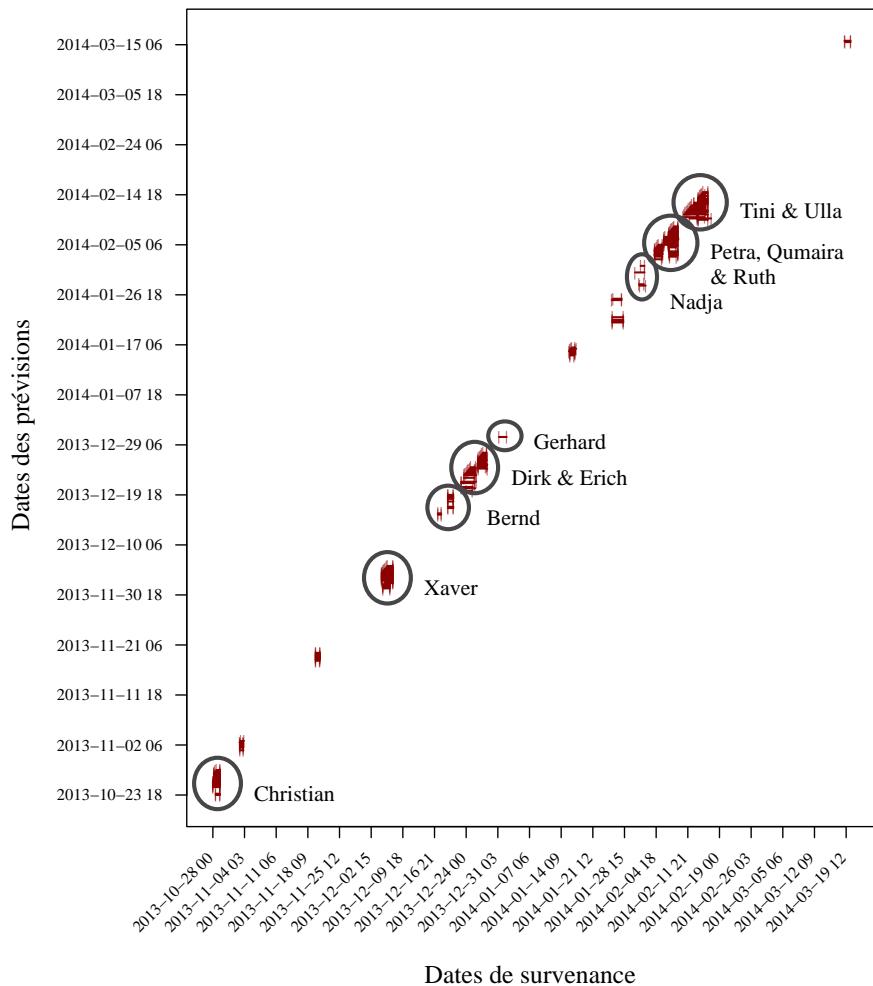


FIGURE 60 : EVENEMENTS AYANT DECLENCHE UNE ALERTE AU COURS DE LA SAISON HIVERNALE 2013 – 2014. LES EVENEMENTS NOMMÉS SONT CEUX DU TABLEAU 1 DETECTÉS PAR L’OUTIL. L’AXE DES ORDONNÉES INDIQUE LES DATES DES PRÉVISIONS DE GFS ET L’AXE DES ABSCISSES INDIQUE LES DATES DE SURVENANCE DES EVENEMENTS.

La Figure 60 présente les événements ayant déclenché une alerte sur la période hivernale d’Octobre 2013 à Mars 2014. Au total, 177 alertes ont été émises par l’outil pour 17 événements. La liste des événements est présentée dans le Tableau 7 avec, pour chaque événement, le nombre d’alerte déclenchée. Sur les 15 événements mis sous surveillance par PERILS, 12 ont été détectés par l’outil.

| Nom | Date du début | Nombre d'alerte |
|------------------|----------------------|------------------------|
| Christian | 27 Oct 2013 | 16 |
| NA_1 | 03 Nov 2013 | 7 |
| NA_2 | 20 Nov 2013 | 7 |
| Xaver | 05 Dec 2013 | 19 |
| Bernd | 18 Dec 2013 | 9 |
| Dirk | 23 Dec 2013 | 13 |
| Erich | 26 Dec 2013 | 13 |
| Gerhard | 01 Jan 2014 | 1 |
| NA_3 | 16 Jan 2014 | 7 |
| NA_4 | 26 Jan 2014 | 6 |
| Nadja | 31 Jan 2014 | 4 |
| Petra | 04 Feb 2014 | 11 |
| Qumaira | 06 Feb 2014 | 7 |
| Ruth | 08 Feb 2014 | 22 |
| Tini | 12 Feb 2014 | 12 |
| Ulla | 14 Feb 2014 | 21 |
| NA_5 | 19 Mar 2014 | 2 |

TABLEAU 7 : LISTE DES EVENEMENTS DETECTES PAR L'OUTIL AVEC LEUR DATE DE DEBUT ET LE NOMBRE D'ALERTE DECLENCHEE.

Comparée aux années précédentes, cette saison hivernale a été particulièrement riche en événements de type « tempête de vent » et a donc été l'occasion de tester les performances de l'outil. La section suivante présente l'ensemble des résultats.

Retour d'expérience de la saison 2013 – 2014

Les performances de l'outil peuvent être estimées à partir de l'étude de trois type d'événements :

1. Les événements détectés par l'outil et qui appartiennent à la base PERILS et sont identifiés comme pouvant potentiellement générer des dommages importants (12 événements),
2. Les événements non détectés par l'outil et qui appartiennent à la base PERILS (2 événements),
3. Les événements détectés par l'outil et qui n'appartiennent pas à la base PERILS et peuvent être considérés comme des fausses alertes (5 événements).

Événements détectés par l'outil et qui appartiennent à la base PERILS

Sur les quinze événements mis sous surveillance par PERILS, douze ont été détectés avec l'outil SWIFT. Les résultats des prévisions pour chacun des événements sont présentés dans l'Annexe de ce chapitre et sont divisés en deux parties : une pour les résultats du module de détection et la seconde pour le module de pertes. Bien que le module de vulnérabilité et de pertes ait été intégré à l'outil à partir de la mi-décembre, il a tout de même été appliqué a posteriori aux alertes antérieures.

Le module de détection délivre, pour chaque événement qui déclenche une alerte, une estimation de la trajectoire, de l'empreinte des rafales de vent et de l'empreinte temporelle de l'événement. Afin de rendre compte de l'ensemble des prévisions réalisées pour chacun des événements, trois graphiques sont produits. Le premier graphique montre, pour chaque centre de l'événement, sa position moyenne (points de couleur) et son écart-type (cercles autour des points de couleur) calculés à partir des trajectoires de l'événement définies à chaque alerte. Le second graphique représente, en chaque point de grille, la probabilité d'occurrence de rafales de vent supérieures à 80 km/h, calculée à partir des empreintes de vent émises par l'outil au cours des alertes. Ce graphique permet de visualiser la fluctuation de l'empreinte au cours des prévisions. En effet, une probabilité égale à 1 en un point de grille signifie que sur l'ensemble des prévisions, les rafales de vent sont supérieures à 80 km/h en ce point. Une probabilité égale à 0.2 pour un événement ayant déclenché 10 alertes signifie que des rafales de vent supérieures à 80 km/h n'ont été prévues qu'au cours de 2 alertes. Enfin, le troisième graphique est complémentaire au second graphique. Il représente, en chaque point de grille, la

date pour laquelle la probabilité d'occurrence des rafales de vent supérieures à 80 km/h est la plus élevée. Pour un point de grille donné, cette probabilité est calculée sur l'ensemble des alertes pour lesquelles des rafales de vent supérieures à 80 km/h ont été estimées pour ce point de grille. Si cette probabilité dépasse 0.75, le point de grille est indiqué par une croix. La Figure 61 présente ces trois graphiques pour la tempête Ruth et la Figure 62 les analyses du centre de prévisions météorologiques autrichien produites entre le 7 et le 9 Février 2014.

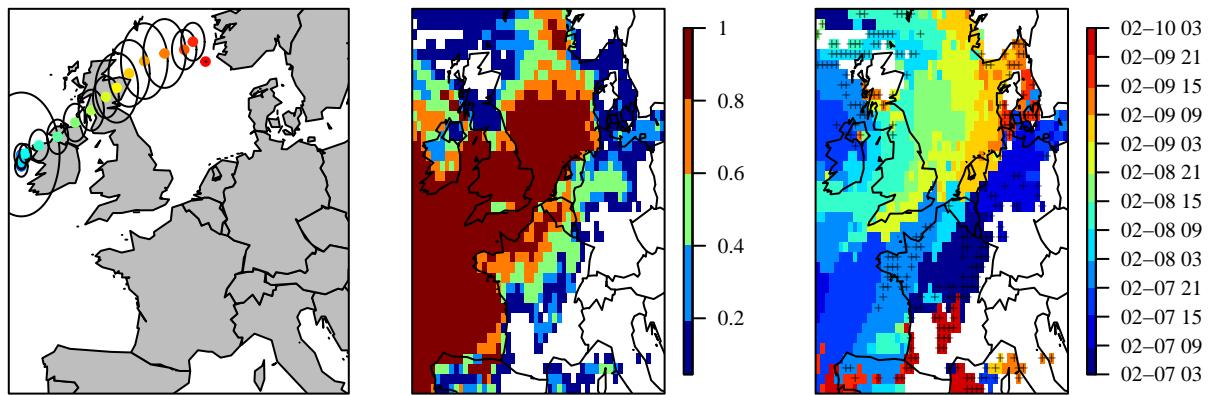


FIGURE 61 : POSITION MOYENNE ET ECART-TYPE DES CENTRES DE PRESSION DE LA TRAJECTOIRE DE RUTH (GAUCHE), PROBABILITE D'OCCURRENCE DES VENTS SUPERIEURS A 80 KM/H EN CHAQUE POINT DE GRILLE (MILIEU), DATE POUR LAQUELLE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE DES RAFALES DE VENT SUPERIEURES A 80 KM/H EST LA PLUS ELEVEE (DROITE). LES CROIX INDIQUENT LES VALEURS SUPERIEURES A 0.75.

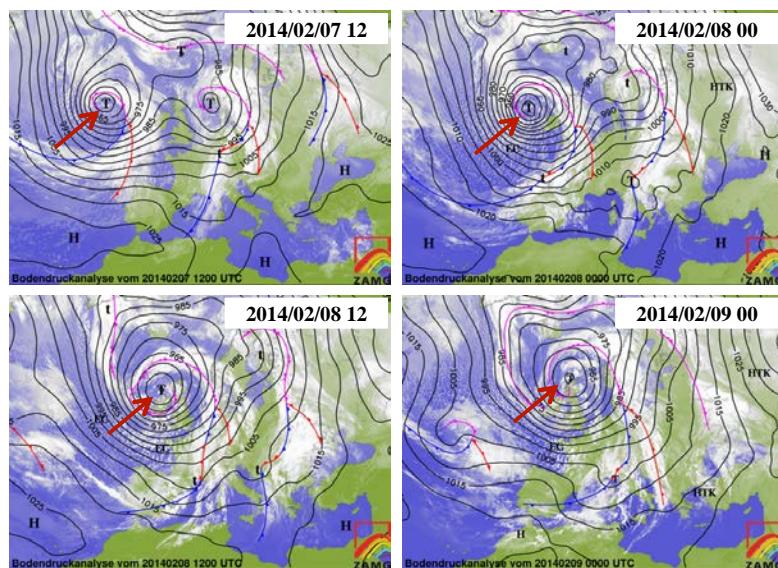


FIGURE 62 : ANALYSES ISSUES DU CENTRE DE PREVISIONS AUTRICHIEN AUX DATES DE SURVENANCE DE LA TEMPETE RUTH (SOURCE : ZAMG)

Les trois graphiques ont été réalisés pour tous les événements (voir Annexe). Il en ressort tout d'abord que les trajectoires sont dans l'ensemble bien capturées par l'outil, à l'exception de Gerhard. Il faut également noter, pour les événements Nadja et Tini, l'accumulation de centres de pression dans la partie nord-ouest de la fenêtre. Ces centres sont détectés à des pas de temps antérieurs à l'événement mais sont associés à la trajectoire de l'événement qui se déplace par la suite au-delà du seuil fixé de -5°E . Ils permettent ainsi de dépasser largement le critère du minimum de 7 centres pour constituer un événement susceptible de déclencher une alerte. Concernant les empreintes de vent, les prévisions de certains événements sont particulièrement fluctuantes. C'est notamment le cas pour Nadja, Ruth et Tini. Cette fluctuation aura un impact sur l'estimation des pertes du module de vulnérabilité.

Le module de vulnérabilité et de pertes délivre pour chaque événement une densité de probabilité des pertes et du nombre de sinistres ainsi que l'évolution de ces deux paramètres. Pour rendre compte de l'évolution de l'estimation de ces deux paramètres, le maximum des deux courbes de densité est extrait pour chaque alerte émise. La Figure 63 montre l'exemple pour la tempête Ruth.

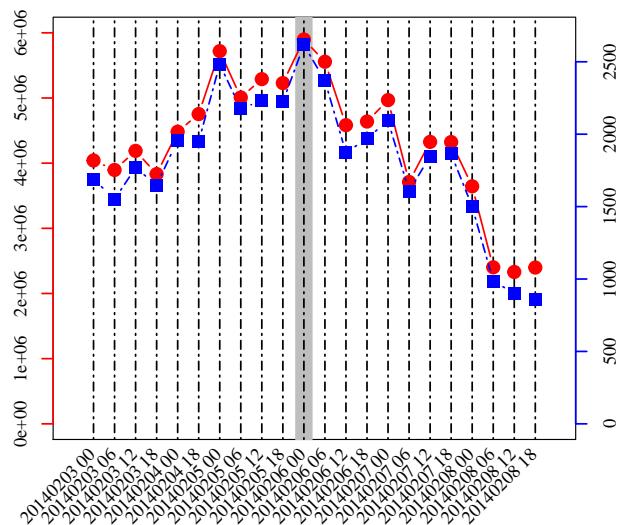


FIGURE 63 : EVOLUTION DE L'ESTIMATION DU MAXIMUM DE PERTES (LIGNE PLEINE ROUGE) ET DU NOMBRE DE SINISTRES (LIGNE BLEUE TIREE) AU COURS DES ALERTES EMISES POUR LA TEMPETE RUTH.

Avec le module de vulnérabilité, les pertes ne sont calculées que pour l'exposition de la France, et plus spécifiquement pour les polices de la branche Multi Risques Habitation. Pour

l'événement Ruth, les pertes estimées sont comprises entre 2 et 6 millions d'euros, pour 1000 à 2000 sinistres. C'est donc un petit événement pour l'exposition d'AXA France. Les résultats pour les autres événements sont également dans l'Annexe, à la suite des graphiques du module de détection. Un point intéressant à noter est l'existence d'un biais de 2 millions d'euros. L'événement pour lequel ce biais est le plus visible est Xaver. En effet, sur l'ensemble des prévisions associées à cet événement, aucune vitesse de vent supérieure à 80 km/h n'affecte la France. Les vents y sont donc faibles, et souvent compris dans la première classe de vitesses de vent du module de vulnérabilité de 0 à 70 km/h. Lors du calcul des pertes, les dégâts liés à cette tranche sont comptabilisés, et cela mène donc à une estimation des pertes d'environ 2 millions. Ce biais se retrouve pour d'autres prévisions d'événement, comme Bernd ou Nadja, au cours desquels les vents n'ont pas touché la France. Enfin, les pertes pour l'exposition MRH d'AXA France sont dans l'ensemble estimées à quelques millions, sauf pour les événements Christian (jusqu'à 12 millions d'euros) et Dirk (jusqu'à 40 millions d'euros). Une première estimation des pertes réelles enregistrées par AXA France sont accessibles pour les événements Christian, Xaver et Dirk. Elles sont indiquées par une ligne rouge sur la Figure 70 de l'Annexe. En comparant les estimations de SWIFT avec les pertes réelles observées par AXA France, il est visible que l'outil surestime les pertes potentielles de l'événement détecté.

Événements non détectés par l'outil et qui appartiennent à la base PERILS

Afin de comprendre pourquoi les trois tempêtes de vent Félix, Anne et Christina n'ont pas déclenché d'alerte, les centres de pression associés aux événements formés au cours des prévisions des sept jours précédents la période de survenance des trois tempêtes de vent sont représentés dans la Figure 64. Le Tableau 8 reprend pour les trois tempêtes les dates des prévisions et la période de survenance considérées.

| Nom | Prévisions | Période de survenance |
|------------------|----------------------------|------------------------------|
| Félix | 23 déc. 2013 – 2 jan. 2014 | 30 jan. 2014 – 2 jan. 2014 |
| Anne | 27 déc. 2013 – 6 jan. 2014 | 3 – 6 jan. 2014 |
| Christina | 29 déc. 2013 – 9 jan. 2014 | 6 – 9 jan. 2014 |

TABLEAU 8 : POUR CHACUNE DES TROIS TEMPETES DE VENT MANQUEES, LES DATES DES PREVISIONS ET LA PERIODE DE SURVENANCE CONSIDEREEES POUR LA FIGURE 8.

D'après la position des centres de pression sélectionnés pendant la période de survenance des trois événements, il apparaît tout d'abord qu'ils sont situés à l'ouest du seuil de longitude -5°E utilisé pour définir un état d'alerte. L'étude des analyses du centre de prévisions météorologiques allemand montre que ces trois événements sont en réalité en dehors de la fenêtre spatiale considérée. La signature observée est donc associée à la périphérie de ces événements. Une deuxième conclusion de la Figure 64 est que les centres de pression sélectionnés ne peuvent pas former de trajectoire suffisamment longue pour déclencher le critère sur la durée de l'événement, également nécessaire pour émettre une alerte.

Sur le graphique décrivant la situation de la tempête Félix, il est possible de distinguer les centres associés à la trajectoire de Gerhard, pour lequel une seule alerte a été déclenchée le 30 décembre 2013 à 18h. Une variabilité importante de la position des centres de pression composant la trajectoire est indiquée par la taille des cercles les entourant, et met en évidence un écueil de la partie « comparaison des prévisions » de l'algorithme. En effet, il est possible qu'un événement soit divisé en deux parce que deux centres successifs dans le temps et n'appartenant pas à la même prévision ne suivent plus un mouvement vers l'est. Cette configuration se produit généralement lorsque les prévisions successives de GFS prévoient un décalage de l'événement dans le temps. Cet inconvénient n'a été observé qu'au cours de cet exercice. Une solution pourrait être, au moment de la comparaison aux prévisions antérieures, de remplacer un centre par la moyenne des positions des centres détectés aux alentours plutôt que de le remplacer par la nouvelle position du centre qui peut induire un changement de position abrupt.

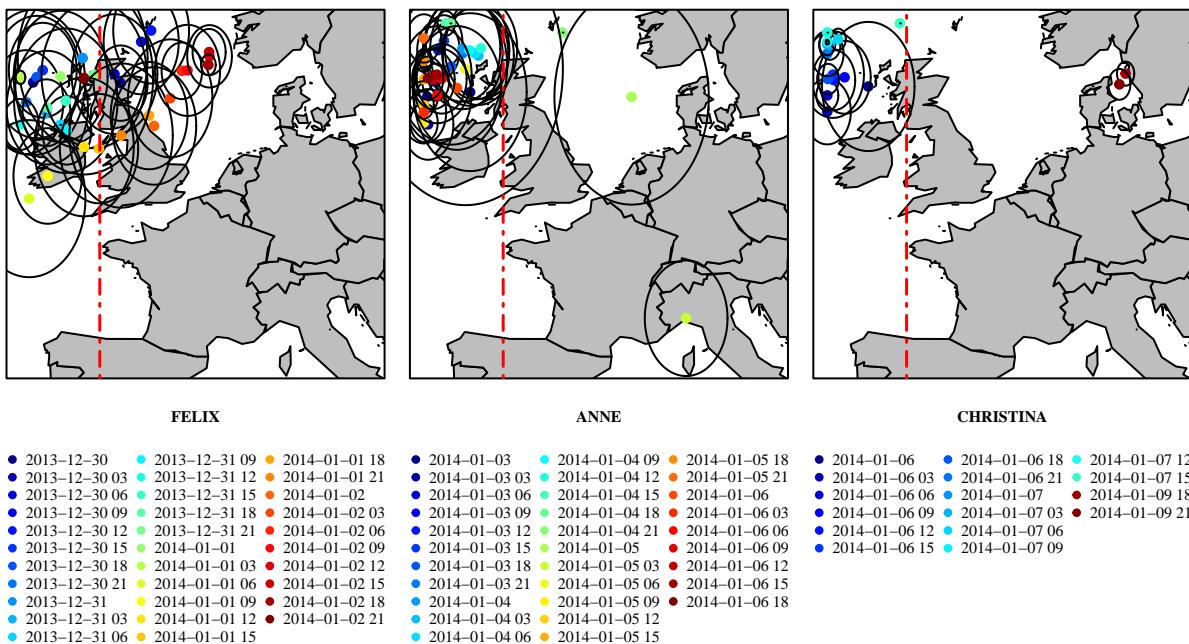


FIGURE 64 : CENTRES DETECTES DANS LES PREVISIONS DES SEPT JOURS PRECEDENTS LES TROIS EVENEMENTS. POUR LES TROIS TEMPETES, UNE FENETRE DE QUATRE JOURS EST CONSIDEREE. LES POINTS DE COULEUR REPRESENTENT LA POSITION MOYENNE AUX DIFFERENTES ECHEANCES ET LES CERCLES INDiquENT L'ECART-TYPE DE LA POSITION DES CENTRES DE PRESSION.

Evénements détectés par l'outil et qui n'appartiennent pas à la base PERILS

Les mêmes cartes que celles présentées dans la section « Evénements détectés par l'outil et qui appartiennent à la base PERILS » ont été tracées pour les cinq derniers événements détectés par SWIFT.

Bien que ces événements aient une signature dans le champ de pression qui remplit les critères de détection, sélection et alerte, la signature dans le champ de vent de surface révèle que ces événements n'impacteront que peu les pays d'Europe de l'ouest.

Une conclusion de ces cinq événements pourrait être l'ajout d'un critère sur les vitesses de vent atteintes sur les continents. Cependant, cinq « fausses alertes » pour douze « bonnes alertes » est un ratio correct et l'ajout d'un nouveau paramètre pourrait altérer les résultats. Des études complémentaires seront menées afin de mesurer l'impact de l'ajout de ce paramètre.

Ces événements appartiennent-ils au catalogue d'événements détectés à l'aide de la méthode du projet de recherche ?

La méthode multi-variable développée dans le cadre du projet de recherche s'appuie sur des séries temporelles d'une trentaine d'années pour définir les seuils de détection et de sélection. L'historique des prévisions de GFS ne remonte qu'en 2006, et ne permet pas une série temporelle suffisamment longue pour définir ces seuils. Par ailleurs, les jeux de réanalyses ERA Interim et NCEP2 utilisés au cours du travail de recherche n'étaient pas disponibles pour la période d'Octobre 2013 à Mars 2014. Seules les réanalyses NCEP (Kalnay et al., 1996), de résolution spatiale et temporelle équivalente à celle de NCEP2 ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 6h), sont actualisées tous les jours et sont donc utilisées pour cette étude sur la période 1979 – 2014. La méthode sera donc appliquée à ces données dans un premier temps, en attendant que les réanalyses ERA Interim, d'une résolution spatiale plus proche des prévisions GFS, soient disponibles.

Afin de pouvoir comparer les résultats entre les deux méthodes, la méthode multi-variable est appliquée à la fenêtre spatiale de SWIFT. Cette fenêtre spatiale étant plus grande que celle utilisée pour le travail de recherche, les seuils de détection et de sélection sont fixés respectivement aux 90^e et 95^e percentiles des distributions de maxima détectés sur la fenêtre spatiale de SWIFT. Ces valeurs correspondent aux valeurs utilisées lors de l'application de la méthode multi-variable à une grande fenêtre (Chapitre 4). L'application de la méthode multi-variable conduit à la détection de 142 événements sur la période d'Octobre à Mars 1979 – 2014.

La Figure 65 présente la distribution temporelle des événements sur l'ensemble de la période : 4 événements sont sélectionnés en 2013 (1 en Janvier et 3 en Décembre) et 6 en 2014 (5 en Février et 1 en Mars). La Figure 66 présente, pour chacun des 9 événements détectés au cours de l'hiver 2013 – 2014, les centres de pression et de vorticité relative ainsi que l'empreinte du ratio de vent. Cette empreinte est définie par le maximum en chaque point de grille du ratio de vent à la surface sur la durée de l'événement détecté avec le ratio de vent. Parmi ces 9 événements il y a : Xaver, Dirk et Erich (Décembre 2013), Nadja, Petra, Tini et Ulla (Février 2014) et deux autres événements.

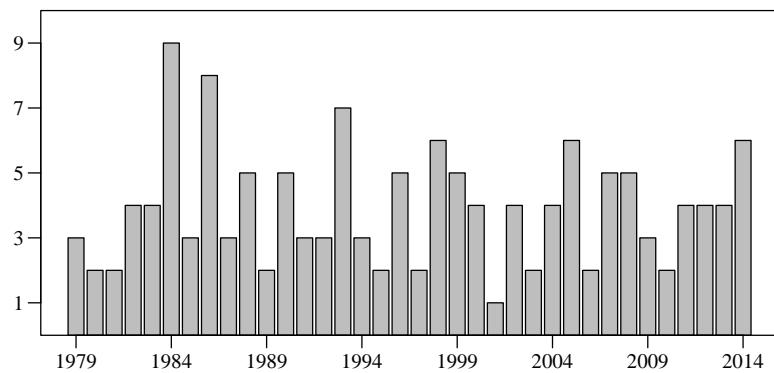


FIGURE 65 : DISTRIBUTION DU NOMBRE D'EVENEMENTS PAR AN POUR LES 142 EVENEMENTS DETECTES PAR LA METHODE MULTI-VARIABLE.

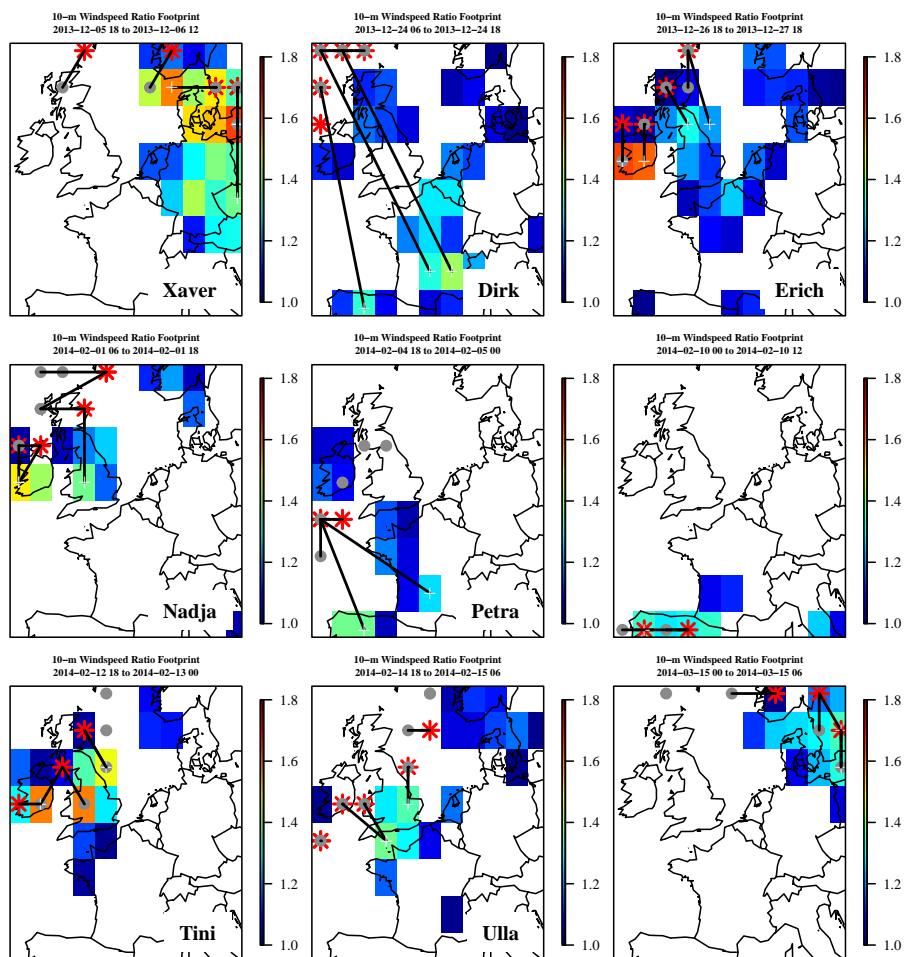


FIGURE 66 : CARTES DES 9 EVENEMENTS DETECTES AU COURS DE L'HIVER 2013-2014. LES POINTS GRIS INDUIENT LES CENTRES DE VORTICITE RELATIVE, LES ETOILES ROUGES LES CENTRES D'ANOMALIE DE PRESSION ET LES CROIX BLANCHES LES CENTRES DU RATIO DE VENT. LES CENTRES DES TROIS VARIABLES SURVENANT AU MEME PAS DE TEMPS SONT LIES PAR UNE LIGNE NOIRE.

Sur les 15 tempêtes de vent placées sous surveillance par PERILS, sept sont détectées par la méthode multi-variable à partir des réanalyses NCEP. Les tempêtes Gerhard, Anne et Christina ne sont détectés par aucune des trois variables tandis que les événements Christian, Bernd, Qumaira et Ruth sont détectés par deux des trois variables (Figure 67). Seule la tempête Qumaira n'est pas détectée avec la pression, cela peut être expliqué par le minimum de pression atteint observé qui est égal à 975 hPa alors que les autres événements ont atteint des valeurs inférieures à 965 hPa. Par ailleurs, en ce qui concerne les événements Bernd et Ruth, la sous-estimation des vents de surface sur les points de grille terrestres pris en compte dans le calcul du ratio peut expliquer pourquoi ils ne sont pas détectés avec cette variable.

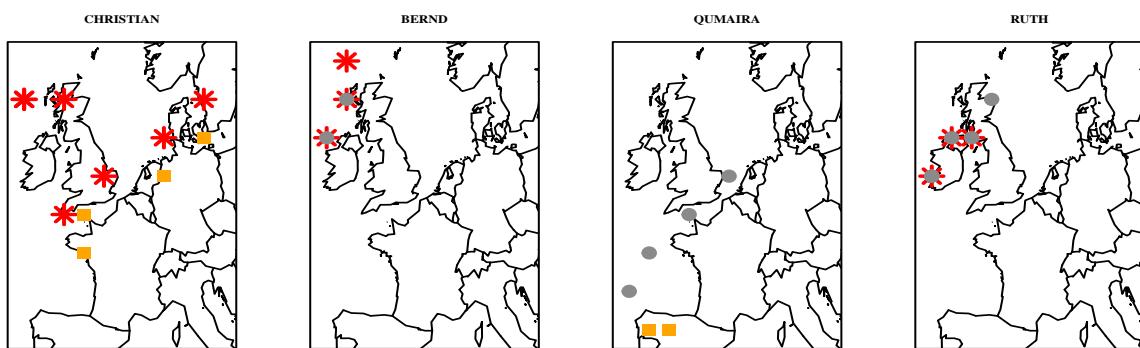


FIGURE 67 : TRAJECTOIRES DES EVENEMENTS DE PERILS QUI NE SONT PAS DETECTES AVEC LA METHODE MULTI-VARIABLE. LES ETOILES ROUGES INDIQUENT LES CENTRES D'ANOMALIE DE PRESSION, LES POINTS GRIS LES CENTRES DE VORTICITE RELATIVE ET LES CARRES JAUNES LES CENTRES DU RATIO DE VENT A LA SURFACE.

Pour conclure cette étude, la méthode multi-variable adaptée à la fenêtre spatiale de SWIFT détecte certains événements de l'hiver 2013 – 2014. Cependant, il est difficile d'estimer si les événements qui ne sont pas détectés, ne le sont pas à cause de la résolution du modèle qui ne permet pas de les reproduire ou à cause des seuils de la méthode multi-variable, trop élevés pour détecter ces événements. L'utilisation des seuils plus élevés 95^e et 98^e percentiles conduit à la détection de Xaver seul pour toute la saison. Cette étude sera reconduite lorsque les données ERA Interim pour la fin de l'hiver seront disponibles. Une première application de la méthode à la période 1979 – 2013, couvrant les mois d'Octobre à Décembre 2013, a été effectuée et a conduit à la détection de Christian, Xaver et Dirk (Figure 68).

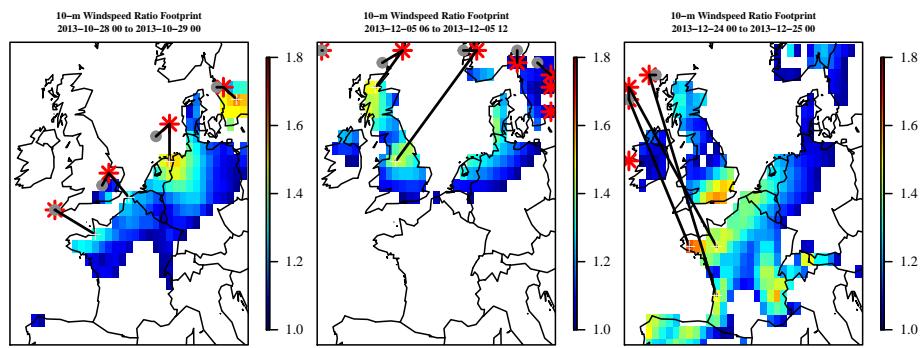


FIGURE 68 : EVENEMENTS DETECTES AU COURS DES MOIS D'OCTOBRE A DECEMBRE 2013 DANS ERA INTERIM. LES POINTS GRIS INDiquENT LES CENTRES DE VORTICITE RELATIVE, LES ETOILES ROUGES LES CENTRES D'ANOMALIE DE PRESSION ET LES CROIX BLANCHES LES CENTRES DU RATIO DE VENT. LES CENTRES DES TROIS VARIABLES SURVENANT AU MEME PAS DE TEMPS SONT LIES PAR UNE LIGNE NOIRE.

Conclusions

L'outil SWIFT a été mis en place pour la saison hivernale d'Octobre 2013 à Mars 2014 et a fonctionné de manière complètement automatique sur toute la période. Des changements mineurs ont été apportés à l'outil au cours de cet exercice et concernent essentiellement la mise en forme des informations envoyées lors d'une alerte.

L'efficacité de l'outil a été prouvée : douze tempêtes de vent ont déclenché une alerte sur les quinze définies comme potentiellement fortement dommageables par PERILS, acteur reconnu du secteur de l'assurance. Les trois événements qui n'ont pas été détectés, et qui peuvent donc être considérés comme des manqués de l'outil, ont eu une trajectoire située au nord-ouest de la fenêtre spatiale considérée par l'outil. Enfin, cinq événements ont été détectés alors que leur potentiel de dommage était faible.

Pour ce qui est de l'estimation des pertes, les résultats obtenus pour les événements ayant déclenché une alerte renforcent les perspectives annoncées dans la conclusion du Chapitre 6. Bien que les estimations de pertes de l'outil reproduisent l'ordre de grandeur des pertes réelles observées, il est possible d'améliorer cette estimation. Des études de sensibilité sur le nombre de classes d'exposition et de vent seront menées afin, notamment, de diminuer le biais de quelques millions d'euros présent lors de l'estimation des pertes pour des événements dont les vents les plus forts ne touchent pas la France.

Dans l'ensemble les résultats produits par l'outil SWIFT pour ce premier exercice en temps réel ont été satisfaisants. L'investissement réalisé pour le fonctionnement de l'outil sera reconduit pour la saison hivernale prochaine.

Annexes

Evénements détectés par l'outil et qui appartiennent à la base PERILS

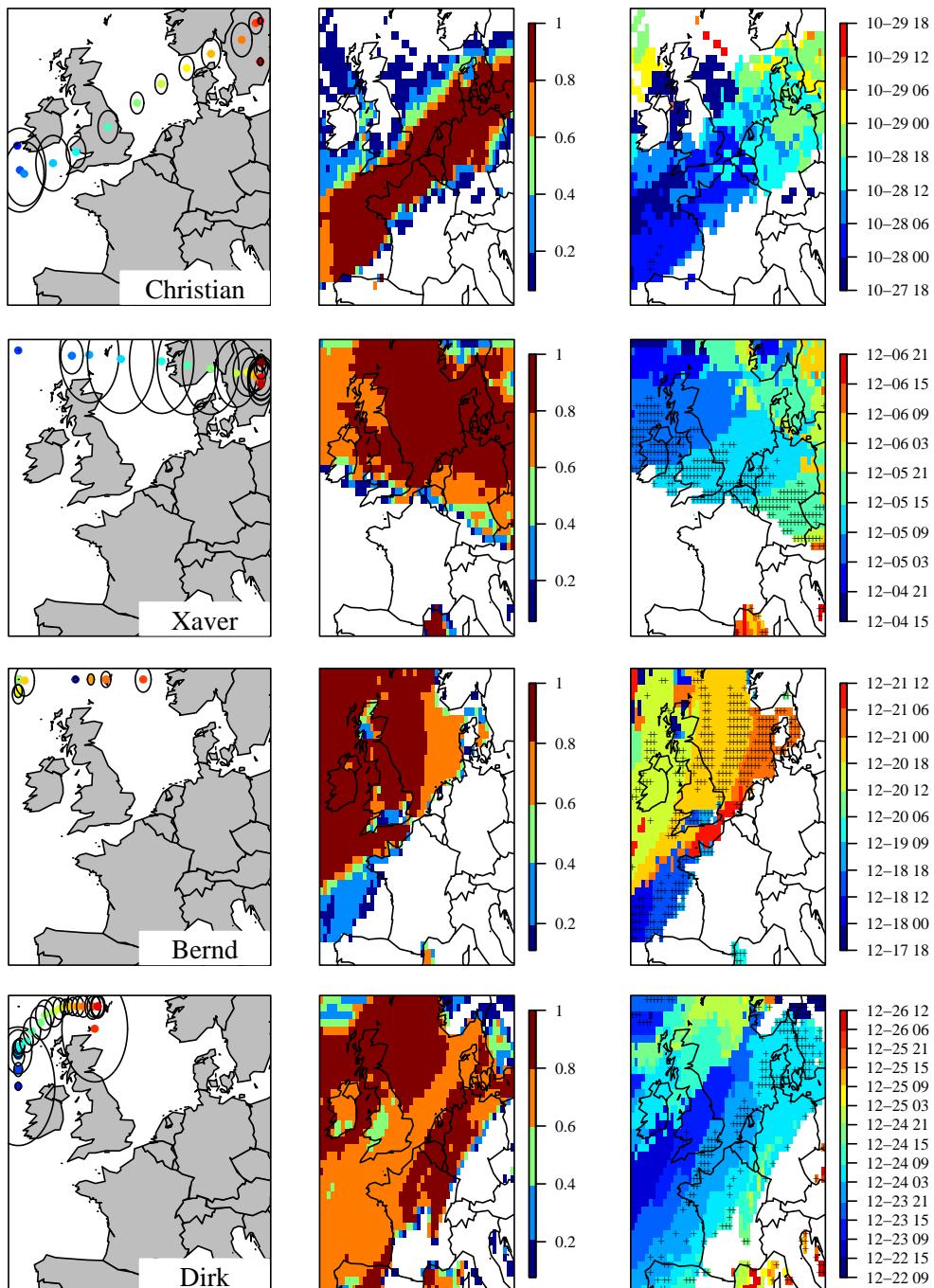


FIGURE 69 : RESULTATS DU MODULE DE DETECTION POUR LES EVENEMENTS CHRISTIAN, XAVER, BERND ET DIRK. GAUCHE : POSITION MOYENNE ET ECART-TYPE DES CENTRES DE PRESSION. MILIEU : PROBABILITE D'OCCURRENCE DES VENTS SUPERIEURS A 80 KM/H EN CHAQUE POINT DE GRILLE. DROITE : DATE POUR LAQUELLE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE DES RAFALES DE VENT SUPERIEURES A 80 KM/H EST LA PLUS ELEVEE (DROITE). LES CROIX INDIQUENT LES VALEURS SUPERIEURES A 0.75.

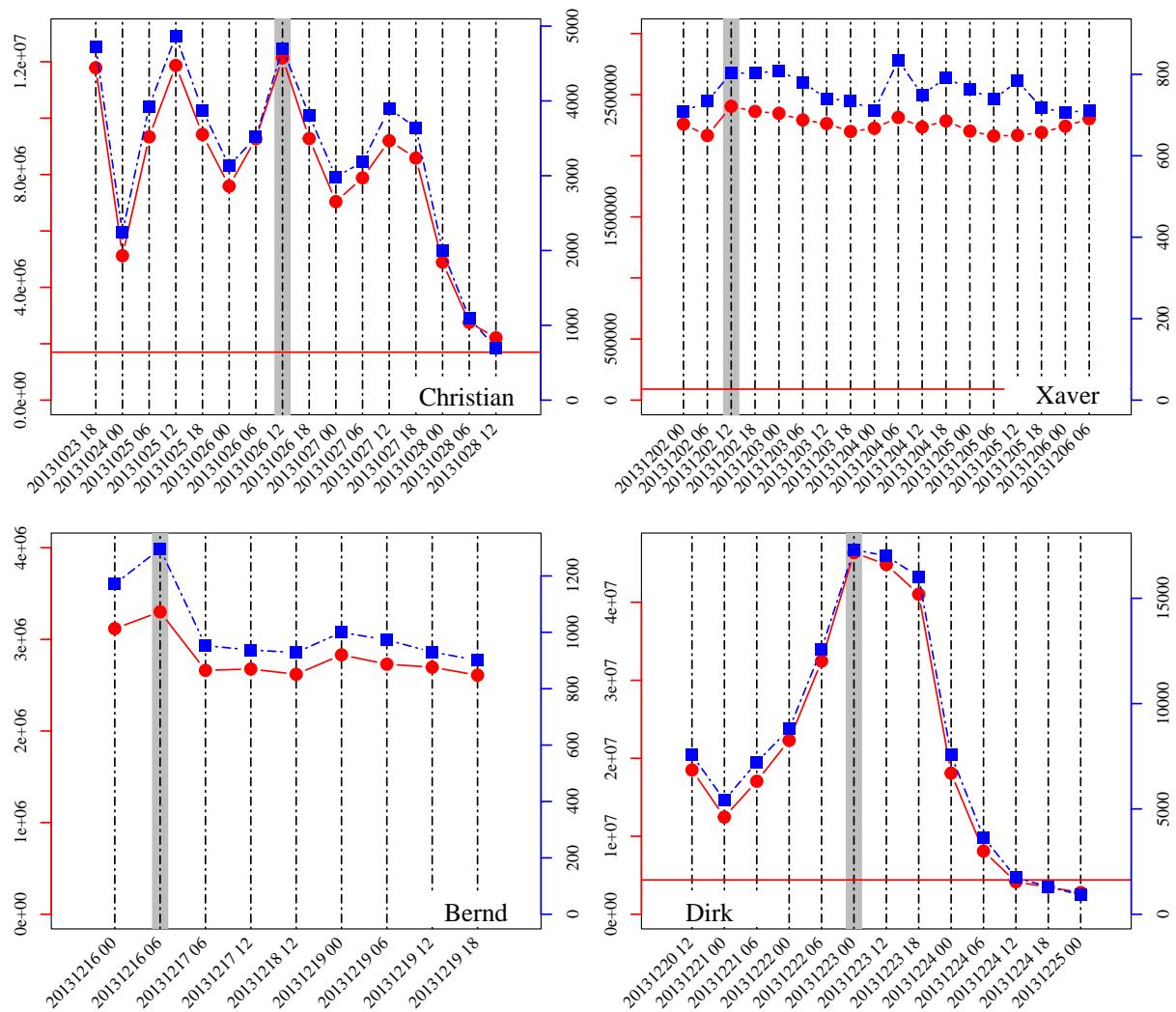


FIGURE 70 : RESULTATS DU MODULE DE PERTES POUR LES EVENEMENTS CHRISTIAN, XAVER, BERND ET DIRK. EVOLUTION DE L'ESTIMATION DU MAXIMUM DE PERTES (LIGNE PLEINE ROUGE) ET DU NOMBRE DE SINISTRES (LIGNE BLEUE TIREE). SI LA Perte OBSERVEE EST DISPONIBLE, ELLE EST INDIQUEE PAR UNE LIGNE PLEINE ROUGE.

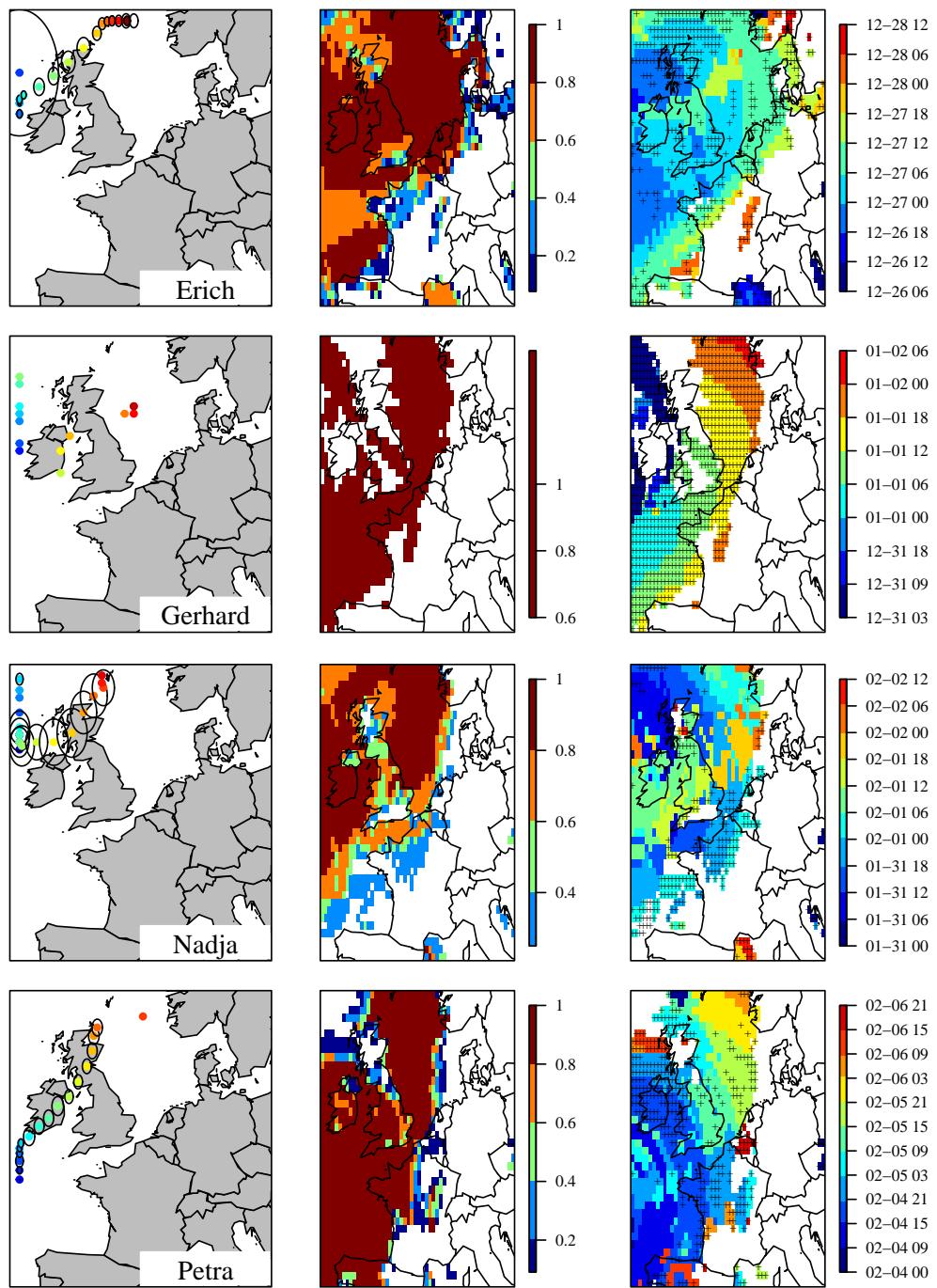


FIGURE 71 : RESULTATS DU MODULE DE DETECTION POUR LES EVENEMENTS ERICH, GERHARD, NADJA ET PETRA. GAUCHE : POSITION MOYENNE ET ECART-TYPE DES CENTRES DE PRESSION. MILIEU : PROBABILITE D'OCCURRENCE DES VENTS SUPERIEURS A 80 KM/H EN CHAQUE POINT DE GRILLE. DROITE : DATE POUR LAQUELLE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE DES RAFALES DE VENT SUPERIEURES A 80 KM/H EST LA PLUS ELEVEE (DROITE). LES CROIX INDIQUENT LES VALEURS SUPERIEURES A 0.75.

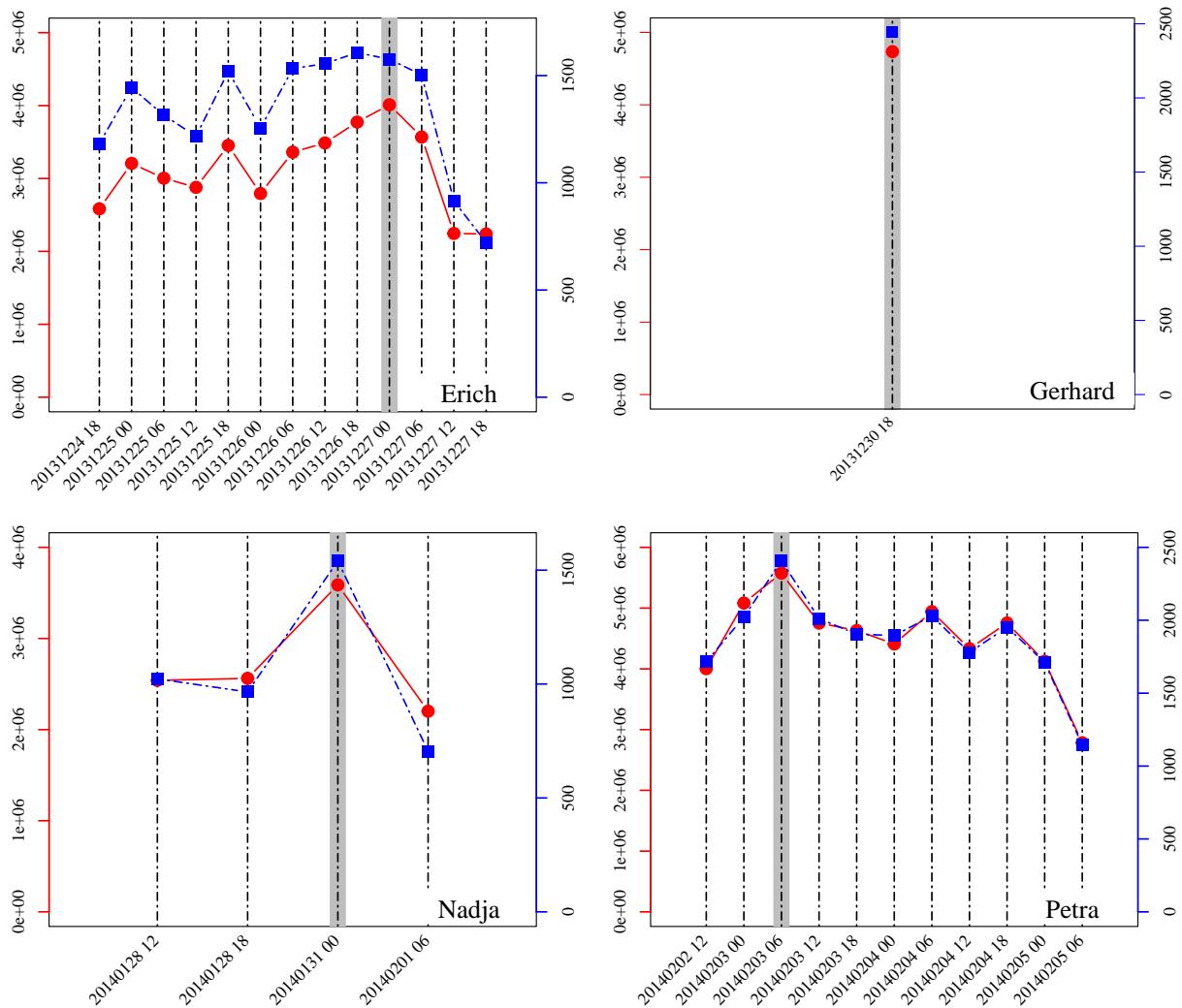


FIGURE 72 : RESULTATS DU MODULE DE PERTES POUR LES EVENEMENTS ERICH, GERHARD, NADJA ET PETRA. EVOLUTION DE L'ESTIMATION DU MAXIMUM DE PERTES (LIGNE PLEINE ROUGE) ET DU NOMBRE DE SINISTRES (LIGNE BLEUE TIRETEE). SI LA PERTE OBSERVEE EST DISPONIBLE, ELLE EST INDIQUEE PAR UNE LIGNE PLEINE ROUGE.

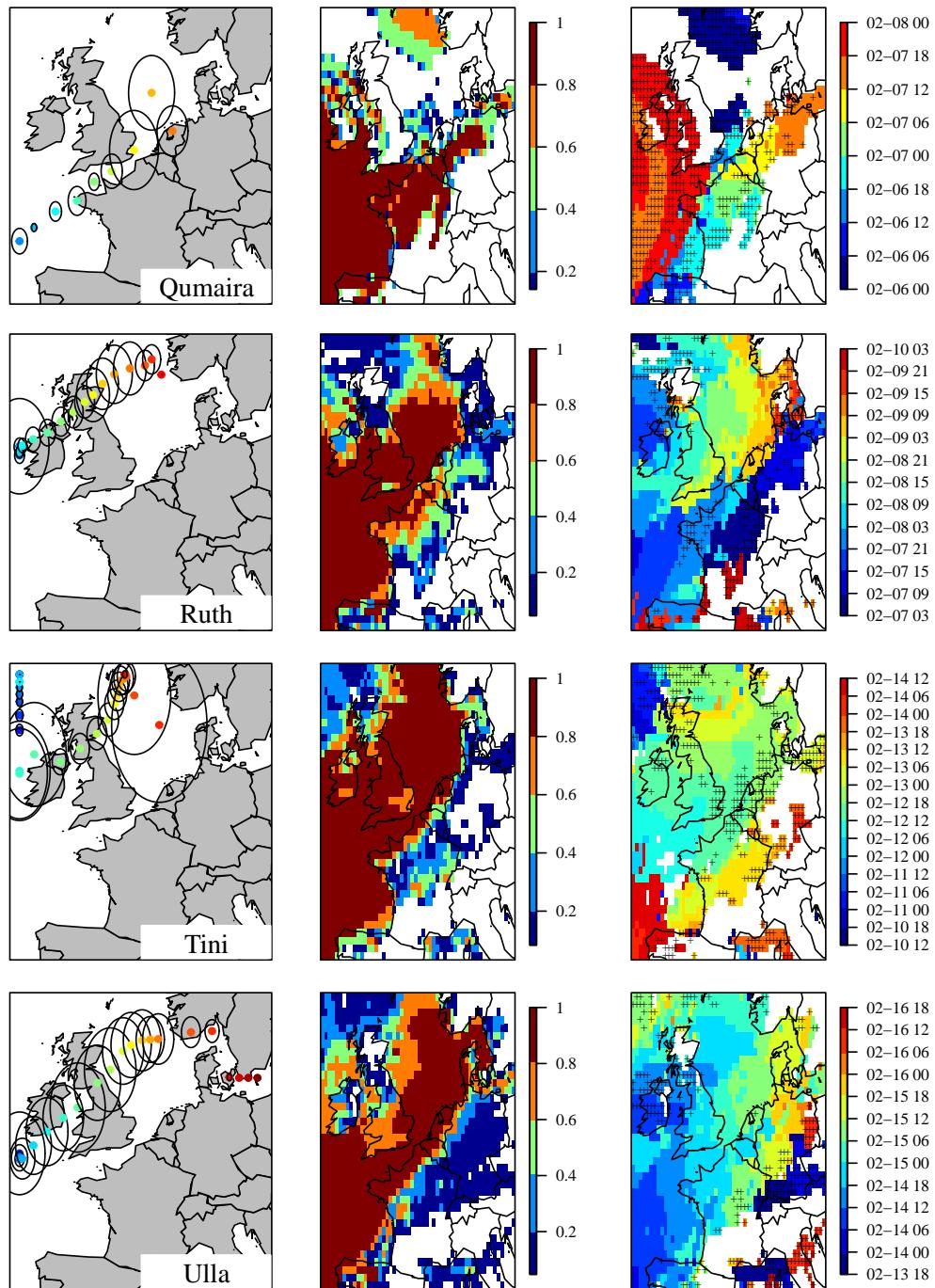


FIGURE 73 : RESULTATS DU MODULE DE DETECTION POUR LES EVENEMENTS QUMAIRA, RUTH, TINI ET ULLA. GAUCHE : POSITION MOYENNE ET ECART-TYPE DES CENTRES DE PRESSION. MILIEU : PROBABILITE D'OCCURRENCE DES VENTS SUPERIEURS A 80 KM/H EN CHAQUE POINT DE GRILLE. DROITE : DATE POUR LAQUELLE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE DES RAFALES DE VENT SUPERIEURES A 80 KM/H EST LA PLUS ELEVEE (DROITE). LES CROIX INDIQUENT LES VALEURS SUPERIEURES A 0.75.

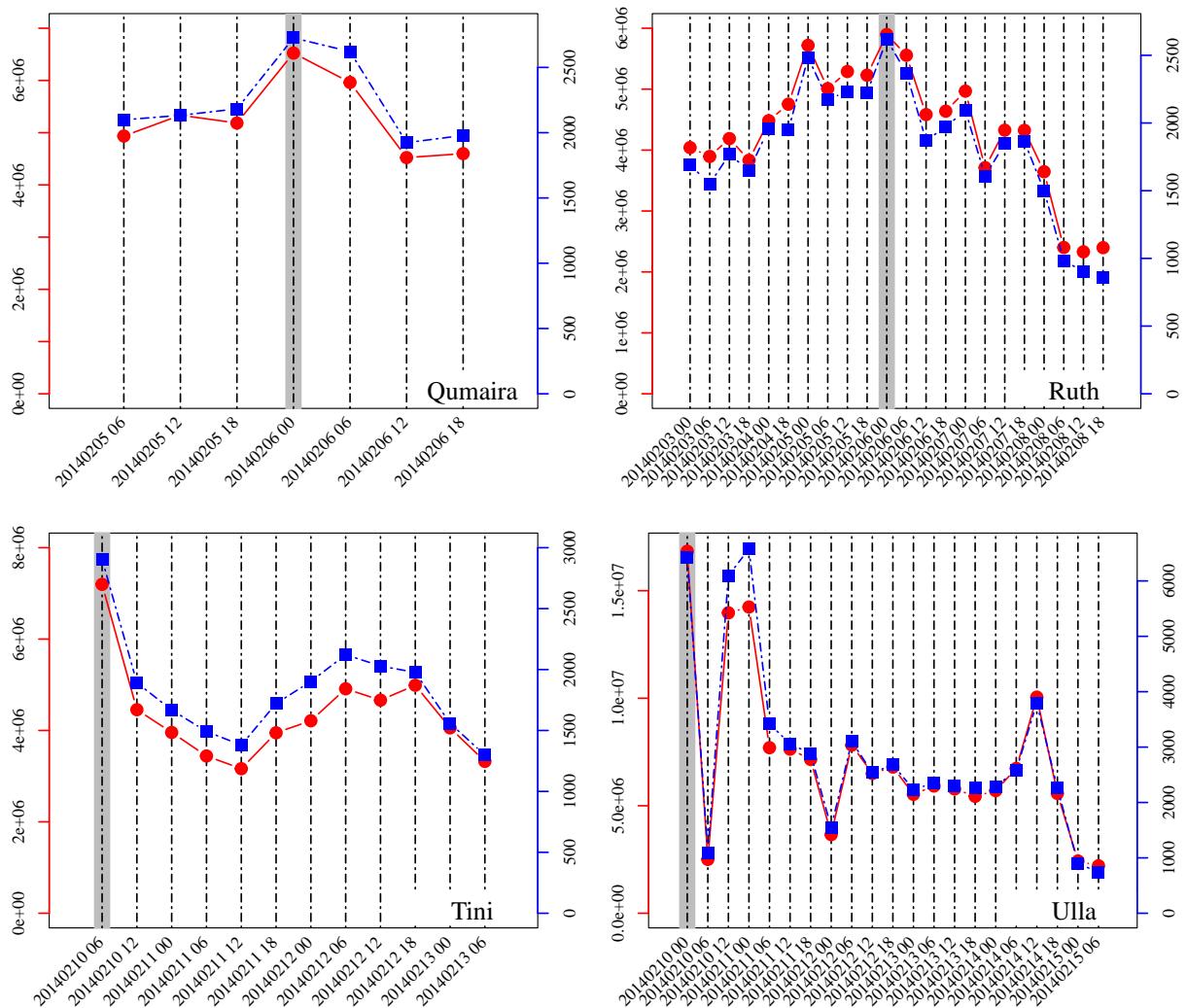


FIGURE 74 : RESULTATS DU MODULE DE PERTES POUR LES EVENEMENTS QUMAIRA, RUTH, TINI ET ULLA. EVOLUTION DE L'ESTIMATION DU MAXIMUM DE PERTES (LIGNE PLEINE ROUGE) ET DU NOMBRE DE SINISTRES (LIGNE BLEUE TIRETEE). SI LA Perte OBSERVEE EST DISPONIBLE, ELLE EST INDIQUEE PAR UNE LIGNE PLEINE ROUGE.

Evénements détectés par l'outil et qui n'appartiennent pas à la base PERILS

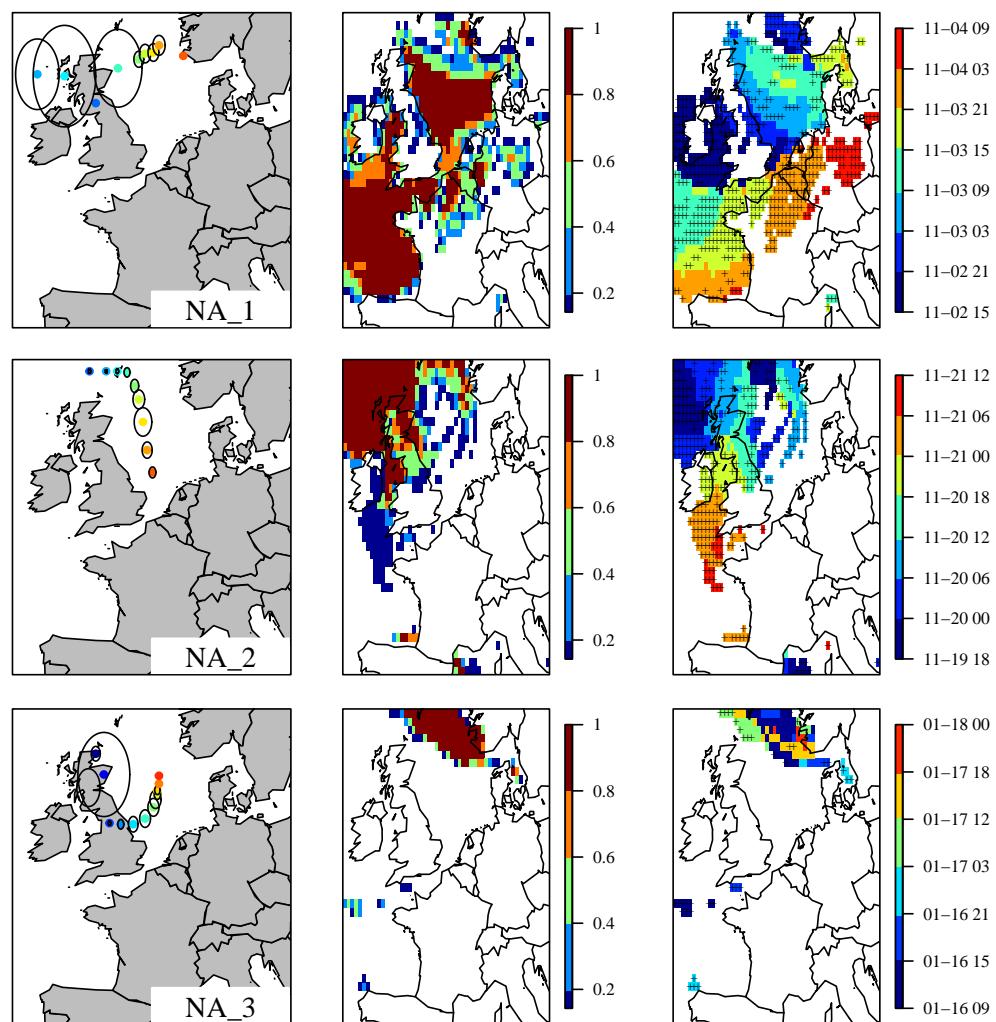


FIGURE 75 : RESULTATS DU MODULE DE DETECTION POUR TROIS DES EVENEMENTS DETECTES. GAUCHE : POSITION MOYENNE ET ECART-TYPE DES CENTRES DE PRESSION. MILIEU : PROBABILITE D'OCCURRENCE DES VENTS SUPERIEURS A 80 KM/H EN CHAQUE POINT DE GRILLE. DROITE : DATE POUR LAQUELLE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE DES RAFALES DE VENT SUPERIEURES A 80 KM/H EST LA PLUS ELEVEE (DROITE). LES CROIX INDIQUENT LES VALEURS SUPERIEURES A 0.75.

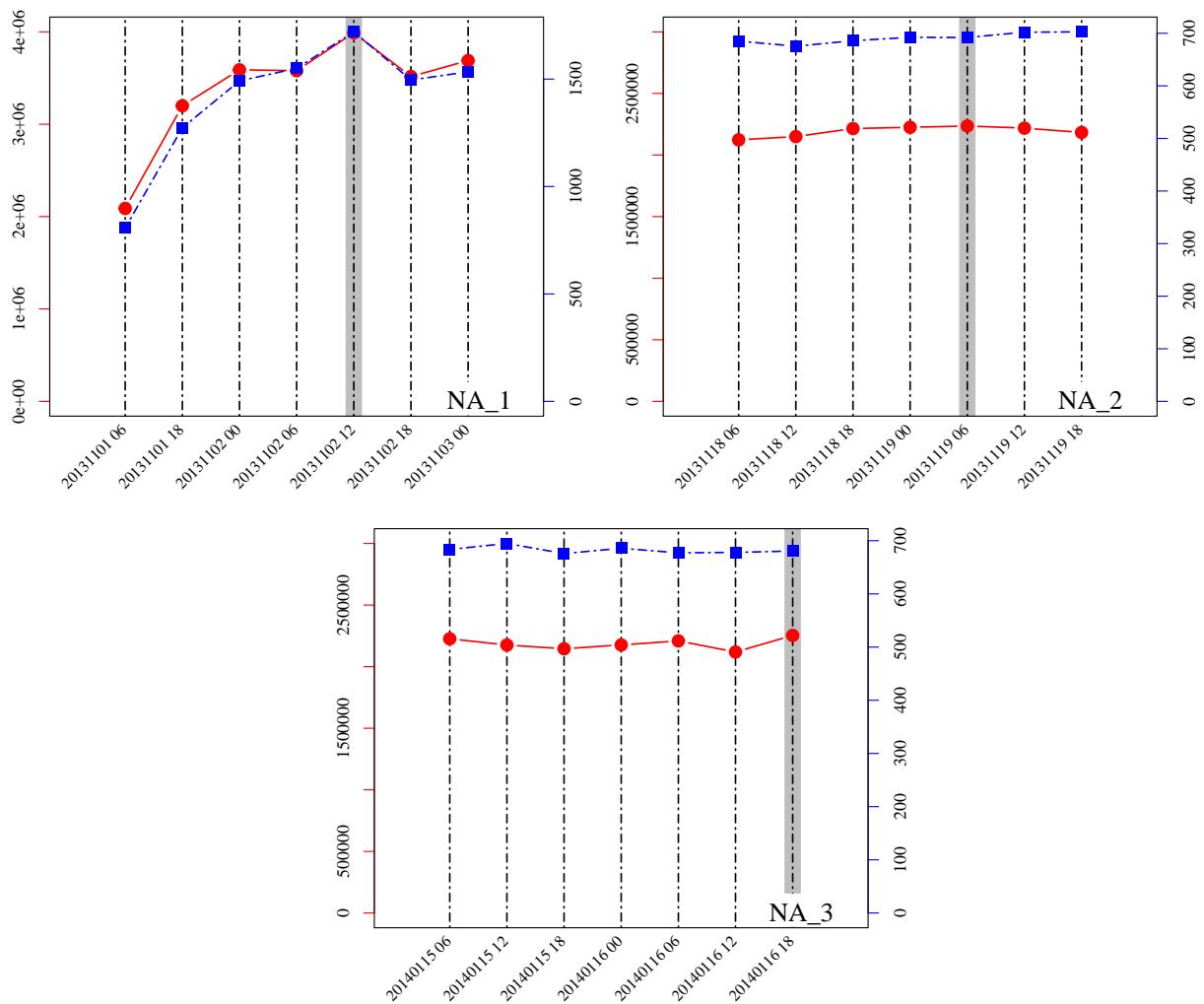


FIGURE 76 : RESULTATS DU MODULE DE PERTES POUR TROIS DES EVENEMENTS DETECTES

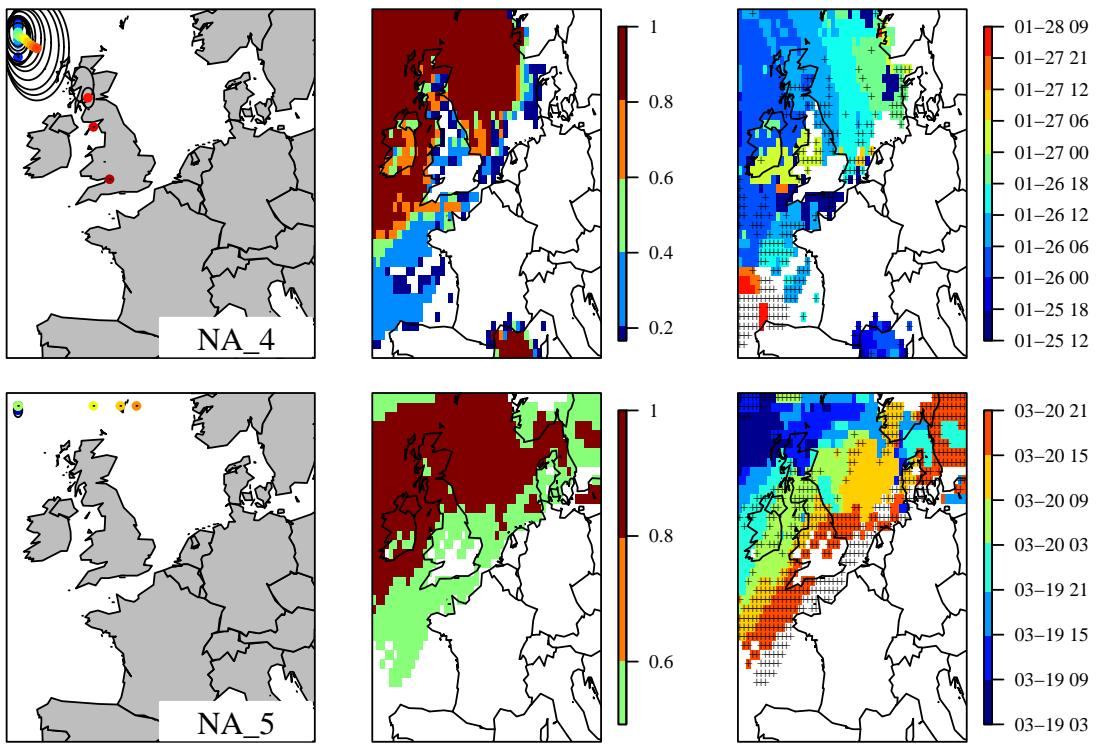


FIGURE 77 : RESULTATS DU MODULE DE DETECTION POUR DEUX DES EVENEMENTS DETECTES. GAUCHE : POSITION MOYENNE ET ECART-TYPE DES CENTRES DE PRESSION. MILIEU : PROBABILITE D'OCCURRENCE DES VENTS SUPERIEURS A 80 KM/H EN CHAQUE POINT DE GRILLE. DROITE : DATE POUR LAQUELLE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE DES RAFALES DE VENT SUPERIEURES A 80 KM/H EST LA PLUS ELEVEE (DROITE). LES CROIX INDIQUENT LES VALEURS SUPERIEURES A 0.75.

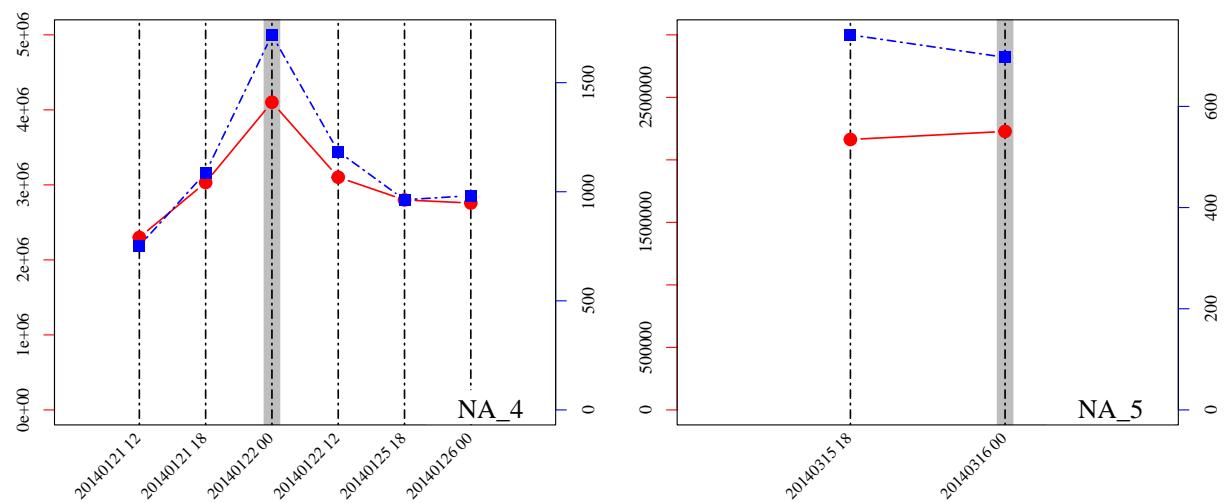


FIGURE 78 : RESULTATS DU MODULE DE PERTES POUR DEUX DES EVENEMENTS DETECTES

Partie 4 :

Conclusion générale et perspectives

| | |
|--|-----|
| VUE D'ENSEMBLE DU TRAVAIL REALISE..... | 193 |
| VALORISATION DU TRAVAIL DE RECHERCHE | 195 |
| PERSPECTIVES | 196 |

Vue d'ensemble du travail réalisé

Mon travail de thèse a reposé sur l'élaboration et l'utilisation de deux méthodes complémentaires pour étudier les tempêtes de vent hivernales qui touchent l'Europe. La Figure 79 propose un parallèle entre les deux méthodes développées au cours du travail de thèse. Bien que le sujet d'étude soit le même pour les deux projets, les objectifs, et donc les données utilisées pour y répondre, diffèrent et conduisent à des méthodes différentes.

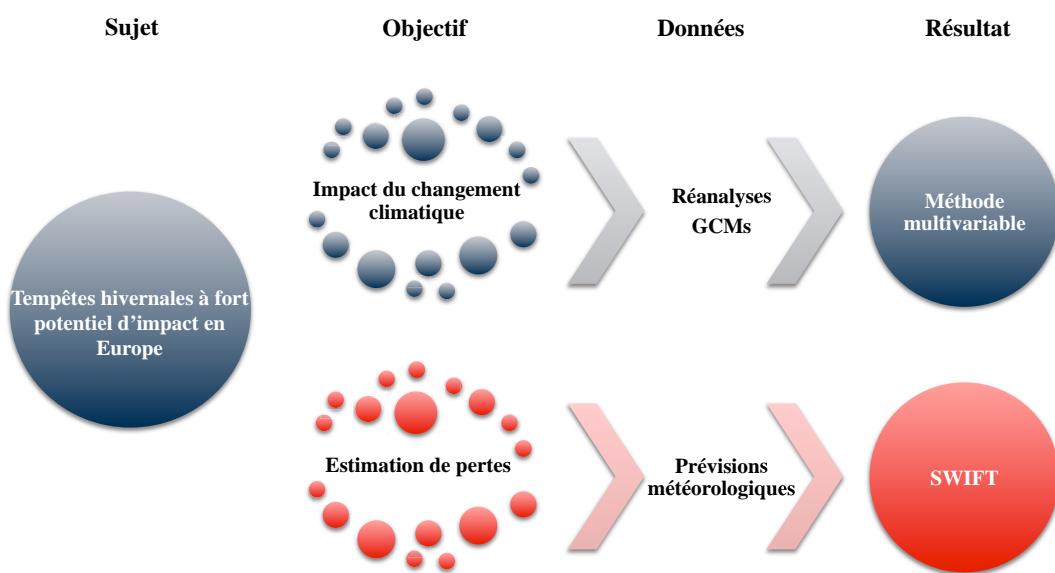


FIGURE 79 : PARALLELE ENTRE LES DEUX METHODES DEVELOPPEES AU COURS DU DOCTORAT.

Dans le cas du projet de recherche, il s'agit de caractériser sur le long terme les tempêtes de vent particulièrement extrêmes. Les données utilisées pour ce travail sont des modèles de climat global qui simulent les périodes actuelle et future. L'incertitude inhérente aux modèles et aux scénarios utilisés pour modéliser les conditions climatiques futures a conduit au développement d'une méthode multi-variable permettant d'extraire les événements à fort potentiel d'impact et à l'étude des caractéristiques de ces événements au cours des différentes périodes considérées.

Dans le cas du projet opérationnel, il s'agit d'estimer le coût potentiel d'une tempête de vent dans les jours à venir. Les données utilisées pour répondre à cet objectif sont des prévisions météorologiques, actualisées toutes les 6 heures. Une meilleure résolution spatiale de données

météorologiques ainsi que la disponibilité de données de pertes ont permis l’élaboration de courbes de vulnérabilité et leur combinaison aux vitesses de vent fournies par le modèle. Enfin, la comparaison des résultats obtenus avec SWIFT pour l’hiver 2013 – 2014 et ceux obtenus en appliquant la méthode multi-variable aux réanalyses disponibles sur cette période, a permis de montré que les événements détectés n’étaient pas les mêmes. La méthode multi-variable semble sélectionner des événements ayant une signature dans les variables météorologiques plus intense que les événements sélectionnés avec SWIFT. Cependant, une fois les seuils de la méthode multi-variable adaptés à la taille de la fenêtre, plus d’événements communs sont détectés.

D’un point de vue académique, le travail réalisé pour ces deux méthodes offre une nouvelle appréhension des tempêtes de vent hivernales en Europe. Dans le cas du projet de recherche, la méthode développée offre en effet une nouvelle vision du potentiel de dommage défini par plusieurs variables météorologiques par rapport aux indices jusqu’à présent utilisés. Dans le cas du projet opérationnel, le développement de l’outil a permis non seulement l’élaboration de courbes de vulnérabilité, encore peu développées par la communauté scientifique, mais aussi l’utilisation combinée de ces courbes à des prévisions météorologiques.

Pour l’entreprise, ce travail a abouti à deux outils permettant d’étudier facilement les tempêtes de vent en Europe, soit à partir d’un modèle simulant de longues périodes de temps, soit à partir de prévisions météorologiques.

Valorisation du travail de recherche

Le travail de recherche a été présenté au cours de plusieurs conférences et groupes de travail (Tableau 9). Un article sur la méthode multi-variable a été accepté dans le journal *Natural Hazard and Earth System Science*. Un deuxième article sur les résultats issus de l'application de la méthode multi-variable aux données CMIP5 est en cours de rédaction. Les connaissances acquises au cours du doctorat ont également mises en valeur dans la rédaction d'une étude de cas dans un rapport d'un assureur anglais.

L'outil SWIFT a été présenté au cours de plusieurs réunions au sein du groupe AXA et a reçu un accueil favorable. Un article s'appuyant sur les résultats des Chapitres 6 et 7 est également en cours de rédaction.

16th Cyclone Workshop (St Adèle, Québec)

| | | |
|------|--|------|
| 2013 | Detection of Events Impacting the Insurance Industry in PiControl, Historical and RCP4.5 Experiments from the CMIP5 Project. | Oral |
|------|--|------|

European Geosciences Union assembly (Vienne, Autriche)

| | | |
|------|---|--------|
| 2013 | Detection of Events Impacting the Insurance Industry in Historical and PiControl Experiments from the CMIP5 Project | Poster |
| 2012 | Extreme European Winter Storm: Detection And Characterization Of Events Impacting The Insurance Industry | Oral |
| 2011 | Extreme European Winter Storms: Sensitivities to Detection Methods and Reanalysis Datasets | Poster |

SEAMSEW Workshop (Leeds, Royaume-Uni)

| | | |
|------|---|--------|
| 2012 | Detection of events impacting the insurance industry in WRF driven by ERA Interim (EURO-CORDEX Project) | Poster |
|------|---|--------|

RACEWIN Workshop (Exeter, Royaume-Uni)

| | | |
|------|--|--------|
| 2011 | Extreme European Winter Storms: Sensitivities to Detection Methods and Reanalysis Datasets | Poster |
|------|--|--------|

WRCP Workshop (Paris, France)

| | | |
|------|---|--------|
| 2010 | Extreme European windstorms in the ERA-Interim Reanalysis | Poster |
|------|---|--------|

TABLEAU 9 : LISTE DES CONFERENCES ET GROUPES DE TRAVAIL AU COURS DESQUELS LE TRAVAIL DE RECHERCHE A ETE PRESENTE.

Perspectives

- Travaux en cours suite aux résultats obtenus avec la méthode multi-variable

Le travail sur la méthode multi-variable a déjà donné suite à un sujet de post-doc au Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement sur l'élaboration d'un catalogue de plusieurs milliers de tempêtes de vent hivernales en Europe, à partir de données de réanalyses. Cette étude est réalisée dans le cadre du projet OASIS, de la Climate KIC (<http://www.oasislmf.org/>), qui a pour objectif la création d'un modèle de catastrophes en libre accès. La méthode développée pour obtenir les événements du catalogue de tempête s'appuie d'une part sur la méthode multi-variable présentée dans ce manuscrit et sur une méthode d'analogues de circulation. Les premiers résultats sont prometteurs et un article sera soumis prochainement. Un stage de Master (printemps 2013) a également été réalisé au Laboratoire de Météorologie Dynamique sur la reproduction des tempêtes Lothar et Martin en Décembre 1999 par le modèle IPSL zoomé sur l'Europe et guidé par ERA Interim.

- Application de la méthode multi-variable à d'autres jeux de données

Suite aux résultats obtenus avec les différentes données utilisées, une perspective de recherche possible serait l'application à d'autres jeux de données. Tout d'abord, l'analyse de l'impact du changement climatique pourrait être complétée par l'étude du scenario *rcp8.5*, dont le forçage à la fin du 21^e siècle est plus fort que celui du scenario *rcp4.5*. La méthode pourrait également être appliquée aux données issues de la simulation des modèles de climat global participant au projet PMIP (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project). Ce projet a pour objectif l'évaluation des modèles de climat sous des conditions climatiques passées, ainsi que l'amélioration de la compréhension des mécanismes des changements climatiques passés (PMIP, 2000). L'application de la méthode multi-variable demande d'une part le téléchargement de volumes importants de données, le contrôle de qualité des fichiers (ce qui peut prendre plusieurs mois) et d'autre part une étape de traitement et d'analyse (ce qui prend aussi plusieurs semaines). Une telle tâche est un véritable projet de recherche.

- Pistes d'amélioration de l'outil SWIFT

Tout d'abord, le module de détection ne s'appuie pour l'instant que sur la moyenne d'ensemble proposée par le modèle Global Forecast System (GFS). Il pourrait être intéressant

d'intégrer l'analyse de chaque simulation composant l'ensemble, également fournie par le modèle. Une seconde piste d'amélioration, évoquée dans le Chapitre 6, est le changement de certains critères lors de la comparaison des résultats obtenus à partir des prévisions successives de GFS. Une première idée serait d'utiliser la moyenne de la position des centres de pression détectés au cours des prévisions successives plutôt que de n'utiliser que la position du dernier centre. Ensuite, pour le module de vulnérabilité, plusieurs pistes ont également été proposées dans les Chapitres 6 et 7. Deux pistes seront très certainement investiguées d'ici la prochaine saison hivernale. La première concerne la calibration des courbes de vulnérabilité et l'analyse de l'impact de la définition des classes de vitesses de vent et d'expositions sur les résultats. La seconde vise à mieux caractériser l'exposition en fonction de sa localisation géographique.

- Application des méthodes à d'autres régions

Une autre perspective possible, cette fois pour les deux projets, est l'application des méthodes à d'autres régions que l'Europe dans lesquelles des cyclones, tropicaux ou extratropicaux, surviennent. Bien que les mécanismes de cyclogenèse soient différents, la signature de ces systèmes se retrouvent dans les mêmes variables. Certains paramètres, dans chacune des méthodes, doivent bien sûr être modifiés mais il serait intéressant d'étudier dans quelle mesure les approches développées pour chaque projet restent valables pour les ouragans aux Etats-Unis ou les typhons en Asie du sud-est. Il est possible également que d'autres périls, dont la variable principale soit locale et difficilement capturée par les modèles de climat global, puissent être caractérisés par une méthode multi-variable.

Bibliographie

- Akperov, M.G., Mokhov, I.I., 2010. A comparative analysis of the method of extratropical cyclone identification. *Izv. Atmospheric Ocean. Phys.* 46, 574–590. doi:10.1134/S0001433810050038
- Alexander, L.V., 2005. Recent observed changes in severe storms over the United Kingdom and Iceland. *Geophys. Res. Lett.* 32, 13. doi:10.1029/2005GL022371
- Barredo, J.I., 2010. No upward trend in normalised windstorm losses in Europe: 1970–2008. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10, 97–104. doi:10.5194/nhess-10-97-2010
- Berz, G., 2005. Windstorm and storm surges in Europe: loss trends and possible counteractions from the viewpoint of an international reinsurer. *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 363, 1431–1440. doi:10.1098/rsta.2005.1577
- Bjerknes, J., Solberg, H., 1922. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geof Publ* 3.
- Blender, R., Fraedrich, K., Lunkeit, F., 1997. Identification of Cyclone-Track Regimes in the North Atlantic. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 123, 727–741. doi:10.1002/qj.49712353910
- Catto, J.L., Shaffrey, L.C., Hodges, K.I., 2011. Northern Hemisphere Extratropical Cyclones in a Warming Climate in the HiGEM High-Resolution Climate Model. *J. Clim.* 24, 5336–5352. doi:10.1175/2011JCLI4181.1
- Chang, E.K.M., Guo, Y., Xia, X., 2012. CMIP5 multimodel ensemble projection of storm track change under global warming. *J. Geophys. Res.* 117. doi:10.1029/2012JD018578
- Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner, 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility, in: 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, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Dacre, H.F., Gray, S.L., 2009. The Spatial Distribution and Evolution Characteristics of North Atlantic Cyclones. *Mon. Weather Rev.* 137, 99–115. doi:10.1175/2008MWR2491.1
- Della-Marta, P.M., Liniger, M.A., Appenzeller, C., Bresch, D.N., Köllner-Heck, P., Muccione, V., 2010. Improved Estimates of the European Winter Windstorm Climate and the Risk of Reinsurance Loss Using Climate Model Data. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 49, 2092–2120. doi:10.1175/2010JAMC2133.1
- Della-Marta, P.M., Mathis, H., Frei, C., Liniger, M.A., Kleinn, J., Appenzeller, C., 2009. The Return Period of Wind Storms Over Europe. *Int. J. Climatol.* 29, 437–459. doi:10.1002/joc.1794
- Deveson, A.C.L., Browning, K.A., Hewson, T.D., 2002. A classification of FASTEX cyclones using a height-attributable quasi-geostrophic vertical-motion diagnostic. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 128, 93–117. doi:10.1256/00359000260498806
- Donat, M.G., Leckebusch, G.C., Wild, S., Ulbrich, U., 2011a. Future Changes in European Winter Storm Losses and Extreme Wind Speeds Inferred from GCM and RCM Multi-Model Simulations. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 1351–1370. doi:10.5194/nhess-11-1351-2011

-
- Donat, M.G., Renggli, D., Wild, S., Alexander, L.V., Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2011b. Reanalysis Suggests Long-Term Upward Trends in European Storminess Since 1871. *Geophys. Res. Lett.* 38, 14. doi:10.1029/2011GL047995
- Fink, A.H., Brücher, T., Ermert, V., Krüger, A., Pinto, J.G., 2009. The European Storm Kyrill in January 2007: Synoptic Evolution, Meteorological Impacts and Some Considerations with Respect to Climate Change. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 405–423. doi:10.5194/nhess-9-405-2009
- Fink, A.H., Pohle, S., Pinto, J.G., Knippertz, P., 2012. Diagnosing the influence of diabatic processes on the explosive deepening of extratropical cyclones. *Geophys. Res. Lett.* 39, n/a–n/a. doi:10.1029/2012GL051025
- Gulev, S.K., Zolina, O., Grigoriev, S., 2001. Extratropical Cyclone Variability in the Northern Hemisphere Winter from the NCEP/NCAR Reanalysis Data. *Clim. Dyn.* 17, 795–809. doi:10.1007/s003820000145
- Hanley, J., Caballero, R., 2012a. The role of large-scale atmospheric flow and Rossby wave breaking in the evolution of extreme windstorms over Europe. *Geophys. Res. Lett.* 39, 21. doi:10.1029/2012GL053408
- Hanley, J., Caballero, R., 2012b. Objective Identification and Tracking of Multicentre Cyclones in the ERA-Interim Reanalysis Dataset. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 138, 612–625. doi:10.1002/qj.948
- Hartmann, D.L., A.M.G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J. Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild and P.M. Zhai, 2013. Observations: Atmosphere and Surface, in: 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.
- Harvey, B.J., Shaffrey, L.C., Woollings, T.J., 2013. Equator-to-pole temperature differences and the extra-tropical storm track responses of the CMIP5 climate models. *Clim. Dyn.* doi:10.1007/s00382-013-1883-9
- Harvey, B.J., Shaffrey, L.C., Woollings, T.J., Zappa, G., Hodges, K.I., 2012. How large are projected 21st century storm track changes? *Geophys. Res. Lett.* 39, n/a–n/a. doi:10.1029/2012GL052873
- Heneka, P., Hofherr, T., Ruck, B., Kottmeier, C., 2006. Winter Storm Risk of Residential Structures-Model Development and Application to the German State of Baden-Württemberg. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 6, 721–733.
- Hodges, K.I., 1994. A General Method for Tracking Analysis and Its Application to Meteorological Data. *Mon. Weather Rev.* 122, 2573–2586. doi:10.1175/1520-0493(1994)122<2573:AGMFTA>2.0.CO;2
- Hodges, K.I., Hoskins, B.J., Boyle, J., Thorncroft, C., 2003. A Comparison of Recent Reanalysis Datasets Using Objective Feature Tracking: Storm Tracks and Tropical Easterly Waves. *Mon. Weather Rev.* 131, 2012–2037. doi:10.1175/1520-0493(2003)131<2012:ACORRD>2.0.CO;2
- Hodges, K.I., Lee, R.W., Bengtsson, L., 2011. A Comparison of Extratropical Cyclones in Recent Reanalyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25. *J. Clim.* 24, 4888–4906. doi:10.1175/2011JCLI4097.1
- Hoskins, B.J., Hodges, K.I., 2002. New Perspectives on the Northern Hemisphere Winter Storm Tracks. *J. Atmospheric Sci.* 59, 1041–1061. doi:10.1175/1520-0469(2002)059<1041:NPOTNH>2.0.CO;2

-
- IPCC, 2012. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- 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.
- Keyser, D., Shapiro, M.A., 1986. A review of the structure and dynamics of upper-level frontal zones. *Mon Wea Rev* 114, 452–499. doi:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1986\)114<0452:AROTSA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1986)114<0452:AROTSA>2.0.CO;2)
- Kirtman, B., S.B. Power, J.A. Adedoyin, G.J. Boer, R. Bojariu, I. Camilloni, F.J. Doblas-Reyes, A.M. Fiore, M. Kimoto, G.A. Meehl, M. Prather, A. Sarr, C. Schär, R. Sutton, G.J. van Oldenborgh, G. Vecchi and H.J. Wang, 2013. Near-term Climate Change: Projections and Predictability, in: 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, pp. 953–1028.
- Klawa, M., Ulbrich, U., 2003. A Model for the Estimation of Storm Losses and the Identification of Severe Winter Storms in Germany. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 3, 725–732.
- Leckebusch, G.C., Renggli, D., Ulbrich, U., 2008. Development and Application of an Objective Storm Severity Measure for the Northeast Atlantic Region. *Meteorol. Z.* 17, 575–587. doi:10.1127/0941-2948/2008/0323
- Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2004. On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. *Glob. Planet. Change* 44, 181–193. doi:10.1016/j.gloplacha.2004.06.011
- Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., Fröhlich, L., Pinto, J.G., 2007. Property Loss Potentials for European Midlatitude Storms in a Changing Climate. *Geophys. Res. Lett.* 34, 5. doi:10.1029/2006GL027663
- Le Treut, H., Kalnay, E., 1990. Comparison of observed and simulated cyclone frequency distribution as determined by an objective method. *Atmosfera* 3, 57–71.
- Liberato, M.L.R., Pinto, J.G., Trigo, I.F., Trigo, R.M., 2011. Klaus - an Exceptional Winter Storm Over Northern Iberia and Southern France. *Weather* 66, 330–334. doi:10.1002/wea.755
- Liberato, M.L.R., Pinto, J.G., Trigo, R.M., Ludwig, P., Ordóñez, P., Yuen, D., Trigo, I.F., 2013. Explosive development of winter storm Xynthia over the subtropical North Atlantic Ocean. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 2239–2251. doi:10.5194/nhess-13-2239-2013
- Mann, H.B., Whitney, D.R., 1947. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *Ann. Math. Stat.* 18, 50–60. doi:10.1214/aoms/1177730491
- Matulla, C., Schöner, W., Alexandersson, H., Storch, H., Wang, X.L., 2008. European storminess: late nineteenth century to present. *Clim. Dyn.* 31, 125–130. doi:10.1007/s00382-007-0333-y

-
- Mayencon, R., 2000. La violente tempête du 20 décembre 1998. *La Météorologie* 8, 32. doi:10.4267/2042/36106
- Moss R. et. al, 2008. Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. *IPCC Secretariat, Geneva*.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756. doi:10.1038/nature08823
- Murray, R., Simmonds, I., 1991. A Numerical Scheme for Tracking Cyclone Centres from Digital Data. I. Development and Operation of the Scheme. *Aust. Meteorol. Mag.* 39, 155–166.
- Neu, U., Akperov, M.G., Bellenbaum, N., Benestad, R., Blender, R., Caballero, R., Cocozza, A., Dacre, H.F., Feng, Y., Fraedrich, K., Grieger, J., Gulev, S., Hanley, J., Hewson, T., Inatsu, M., Keay, K., Kew, S.F., Kindem, I., Leckebusch, G.C., Liberato, M.L.R., Lionello, P., Mokhov, I.I., Pinto, J.G., Raible, C.C., Reale, M., Rudeva, I., Schuster, M., Simmonds, I., Sinclair, M., Sprenger, M., Tilinina, N.D., Trigo, I.F., Ulbrich, S., Ulbrich, U., Wang, X.L., Wernli, H., 2013. IMILAST: A Community Effort to Intercompare Extratropical Cyclone Detection and Tracking Algorithms. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 94, 529–547. doi:10.1175/BAMS-D-11-00154.1
- Petterssen, S., 1952. On the propagation and growth of jet-stream waves. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 78, 337–353. doi:10.1002/qj.49707833704
- Pinto, J., Karremann, M., Born, K., Della-Marta, P., Klawar, M., 2012. Loss potentials associated with European windstorms under future climate conditions. *Clim. Res.* 54, 1–20. doi:10.3354/cr01111
- Pinto, J.G., Spangehl, T., Ulbrich, U., Speth, P., 2005. Sensitivities of a Cyclone Detection and Tracking Algorithm: Individual Tracks and Climatology. *Meteorol. Z.* 14, 823–838. doi:10.1127/0941-2948/2005/0068
- Pinto, J.G., Zacharias, S., Fink, A.H., Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2009. Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. *Clim. Dyn.* 32, 739–739. doi:10.1007/s00382-008-0525-0
- Rivière, G., Arbogast, P., Maynard, K., Joly, A., 2010. The Essential Ingredients Leading to the Explosive Growth Stage of the European Wind Storm Lothar of Christmas 1999. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 136, 638–652. doi:10.1002/qj.585
- Sanders, F., Gyakum, J.R., 1980. Synoptic-Dynamic Climatology of the “Bomb”. *Mon. Weather Rev.* 108, 1589–1606. doi:10.1175/1520-0493(1980)108<1589:SDCOT>2.0.CO;2
- Schwierz, C., Köllner-Heck, P., Zenklusen Mutter, E., Bresch, D.N., Vidale, P.-L., Wild, M., Schär, C., 2010. Modelling European Winter Wind Storm Losses in Current and Future Climate. *Clim. Change* 101, 485–514. doi:10.1007/s10584-009-9712-1
- Semple, A.T., 2003. A review and unification of conceptual models of cyclogenesis. *Meteorol. Appl.* 10, 39–59. doi:10.1017/S135048270300505X
- Shapiro, M.A., Keyser, D., 1990. Fronts, jet streams and the tropopause, in: Extratropical Cyclones, The Erik Palmen Memorial Volume. C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., American Meteorological Society, Boston, USA, pp. 167–191.
- Smits, A., Klein Tank, A.M.G., Können, G.P., 2005. Trends in storminess over the Netherlands, 1962–2002. *Int. J. Climatol.* 25, 1331–1344. doi:10.1002/joc.1195
- Sutcliffe, R.C., 1947. A contribution to the problem of development. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 73, 370–383. doi:10.1002/qj.49707331710

-
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- The WASA Group, 1998. Changing Waves and Storms in the Northeast Atlantic? *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79, 741–760. doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0741:CWASIT>2.0.CO;2
- Tilinina, N., Gulev, S.K., Rudeva, I., Koltermann, P., 2013. Comparing Cyclone Life Cycle Characteristics and Their Interannual Variability in Different Reanalyses. *J. Clim.* 26, 6419–6438. doi:10.1175/JCLI-D-12-00777.1
- Uccellini, L.W., 1990. Processes contributing to the rapid development of extratropical cyclones, in: *Extratropical Cyclones, The Erik Palmen Memorial Volume*. C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., American Meteorological Society, Boston, USA, pp. 81–105.
- Ulbrich, U., Fink, A.H., Klawar, M., Pinto, J.G., 2001. Three extreme storms over Europe in December 1999. *Weather* 56, 70–80. doi:10.1002/j.1477-8696.2001.tb06540.x
- Ulbrich, U., Leckebusch, G.C., Grieger, J., Schuster, M., Akperov, M., Bardin, M.Y., Feng, Y., Gulev, S., Inatsu, M., Keay, K., Kew, S.F., Liberato, M.L.R., Lionello, P., Mokhov, I.I., Neu, U., Pinto, J.G., Raible, C.C., Reale, M., Rudeva, I., Simmonds, I., Tilinina, N.D., Trigo, I.F., Ulbrich, S., Wang, X.L., Wernli, H., 2013. Are Greenhouse Gas Signals of Northern Hemisphere winter extra-tropical cyclone activity dependent on the identification and tracking algorithm? *Meteorol. Z.* 22, 61–68. doi:10.1127/0941-2948/2013/0420
- Ulbrich, U., Leckebusch, G.C., Pinto, J.G., 2009. Extra-Tropical Cyclones in the Present and Future Climate: A Review. *Theor. Appl. Climatol.* 96, 117–131. doi:10.1007/s00704-008-0083-8
- Ulbrich, U., Pinto, J.G., Kupfer, H., Leckebusch, G.C., Spangehl, T., Reyers, M., 2008. Changing Northern Hemisphere Storm Tracks in an Ensemble of IPCC Climate Change Simulations. *J. Clim.* 21, 1669–1679. doi:10.1175/2007JCLI1992.1
- Usbeck, T., Wohlgemuth, T., Dobbertin, M., Pfister, C., Bürgi, A., Rebetez, M., 2010. Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. *Agric. For. Meteorol.* 150, 47–55. doi:10.1016/j.agrformet.2009.08.010
- Wang, X.L., Zwiers, F.W., Swail, V.R., Feng, Y., 2009. Trends and Variability of Storminess in the Northeast Atlantic Region, 1874–2007. *Clim. Dyn.* 33, 1179–1195. doi:10.1007/s00382-008-0504-5
- Wernli, H., Dirren, S., Liniger, M.A., Zillig, M., 2002. Dynamical Aspects of the Life Cycle of the Winter Storm “Lothar” (24–26 December 1999). *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 128, 405–429. doi:10.1256/003590002321042036
- Zappa, G., Shaffrey, L.C., Hodges, K.I., 2013a. The Ability of CMIP5 Models to Simulate North Atlantic Extratropical Cyclones. *J. Clim.* 26, 5379–5396. doi:10.1175/JCLI-D-12-00501.1
- Zappa, G., Shaffrey, L.C., Hodges, K.I., Sansom, P.G., Stephenson, D.B., 2013b. A Multimodel Assessment of Future Projections of North Atlantic and European Extratropical Cyclones in the CMIP5 Climate Models*. *J. Clim.* 26, 5846–5862. doi:10.1175/JCLI-D-12-00573.1

Table des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Calcul du Solvency Capital Requirement (Source : QIS5 – Technical specifications)..... | 11 |
| Figure 2 : Facteurs du risque tempête de vent hivernales en Europe | 13 |
| Figure 3 : Réassurance traditionnelle – a) Traité quote-part ; b) Traité excédent de sinistres ; c) Traité excédent de pertes..... | 15 |
| Figure 4 : Les trois modules d'un modèle de catastrophes naturelles. En orange, les informations sur l'exposition fournies par l'assureur et intégrées par le modèle (source : AXA White Paper sur les risques climatiques) | 17 |
| Figure 5 : Gestion des sinistres – Satisfaction du client (Source : Enquête Solucom 2009).... | 22 |
| Figure 6 : Procédure d'indemnisation d'un sinistre et ses acteurs. | 23 |
| Figure 7 : Nombre de sinistres par mois (source : AXA France)..... | 25 |
| Figure 8 : Graphique a : Flux solaire incident en jaune et flux terrestre émis en rouge. Graphique b : Bilan entre la moyenne du flux entrant net (net shortwave) et du flux sortant net (net longwave) entre 90° sud et 90° nord (Source : ERBE)..... | 29 |
| Figure 9 : Coupe méridionale (nord-sud) du mécanisme des cellules de Hadley. De part et d'autre de l'équateur un transport vertical des masses d'air chaudes et humides est réalisé vers latitudes $\pm 30^\circ$. L'air plus froid de ces latitudes est ensuite transporté vers l'équateur. La position des zones de subsidence et d'ascendance varient au cours du temps. Il s'agit ici d'un schéma présentant l'état moyen. (Source : IFREMER)..... | 30 |
| Figure 10 gauche : Schéma de l'onde qui transporte l'air chaud tropical vers les pôles et l'air froid polaire vers les tropiques par advection. Le même transport existe aux deux pôles. droite : Cette onde est caractérisée par une succession de tourbillons cycloniques associés à un minimum de pression (ou L pour low pressure) et de tourbillons anticycloniques associés à un maximum de pression (ou H pour high pressure). (Source : PAOC, MIT)..... | 31 |
| Figure 11 : écart-type du vent méridien sur les mois d'octobre à mars entre 1987 et 2010 (échelle : m/s) – données utilisées : era interim | 32 |

| | |
|---|----|
| Figure 12 : a) Modèle conceptuel de l'école norvégienne ; b) Modèle conceptuel de Shapiro-Keyser (source : Schultz et Vaughan, 2010) | 35 |
| Figure 13 : mécanisme d'instabilité barocline. 48h avant le maximum d'intensité, existence d'anomalies en surface et en altitude. 24h avant, interaction entre les anomalies de surface et d'altitude, intensification du système. 0h, début de l'occlusion marquant la fin de la cyclogenèse. (source : extratropical cyclone atlas, university of reading) | 39 |
| Figure 14 : modèle simple de la dynamique induite par la présence d'un maximum de vent (jet streak) au sein d'un courant-jet rectiligne. Graphique a) : création d'une circulation agéostrophique à l'entrée et à la sortie de la zone du maximum de vent. Graphique b) : Zones de divergence et de convergence associées à un mouvement vertical ascendant (contours tiretés) et descendant (contours pointillés)..... | 40 |
| Figure 15 : Oscillation Nord Atlantique – phases positive et négative (source : Thomson higher education)..... | 41 |
| Figure 16 : Indice de l'oscillation nord atlantique : différence de pression normalisée entre Lisbonne et Reykjavik. (Source : Hurrell, James & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 02 Dec 2013. "The Climate Data Guide: Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (station-based)." Retrieved from https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based.) | 42 |
| Figure 17 : Calendrier des projets sur les trois ans. La ligne tiretée rouge indique la partie de SWIFT commencée avant la thèse. | 62 |
| Figure 18 : Cartes de vorticité relative (RV850), pression au niveau de la mer (MSLP), vent à la surface (WND10) et à 300 hPa (WND300) pour Era Interim (graphiques du haut) et NCEP2 (graphiques du bas). | 71 |
| Figure 19 de gauche à droite : pression au niveau de la mer, de vorticité relative à 850 hPa et du vent à 10m au 26 Décembre 1999 06h. Les contours correspondent aux 90 et 95 percentiles des valeurs prises à cet instant par chacune des variables. | 73 |
| Figure 20 de gauche à droite : Climatologie du vent à 10m, Moyenne de la pression sur les 8 jours autour du 26 Décembre 1999 06h, Climatologie de la période sur la période hivernale octobre à mars..... | 74 |

| | |
|--|-----|
| Figure 21 : Histogramme des maxima de vorticité relative à 850 hPa détectés sur la période hivernale considérée. Les points indiquent les valeurs prises au moment des neuf événements. Le trait plein bleu indique le 96 ^e percentile de la distribution et le trait tireté rouge indique le 98 ^e percentile..... | 75 |
| Figure 22 Graphiques supérieurs : climatologie du champ de vent à 300 hPa (a gauche) et le composite sur les événements de vorticité relative (a droite). Graphiques inférieurs : climatologie du champ de vent à 700 hPa (a gauche) et le composite sur les événements de vorticité relative (a droite) | 77 |
| Figure 23 : Histogrammes du maximum de vent à 300 hPa (en haut) et à 700 hPa (en bas). Les deux champs ont été moyennés sur la bande de longitude -20°E : -10°E, et seul un maximum sur 8 jours est utilisé. En gris, l'ensemble des maxima sur la période considérée, en rouge, les valeurs associées aux événements de vorticité relative, et les carrés bleus correspondent aux neuf événements du tableau 1..... | 78 |
| Figure 24 : Graphiques supérieurs : composites du champ de vent à 300 hPa pour les événements ayant un vent inférieur a 46 m/s (a gauche) , un vent supérieur a 46 m/s (a droite). Graphiques inférieurs : composites du champ de vent à 700 hPa pour les événements ayant un vent inférieur a 22 m/s (a gauche) , un vent supérieur a 22 m/s (a droite). | 79 |
| Figure 25 : Résultat de la classification a partir des trois indices. Les carrés rouges appartiennent à la classe 1, les étoiles noires à la classe 2. Les points entourés indiquent les dix tempêtes de référence..... | 82 |
| Figure 26 : Densité de probabilité des maxima de vorticité relative (RV850), d'anomalie de pression (Msdp Anom) et de ratio de vent à 10m (Wnd10 Ratio) pour ERA Interim (courbe tiretée grise) et WRF-IPSL (courbe tiretée rouge)..... | 109 |
| Figure 27 : Comparaison des maxima detectes au même pas de temps dans ERA Interim et WRF-IPSL pour chacune des trois variables. Seuls les maxima supérieurs au 98 ^e percentile sont considérés. Les graphiques en haut présentent les différences de rang entre les maxima tandis que les graphiques du bas présentent la distance entre deux maxima. La ligne rouge indique une distance de 250 kms. | 111 |
| Figure 28 : Petite (gauche) et grande (droite) fenêtres utilisées pour l'étude. | 117 |

| | |
|---|-----|
| Figure 29 : En haut : distributions de probabilité pour ERA Interim et les quatorze modèles CMIP5 pour la vorticité relative à 850 hPa, l'anomalie de pression et le ratio de vent à 850 hPa (de gauche à droite). En bas : ratio entre chaque modèle et ERAI du 95 ^e (ligne verticale) et du 90 ^e (ligne horizontale) percentile de la distribution. | 118 |
| Figure 30 : Fréquence annuelle et moyenne de la vorticité relative à 850 hPa, l'anomalie de pression et le ratio de vent à 850 hPa sur l'ensemble des événements détectés par la méthode. Les boxplots du haut présentent la distribution pour l'ensemble des modèles (la valeur pour ERA Interim est indiquée par un point bleu foncé) et les graphiques du bas présentent le ratio modèle / reanalyse pour chaque modèle. | 119 |
| Figure 31 : Répartition temporelle des événements détectés par la méthode. Le graphique du haut présente, pour chaque mois, la distribution pour l'ensemble des modèles. le graphique du bas présentent le ratio modèle / reanalyse pour chaque modèle. L'axe horizontal du graphique du bas indique la valeur du ratio modèle / reanalyse et les lettres indiquent le mois d'occurrence. | 121 |
| Figure 32 : Nombre d'événements par an détectés par la méthode. Le graphique du haut présente la distribution pour l'ensemble des modèles. L'axe horizontal indique le nombre d'événements par hiver. Le graphique du bas présente le ratio modèle / reanalyse pour chaque modèle. L'axe horizontal indique la valeur du ratio modèle / reanalyse et les chiffres sur le graphique rappellent le nombre d'événements par hiver. | 122 |
| Figure 33 : Nombre d'événements par an détectés par la méthode sur la fenêtre centrée sur l'Europe de l'Ouest. | 123 |
| Figure 34 : Distributions des percentiles 90 (gauche) et 95 (droite) pour la vorticité relative à 850 hPa (en haut), l'anomalie de pression (au milieu) et le ratio de vent (en bas), pour les quatre périodes considérées pour l'étude. les lignes horizontales tiretées rouge indiquent l'évaluation intra-modèle moyenne au cours des quatre périodes. Les triangles bleus représentent la moyenne des modèles CMIP5. | 125 |
| Figure 35 : Distribution des valeurs de fréquence annuelle (en haut), de vorticité relative à 850 hPa (milieu-haut), d'anomalie de pression (milieu-bas) et du ratio de vent à 850 hPa (en bas) pour les quatre périodes considérées dans l'étude. les lignes horizontales tiretées rouge indiquent l'évaluation intra-modèle moyenne au cours des quatre périodes. Les triangles bleus représentent la moyenne des modèles CMIP5. | 126 |

| | |
|---|-----|
| Figure 36 : Distribution par mois des événements détectés par la méthode pour l'ensemble des modèles CMIP5. les lignes horizontales tiretées rouge indiquent l'évalution intra-modèle moyenne au cours des quatre périodes. Les triangles bleus représentent la moyenne des modèles CMIP5..... | 128 |
| Figure 37 : Distribution par hiver du nombre d'événements détectés par la méthode pour l'ensemble des modèles CMIP5. Les lignes tiretées rouge indiquent les écarts types de la distribution associée à la période historique..... | 129 |
| Figure 38 : Schéma de l'émission des prévisions. Une prévision est produite toutes les 6 heures et couvre les 180 heures (7 jours) à venir, à un pas de temps de 3 heures..... | 136 |
| Figure 39 : Exemple illustrant les critères envisagés pour la détection de tempêtes à fort potentiel d'impact en Europe dans la première version de l'algorithme. Les contours représentent les isobars. En couleur le vent à 300 hPa. Le point indique le centre de la zone dépressionnaire, le triangle le maximum du gradient de pression. Le carré noir indique l'extrémité du vent à 300 hPa..... | 137 |
| Figure 40 : Trajectoire du centre de la dépression et du maximum de vent (en haut à gauche) et vitesses de vent maximales observées le 24 janvier 2009 (en haut à droite) (source : meteo-France). Trajectoire du centre de la dépression (en bas à gauche) et vitesses de vent maximales observées le 24 janvier 2009 (en bas à droite). | 139 |
| Figure 41 Graphique A: les centres de pression détectés pour l'échéance du 24 Janvier 2009 00h qui répondent aux critères de minimum de pression et du maximum du gradient de pression. Graphique B: l'ensemble des centres détectés sur l'ensemble des échéances de la prévision. | 141 |
| Figure 42 Graphique A: l'ensemble des centres détectés sur l'ensemble des échéances de la prévision du 23 Janvier à 06h. Graphique B: Trajectoire formée à partir des centres de pression répondant aux critères de suivi d'événement..... | 142 |
| Figure 43 : Graphique a : centres de pression sélectionnés à l'issue de l'analyse de la prévision du 22 Janvier 2009 à 00h. Le centre entouré correspond au centre sélectionné à l'échéance du 24 Janvier 2009 12h. Graphique b : Centres de pression sélectionnés au cours de prévisions précédant celle du 22 Janvier 2009 00h. Le centre encerclé en bleu indique le centre sélectionné à l'issue de la prévision du 22 Janvier 2009 00h, tandis que le centre encerclé de rouge indique celui sélectionné à l'issue de la prévision du 21 | |
| 208 | |

| | |
|---|-----|
| Janvier 2009 18h. Les centres reliés par un trait rouge sont a distance inférieure à 250 km. Graphique c : Centres finalement considérés, après comparaison avec les prévisions précédentes..... | 143 |
| Figure 44 A gauche : Empreinte de vent calculée le 23 Février 2009 à 06h en prévision de Klaus. Le contour indique les vitesses de vent supérieures à 80 km/h. A droite : prévision de la date a laquelle des vents atteindront des vitesses supérieures à 80 km/h..... | 145 |
| Figure 45 : Structure du module de détection. La partie téléchargement en bash récupère les données gfs depuis le serveur du nws. L'algorithme d'analyse des prévisions en R comprend 5 étapes de la détection des centres au déclenchement d'une alerte si un événement répond aux différents critères..... | 146 |
| Figure 46 : Résultats des alertes issues de l'analyse des prévisions du 22 janvier 2009 06 (graphiques supérieurs) et du 23 janvier 2009 18 (graphiques inférieurs) : la trajectoire de l'événement (gauche), l'empreinte de vent (milieu) et l'empreinte temporelle des vents supérieurs à 80 km/h (droite)..... | 147 |
| Figure 47 : Résultats des alertes issues de l'analyse des prévisions du 25 février 2010 12h (graphiques supérieurs) et du 27 février 2010 12h (graphiques inférieurs) : la trajectoire de l'événement (gauche), l'empreinte de vent (milieu) et l'empreinte temporelle des vents supérieurs à 80 km/h (droite)..... | 148 |
| Figure 48 : Comparaison des versions avec (graphiques de gauche) et sans (graphiques de droite) comparaison des résultats des prévisions disponibles pour Klaus (graphiques supérieurs) et Xynthia (graphiques inférieurs). A chaque événement ayant déclenché une alerte au cours d'une prévision (axe des ordonnées), sa période est indiquée (axe des abscisses)..... | 149 |
| Figure 49 Gauche : Taux de destruction en fonction de l'exposition pour les tempêtes Klaus (points gris) et Xynthia (carrés rouge). La ligne pleine bleu foncé indique le seuil d'exposition 1 million d'euros et la ligne en tiret turquoise le seuil qui sépare les codes insee non-urbains des codes insee urbains. Droite : Taux de destruction en fonction des rafales de vent observées pour les deux tempêtes Klaus (points gris) et Xynthia (carrés rouge)..... | 152 |

| | |
|--|-----|
| Figure 50 : Courbes de vulnérabilité pour les classes de vent 0-70 km/h et 100-110 km/h pour la classe d'exposition inférieure àu seuil fixé (Gauche) et la classe d'exposition supérieure àu seuil fixé (Droite)..... | 153 |
| Figure 51 : Schéma du calcul de la perte pour un code insee donné..... | 154 |
| Figure 52 : Densité de probabilité et evolution temporelle des pertes pour le portefeuille d'AXA France (graphiques de gauche) et du nombre de sinistres (graphiques de droite). .. | 155 |
| Figure 53 : Pour Klaus (gauche) et Xynthia (droite), estimation du total de pertes (courbe pleine rouge) et du nombre de sinistres (courbe tiree bleue) pour chaque evenement ayant déclenché une alerte. Les valeurs réelles des pertes sont indiquées par la ligne pleine rouge (perte totale) et la ligne tiree bleue (nombre de sinistres). .. | 156 |
| Figure 54 : Différence entre l'empreinte de vent de gfs du 24 Janvier 2009 et les observations, pour chacune des prévisions au cours desquelles une alerte a été déclenchée. La moyenne des différences est indiquée pour chaque carte, sous la date de l'exécution de GFS.... | 157 |
| Figure 55 : Différence entre l'empreinte de vent de gfs pour les 27 et 28 Février 2010 et les observations, pour chacune des prévisions au cours desquelles une alerte a été déclenchée pour Xynthia. La moyenne des différences est indiquée pour chaque carte, sous la date de l'exécution de GFS. | 158 |
| Figure 56 : Événements ayant déclechés une alerte au cours de la période hivernale entre Octobre 2008 et Mars 2009. Pour chaque événement, la trajectoire moyenne est tracée ainsi que l'écart-type de la position de chaque centre. Les deux événements Klaus et Quinten ont bien été détectés, respectivement graphique e et h..... | 160 |
| Figure 57 : climatologie du vent à 250 hPa au cours des mois de Décembre (en haut à gauche) et Janvier (en bas à gauche) de 1961 à 2010. Composites des mois de Décembre 2013 (en haut a droite) et de Janvier 2014 (en bas à droite). | 166 |
| Figure 58 : Figure 59 : climatologie du vent à 850 hPa au cours des mois de Décembre (en haut à gauche) et Janvier (en bas à gauche) de 1961 à 2010. Composites des mois de Décembre 2013 (en haut a droite) et de Janvier 2014 (en bas à droite). | 167 |
| Figure 60 : Evénements ayant déclenché une alerte au cours de la saison hivernale 2013 – 2014. Les événements nommés sont ceux du tableau 1 détectés par l'outil. L'axe des | |
| 210 | |

| | |
|--|-----|
| ordonnées indique les dates des prévisions de GFS et l'axe des abscisses indique les dates de survenance des événements..... | 169 |
| Figure 61 : Position moyenne et écart-type des centres de pression de la trajectoire de Ruth (gauche), probabilité d'occurrence des vents supérieurs à 80 km/h en chaque point de grille (milieu), date pour laquelle la probabilité d'occurrence des rafales de vent supérieures à 80 km/h est la plus élevée (droite). Les croix indiquent les valeurs supérieures à 0.75..... | 172 |
| Figure 62 : Analyses issues du centre de prévisions autrichien aux dates de survenance de la tempête Ruth (source : ZAMG)..... | 172 |
| Figure 63 : Evolution de l'estimation du maximum de pertes (ligne pleine rouge) et du nombre de sinistres (ligne bleue tiretée) au cours des alertes émises pour la tempête Ruth. | 173 |
| Figure 64 : Centres détectés dans les prévisions des sept jours précédents les trois événements. Pour les trois tempêtes, une fenêtre de quatre jours est considérée. Les points de couleur représentent la position moyenne aux différentes échéances et les cercles indiquent l'écart-type de la position des centres de pression. | 176 |
| Figure 65 : Distribution du nombre d'événements par an pour les 142 événements détectés par la méthode multi-variable..... | 178 |
| Figure 66 : Cartes des 9 événements détectés au cours de l'hiver 2013-2014. Les points gris indiquent les centres de vorticité relative, les étoiles rouges les centres d'anomalie de pression et les croix blanches les centres du ratio de vent. Les centres des trois variables survenant au même pas de temps sont liés par une ligne noire..... | 178 |
| Figure 67 : Trajectoires des événements de PERILS qui ne sont pas détectés avec la méthode multi-variable. Les étoiles rouges indiquent les centres d'anomalie de pression, les points gris les centres de vorticité relative et les carrés jaunes les centres du ratio de vent à la surface. | 179 |
| Figure 68 : Evénements détectés au cours des mois d'Octobre à Décembre 2013 dans ERA Interim. Les points gris indiquent les centres de vorticité relative, les étoiles rouges les centres d'anomalie de pression et les croix blanches les centres du ratio de vent. Les | |

| | |
|---|-----|
| centres des trois variables survenant au même pas de temps sont liés par une ligne noire. | 180 |
| Figure 69 : Résultats du module de détection pour les événements Christian, Xaver, Bernd et Dirk. Gauche : position moyenne et écart-type des centres de pression. Milieu : probabilité d'occurrence des vents supérieurs à 80 km/h en chaque point de grille. Droite : date pour laquelle la probabilité d'occurrence des rafales de vent supérieures à 80 km/h est la plus élevée (droite). Les croix indiquent les valeurs supérieures à 0.75. | 182 |
| Figure 70 : Résultats du module de pertes pour les événements Christian, Xaver, Bernd et Dirk. Evolution de l'estimation du maximum de pertes (ligne pleine rouge) et du nombre de sinistres (ligne bleue tiretée). Si la perte observée est disponible, elle est indiquée par une ligne pleine rouge. | 183 |
| Figure 71 : Résultats du module de détection pour les événements Erich, Gerhard, Nadja et Petra. Gauche : position moyenne et écart-type des centres de pression. Milieu : probabilité d'occurrence des vents supérieurs à 80 km/h en chaque point de grille. Droite : date pour laquelle la probabilité d'occurrence des rafales de vent supérieures à 80 km/h est la plus élevée (droite). Les croix indiquent les valeurs supérieures à 0.75. | 184 |
| Figure 72 : Résultats du module de pertes pour les événements Erich, Gerhard, Nadja et Petra. Evolution de l'estimation du maximum de pertes (ligne pleine rouge) et du nombre de sinistres (ligne bleue tiretée). Si la perte observée est disponible, elle est indiquée par une ligne pleine rouge. | 185 |
| Figure 73 : Résultats du module de détection pour les événements Qumaira, Ruth, Tini et Ulla. Gauche : position moyenne et écart-type des centres de pression. Milieu : probabilité d'occurrence des vents supérieurs à 80 km/h en chaque point de grille. Droite : date pour laquelle la probabilité d'occurrence des rafales de vent supérieures à 80 km/h est la plus élevée (droite). Les croix indiquent les valeurs supérieures à 0.75. | 186 |
| Figure 74 : Résultats du module de pertes pour les événements Qumaira, Ruth, Tini et Ulla. Evolution de l'estimation du maximum de pertes (ligne pleine rouge) et du nombre de sinistres (ligne bleue tiretée). Si la perte observée est disponible, elle est indiquée par une ligne pleine rouge. | 187 |
| Figure 75 : Résultats du module de détection pour trois des événements détectés. Gauche : position moyenne et écart-type des centres de pression. Milieu : probabilité d'occurrence | |

| | |
|---|-----|
| des vents supérieurs à 80 km/h en chaque point de grille. Droite : date pour laquelle la probabilité d'occurrence des rafales de vent supérieures à 80 km/h est la plus élevée (droite). Les croix indiquent les valeurs supérieures à 0.75..... | 188 |
| Figure 76 : Résultats du module de pertes pour trois des événements détectés..... | 189 |
| Figure 77 : Résultats du module de détection pour deux des événements détectés. Gauche : position moyenne et écart-type des centres de pression. Milieu : probabilité d'occurrence des vents supérieurs à 80 km/h en chaque point de grille. Droite : date pour laquelle la probabilité d'occurrence des rafales de vent supérieures à 80 km/h est la plus élevée (droite). Les croix indiquent les valeurs supérieures à 0.75..... | 190 |
| Figure 78 : Résultats du module de pertes pour deux des événements détectés | 190 |
| Figure 79 : Parallèle entre les deux méthodes développées au cours du doctorat..... | 193 |