



**HAL**  
open science

# Estimation des coûts économiques des inondations par des approches de type physique sur exposition

Gwladys Mao

► **To cite this version:**

Gwladys Mao. Estimation des coûts économiques des inondations par des approches de type physique sur exposition. Gestion et management. Université de Lyon, 2019. Français. NNT : 2019LYSE1192 . tel-02456743

**HAL Id: tel-02456743**

**<https://theses.hal.science/tel-02456743>**

Submitted on 27 Jan 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N°d'ordre NNT : xxx



## **THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON**

opérée au sein de  
**l'Université Claude Bernard Lyon 1**

**Ecole Doctorale N° ED 486**  
**Sciences Économiques et Gestion**

**Spécialité de doctorat :**  
**Discipline :** Science de gestion

Soutenue publiquement le 21/10/2019, par :  
**Gwladys, Marianne Mao**

---

# **Estimation des coûts économiques des inondations par des approches de type physique sur exposition**

---

Devant le jury composé de :

Enjolras, Geoffroy, Professeur des Universités, IAE Grenoble, Université Grenoble Alpes, Rapporteur

Folus, Didier, Professeur des Universités, Université Paris Nanterre, Rapporteur

Viavattene, Christophe, Senior Research Fellow, Middlesex University London, Rapporteur

Rozan, Anne, Professeure des Universités, UMR GESTE, Examinatrice

Viot, Catherine, Professeure des Universités, Université Claude Bernard Lyon 1, Examinatrice

Robert, Christian, Professeur des Universités, Laboratoire SAF, Directeur de thèse

Moncoulon, David, Responsable du service Modélisation et R&D, Caisse Centrale de Réassurance, Invité

Rullière, Didier, Maître de Conférences, Laboratoire SAF, Invité

UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1  
LABORATOIRE DE SCIENCES ACTUARIELLE ET FINANCIÈRE

# THÈSE

présentée en première version en vue d'obtenir le grade de Docteur, spécialité  
« Sciences de gestion »

par

Gwladys Mao

## ESTIMATION DE COÛTS ÉCONOMIQUES DES INONDATIONS PAR DES APPROCHES DE TYPE MODÉLISATION PHYSIQUE SUR EXPOSITION

Thèse soutenue le la date de soutenance devant le jury composé de :

M.	GEOFFROY ENJOLRAS	IAE Grenoble, Université Grenoble Alpes	(Rapporteur)
M.	DIDIER FOLUS	Université Paris Nanterre	(Rapporteur)
M.	CHRISTIAN ROBERT	Laboratoire SAF	(Directeur)
M <sup>me</sup>	ANNE ROZAN	UMR GESTE	(Examinatrice)
M.	CHRISTOPHE VIAVATTENE	Middlesex University London	(Rapporteur)
M <sup>me</sup>	CATHERINE VIOT	Université Claude Bernard Lyon 1	(Examinatrice)
M.	DAVID MONCOULON	Caisse Centrale de Réassurance	(Invité)
M.	DIDIER RULLIÈRE	Laboratoire SAF	(Invité)



*À ma famille*



# REMERCIEMENTS

**J**E voudrais dans un premier temps remercier la Caisse Centrale de Réassurance et M. Antoine Quantin, Directeur des Réassurances et Fonds Publics, pour m'avoir donné l'opportunité de faire ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse, M. Christian Robert, pour toute son aide. Je suis heureuse d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse et me soutenir, notamment durant cette dernière année.

J'adresse mes remerciements à M. Geoffroy Enjolras, Professeur à l'IAE de Grenoble, M. Didier Folus, Professeur à l'Université Paris Nanterre, et M. Christophe Viavattene, Senior Research Fellow à la Middlesex University London, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.

J'exprime ma gratitude à Mme Anne Rozan, Professeure à l'UMR GESTE et à Mme Catherine Viot, Professeure à l'Université Claude Bernard Lyon 1, qui ont bien voulu être examinatrices.

Je remercie tout particulièrement M. Christophe Viavattene et M. Didier Rullière pour avoir accepté de faire partie de mon comité de suivi de thèse deux années consécutives et avoir pris le temps de discuter avec moi.

Enfin, je tiens à remercier tous les membres du Service Modélisation et R&D de la Caisse Centrale de Réassurance, qui ont répondu avec calme et patience à mes questions. Notamment M. David Moncoulon, Responsable du service Modélisation et R&D, qui a tout fait pour m'aider et à mes compagnons de tous les jours : M. Thomas Onfroy, Chargé d'Etudes Géomatiques, avec qui j'ai travaillé sur tous les aspects ArcGIS de la modélisation du risque agricole. M. Zi-Xiang Wang, Modélisateur, pour m'avoir guidée dans l'architecture de mes modèles sous Matlab et m'avoir enseigné l'art de la modélisation. M. Jérémy Desarthe, pour son aide précieuse pour ma recherche bibliographique. M. Jean-Philippe Naulin, pour avoir pris le temps de m'écouter et dont les réflexions m'ont souvent permis d'envisager mon travail sous un autre angle. M. Daniel Benlolo, pour m'avoir éclairée sur le marché de la réassurance des catastrophes naturelles. Enfin, Mme Selma Jaziri et Mme Elsa Rothschild, merci pour votre gentillesse, votre disponibilité permanente et pour vos nombreux encouragements.

Je ne citerai pas, mais ils se reconnaîtront, tous mes amis et collègues, qui m'ont soutenue et relu ma thèse. Je leur en suis reconnaissante.

Enfin et par-dessus tout, je remercie ma famille.

Delphine et Alexander d'abord, merci pour votre soutien indéfectible durant mes innombrables moments de doute, vous en avez de la patience !

Puis mes parents, Martine et Gildas, et mon frère, Cédric, qui me soutiennent dans tous mes projets, réalisables ou non mais eux aussi innombrables. Merci d'être là pour moi, heureux lors des victoires petites ou grandes, bienveillants dans mes échecs. Vous êtes le filet de sécurité qui me permet de me lancer sans peur dans toutes les aventures qu'offre la vie. Préparez-vous, je n'ai pas fini d'expérimenter.

Por último, mi pequeña familia. Camilo, es gracias a ti que he acabado este trabajo. Supiste encontrar las palabras y las formas para animarme. ¡No puedo contar cuantas rosas me regalaste! Tienes una fuerza tranquila y una férrea determinación en todo lo que emprendes y emprendemos. Me siento muy afortunada de estar contigo, te amo. Agathe, es para ti que la he acabado. Je te vois chaque jour grandir, sourire, jouer et découvrir avec plaisir le monde qui t'entoure. Je t'aime.

Berlin, le 21 janvier 2020.

# ABSTRACT

LES travaux de cette thèse se situent dans le cadre de l'élargissement du périmètre des impacts estimés par le modèle inondation de la Caisse Centrale de Réassurance (CCR). Le premier chapitre étudie les différents impacts d'une inondation, leurs interdépendances et d'en conclure une classification des impacts. A partir de cela, nous proposons un modèle global construit par chaînage de modélisation des impacts où les outputs des différents modèles servent d'inputs pour les modèles suivants. Cette démarche permettra d'avoir une répartition des impacts par poste et une compréhension des effets en cascade des dommages directs vers les effets macro-économiques.

Le chapitre 2 s'intéresse à la modélisation des dommages aux véhicules sous le cahier des charges de CCR. Les différentes conditions à respecter sont : la modélisation pour le péril inondation seul et du risque automobile seul, la modélisation pour un événement particulier et pour la charge totale annuelle. L'étude de ce risque, nous a permis de décrire, d'implémenter, d'identifier les problèmes et possibles améliorations de différentes approches de modélisation, à savoir :

- une régression linéaire, la méthodologie aujourd'hui utilisée par CCR
- une modélisation fréquence x sévérité associée à la théorie des valeurs extrêmes, très utilisée dans le monde de l'assurance
- une modélisation physique sur exposition, démarche déjà adoptée à CCR pour les dommages au bâti. Nous nous sommes donc appuyés sur le modèle d'aléa inondation CCR et avons développé les modules de vulnérabilité et de dommages propres à ce risque.

CCR étant chargée de la gestion comptable et financière du Fonds National de Gestion des Risques en Agriculture pour le compte de l'Etat, les travaux se sont poursuivis, dans le chapitre 3, par la modélisation du risque agricole. A partir d'un état de l'art sur la modélisation des conséquences agricoles des inondations, une modélisation de ce risque est proposée et implémentée. Le modèle s'intègre dans la démarche de modélisation physique sur exposition développée à CCR. Le travail a porté sur le développement des modules de vulnérabilité et de dommages spécifiques à l'agriculture. Le modèle de vulnérabilité a été développé à partir du registre parcellaire graphique et le module de dommages a été développé à partir des courbes de dommages à l'agriculture développées par le groupe de travail national Analyse Multi-Critères inondation à travers les travaux de l'IRSTEA. Le modèle d'aléa utilisé est le modèle développé par CCR depuis 2003.

Le dernier chapitre est pensé comme une base technique afin de pouvoir continuer les travaux d'élargissement du périmètre des impacts modélisés. Tout d'abord, un état des lieux des travaux réalisés (risques automobile et agricole) et en cours (pertes d'exploitations consécutives à un dommage direct) est réalisé et replacé dans le contexte de la modélisation globale des impacts proposée à CCR. Pour les impacts non traités, nous présenterons les problématiques de modélisation, un court état de l'art et les conclusions que nous en avons tirées en termes de modélisation.

**T**HIS research was conducted within the framework of the Caisse Centrale de Réassurance's (CCR) R&D objective - to widen the scope of impacts estimated by its flood impact model. In chapter one, we study the various impacts of a flood and their interdependencies in order to create a classification of impacts. This classification allows us to design the architecture of a global impact model built from linking specific impacts models where the outputs of one model are the inputs of the following one. This approach generates an estimation with a breakdown by type of impact. It also allows us to understand the domino effects from the direct damage to the macroeconomic impacts.

In chapter two, we study models for car damages according to CCR's specifications. The requirements are : the model should be independent from other natural catastrophes and impacts estimations and it should be able to model both a specific event and the total annual loads. Through this work we describe, implement, and identify issues with possible improvements of three modelling approaches :

- a simple linear regression, CCR's presently used method
- a frequency x severity model associated to the extreme value theory, widely used in the insurance business sector
- a model that pairs a physical model with exposure through damage curves. CCR already uses this approach to estimate damage to buildings. Hence, we are using CCR's flood hazard model and develop an exposure model and a damage model specific to cars.

CCR is in charge of the accounting management of the Agricultural National Risk Management Fund on behalf of the State. Hence, chapter three contains state of the art modeling solutions for this risk and description of the designed model and its implementation. A vulnerability model and a damage model specific to the agricultural risk are developed and paired with CCR's flood hazard model. The vulnerability model uses the Graphic Parcel Register database. The damage model is based on the damage curves developed by IRSTEA for the national think tank on flood cost-benefit analysis.

Chapter four is a technical document that will allow CCR to continue the development of the global model. It presents a situational analysis of what has been done (cars and agricultural risks) and of ongoing works (business interruption due to direct damage). For the remaining impacts, it presents the modeling issues, a short research review and the conclusions reached in terms of modeling.

# TABLE DES MATIÈRES



# CHAPITRE INTRODUCTIF

1

**L**A survenance d'une catastrophe donne toujours lieu à une évaluation des dommages qui varie selon les protagonistes (assureurs, collectivités, professionnels).

En plus des différences méthodologiques, ces divergences sont dues à l'aspect multi-dimensionnel des impacts des catastrophes. Il y a d'une part le périmètre des dommages pris en compte dans le cadre de l'estimation et d'autre part les fenêtres temporelle et géographique considérées. Etudie-t-on uniquement la zone impactée, toute l'entité régionale concernée ou également les régions adjacentes voire tout le territoire national? L'étude s'intéresse-t-elle uniquement à l'impact du choc de destruction ou aux conséquences à plus ou moins long terme, intégrant alors les effets de la reconstruction et de la reprise économique? Enfin, les impacts négatifs et positifs des catastrophes ont un large effet redistributif, ce qui rend flou les impacts inclus ou non dans les estimations.

Tous ces choix dépendent également du but dans lequel ces estimations sont effectuées car les différents périmètres d'analyse et la définition du « coût » dépendent de la spécification des objectifs.

Cette confusion se traduit dans la multitude de termes existants pour décrire le coût des catastrophes dans les estimations publiées : perte directe, perte d'actifs, perte indirecte, perte d'ordre supérieur, perte d'exploitation, perte intangible, perte marchande et non marchande, perte de bien-être... Cela rend presque impossible la comparaison ou l'agrégation des estimations publiées qui sont fondées sur autant d'hypothèses et de méthodes (Meyer et al., 2013).

Or, comprendre et estimer quantitativement l'impact des catastrophes permet de mieux les anticiper via des politiques de gestion des risques adaptées. Ces politiques peuvent s'appuyer sur l'estimation des événements de référence ou passés ou sur l'estimation probabiliste des impacts futurs. Pour ce faire, de nombreuses études se fondent sur les dommages économiques directs, à savoir la valeur de ce qui a été endommagé ou détruit par la catastrophe. Si cet indicateur est nécessaire, il est néanmoins insuffisant pour mesurer la gravité d'une catastrophe. Estimer les dommages indirects est alors crucial pour envisager les conséquences d'un point de vue plus global.

Ces travaux de thèse s'intéressent donc d'une part à la définition d'un modèle d'estimation des impacts des catastrophes naturelles, global et exploitable par les preneurs de décision. D'autre part, les travaux entament l'implémentation de ce macro-modèle pour

l'aléa inondation.

Ce premier chapitre a pour objectif de remettre les travaux de cette thèse en contexte. Tout d'abord, nous ferons l'état des lieux des impacts des inondations et la classification développée afin de pouvoir par la suite définir des périmètres d'étude clairs. Nous partons de l'hypothèse que toutes les catastrophes, de quelque nature qu'elles soient, peuvent être traduites en informations relatives au choc de destruction dont les impacts se propagent ensuite par effet domino. Puis nous étudierons l'évolution des politiques de gestion des catastrophes naturelles et les systèmes de transferts de risques existants en France afin de mettre en avant l'intérêt des estimations quantitatives dans la mise en place de ces politiques. Enfin, nous décrirons le modèle d'estimation des inondations développé par CCR, celui-ci étant le point de départ de nos travaux de modélisation. Ceci nous permettra de conclure sur l'architecture globale de l'estimation des impacts proposée dans ces travaux.

## 1.1 LES IMPACTS DES CATASTROPHES NATURELLES

### 1.1.1 Concept de catastrophe naturelle

White (1945) définit les inondations de la manière suivante : *"Floods are "acts of god", but flood losses are largely acts of man"*.

Par "fait de Dieu", White (1945) entend une inondation comme un événement physique, ce que l'on appellera l'aléa. Cet événement physique est généralement décrit en termes de fréquence ou de période de retour pour chiffrer sa probabilité de survenance. Il peut également être caractérisé par son étendue et, en chaque point du bassin versant, par plusieurs variables telles que la hauteur d'eau, le débit, la durée, le type de crue (lente, éclair, submersion marine, remontée de nappe), etc.

Mais les pertes dues aux inondations sont largement des "faits de l'homme" puisqu'elles se réfèrent au développement d'une société dans la zone d'aléa. Les choix concernant l'occupation des sols, les actifs immobiliers, leurs matériaux de construction et leurs contenus déterminent la vulnérabilité physique de l'environnement bâti. Cette vulnérabilité est donc un facteur important pour l'estimation des dommages directs et des pertes indirectes. En effet, les catastrophes naturelles ont des impacts multiples. Au-delà des dommages directs sur les personnes et les biens, elles perturbent le fonctionnement du système économique menant à des pertes additionnelles (effets dominos dans la chaîne de production, endettement, diminution de la consommation, ...) et des effets positifs à travers la reconstruction et la reprise économique. Ces impacts sont appelés effets indirects ou effets d'ordre supérieur (Pelling et al., 2002; Lindell et Prater, 2003; Cochrane, 2004; Rose et Guha, 2004; Hallegatte, 2010).

Un aléa de grande ampleur ne se convertit donc pas spécialement en une catastrophe. La distinction entre catastrophe et aléa peut être trouvée dans Okuyama et Chang (2004) : *"l'aléa est la survenance de l'événement physique proprement dit et la catastrophe est sa conséquence"*. Ariyabandu (2001) définit plus spécifiquement une catastrophe comme le résultat d'un aléa impactant la vulnérabilité d'une société. Dans une perspective économique, une catastrophe naturelle, et dans notre cas une inondation, peut donc être définie comme un événement naturel (l'aléa) qui cause des perturbations au fonctionnement du système économique avec un impact négatif significatif sur les actifs, les facteurs de production, la production, l'emploi et/ou la consommation et un impact positif à travers la reconstruction et la reprise économique.

### 1.1.2 Les impacts des aléas sur les sociétés - Focus sur les inondations

#### 1.1.2.1 Description des impacts et définitions

Les catastrophes naturelles peuvent être la cause de blessures et de pertes humaines ainsi que de destructions physiques à l'environnement bâti, son contenu, aux facteurs de production et aux réseaux, tels que les réseaux de transports et de services (communications comme téléphone et internet, énergie comme électricité et gaz, eau potable, eaux usées, services d'urgence, santé, services publics, biens de première nécessité, finance). Ces conséquences représentent un choc de destruction et sont appelées dommages directs (DD). Les économistes les définissent comme dommages aux stocks.

Ces dommages directs peuvent mener à des interruptions des activités économiques

appelées pertes d'exploitation (PE). Les PE sont des pertes subies par l'industrie, le commerce et l'agriculture lorsque les activités sont perturbées durant et suite à une inondation.

Dans la littérature, les PE sont parfois classifiées dans les Dommages Directs puisqu'elles peuvent provenir d'un impact direct de l'inondation : l'entreprise est inondée ou a subi des dommages qui l'empêchent de fonctionner normalement (Kok et al., 2004). Cependant, les PE sont parfois classifiées dans les dommages indirects (DI). En effet, ce type de perte ne résulte pas nécessairement d'un contact physique de l'entreprise ou de ses outils de production avec les eaux d'inondation mais peut aussi provenir de la perturbation du processus économique qui peut parfois durer plus longtemps et concerner une plus grande zone géographique que les impacts directs de l'inondation (Smith et Ward, 1998). De plus, les méthodes pour évaluer les pertes dues aux interruptions d'activités sont assez différentes de celles utilisées pour les pertes directes et indirectes. Pour cette raison, et dans la même logique que le projet CONHAZ (Meyer et al., 2013), nous considérerons les PE comme une catégorie d'impacts à part entière, au sein de laquelle nous distinguons deux sous-catégories :

- les Pertes d'Exploitation Consécutives (PEC);
- les Pertes d'Exploitation Non Consécutives (PENC).

Les PEC correspondent aux pertes de valeur ajoutée des entreprises situées dans la zone d'aléa et impactées par l'événement lorsqu'une partie des facteurs de production est endommagée. Les entreprises touchées peuvent être amenées à ralentir voire interrompre leur processus de production pendant la durée de l'inondation et la période de remise en état de production.

Les entreprises peuvent également être amenées à ralentir voire arrêter leur processus de production même si elles ne se trouvent pas dans le périmètre géographique et temporel de l'inondation. Les pertes ainsi engendrées correspondent aux PENC et s'expliquent de deux manières.

Premièrement, les pertes d'exploitation d'entreprises situées dans des zones de défaillance de réseaux d'infrastructure (réseaux de transport et réseaux de service) dont la société moderne est très dépendante sont considérées comme des PENC. Par exemple, dans le cas où les infrastructures d'une entreprise productrice d'électricité sont endommagées par l'aléa, la production et la distribution d'électricité peuvent être interrompues. Une zone géographique - que l'on appelle zone de défaillance - qui ne suit pas spécialement le tracé de la zone d'aléa, peut se trouver coupée d'électricité. Les entreprises installées dans cette zone et pour lesquelles l'électricité est nécessaire au bon déroulement de leur activité ne pourront plus fonctionner normalement bien qu'elles n'aient pas été endommagées par l'aléa. Les pertes causées par la réduction, voire l'arrêt de la production jusqu'à la restauration de l'approvisionnement en électricité correspondent à des PENC.

Deuxièmement, les PENC peuvent être causées par la perturbation du système des relations inter-industrielles, c'est-à-dire par l'interdépendance de toutes les activités économiques. En effet, l'interruption d'une activité peut entraîner des effets dominos sur la chaîne de production de deux types :

- en amont de la chaîne de production : ce sont les effets qui se propagent du fait d'une demande modifiée. Une entreprise qui ne peut plus produire ne va plus consommer, diminuant alors l'activité de ses fournisseurs qui consommeront alors moins à leur tour et ainsi de suite. C'est ce que l'on appellera la carence client;

- en aval de la chaîne de production : Une entreprise qui ne peut plus produire ne pourra pas non plus fournir ses clients qui devront à leur tour ralentir leurs activités s'ils ne possèdent pas de stocks suffisants ou de fournisseurs alternatifs pour faire face à la pénurie d'approvisionnements. C'est ce que l'on appellera la carence fournisseur.

Les destructions et les pertes d'exploitation peuvent produire des effets sur l'ensemble du système économique. Ce sont les conséquences indirectes (CI). Celles-ci comprennent un très large éventail de conséquences telles que l'endettement des ménages et des gouvernements, la modification des tendances de consommation ou de la balance commerciale. A plus long terme, on peut également observer un phénomène d'accélération de la croissance par un effet de reconstruction et de reprise économique.

Tous les impacts présentés jusqu'ici sont tangibles et on les oppose aux impacts intangibles. Ces impacts se réfèrent aux biens et services qui ne sont pas mesurables (ou du moins pas facilement) en termes monétaires car ils ne s'échangent pas sur les marchés. On se réfère donc également à ces impacts avec le terme d'impacts non marchands (Smith, 1998). Les effets intangibles incluent par exemple les impacts environnementaux, sur la santé ou sur l'héritage culturel et peuvent également être directs et indirects.

#### 1.1.2.2 La composante spatio-temporelle

Les impacts des inondations ont un aspect spatio-temporel très important. Si on prend l'exemple des PE, ce type de perte présente une composante temporelle très importante puisque le montant de la perte d'exploitation dépendra de la durée d'incapacité de production normale qui dépend de :

- la durée de la crue ;
- la durée de remise en état ;
- la durée de la défaillance des réseaux (i.e. le temps nécessaire aux gestionnaires des différents réseaux pour les remettre en fonctionnement).

Le temps de remise en état conditionne la PEC voire, la survie de l'entreprise. Il est très variable d'une activité à une autre et d'un site à un autre, en fonction notamment des :

- délais d'expertise (et de contre-expertise) ;
- délais d'obtention des devis des artisans ;
- délais de commande ;
- durées d'intervention ;
- délais de remplacement des machines et des stocks.

De plus, les PENC concernent une zone géographique qui peut ne pas correspondre à la zone d'aléa et les pertes dues aux inondations ne sont généralement pas uniformes à travers cette zone - certaines régions, *a priori* épargnées, peuvent se trouver très touchées. Cela est d'autant plus vrai lors d'un gros événement dont les impacts peuvent se propager bien au delà de la zone d'aléa.

A une plus grande échelle, les différents impacts d'une inondation peuvent être classifiés en fonction de l'importance des dimensions temps et espace. Le schéma ci-dessous est un exemple de cette démarche :

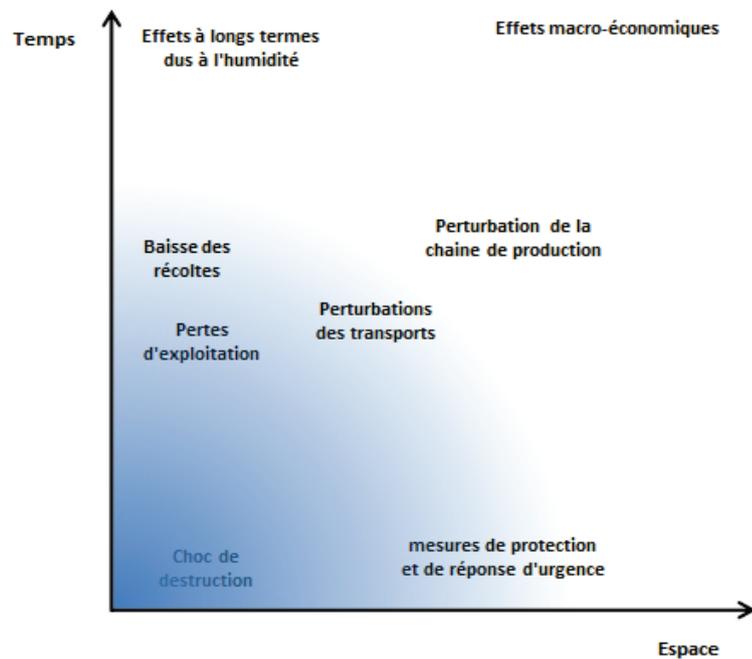


FIGURE 1.1 – Composante Spatio-temporelle des dommages

Pour comprendre cet aspect, il est utile de s'intéresser à la notion de système. Les conséquences d'un choc sur la trajectoire d'un système ont tout d'abord été étudiées par Holling en 1973 dans le cadre de l'étude des éco-systèmes naturels avant d'être généralisée et appliquée à l'économie. Un système présente une trajectoire qu'un choc va perturber. Cette perturbation initiale est provoquée par les dommages directs. Le retour du système à l'état initial (ou à un nouvel état d'équilibre) prendra un temps. Ce temps de rééquilibrage représente les dommages indirects. L'estimation des impacts d'une catastrophe prend alors 2 formes :

- l'évaluation du choc initial sur le système économique ;
- l'estimation des conséquences sur le changement de trajectoire du système économique.

Ainsi, le coût de l'endommagement d'une partie du système n'est pas égal à son endommagement seul car un système n'est pas seulement égal à la somme de ses parties. Un système est un ensemble d'éléments interdépendants qui constituent un tout unifié. Chaque élément implique de transformer certains inputs en certains outputs. Les caractéristiques essentielles d'un système sont donc les séries de nœuds au sein desquels des inputs sont transformés en outputs et les relations entre les nœuds. Mathématiquement, un système est un graphe orienté et peut être résumé sous la forme d'une matrice. En économie, cette matrice prend souvent la forme d'un tableau d'Input-Output (IO) ou d'une matrice de comptabilité sociale (MCS).

Cependant, une telle matrice représente un système à l'instant  $t$  et il est difficile d'estimer l'évolution d'un système par sa simple description statique et encore moins sa réaction en cas de choc. Cette problématique met en avant la dimension temporelle de l'étude des conséquences économiques des catastrophes naturelles : c'est le temps de retour à la normale du système. En fonction de la fenêtre temporelle étudiée et de l'ampleur de l'événement, les effets considérés ne seront pas les mêmes. Au fur et à

mesure qu'on allongera la fenêtre temporelle, on prendra successivement en compte les DD, les PEC, les PENC puis les CI. Plus on avance dans le temps, plus les effets seront "lents". En effet, si les dommages directs ont une caractéristique "instantanée", les effets macroéconomiques correspondent aux conséquences économiques qui se développent durant des mois voire des années. Cette caractéristique amènera un questionnement sur le pas de temps à adopter pour les modèles développés.

Une catastrophe a également une composante spatiale qui peut avoir des effets significatifs sur les estimations des conséquences économiques. Par exemple, un nœud de transformation particulier (correspondant à un secteur industriel) peut être concentré dans un seul endroit ou peut avoir lieu sur de nombreux petits sites. L'aléa aura alors un impact très différent selon les cas : blocage nul ou potentiellement total dans le premier cas et probablement partiel dans le deuxième cas en fonction du nombre de sites dans la zone d'aléa et de ses caractéristiques d'intensité. Le type de blocage expliquera la variation d'approvisionnement en produits issus de ce nœud.

Le système économique peut s'adapter à ces pénuries d'approvisionnement : des stocks sont parfois disponibles pour parer les effets des chocs mais ces stocks peuvent eux-même être concentrés ou dispersés géographiquement (par exemple les dépôts de distribution des supermarchés sont souvent très concentrés) et touchés par l'inondation. Certaines actions (telles que les tâches de maintenance) peuvent être, dans une certaine mesure, repoussées à plus tard. Enfin, il est possible de se tourner vers d'autres fournisseurs ou des produits de substitution. Cependant il y a un temps de réponse et un coût d'ajustement dans ce mécanisme d'adaptation qu'il faut également prendre en compte.

Cette composante spatio-temporelle aura donc une influence importante sur la modélisation des impacts des inondations.

### 1.1.2.3 Classification des impacts

Avant de définir le périmètre des modèles d'impacts à développer, il est donc nécessaire de définir une classification des impacts. Le tableau suivant récapitule la classification des dommages découlant de nos définitions et que nous utiliserons dans ces travaux.

	Direct	Pertes d'exploitation	Indirect
Tangible	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Particuliers : biens immobiliers, biens mobiliers et véhicules</li> <li>- Risques Professionnels : biens immobiliers, stocks, outils de production, véhicules</li> <li>- Agriculture : biens immobiliers, outils de production, stocks, véhicules, récoltes engrangées, bétail en étable, récoltes non engrangées, cultures, sols, cheptel vif hors bâtiment</li> <li>- Infrastructures de transport : <ul style="list-style-type: none"> <li>- infrastructures routières : autoroutes, routes, ouvrages d'art</li> <li>- infrastructures de transports hors routes : réseau ferroviaire, réseau urbain (tramway, métro...), réseau fluvial, infrastructures portuaires, infrastructures aéroportuaires</li> </ul> </li> <li>- Infrastructures techniques : <ul style="list-style-type: none"> <li>- adduction et distribution d'eau potable (stations et réseaux)</li> <li>- assainissement (stations et réseaux)</li> <li>- réseaux électriques &amp; énergétiques (EDF, GDF, centrales nucléaires, centrales électriques)</li> <li>- réseaux télécoms</li> <li>- chauffage urbain</li> </ul> </li> <li>- Equipements touristiques : Campings, hôtels, autres</li> <li>- Bâtiments publics : biens publics, bâtiments administratifs, bâtiments scolaires, bâtiments à vocation médico-sociale, musées, autres</li> <li>- Autres : Indemnisation Assurance Vie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Arrêt d'exploitation d'un site inondé</li> <li>- Pertes d'exploitation consécutive à des dommages directs</li> <li>- Pertes d'exploitation non consécutive à des dommages directs mais dues à la perturbation des réseaux : coupure d'accès (interruption et déviation de trafic, passage ou manœuvre), arrêt des infrastructures techniques nécessaires au fonctionnement</li> <li>- Pertes d'exploitation d'un site situé hors de la région inondée : carence fournisseurs, carence clients, interruption ou ralentissement en amont et en aval de la chaîne de production</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Particuliers : relogement provisoire, perte de valeur foncière, perte de valeur immobilière</li> <li>- Entreprises : perte de marché, perte de valeur foncière, perte de valeur immobilière, relogement provisoire ou permanent des activités</li> <li>- Agriculture : perte de valeur foncière, baisse de productivité, perte de valeur de l'exploitation</li> <li>- Infrastructures de transport : pertes de marchés (gestionnaires, transporteurs et leurs clients)</li> <li>- Tourisme : fermeture temporaire des équipements et sites touristiques, perte de marché</li> <li>- Bâtiments publics : relogement provisoire ou permanent des activités</li> <li>- Coût de la réponse d'urgence : évacuation, secours</li> <li>- Effets macroéconomiques : perte de revenu fiscal due à l'émigration d'entreprises suite à l'inondation, endettement des foyers et des gouvernements, déséquilibre de la balance commerciale, reconstruction avec parfois des effets d'innovation technologique, reprise économique</li> </ul>
Intangible	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perte de vies humaines</li> <li>- Atteintes physiques</li> <li>- détresse psychologique</li> <li>- Patrimoine historique : bâtiments, œuvres d'art, parcs et jardins</li> <li>- Impact écologique : cours d'eau, zones humides, forêts</li> </ul>	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bâtiments publics : durée d'interruption des services</li> <li>- Effets sur la santé</li> <li>- Impacts psychologiques : traumatisme, perte de souvenirs, perte de confiance dans les autorités publiques</li> <li>- effets négatifs sur les écosystèmes : dégradation de substances nocives, perte de production due à l'érosion des sols agricoles, impact sur la fréquentation touristique</li> </ul>

FIGURE 1.2 – Catégorisation des Conséquences des Catastrophes Naturelles

### 1.1.3 Focus sur le risque agricole

Brémond et al. (2013) ont réalisé une revue de littérature consacrée aux dommages agricoles lors d'inondations, qui a servi de référence pour nos travaux. Ils y effectuent une distinction entre les aspects spatiaux et temporels des conséquences des inondations sur le secteur agricole. Ils classifient les dommages au secteur agricole de la façon suivante :

- tangibles et intangibles ;
- instantanées et induits : afin de prendre en compte l'échelle temporelle, les dommages instantanés surviennent pendant ou immédiatement après l'inondation alors que les dommages induits surviennent plus tard dans le temps ;
- directs et indirects : il s'agit ici de l'échelle spatiale. Les dommages directs sont les dommages dus à un contact physique direct de l'objet étudié avec les eaux d'inondation alors que les dommages indirects surviennent dans une zone qui n'est pas touchée par l'inondation.

Il est donc possible d'établir un rapprochement avec la classification établie dans nos travaux :

TABLE 1.1 – *Rapprochement Classification Brémond et al. (2013) et CCR*

Classification CCR	Classification Brémond et al. (2013)
Tangible	Tangible
Intangible	Intangible
Direct	Direct instantané
Indirect	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Direct induit,</li> <li>— Indirect instantané,</li> <li>— Indirect induit.</li> </ul>

En faisant la distinction entre les dimensions spatiales et temporelles, Brémond et al. (2013) affinent la classification adoptée par CCR pour le secteur agricole.

#### 1.1.3.1 Dommages instantanés directs

Toutes les composantes d'une exploitation agricole peuvent être impactées par l'inondation. A partir des études qualitatives ex-post d'impacts d'inondations sur l'agriculture (Pivot et al., 2002 ; Bauduceau, 2001 ; Chatterton et al, 2010 ; Bauduceau, 2004a ; Twining et al., 2007 ; Posthumus et al., 2009 ; Morris et Brewin, 2013), Brémond et al. (2013) distinguent huit catégories de dommages instantanés directs :

- pertes de récoltes et baisses de rendement ;
- dommages ou destruction de plantes permanentes (vignoble, verger) ;
- mort et blessures au bétail ;
- perte de produits du bétail (lait, œufs) ;
- dommages au sol (érosion, dépôt des détritiques et des déchets, contamination) ;
- dommages aux bâtiments ;
- dommages aux machines et aux équipements ;
- dommages aux produits stockés (intrants, nourriture pour animaux et fourrage).

### 1.1.3.2 Dommages induits directs

Les dommages induits directs dépendent de l'échelle à laquelle les activités agricoles sont étudiées. Quand l'agriculture est étudiée uniquement à travers l'occupation des sols (c'est-à-dire via une étude séparée des parcelles et des bâtiments agricoles), les dommages induits directs suivants peuvent être pris en compte :

- les dommages induits directs sur le bétail, tels que la réduction de la production de lait du fait de la perte de pâturage, de la baisse de qualité de la nourriture ou une augmentation du coût des traitements vétérinaires à cause du stress sur les animaux (Posthumus et al., 2009);
- l'augmentation des coûts de production (Bauduceau, 2001). En effet, pour limiter les pertes, des actions et des achats additionnels sont nécessaires;
- des restrictions dans l'utilisation des sols, allant jusqu'à l'interdiction de certaines cultures, lorsque des dommages directs ne sont pas entièrement réparés (érosion ou contamination des sols par exemple);
- les pertes futures de rendement qui perdurent plusieurs années après l'inondation, quand du matériel végétal permanent (ex : vergers) est détruit (Bauduceau, 2001).

De plus, l'exécution de certaines actions en prévention ou en réaction à l'inondation peut amener à modifier les dommages initiaux. Inclure les impacts de telles actions n'est pas direct et implique un travail d'analyse supplémentaire. Par exemple, l'évacuation du bétail permet d'éviter la mort ou les blessures pour certains animaux. Une récolte anticipée peut être envisagée afin de réduire la perte de rendement; ré-ensemencer la même culture (ou une nouvelle en fonction du calendrier agricole) permet de diminuer la perte de valeur ajoutée à l'échelle de l'exploitation agricole : la culture d'origine peut être complètement perdue mais une nouvelle culture de substitution générerait un revenu. La prise en compte de ces actions implique d'inclure dans la modélisation des économies ou de nouveaux revenus mais génère aussi de nouvelles dépenses.

Quand les exploitations agricoles sont étudiées comme une entité globale, c'est-à-dire en considérant les liens entre les parcelles, les bâtiments et les outils de production, des études empiriques mettent en avant des perturbations de l'activité de l'exploitation agricole du fait de l'inondation. Par exemple, dans une étude sur la vulnérabilité d'une exploitation agricole aux inondations, Barbut et al. (2004) ont montré qu'un des critères qui explique le mieux la vulnérabilité est l'augmentation non-maîtrisable de travail induite par les tâches de rétablissement. Posthumus et al. (2009) et Morris et Bremin (2013) confirment qu'à l'échelle de l'exploitation, les inondations peuvent entraîner un délai de récolte dans les champs non touchés, ou de toute autre tâche du fait de l'indisponibilité des outils de production ou s'il y a trop de tâches à effectuer en même temps du fait de l'inondation. De plus, ces auteurs mentionnent que les impacts de l'inondation peuvent continuer plusieurs années du fait du changement dans la rotation des cultures. Par exemple, à cause de l'impossibilité de préparer le sol à temps, il peut être impossible d'ensemencer la culture suivante. Au delà des dommages directs aux composants élémentaires, les dommages à l'échelle d'une exploitation peuvent varier en fonction de son organisation interne, de la disponibilité de ressources de production et des prises de décision du gérant de l'exploitation (Pivot et al., 2002).

### 1.1.3.3 Pertes indirectes

Inclure les pertes indirectes - instantanées ou induites - dans le périmètre de l'analyse implique d'élargir l'échelle spatiale de l'étude. Il ne faut pas se restreindre aux exploi-

tations directement impactées par l'aléa mais adopter une échelle plus large, à savoir régionale, voire nationale selon l'ampleur de l'événement. La distinction entre dommages indirects instantanés et induits n'est pas triviale. Cela dépend de la dynamique de propagation des impacts au sein de la société et peut nécessiter de trouver des substituts pour modéliser les effets macroéconomiques.

Des études qualitatives mentionnent des impacts possibles de l'inondation sur les activités agricoles qui ne surviennent pas dans la zone inondée (Bauduceau, 2004b; Brémond et al., 2008). Par exemple, des exploitants qui ne sont pas directement impactés peuvent souffrir d'une carence de fournisseur (y compris des fourrages entreposés) si les activités de ce fournisseur sont touchées. Les secteurs économiques fortement liés au secteur agricole peuvent également être touchés : si les récoltes ont été détruites, l'industrie agroalimentaire peut souffrir des pénuries d'intrants agricoles, en fonction de sa capacité à trouver sur les marchés des substituts à la récolte perdue. Si beaucoup d'exploitations agricoles font faillite, l'industrie agroalimentaire peut avoir à se réorganiser pour s'adapter à cette nouvelle situation.

Enfin, les conséquences sur le long terme sur le secteur agricole peuvent avoir un impact sur l'environnement. Des inondations à répétition sur un territoire peuvent engendrer une déprise agricole. Or, l'agriculteur joue un rôle majeur dans l'entretien du territoire et son retrait peut amener à une dégradation du milieu par l'apparition de friches, notamment sur les zones péri-urbaines. Ces conséquences ne seront pas traitées dans ce travail.

Le tableau ci-dessous récapitule la classification des pertes du secteur agricole adoptée par Brémond et al. (2013) et les principaux dommages recensés :

TABLE 1.2 – Classification des dommages agricoles lors d'inondations

	<b>Instantané</b> (juste après l'inondation)	<b>Induit</b> (plus tard après l'inondation)
<b>Direct</b> (dû à l'exposition à l'inondation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>— pertes de récoltes et baisses de rendement;</li> <li>— dommages ou destruction de plantes permanentes (ex : vignoble, verger);</li> <li>— décès et blessures au bétail;</li> <li>— perte de produits de bétail (ex : lait, œufs);</li> <li>— dommages au sol;</li> <li>— dommages aux bâtiments;</li> <li>— dommages aux machines et aux équipements;</li> <li>— dommages aux produits stockés (intrants, nourriture pour animaux et fourrage);</li> <li>— dommages aux infrastructures (routes).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— perte de valeur ajoutée due à la perte de rendement pendant la première année ou plus après replantation du matériel végétal permanent ou le réensemencement des pâturages;</li> <li>— perte de valeur ajoutée due à l'indisponibilité de facteurs de production (outils de production, intrants);</li> <li>— coût du déménagement ou de la vente prématurée du bétail;</li> <li>— coût de la nourriture additionnelle pour le bétail;</li> <li>— réduction de la taille du troupeau.</li> </ul>
<b>Indirect</b> (non directement dû aux eaux d'inondation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>— augmentation du temps de transport du fait des infrastructures endommagées;</li> <li>— retard ou annulation des approvisionnements provenant des zones inondées (intrants, outils de production, etc).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— perte de valeur ajoutée en dehors de la zone inondée due aux pertes d'exploitation des actifs dans la zone inondée;</li> <li>— perte de valeur ajoutée en dehors de la zone inondée due aux dommages aux infrastructures.</li> </ul>

Source : Brémond et al. (2013)

## 1.1.4 Les Retours d'Expérience (RETEX)

### 1.1.4.1 L'intérêt des RETEX

Les sources d'informations les plus complètes sur les impacts des événements sont fournies par les RETEX (Lefrou et al., 2000; EDATER, 2001; MEDD / DPPR, 2003). En effet, leur objectif est de collecter de l'information sur les événements passés afin de mieux définir les mesures de prévention et de protection et la gestion de crise des événements futurs (Huet, 2005).

En France, les RETEX sont avant tout initiés par l'État, via le Ministère chargé de l'Écologie. Mais ils peuvent être réalisés par d'autres acteurs tels que des parlementaires, des collectivités, des acteurs privés ou opérateurs d'infrastructures de réseaux (EDF, SNCF, etc...), des universitaires ou institutions scientifiques. Par certains aspects, ils ont favorisé l'amélioration de la gestion des inondations, avec, par exemple, la création du SCHAPI (Le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la prévision des inondations) en juin 2003 et la réforme du service d'annonce des crues (SPC) (suite aux recommandations formulées dans le RETEX des inondations de 1999 dans l'Aude (Lefrou et al., 2000)), l'amélioration des connaissances sur l'aléa en termes de réévaluation de paramètres hydrauliques, le redimensionnement des ouvrages de protection, l'amélioration de politiques publiques notamment en matière d'urbanisme (Huet, 2005).

Ainsi, les RETEX fournissent de l'information sur le récit du déroulement de la catastrophe, de l'évolution de l'aléa aux mesures de gestion de crise mises en place, et sur les dommages directs, les impacts sociaux et indirects via un travail de collecte de données.

Ces données permettent de disposer de données de calibrage des modèles et de mener de nombreuses études statistiques. Nous donnons ici deux exemples d'études pouvant être menées :

- par comparaison entre les RETEX, il est possible de dresser un portrait de l'importance relative de chaque catégorie de dommages, en fonction des caractéristiques de l'aléa et de la vulnérabilité de la zone impactée ;
- par l'étude d'événements ayant touché la même zone géographique, il est possible de comprendre l'évolution de la vulnérabilité de la société aux inondations au cours du temps.

#### 1.1.4.2 Comparaison de RETEX

##### a. La répartition des dommages

A partir d'informations détaillées sur 11 inondations (Lamothe et al., 2005 ; Huet et al., 2001 ; Sauzey et al., 2001 ; Huet et al., 2003 ; Perriez et al., 2003 ; AFA, 2011), nous avons obtenu la distribution globale des dommages directs présentée dans le tableau suivant.

TABLE 1.3 – Distribution des dommages directs à partir de retours d'expérience et ajustés de l'inflation

Événement (M€2015)	Particuliers	Professionnels	Agriculture	Réseaux
France 1977-78 (Lamothe et al., 2005)	23M€, 18%	25M€, 19%	39M€, 30%	43M€, 33%
Vaucluse 1992 (Lamothe et al., 2005)	26M€, 19%	26M€, 19%	27M€, 20%	57M€, 42%
Orb 1995-96 (Lamothe et al., 2005)	13M€, 26%	14M€, 28%	3M€, 7%	19M€, 40%
Meuse 1993-95 (Lamothe et al., 2005)	168M€, 41%	199M€, 48%	17M€, 4%	28M€, 7%
Nîmes 1998 (Lamothe et al., 2005)	179M€, 25%	279M€, 38%	0M€, 0%	269M€, 37%
Aude 1999 (Lamothe et al., 2005)	191M€, 34%	98M€, 18%	59M€, 11%	207M€, 37%
Bretagne 2000 et 2001 (Huet et al., 2001)	81M€, 41%	54M€, 28%	6M€, 3%	54M€, 28%
Somme 2001 (Sauzey et al., 2001)	38M€, 28%	12M€, 9%	9M€, 6%	75M€, 56%
Gard 2002 (Huet et al., 2003)	122M€, 12%	389M€, 38%	259M€, 25%	261M€, 25%
Rhône 2003 (Perriez et al., 2003)	200M€, 17%	628M€, 54%	90M€, 8%	248M€, 21%
Var 2010 (AFA, 2011)	326M€, 39%	290M€, 34%	73M€, 9%	155M€, 18%
<b>Répartition globale</b>	<b>25%</b>	<b>37%</b>	<b>11%</b>	<b>26%</b>

On observe une très grande volatilité dans la répartition des dommages d'un événement à l'autre, les pertes agricoles représentant de 0% à 30% des dommages selon les événements par exemple. En effet, cette répartition des dommages dépend tout d'abord de l'occupation du territoire de la zone d'aléa, il y aura très peu voire aucun dommage au secteur agricole en zone urbaine. Cette volatilité est accrue lors de crues éclairs, car souvent très localisées.

Une grande majorité des modèles actuels se concentrent sur les dommages aux particuliers alors que les dommages aux entreprises, à l'agriculture et aux réseaux peuvent représenter une part importante des dommages directs. Ces résultats permettent donc de mettre en avant l'importance d'élargir le périmètre des modèles de dommages.

### **b. L'évolution dans le temps des conséquences des crues : les crues de la Seine**

En fonction des époques et des sociétés, les vulnérabilités, donc les impacts d'une catastrophe naturelle, sont différents. Cela dépend de multiples facteurs comme, par exemple, l'occupation des sols, la structure de l'économie, les réseaux structurants de la société, l'amélioration des mesures de protection, de prévention ou de gestion de crise.

Comparer des RETEX d'inondations ayant touché un même territoire à des époques différentes permet de mettre en avant certaines de ces évolutions. Ici, nous avons comparé les RETEX effectués sur la crue de la Seine de 1910 (CCR, 2016) et l'étude menée par l'OCDE sur les conséquences qu'aurait aujourd'hui ce même événement (OCDE, 2017).

En 1910, au fur et à mesure de l'augmentation du niveau de la Seine, les dommages se sont amplifiés allant de l'interruption des communications à la destruction des bâtiments - 20 000 bâtiments, impactant directement 200 000 personnes.

Les communications ont été les premiers enjeux à être victimes de la montée des eaux. Le transport fluvial sur la Seine, une des principales artères du réseau parisien à l'époque, fut coupé lors de la crue. Les réseaux ferroviaires (métro, tramway et train) ont également été en grande partie paralysés. Toute connexion ferroviaire depuis Paris jusqu'en banlieue était alors presque impossible.

Les dysfonctionnements des réseaux de communication ont 2 causes : la montée des eaux touchant directement les infrastructures et les nombreuses coupures d'énergie. En effet, les usines à gaz de houille nécessaires à l'éclairage de Paris ont connu des défaillances. La vulnérabilité de ces usines est double. En effet, situées en zone inondable, le niveau des eaux est susceptible d'interrompre leur fonctionnement. De plus, la houille qui permet leur fonctionnement n'est acheminée que par voie fluviale. Ainsi lors d'une crue, à la menace de l'inondation des bâtiments vient s'ajouter l'arrêt de l'approvisionnement en charbon. Sur les neuf qui étaient en services en janvier 1910, seules 2 ont été totalement paralysées. En revanche, toutes ont subi l'arrêt de la navigation. Les canalisations de gaz ont connu une douzaine de ruptures. Au total, les eaux ont envahi 120 kilomètres de conduites de gaz soit 7% du réseau de l'époque.

Les différentes entreprises de la région Île-de-France ont subi des effets directs et indirects de l'inondation. Elles ont pu en effet être inondées interrompant ainsi la production ou bien ont subi les différentes pannes électriques. En amont de Paris, dans l'actuel département du Val-de-Marne, les communes les plus durement touchées étaient Ivry-sur-Seine avec 67 établissements impactés, Alfortville (28) et Maisons-Alfort (15). De plus, la fermeture des usines a provoqué l'arrêt du travail. En conséquence, 11 500 ouvriers se sont retrouvés au chômage et sans ressource. La présence de l'eau occasionne également des courts-circuits aux conséquences souvent graves : à Ivry, la vinaigrerie Pagès s'est trouvée entourée par les eaux le 25 janvier et un dysfonctionnement a provoqué l'explosion du bâtiment et l'incendie de près de 10 000 litres d'alcool méthylique.

L'étude menée par l'OCDE étudie les conséquences que cette même inondation aurait aujourd'hui, selon 3 scénarios, décrits ci-dessous.

Le scénario S1 correspond à 80% du débit de la crue de 1910. Dans ce scénario, l'eau de la Seine atteint une hauteur de 6.90 m à l'échelle d'Austerlitz et reste haute près

d'une semaine. Grâce à des protections locales bien maintenues, l'eau reste majoritairement contenue par les berges et les murs de protection de la Seine dans les grandes zones urbanisées. La crue affecte toutefois plus de 100 000 personnes et inonde 30 000 habitations en grande banlieue à l'amont et à l'aval de Paris. Entreprises et équipements publics sont aussi touchés par des impacts directs causant des pertes d'exploitation ainsi que la perturbation localement des réseaux d'assainissement, d'électricité et de transport (la ligne du RER C notamment) pour deux semaines additionnelles au minimum. Ce scénario est légèrement inférieur mais représentatif des crues historiques de janvier 1924 et 1955 (environ 7.30 à Paris Austerlitz).

Avec 100% du débit de la crue de 1910 dans le scénario S2, l'eau est 50 cm en dessous du niveau atteint à cette époque du fait des travaux sur le lit de la rivière et les ponts menés depuis lors. La hauteur d'eau de 8,15 m atteinte à la station d'Austerlitz fait que la ville de Paris est protégée par ses berges et murettes, mais les départements de la Petite Couronne ne le sont pas, et l'eau y déborde sur de larges zones. Plus de 600 000 habitants sont directement affectés essentiellement dans les départements des Hauts-de-Seine et du Val-de-Marne et près de 100 000 habitations sont inondées. Les eaux restent hautes pendant près de deux semaines, entraînant des dommages sérieux aux entreprises situées dans la zone inondable, et de nombreux dommages aux équipements publics et aux infrastructures de réseaux. La préservation du cœur de l'agglomération permet néanmoins de restaurer la plupart des fonctionnalités métropolitaines un à deux mois après la fin de la période de crise.

Le scénario S3 prévoit une augmentation de 15% du débit par rapport à la crue de 1910, et le niveau de l'eau atteint 9,11 m à la station de Paris Austerlitz. Ce scénario est représentatif d'une crue de même niveau que celui de la crue historique de 1910. En conséquence, les berges et murettes ne permettent plus de contenir l'eau dans plusieurs quartiers de Paris, et de larges zones de l'agglomération se retrouvent sous les eaux. Les eaux restent hautes pendant près d'un mois par endroit, affectant directement 1 000 000 de personnes. Le réseau électrique est interrompu pour près de 1,5 million de clients particuliers et professionnels, l'eau potable n'est plus distribuée ou seulement avec une qualité détériorée pour près de 3 millions d'habitants. Le réseau de transport public souterrain est largement endommagé et interrompu pendant une longue période et le passage de la rive droite à la rive gauche de la Seine est impossible. La plupart des habitants de l'Ile-de-France voient leurs conditions de vie sévèrement dégradées pendant plusieurs mois. L'activité économique de cette région européenne majeure s'interrompt quasiment pendant plusieurs semaines et met des mois avant que des conditions de vie normales permettent aux habitants de retourner travailler au niveau d'avant la crise. Entretiens de nombreuses PME ont pu faire faillite et de grandes entreprises ont délocalisé -provisoirement- leurs activités.

TABLE 1.4 – Impact macro-économique des scénarios d'inondation (Source : OCDE, 2016)

	<b>Impacts directs et indirects (milliards €)</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>
	Evolution des impacts	Inondation : 1 semaine; Impact indirects : 2 semaines	Inondation : 2 semaines; Impacts indirects : 2 mois	Inondation : 1 mois; Impacts indirects : 2-5 mois
Destruction de capital	Habitat et mobiliers	0.76 dont 0.04 auto	4,08 dont 0.23 auto	6.83 dont 0.39 auto
	Stocks (entreprises), Équipement (entreprises), Bâtiments (entreprises)	0.81	4.71	8.54
	TOTAL Destruction de capital privé	1.57 dont 0.04 auto	8.79 dont 0.23 auto	15.37 dont 0.39 auto
	Réseaux :			
	- Électricité	0.25	0.50	1.00
	- Transport public RATP	-	1.00	5.00
	- Transport public SNCF	1.00	2.00	5.00
	- Routes	0.00	0.05	0.10
	- Eau	-	-	1.00
	Équipements et bâtiments publics	0.35	1.12	1.93
	TOTAL Destruction de capital public	1.60	4.67	14.03
Pertes d'exploitation (réduction de chiffre d'affaire)	Faillite de PME (impact annuel)	-	-	cas A : 1.25-0.6-0.3-0; cas B : 3-1.5-0.7-0
	Temporaires (impact trimestriel) dont :	0.58	5.67	cas A : 12.33; cas B : 16
	- Effets directs de l'inondation	0.19	1.06	cas A : 1.96; cas B : 1.96
	- Effets interruption électricité	0.19	2.59	cas A : 4.67; cas B : 5.4
	- Effets interruption transport	0.19	2.02	cas A : 5.7; cas B : 8.64

Tout d'abord, cette étude met en avant les bénéfices de la mise en place de mesures de protection (travaux sur le lit de la Seine,haussement des murettes, etc...) sur l'aléa, il s'agit du scénario S2. Pour un événement identique, l'aléa serait moins important.

Ensuite, une crue de la Seine aujourd'hui aurait de plus gros impacts du fait du développement de la région Île-de-France donc de l'augmentation de son exposition par la concentration des activités humaines dans la zone impactée.

De plus, cette étude permet de mettre en avant la grande vulnérabilité d'une société à ses réseaux - de distribution d'énergie et de transport. En 1910 et aujourd'hui, on peut remarquer l'impact important qu'ont eu et qu'auraient l'interruption des transports ferroviaires sur l'activité de la région.

Cependant, la dépendance à certains réseaux a évolué au cours du temps. En 1910, l'Île-de-France était très dépendante du réseau de transport fluvial pour l'approvisionnement en matières premières dont notamment le charbon et, pour les besoins énergétiques, elle était très dépendante du gaz à houille. Aujourd'hui, une grande partie du transport s'est tourné vers le réseau routier et l'électricité provient d'autres sources, créant un système de vulnérabilités différent.

Ces observations permettent de mettre en avant qu'un modèle d'estimation des catastrophes naturelles ne peut donc pas être transposé tel quel d'une époque à une autre et d'une région à l'autre.

#### **1.1.4.3 Un besoin de formalisation et généralisation d'une démarche RETEX uniformisée**

La pratique du RETEX s'est généralisée à la suite d'événements catastrophiques et les RETEX disponibles aujourd'hui sont nombreux. Bourguignon, D. (2014) propose un premier recensement des sources de données sur les événements naturels dommageables survenus en France. La base de données EMDAT de l'université de Louvain collecte des informations sur les impacts humains et économiques de catastrophes naturelles dans 184 pays de 1900 à aujourd'hui.

Cependant, si cela nous permet de disposer de nombreuses informations et données, celles-ci sont aujourd'hui difficilement exploitables, par manque d'accessibilité ou de fiabilité, notamment concernant les dommages économiques (Bourguignon, 2014). Or, cette étape s'avère cruciale pour une bonne calibration des modèles et compréhension des phénomènes.

D'abord, un même événement peut générer plusieurs RETEX ce qui accentue la fragmentation des connaissances et accroît le risque d'incohérence des chiffres entre les différentes sources. De plus, en fonction des organismes, le seuil à partir duquel un événement devient une catastrophe diffère. Par exemple, la CCR et la FFA identifient *a priori* comme «majeurs» les événements qui dépassent 50 millions d'euros de dommages assurés (coûts historiques). Toutefois, selon le contexte médiatique, l'intensité du phénomène naturel, le nombre de décès, etc. certaines inondations peuvent être associées à cette catégorie sans atteindre un tel seuil de pertes économiques (exemple : les inondations du Gard en octobre 2007 qui ont coûtées moins de 15 millions d'euros historiques, sont référencées par la CCR comme un événement «majeur»). Le même problème se pose

concernant la définition des événements «fréquents». En effet, bien que les inondations inférieures à une période de retour décennale n'entrent pas, théoriquement, dans le cadre du régime CatNat, il existe des situations où des événements inférieurs ou supérieurs à ce seuil sont respectivement acceptés ou refusés par la commission interministérielle CatNat (Bourguignon, 2014).

Le degré d'accessibilité aux rapports diffère largement selon les acteurs qui les produisent. Par exemple, un RETEX sous maîtrise d'ouvrage EDF est plus difficile à obtenir qu'un RETEX mené par l'administration centrale (Vinet, 2007).

Les données qualitatives et factuelles présentes dans certains rapports ne sont pas facilement mobilisables pour des traitements statistiques, car les RETEX ne sont pas standardisés et peu adaptés aux outils informatiques de gestion de base de données (beaucoup de RETEX sont des versions numérisées de rapports papiers).

Les informations présentes dans les RETEX sont rarement issues de traitements de données brutes, mais sont fondées sur des déclarations d'experts ou des données agrégées et non consolidées. De plus, le processus de collecte des données sur les dommages directs, les impacts sociaux et indirects est souvent négligé - notamment pour les petits événements.

Il existe donc aujourd'un un fort besoin de normalisation des RETEX et d'homogénéisation des pratiques afin de pouvoir :

- mener à plus grande échelle des études statistiques ;
- disposer d'une base de données exploitable des conséquences des inondations passées afin de mieux calibrer les modèles ;
- pouvoir mesurer les conséquences de mesures de prévention des risques.

Dans un rapport du Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (CGEDD) (Dantec et al., 2018), l'intérêt de la mise en place d'un dispositif formalisé de recueil des données est soulevée. Il propose la mise en place d'un dispositif global de collecte et de capitalisation des données et informations recueillies à l'occasion des inondations. L'utilisation de ces données permettrait d'améliorer la gestion locale et nationale des inondations et de contribuer à l'évaluation de l'efficacité des politiques publiques. Cette formalisation porte sur les données à recueillir et leur organisation, mais également les modalités de déclenchement du dispositif de retour d'expérience (seuils, périmètre géographique, autorité décisionnaire).

Les livrables de ce dispositif d'homogénéisation des RETEX seront :

- une base de données des dommages structurée avec niveau d'endommagement (échelle macro par quartier et si possible micro par bâti ou objet) ;
- une cartographie des dommages (échelle macro par quartier et si possible micro par bâti ou objet) ;
- un rapport d'analyse sur les dommages, recherche de facteurs de vulnérabilité.

## 1.2 LA POLITIQUE DE GESTION DES CATASTROPHES NATURELLES

### 1.2.1 Des stratégies de contrôle de l'inondation aux politiques de gestion du risque

Afin de réduire le risque d'inondation, les preneurs de décision disposent de deux orientations possibles : la réduction de l'aléa et la réduction de la vulnérabilité (Merz et al., 2014).

Traditionnellement, la réduction du risque d'inondation s'est concentrée sur la première option via la construction d'infrastructures, telles que des digues et ou des réservoirs de rétention, dans le but de contrôler les cours d'eau. De telles mesures, également appelées stratégies de contrôle de l'inondation ont pour but de réduire le risque d'inondation, c'est à dire la probabilité de survenance d'une inondation.

Ainsi, depuis longtemps en France, l'exhaussement des ouvrages de défense (digue, levée, murette) a été la solution mise en place après chaque inondation (CCR, 2016). Depuis les inondations de la Loire (1846, 1856, 1866) jusqu'au lendemain de la tempête Xynthia, ces ouvrages de défense continuent aujourd'hui d'être utilisés.

Cependant, ces mesures structurelles de contrôle des inondations ne résolvent pas le problème. Par exemple, Tobin (1995) étudie la confiance historique en les digues comme mesure de réduction des risques aux États-Unis alors que ce choix amène à un effet de levier : un fois qu'une digue a été construite, la structure peut générer un faux sentiment de sécurité ce qui mène alors à un plus grand développement dans les zones à l'arrière de la digue, une réduction de la sensibilisation au risque d'inondation et des prises de précaution. Ainsi, les mesures de protection amènent à un accroissement de la vulnérabilité et ce, quel que soit le niveau d'entretien.

De plus, bien que les défenses techniques contre les inondations soient essentielles pour la réduction des inondations extrêmes, elles ne sont efficaces que jusqu'à une certaine période de retour. Et, en cas de brèches ou de ruptures des ouvrages, la submersion se fait plus violente (Reghezza Zitt, 2012), comme cela a pu être observé lors de la tempête Xynthia ou de l'ouragan Katrina par exemple.

Les tentatives pour réduire la vulnérabilité, c'est à dire le second aspect du risque, ont été beaucoup moins mises en place (Vis, 2003). Cependant, au cours des 20 dernières années, on observe un glissement progressif des politiques publiques vers la gestion du risque d'inondation. La gestion du risque d'inondation peut être définie comme "une analyse, estimation et réduction sociétale globale et complète du risque d'inondation" (Schanze, 2008).

Cette évolution peut être décrite de façon condensée par trois développements (Merz, 2010) :

#### — La gestion de tous les risques d'inondation

Les politiques classiques se basent sur la définition d'un événement inondation de référence et la spécification de systèmes prévus pour pouvoir l'éviter. Au contraire, les politiques actuelles prennent en compte un large éventail d'événements, incluant des événements de plus grande et plus faible ampleur ou de nature différente (crues éclair, débordement, remontée de nappe, submersion...) associés à des probabilités de survenance. Ces politiques permettent de mettre l'accent sur la

réduction de la vulnérabilité et l'amélioration de la résilience afin de réduire les résultats négatifs alors que les approches normatives cherchent à répondre à certains mécanismes d'inondations particuliers et développent l'illusion d'une possible sécurité totale quant à la survenance des inondations (ISDR, 2004).

— **Prise de décision tenant compte du risque**

Les coûts et bénéfices des différentes options, ainsi que les potentiels impacts intangibles, forment la base de la prise de décision. L'accent est mis sur le choix d'une réponse proportionnée au risque afin que le montant investi dans la réduction du risque soit proportionnel à la magnitude du risque. Le processus d'estimation du risque est transparent et les résultats sont accessibles pour pouvoir être utilisés comme support de décision pour les preneurs de décision.

— **Approche holistique**

Le risque inondation n'est plus considéré seul mais dans le contexte d'autres fonctions de la rivière (Middlekoop, 2004), amenant à des études plus intégrées et holistiques. De plus en plus, les mesures techniques de défense contre les inondations sont complétées ou remplacées par des mesures visant à réduire les effets des inondations, tels que des systèmes d'alerte, des mesures d'urgence, des réglementations sur la planification territoriale, les normes de construction ou des solutions d'assurance.

Ces changements dans les politiques de gestion du risque d'inondation se reflètent dans la directive inondation européenne sur l'estimation et le management des risques d'inondation (European Commission, 2007). Elle impose de développer des plans de management pour les zones présentant un risque d'inondation significatif en mettant l'accent sur la réduction de la probabilité d'inondation et des conséquences potentielles sur la santé humaine, l'environnement et l'activité économique. Les plans de management du risque d'inondation sont ensuite intégrés sur le long-terme avec les plans de management du bassin versant de la directive cadre eau, contribuant à un management de l'eau global à l'échelle des bassins hydrographiques.

Plusieurs exemples peuvent être donnés pour représenter cette évolution dans la conception des politiques à privilégier face au risque d'inondation.

En Allemagne, les inondations des bassins de l'Elbe et du Danube ont déclenché un grand débat public et, le Comité Allemand pour la Réduction des Catastrophes (DKKV, 2003 cité par Merz, 2010) a conclu, entre autres que :

- la réduction des dommages potentiels, à travers l'aménagement du territoire, doit être la priorité principale ;
- les particuliers doivent être responsabilisés via des sensibilisations aux mesures de précaution et la publication de cartes de zones inondables et les risques résidentiels associés ;
- la gestion du risque d'inondation est un travail transversal et il nécessite donc la coopération entre les différentes parties prenantes ayant des intérêts différents, voire divergents, telles que la protection de la nature et celle de l'eau potable ou les besoins des zones rurales et urbaines ;
- toute mesure du risque d'inondation doit être considérée à l'échelle du bassin versant entier et peut donc s'étendre au delà des frontières politiques ;
- un débat public doit être mené sur le péril inondation et la vulnérabilité de la société.

Bien que cette étude ait reçu une large acceptation, l'implémentation de telles recommandations est difficile.

Au Royaume-Uni, le besoin d'une approche stratégique sur le risque inondation et la protection des côtes a été reconnu très tôt par le Ministère de l'Agriculture (MAFF and Welsh Office, 1993).

Les principes de la prise de décision fondée sur l'analyse des risques ont été posés par Meadowcroft et al. (1997). Depuis plus de 20 ans, l'approche fondée sur l'analyse des risques a été développée et mise en pratique (Hall et al., 2003; Evans et al., 2006) et a été progressivement améliorée grâce à l'enrichissement des jeux de données nationaux. Les inondations violentes de l'automne 2000 ont monté les inondations en haut de l'agenda politique et le gouvernement a alors lancé son projet d'anticipation des inondations et de défense des côtes (Evans et al., 2006) qui examine les changements possibles du risque d'inondation sur une fenêtre temporelle de 30 à 100 ans. L'étude analyse les facteurs de changement du risque d'inondation selon un éventail de scénarios climatiques et socio-économiques différents. L'analyse poursuit en explorant les réponses possibles et prône le besoin d'un portefeuille de mesures de gestion du risque d'inondation intégré, implémenté par étapes et adapté aux besoins particuliers de chaque localité. Ces recommandations ont été reprises par un document de politique du gouvernement "Faire de la place pour l'eau" (Defra, 2005).

### 1.2.2 La nécessité d'études quantitatives pour aider la prise de décision : Analyses Coûts-Bénéfices (ACB), Analyses Multi-Critères (AMC)

La mise en œuvre de ces politiques de gestion des risques d'inondation nécessitent donc des analyses quantitatives du risque d'inondation (Castillo-Rodriguez et al., 2016). Historiquement, ces analyses ont pris la forme d'ACB.

Généralement, ces études comparent un scénario de référence à un ou plusieurs scénarios envisagés par les preneurs de décision, correspondant aux différentes variantes du projet étudiées. Le scénario de référence est généralement le scénario actuel, sans implémentation de politiques de gestion des risques.

Pour chaque scénario, les dommages par type d'enjeux et par scénario seront calculés en cas de survenance d'une crue de référence ou via une approche probabiliste d'estimation des moyennes annuelles : dommages aux logements, aux entreprises non agricoles, aux entreprises agricoles, aux établissements publics etc... (Christin et al., 2014). Les dommages pris en compte dans les ACB correspondent souvent aux dommages directs tangibles.

Egalement, les coûts - actualisés - des projets sont estimés en intégrant les éléments suivants (Christin et al., 2014; Iggabel et al., 2014) :

- les coûts initiaux d'études préalables ;
- les coûts initiaux d'investissements propres à chaque projet, et détaillés par mesure ;
- les coûts annuels d'entretien, de fonctionnement, de contrôle propres à chaque programme de mesure, et détaillés par mesure ;
- les coûts de réparation éventuels en cas d'endommagement ou de rupture de l'ouvrage ;

— les coûts « cachés », par exemple ceux des mesures compensatoires le cas échéant.

L'étude de ces projets permet ensuite d'en déduire des indicateurs permettant leur comparaison. Premièrement, cela permet de quantifier les dommages moyens annuels causés par les inondations et le nombre moyen annuel d'enjeux en zone inondable. Cela permet de calculer un certain nombre d'indicateurs pour chaque projet tels que l'efficacité, le coût-efficacité ou l'efficacité par comparaison avec le coût de mise en place du projet. Ces informations permettent ainsi d'orienter le choix des preneurs de décision.

L'utilisation d'ACB est une première approche qui intègre dans le périmètre de l'étude des considérations uniquement économiques. Cependant, elle n'est pas suffisante si on souhaite intégrer les impacts intangibles dans l'étude. En effet, la démarche ACB impliquerait soit de ne pas les intégrer à l'étude, soit de donner une estimation de la valeur monétaire des pertes intangibles. Si des méthodes existent (Dassanayake D. R. et al., 2015), elle restent aujourd'hui largement discutables tant aux niveaux méthodologiques qu'éthiques.

Les AMC permettent de représenter les impacts social, environnemental et culturel via le développement d'indicateurs adéquats (Christin et al., 2014). Ces indicateurs peuvent être quantitatifs (exemples dans le tableau suivant) ou qualitatifs.

TABLE 1.5 – Exemples d'indicateurs quantitatifs dans une AMC

Type de conséquence	Indicateurs
Santé humaine	Nombre de personnes vivant en zone inondable et part communale
Santé humaine	Part des personnes habitant dans des logements de plain-pied en zone inondable par commune
Santé humaine	Capacités d'accueil des établissements sensibles en zone inondable
Santé humaine	Part de bâtiments participant directement à la gestion de crise hors et en zone inondable
Economie	Trafic journalier des réseaux de transport en zone inondable
Economie	Part d'entreprises aidant à la reconstruction après une inondation dans les communes exposées
Economie	Nombre d'emplois en zone inondable
Environnement	Stations de traitement des eaux usées en zone inondable : charge journalière entrante
Environnement	Déchets : capacités de traitement et de stockage en zone inondable
Environnement	Nombre de sites dangereux en zone inondable
Patrimoine	Nombre de bâtiments patrimoniaux et de sites remarquables en zone inondable

Source : Christin et al., 2014

Les analyses AMC doivent intégrer à l'étude la quantification de l'incertitude. Les méthodes conventionnelles de prise de décision en prenant compte des risques représentent l'incertitude en termes probabilistes et établissent ensuite un classement entre les différentes options sur la base de l'utilité espérée. Cette approche de la prise de décision est centrale pour le management du risque d'inondation qui considère la probabilité et les conséquences d'un large éventail de conditions d'inondations.

### 1.2.3 Exemple : La politique de prévention et de gestion du bassin de la Seine de 1910 à nos jours

De par sa situation à la confluence des différents affluents de la Seine, l'Ile-de-France et sa région-cœur sont donc particulièrement exposées à une crue majeure de la Seine. La politique de gestion du risque d'inondation du bassin de la Seine est un bon exemple et son évolution a été retracée par Moncoulon D. et Desarthe J. (2016). Nous reprenons ici l'étude pour illustrer nos propos.

#### 1.2.3.1 La gestion de crise lors de la crue de janvier 1910

Lors de la crue de 1910, en l'absence de mesure sur la prévention du risque inondation - les premiers plans ne verront le jour qu'en 1935 avec le Plan de Surface Submersible - l'essentiel du système de prévention et d'alerte pour le bassin de la Seine repose sur le système d'annonce de crue mis en place par Belgrand en 1854. Ce système semble avoir fonctionné correctement en janvier 1910, les autorités ayant été averties et les services météorologiques soulignant le 23 janvier que la ville doit se préparer à une crue de type 1876 (6,69 mètres). Contrairement à la gestion des crues passées, les autorités ont fait preuve d'inertie, ne délibérant sur la question qu'à partir du 26 janvier (Desarthe, 2013). Les mesures prises ont donc été des mesures de gestion de la situation de crise et non de prévention.

#### 1.2.3.2 La construction d'ouvrages de protection

La crue de 1910 a permis de mettre en avant la nécessité de la mise en place d'une politique de gestion du risque inondation (commission Picard 1910, la commission Dusuzeau en 1924). Ce faisant, tout au long du XXème siècle et suivant le rythme du fleuve, différents aménagements ont été réalisés dans la perspective de réduire la vulnérabilité de la région.

La pratique la plus ancienne consiste à exhausser des murettes. Actuellement pour Paris, les murettes sont au niveau de la crue de 1910, dans le Val-De-Marne de celle de 1955 et en Seine-Saint-Denis de celle de 1924 (Reghezza Zitt, 2012).

Le creusement du lit de la Seine est une pratique également ancienne. En 1876, au lendemain de l'inondation, les bras de l'île Saint-Louis et de la Cité sont en effet approfondis afin d'abaisser la ligne d'eau (Reghezza Zitt, 2012). En 1924, de nouveaux travaux sont réalisés. Parallèlement, des aménagements sont réalisés comme la reconstruction de ponts ou encore la réfection des barrages-écluses.

À la suite de la sécheresse de 1920 et de l'inondation de 1924, le ministère des Travaux Publics approuve la construction de barrages visant à créer une réserve d'un milliard de

mètres cubes utilisables aussi bien lors des crues que lors des étiages pour maintenir la Seine à un niveau optimum afin de répondre aux usages domestiques et professionnels. Ces grands travaux ont été effectués progressivement au cours de la seconde moitié du XXe siècle. Aujourd'hui, quatre lacs-réservoirs d'une capacité totale de 807 millions de mètres cubes sont chargés d'assurer la régulation du bassin amont de la Seine (Données extraites du site de l'EPTB Seine Grands Lacs). Le projet de « La Bassée » permettrait à l'horizon 2020 de porter cette capacité à 862 millions de m<sup>3</sup>.

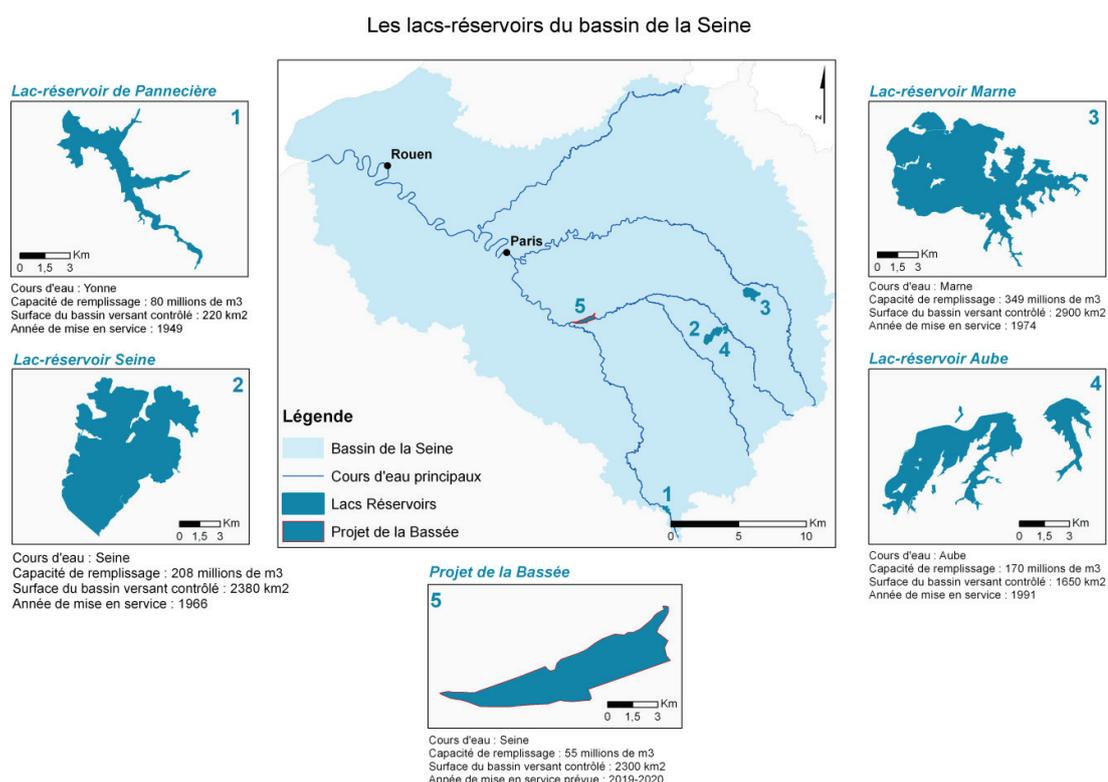


FIGURE 1.3 – Les lacs-réservoirs du bassin de la Seine

Source : Données extraites du site de l'EPTB Seine Grands Lacs, <http://www.seinegrandslacs.fr/>

Sur une crue type 1910, l'action optimale des 4 lacs-réservoirs permettrait de diminuer le niveau de l'eau à Paris de près de 60 cm (OCDE, 2014). Les effets de protection des lacs-réservoirs peuvent cependant être limités si la crue intervient plus tardivement dans la saison alors qu'ils sont déjà partiellement remplis, ou dans le cas de successions de crues de forte intensité contribuant à saturer les ouvrages. Ces deux conditions ont été réunies lors de la crue de la Seine de mai-juin 2016.

La directive européenne sur les inondations recommande de s'intéresser à des inondations avec des périodes de retour plus grandes, de l'ordre de 1000 ans. C'est dans ce contexte qu'un scénario plus extrême est étudié par la DRIEE, avec un débit supérieur de 40% à celui de la crue de 1910.

Pour le bassin de la Seine, les niveaux de protection restent inégaux et sont en dessous du niveau centennal en dehors de la ville de Paris, ce qui est en deçà des standards de protection dans beaucoup de zones à risques des pays de l'OCDE (tableau suivant). Cependant, l'évaluation des risques d'inondation préconisée dans le cadre de la directive

n'intègre pas le rôle joué par les barrages-réservoirs.

TABLE 1.6 – Niveaux de protection dans les grandes métropoles de l'OCDE

Ville	Niveau de protection	Zone protégée	Date de mise en œuvre
Agglomération parisienne	100 ans	Paris	Existant
	30-50 ans	Petite Couronne	Existant
Frankfort	200 ans	Nouveaux quartiers et infrastructures critiques	Existant
	100 ans	Zone urbaine	Existant
Londres	1 000 ans	Zones côtières	Existant
	10 000 ans	Zones côtières	Objectif 2100
New York	100 ans	Zones côtières	Projet 2020

Source : OCDE, 2014

### 1.2.3.3 La politique de prévention

Dans le cadre des travaux de préparation à la crise, le Secrétariat de la Zone de Défense de Paris de la Préfecture de Police a développé un dispositif de réponse pour différents scénarios d'inondation, le dispositif ORSEC (Organisation de la Réponse de Sécurité Civile). Il a mis en place pour cela des groupes de travail avec l'ensemble des acteurs concernés depuis plusieurs années sur :

- **Les réseaux structurants** : électricité, hydrocarbures, télécommunication et eau ;
- **Les secteurs d'activités essentielles** : approvisionnements (distributions d'essence, grande distribution, circulation fiduciaire), santé, hygiène et confort (déchets, chauffage urbain, assainissement), transport, circulations et secteurs spécifiques (immeuble de grande hauteur, quartier d'affaires de la Défense) ;
- **Les procédures de soutien à la gestion de crise** : cadre juridique, sécurité publique, secours, bases opérationnelles et logistiques, plan d'acheminement des personnels pour la gestion de crise.

Concrètement, un dispositif par étape en fonction de la prédiction du niveau de la Seine prévue par le Service de Prédiction des Crues (SPC) active les différents plans de secours sectoriels :

- **En vigilance jaune** (de 3.2 à 6.1 m), les voies sur berges sont progressivement fermées, la navigation sur la Seine interdite et certains acteurs se prémobilisent pour la mise en œuvre de leur plan de secours (RATP pour le métro, ERDF pour l'électricité et l'Agence Régionale de Santé). À partir de 5,50 m le plan Neptune de mobilisation de l'armée est activé et les opérateurs publics et privés mettent en place les premières mesures de protection ;
- **En vigilance orange** (de 6.1m à 7.13 m), un plan de circulation minimal est mis en place à Paris, le Plan de continuité du travail gouvernemental est activé, le tunnel du RER C est ennoyé préventivement, la RATP commence à fermer son réseau et boucher l'ensemble des entrées d'eau du métro. Les premiers dommages sont perceptibles en grande couronne ;
- **En vigilance rouge** (de 7.13 m à 8.62 m), l'eau de la Seine commence à dépasser les berges en petite couronne et les premiers niveaux de sous-sols sont inondés. La

fourniture d'électricité s'interrompt progressivement en zone inondable et au-delà. Des générateurs sont mis en place par les équipes d'ERDF (1000 groupes électrogènes de puissances variables disponibles). L'évacuation de 20 000 véhicules des parkings vers des zones de stationnement pré-identifiées est organisée.

Au-delà, il s'agit du scénario le plus extrême dans lequel l'inondation prend une très large ampleur. Les services de secours mettent en place l'ensemble des plans sectoriels, organisent un circuit de distribution d'eau en bouteille, d'alimentation, d'hydrocarbures pour les générateurs. Les banques mettent en place des distributeurs de billets mobiles, les opérateurs télécom déploient des antennes mobiles supplémentaires, un grand centre de collecte des déchets de l'inondation s'organise à la Porte de Versailles. Des bases opérationnelles réquisitionnées sont mises en place au Nord à Villepinte et au Sud de Paris pour accueillir secours et ressources du reste de la France et d'Europe.

Ce dispositif validé par la Préfecture de Police en 2010 est en constante évolution et renforcement sous l'égide de la Zone de Défense de Paris. Il repose sur l'implication et l'engagement de nombreux acteurs des secteurs publics et privés. La mise en œuvre de ce dispositif aura aussi un coût, difficile à évaluer.

#### 1.2.3.4 Exposition et vulnérabilité

Centre politique, économique et culturel au niveau national, la région Ile-de-France concentre populations, emplois et centres de décisions. Elle est ainsi la plus riche et la plus peuplée des 22 régions administratives de France. Composée de 8 départements et de 1 281 communes, sa population s'élève à 11.9 millions d'habitants, soit 19% de la population française. La région est l'une des plus riches et plus larges d'Europe : son PIB total s'élève à 572 milliards d'euros en 2009, représentant 30% du PIB national et 5% du PIB européen. Avec 6 millions d'emplois, ce bassin d'emploi majeur en France et en Europe, concentre les emplois les plus qualifiés et les grandes entreprises du pays avec leurs centres de décision (37% des cadres et 39% des employés des grandes entreprises) (Données INSEE).

Les flux nationaux et internationaux s'y croisent au quotidien faisant de la région parisienne un hub européen et mondial. Dans son analyse des aires métropolitaines françaises qui évalue les relations entre les territoires autour d'un centre, la DATAR parle d'un grand système intégré de 17 millions d'habitants (incluant Caen, Rouen, Amiens, Le-Mans et Orléans) connecté à la région parisienne dans son fonctionnement quotidien. La relation à l'aire urbaine de Paris est aussi constitutive de l'ensemble des systèmes urbains français (DATAR, 2012). Elle est le premier exportateur et importateur du pays. La région est la deuxième région européenne attirant le plus d'Investissements Directs Étrangers. Accueillant le premier hub aérien d'Europe continentale, elle est aussi la première destination touristique mondiale et est au tout premier rang européen pour l'organisation de salons internationaux.

Ce dynamisme régional qui participe à irriguer l'ensemble de l'économie nationale et européenne repose sur des infrastructures critiques essentielles au fonctionnement métropolitain, et notamment les réseaux de transport, d'énergie, de communication, d'eau. L'interdépendance de l'ensemble de ces réseaux les uns avec les autres, l'interpénétration des chaînes de production et leur fonctionnement en flux tendus (en mode zéro-stock), le rôle clé de la mobilité des personnes et des échanges pour le fonctionnement et le dyna-

misme de l'économie, l'urbanisation et la concentration des populations et des capitaux sont autant de facteurs-clés de l'accroissement de la vulnérabilité des sociétés modernes aux chocs (OCDE, 2011). L'ouragan Katrina en 2005, les inondations dues à la tempête Sandy à New York en 2012, les inondations de 2011 à Bangkok et à Brisbane ou encore celles de Prague en 2002 ont démontré l'impact dévastateur que de tels événements pouvaient avoir sur le fonctionnement, le bien-être et l'économie des grandes métropoles. Effets en cascade d'un secteur vers un autre, impacts sur des régions non directement touchées et au-delà à l'international sont autant de conséquences auxquelles les pays de l'OCDE doivent pouvoir se préparer en cas de crise majeure.

Si le risque d'inondation de la Seine en Ile-de-France a été réduit par les travaux de protection, en revanche, l'exposition au risque et la vulnérabilité qui en résulte ont aussi été accrues concomitamment par l'urbanisation croissante de la première région française ainsi que la construction de nombreuses zones d'activités, d'infrastructures et de réseaux critiques (transport, énergie, communication, eau) au fil du fleuve et dans d'autres zones exposées par effet de levier, le sentiment de sécurité favorise le développement urbain à l'arrière des protections.

#### 1.2.4 Conclusion : la prise de décision en situation de forte variabilité

Quatre domaines d'études sont fondamentaux pour le développement d'un plan stratégique global de gestion du risque inondation (Merz et al., 2010) :

- la gouvernance : qui est responsable ? Qui agit et peut agir ? Qui réagira efficacement ?
- la planification de l'occupation des sols : quel développement de l'occupation des sols est adéquat lorsqu'on considère les problématiques environnementales, sanitaires, sociales et économiques des zones inondables ou non. Une adaptation aux événements d'inondation est nécessaire dans cette planification pour réduire les dommages potentiels et permettre une reprise plus rapide. C'est-à-dire quel niveau de vulnérabilité on accepte ;
- la planification des mesures d'urgence : plans pour le management des crises, multiplier les scénarios pour obtenir une meilleure réactivité ;
- le schéma de financement : Assurances et financements publics. Des assurances inondation qui pourraient inclure les effets dominos même en dehors de la zone inondée.

Pour ce faire, des études du risque d'inondation, de ses conséquences et des coûts & bénéfiques des différentes politiques de gestion du risque sont nécessaires.

Cependant, l'étude du risque d'inondation et de ses impacts comporte de nombreuses incertitudes. Hall et Solomatine (2008) ont passé en revue les sources d'incertitude des études sur le risque d'inondation, à savoir :

- les incertitudes relatives à la modélisation de l'aléa et de ses dommages ;
- l'évaluation du coût des différentes options de gestion du risque d'inondation ;
- le choix du taux d'actualisation qui signifie de prendre également en compte la préférence temporelle : taux d'actualisation faible implique politique de long terme alors que taux d'actualisation élevé implique politique de court termes.

A cela s'ajoute l'incertitude sur l'évolution future de l'aléa du fait du changement

climatique impactant sa fréquence et sa sévérité par exemple et sur l'évolution de la vulnérabilité. Certains processus socio-économiques, tels que la croissance de la population et le développement économique, peuvent changer très rapidement, et l'exposition et la vulnérabilité aux inondations (via l'occupation du sol par exemple) peuvent être très dynamiques. De plus, le choix de politique de gestion du risque d'inondation peut également générer des changements dans l'évolution de l'exposition. Par exemple, à la suite de la mise en place de certaines mesures de protection, on peut observer une augmentation rapide de la vulnérabilité appelée effet de levier, la baisse du risque d'aléa incitant les populations et activités économiques à se développer dans cette région.

Ainsi, les tendances futures peuvent être différentes des tendances observées dans le passé. Or, beaucoup d'études posent l'hypothèse que ces deux variables sont constantes (stationnaires). Introduire la dépendance au temps dans les analyses du risque est une option pour approcher le changement dans le péril inondation. Cependant, prendre en compte les changements possibles de ces deux variables peut faire exploser les incertitudes, rendant alors d'autant plus difficile la prise de décision (Milly et al., 2008).

Alors que la modélisation non-stationnaire du péril inondation est un travail complexe, l'intégration de non-stationnarité dans l'estimation et la modélisation de la vulnérabilité l'est encore plus. Khaliq et al. (2006) mettent en avant l'importance d'une interprétation prudente de la non-stationnarité des extrêmes pour lesquels les variations des paramètres entraînent une volatilité très forte des résultats.

Cependant, si ce type d'étude présente de grandes incertitudes, elles sont importantes à mener afin de se rendre compte de l'ampleur potentielle de l'évolution de l'aléa et de l'exposition sur les impacts futurs des inondations. Dans une étude menée en 2015, le service R&D modélisation de la Caisse Centrale de Réassurance en partenariat avec Météo France a mené des travaux de modélisation détaillés visant à évaluer l'impact financier du changement climatique sur le régime français d'indemnisation des catastrophes naturelles à perspective 2050 (CCR, 2015). Cette étude prend en compte l'évolution des valeurs assurées et le changement climatique, sur la base d'un scénario médian du GIEC, considéré par Météo France comme plausible scientifiquement.

Au global, la sinistralité Cat Nat causée chaque année par des événements climatiques (inondations par débordement et ruissellement, submersions marines et sécheresse) en métropole devrait doubler d'ici 2050 en raison à 80% de l'évolution des valeurs assurées et de leur répartition géographique et à 20% du changement climatique. Pour ce qui est des inondations par débordement et ruissellement, l'étude estime une hausse de 20% des pertes annuelles moyennes due à l'effet du changement climatique, principalement liée à l'augmentation des phénomènes cévenols.

### 1.3 AMÉLIORATION DE LA RÉSILIENCE DES SOCIÉTÉS : LES SYSTÈMES DE TRANSFERT DES RISQUES

La couverture des risques naturels en France regroupe plusieurs dispositifs de couverture qui, de par leur complémentarité, apportent une réponse à un large éventail de conséquences, qu'elles soient causées par des périls assurables ou non assurables :

- les dommages aux biens résultant de phénomènes naturels assurables (tempêtes, grêle, poids de la neige, gel) relèvent de garanties contractuelles, facultatives ou obligatoires, et ne relèvent donc pas du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles mais du système assurantiel classique ;
- les dommages causés aux récoltes non engrangées, aux cultures, aux sols et au cheptel vif hors bâtiment relèvent de l'indemnisation par les contrats grêle et multi-risques récoltes ou à défaut, sont pris en charge par le Fonds National de Gestion des Risques en Agriculture (FNGRA), qui couvre notamment les dommages non assurables subis par les exploitations agricoles ayant été reconnus par un arrêté du ministère de l'agriculture ;
- le Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM), tout d'abord destiné à financer les indemnités d'expropriation de biens exposés à un risque naturel majeur, a ensuite été élargi à d'autres catégories de dépenses : acquisitions amiables, études et travaux imposés par un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN), reconnaissance et comblement de cavités souterraines, campagne d'information sur la garantie catastrophes naturelles ;
- tous les autres dommages causés par des risques naturels non assurables sont couverts dans le cadre du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles (ci-après régime Cat Nat) institué par la loi du 13 juillet 1982.

#### 1.3.1 Le Régime d'indemnisation des catastrophes naturelles (Régime Cat Nat)

##### 1.3.1.1 Les principales caractéristiques de la garantie « catastrophes naturelles »

La garantie Cat Nat n'est pas une assurance obligatoire mais une extension de garantie obligatoire à tout contrat d'assurance « dommages » couvrant un bien situé en France métropolitaine et dans une grande partie de l'Outre-mer.

Le régime Cat Nat est un système reposant sur un partenariat Public-Privé entre l'État et les assureurs. Il passe donc par les réseaux de l'assurance mais l'État régule les caractéristiques clés du contrat, à savoir :

- la déclaration de l'état de catastrophe naturelle ;
- la définition des périls couverts ;
- la tarification ;
- les franchises.

##### 1.3.1.2 Les catastrophes naturelles couvertes par le régime

La loi du 13 juillet 1982 (article L. 125-1 du code des assurances) ne comporte pas de liste de périls couverts, elle n'indique pas non plus les périls exclus, lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises. L'article 1 de cette loi décrit seulement ce qui est considéré comme étant les effets d'une catastrophe naturelle, à savoir les « dommages matériels directs non

assurables ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel».

La liste des aléas pouvant être à l'origine d'une catastrophe naturelle est non limitative aujourd'hui. Dans la pratique les périls entrant actuellement dans le champ d'application du régime sont les suivants :

- les inondations (ruissellement, débordement, remontée de nappe phréatique, rupture de barrage causée par un phénomène naturel);
- les coulées de boue;
- les séismes;
- les mouvements de terrain (y compris sécheresse);
- les affaissements de terrain dus à des cavités souterraines et à des marnières (sauf mines);
- les raz-de-marée;
- les avalanches;
- les vents cycloniques de grande ampleur (supérieurs à 145 km/h en moyenne sur 10 mn ou 215 km/h en rafales).

Cette liste n'est cependant pas exhaustive.

### 1.3.1.3 Biens garantis

Le régime impose l'inclusion d'une extension de garantie catastrophes naturelles dans tout contrat d'assurance « dommages ». Cette extension couvre les dommages matériels directs causés par une catastrophe naturelle pour un bien situé en France métropolitaine et dans une grande partie de l'Outre-mer et ce, quel que soit le statut du sinistré (particulier, entreprise...) (CCR, 2017).

Concrètement, sont couverts les biens immeubles et meubles, y compris véhicules terrestres à moteur, assurés contre les dommages d'incendie ou tout autre type de dommage (vol, dégât des eaux, etc) (CCR, 2013). A titre indicatif :

- les habitations et leur contenu;
- les installations industrielles et commerciales et leur contenu;
- les bâtiments appartenant aux collectivités locales et leur contenu;
- les bâtiments agricoles (y compris les récoltes, machines ou animaux se trouvant à l'intérieur desdits bâtiments);
- les serres considérées en tant que bâtiment ou matériel (à l'exclusion des cultures qu'elles abritent);
- les véhicules;
- les accessoires et équipements automobiles si leur couverture est prévue dans le garantie de base;
- les clôtures, murs de soutènement ou fondations s'ils sont couverts par le contrat;
- éventuellement les forêts lorsqu'elles sont assurées par un contrat « dommages aux biens »;
- les frais de déblai, de démolition, de pompage et de nettoyage.

Les contrats « perte d'exploitation » sont aussi systématiquement assortis de la garantie légale. Dans ce cas, celle-ci prend en charge la perte de bénéfice brut et les frais supplémentaires d'exploitation pendant la période d'indemnisation du contrat.

### 1.3.1.4 Etendue de la garantie

Les dommages sont indemnisés à concurrence de leur valeur fixée au contrat et dans les limites et conditions prévues par ce contrat lors de la première manifestation du risque (<https://www.ffa-assurance.fr/>). La circulaire du 27 mars 1984 précise la définition de dommages matériels directs :

- dommages matériels : sont garantis les dommages portant atteinte à la structure ou à la substance de la chose. Ceci exclut les pertes relatives à la valeur vénale des fonds de commerce par exemple, et, d'une manière générale, tout dommage incorporel;
- dommages directs : le dommage doit être la conséquence première de la catastrophe naturelle. Sont exclus par exemple les dommages consécutifs à la coupure du courant électrique, elle-même consécutive à la catastrophe naturelle.

Les sinistres sont réglés sur la base de la garantie « dommages » du contrat ayant la portée la plus étendue (ex. : la garantie incendie dans les contrats « multirisques »). Les modalités d'indemnisation sont identiques à celle de la garantie de base (ex. : règlement en valeur à neuf si cette extension est prévue dans la garantie de base).

### 1.3.1.5 La tarification

Elle met en œuvre un principe de solidarité car elle s'applique de la même façon pour tous les assurés : il n'y a pas de modulation de prime selon l'exposition, le type de bien ou sa construction. Les taux de prime additionnelle Cat Nat sont fixés par l'État, au moyen d'un arrêté. Les taux actuels sont :

- pour les biens autres que véhicules à moteur : 12% de la prime afférente aux garanties dommages du contrat de base;
- pour les véhicules terrestres à moteur : 6% des primes vol et incendie (ou à défaut, 0,50% de la prime dommage).

Il est à noter qu'un prélèvement de 12% est opéré sur la prime additionnelle afin de financer le Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM). La prime Cat Nat nette de FPRNM s'élève donc :

- pour les biens autres que véhicules à moteur :  $12\% \times (1 - 12\%)$  de la prime afférente aux garanties dommages du contrat de base;
- pour les véhicules terrestres à moteur :  $6\% \times (1 - 12\%)$  des primes vol et incendie (ou à défaut,  $0,50\% \times (1 - 12\%)$  de la prime dommage).

### 1.3.1.6 Les franchises minimales légales

Les franchises minimales légales sont fixées par l'Etat, obligatoires et non rachetables. Depuis le 1er janvier 2001, elles s'établissent comme suit :

TABLE 1.7 – Franchises du régime Cat Nat

<b>Biens à usage non professionnel</b>	Dommages Directs	380 €
<b>Biens à usage professionnel</b>	Dommages Directs	10%, mini 1 140 €*
	Pertes d'exploitation	3 jours ouvrés, mini 1 140 €*

\* sauf franchise supérieure prévue par le contrat

Depuis le 1er janvier 2001, dans les communes dépourvues de plan de prévention des risques, les franchises peuvent être modulées au-delà de deux arrêtés de reconnaissance portant sur le même type de péril sur une période de 5 ans (sauf pour les contrats automobile) selon la méthode suivante (<https://www.ccr.fr/>) :

- 1 à 2 reconnaissances : franchise de base ;
- 3 reconnaissances : doublement de la franchise ;
- 4 reconnaissances : triplement de la franchise ;
- 5 reconnaissances et plus : quadruplement de la franchise.

Cette modulation est suspendue dès la prescription d'un Plan de Prévention des Risques (PPR) pour le péril concerné mais elle est réactivée en cas d'absence d'approbation de ce PPR à l'issue d'un délai de quatre ans. Elle a pour objectif d'inciter à la mise en œuvre d'un PPR par les communes très exposées aux catastrophes naturelles. Cette modulation ne s'applique pas aux véhicules terrestres à moteur.

### 1.3.1.7 Le fonctionnement du régime

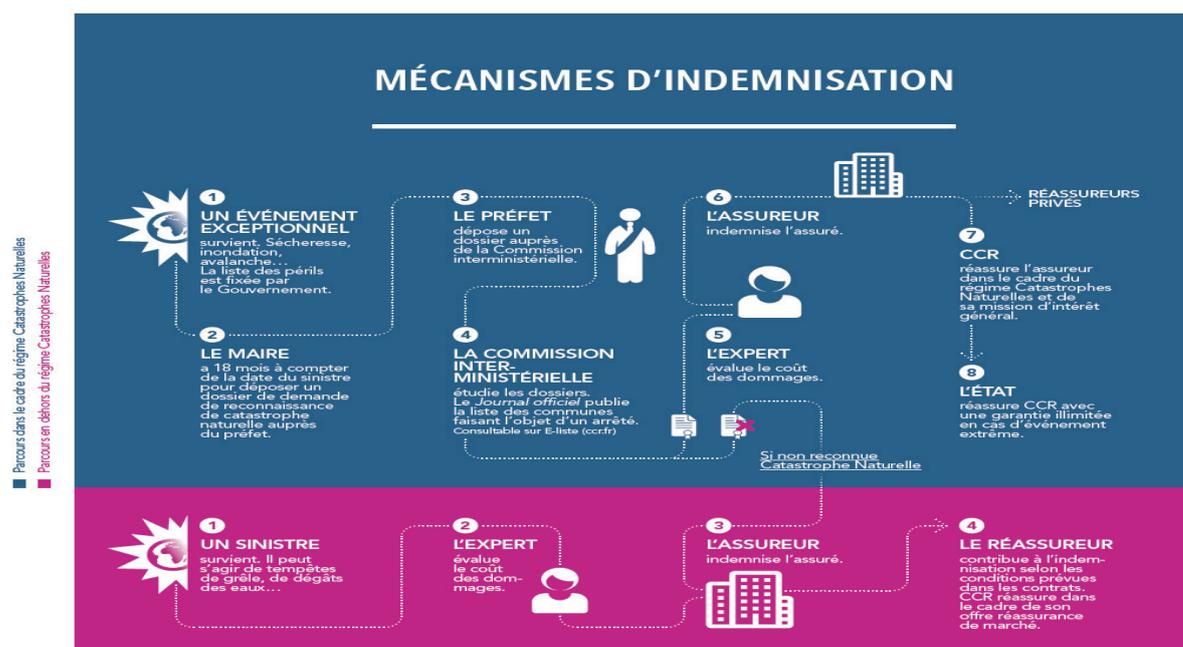


FIGURE 1.4 – Mécanismes d'indemnisation du régime Cat Nat

Source : <https://www.ccr.fr/-/indemnisation-des-catastrophes-naturelles-en-france>

La reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ouvre droit à une indemnisation au titre des contrats d'assurance. Cette reconnaissance est sollicitée par les communes et étudiée par une commission interministérielle. Pour les inondations, la reconnaissance est octroyée à partir du seuil de période de retour décennal.

L'État participe via l'offre de sa garantie illimitée au régime Cat Nat, à travers la réassurance publique - non obligatoire - proposée par CCR.

### 1.3.1.8 Conclusion

La figure ci-dessous présente l'évolution du montant des indemnisations au titre du régime Cat Nat sur la période 1982-2017, actualisé en intégrant l'évolution des valeurs assurées et pour l'ensemble du marché français (Métropole et Outre-Mer). Elle concerne les périls inondations, sécheresse et tous les autres périls confondus (mouvements de terrain, séismes, avalanches, vents cycloniques, etc.). La sinistralité des exercices récents est non consolidée (péril sécheresse depuis 2013, péril inondations et autres périls depuis 2016).

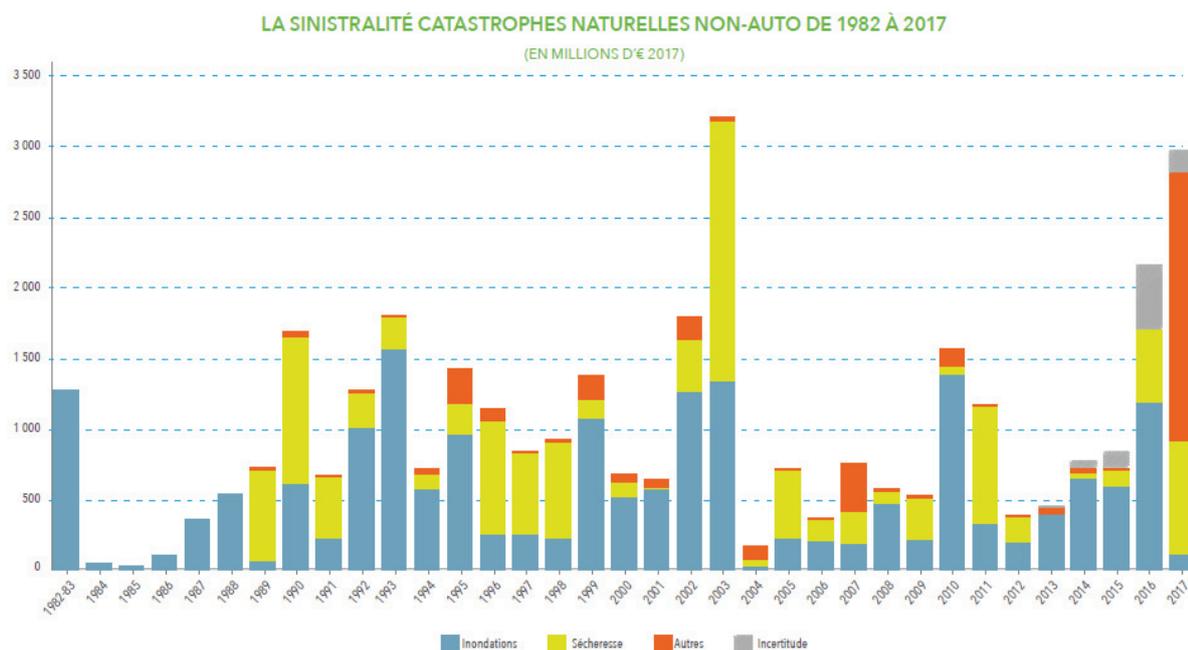


FIGURE 1.5 – Estimation du montant ultime des indemnisations actualisé en €2017

Source : CCR, 2019

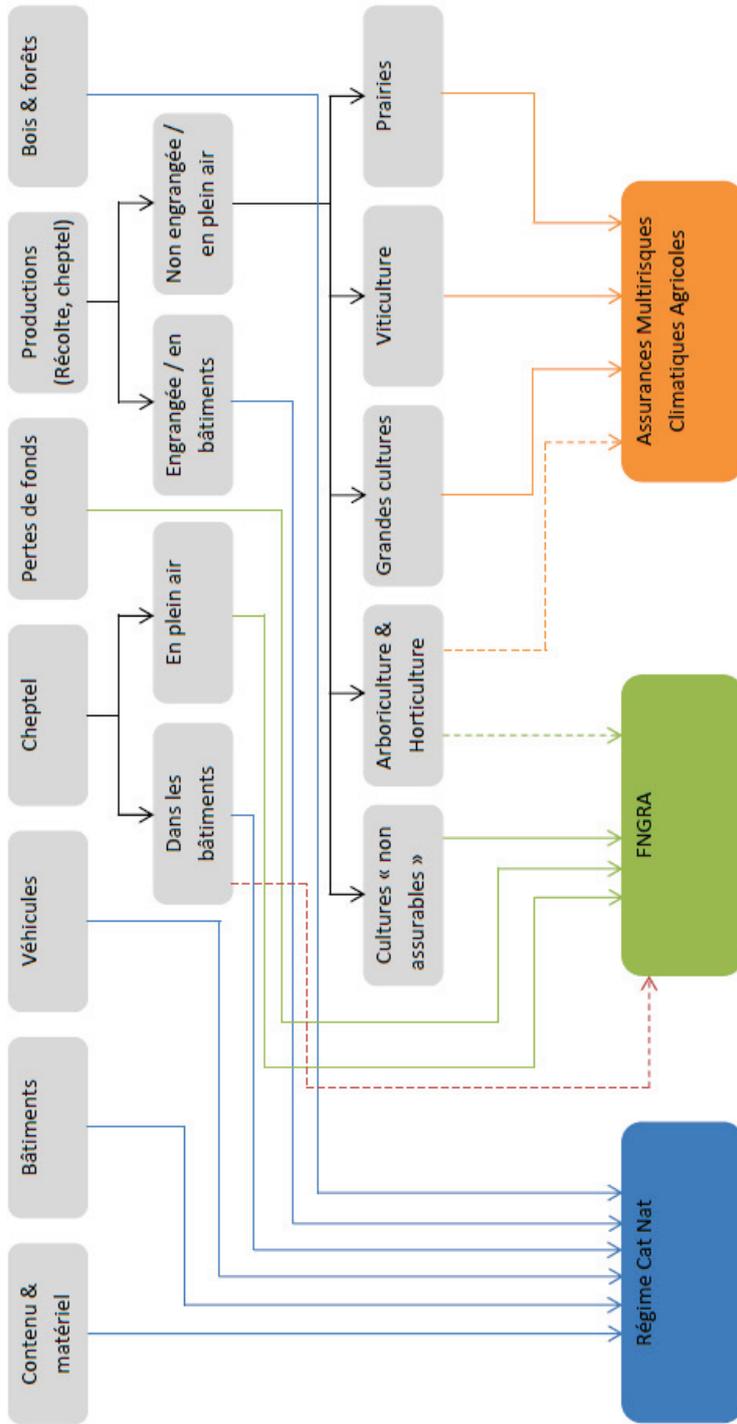
On peut noter que les inondations représentent 56% des indemnisations au titre du régime Cat Nat. Les coûts causés par cet aléa varient fortement en fonction des années avec une sinistralité annuelle moyenne de 526 millions d'euros. C'est sur ce péril que nous avons décidé de travailler.

### 1.3.2 Les systèmes de transfert de risque dans le secteur agricole

L'objectif de ces travaux est notamment de comprendre et modéliser l'impact des inondations sur le secteur agricole. Dans ce cadre, il est important de faire la distinction entre les pertes totales et les pertes financières réelles subies par les exploitants. Les pertes financières sont le coût réel supporté par l'exploitant. Ce sont donc les pertes totales moins les indemnisations obtenues via les différents systèmes de transfert de risque par lesquels les exploitants sont couverts. Cette distinction est importante car elle permet d'estimer le reste à charge pour l'exploitant ; ce reste à charge conditionnant la capacité de l'exploitant à rebondir face à la situation post-inondation.

L'étude de la répartition des pertes entre les différents systèmes de transfert de risque

permet également de mieux cibler les besoins des exploitants agricoles et d'adapter les politiques d'aides. Outre des aides pouvant être mises en place de façon ad hoc lors d'événements particulièrement exceptionnels, les agriculteurs sont ou peuvent également être couverts par plusieurs systèmes de transferts de risque, à savoir : le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles (Régime Cat Nat), le Fonds national de gestion des risques en agriculture (FNGRA) et les assurances récoltes. Ces systèmes sont complexes et interdépendants, et une clarification de leurs rôles respectifs peut s'avérer utile. Avant de décrire en détail le fonctionnement de chacun de ces systèmes, la figure suivante schématise leur fonctionnement global.



- ↑ Si reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle
- ↑ Si reconnaissance de l'état de calamité agricole
- ↑ Si **non** reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle
- ↑ Suivant les modalités du contrat d'assurance
- ↑ En arboriculture et horticulture les agriculteurs ont le choix entre les deux options
- ↑

### 1.3.2.1 Application du Régime Cat Nat au secteur agricole

Dans le cas des pertes pour le secteur agricole, lors de la survenance d'un événement, si l'état de catastrophe naturelle est constaté par un arrêté interministériel, le régime Cat Nat couvre :

- les bâtiments d'exploitation (le contrat peut fusionner les garanties pour les bâtiments d'exploitation et d'habitation) ;
- leurs contenus : mobilier, marchandises et matériel ;
- les véhicules ;
- le cheptels dans les bâtiments ;
- les récoltes engrangées ;
- les bois et forêts (hors pépinières).

Lorsque les bâtiments agricoles et la maison d'habitation font partie du même bâtiment, seule la franchise prévue pour les biens à usage professionnel est applicable.

Les agriculteurs doivent déclarer un état estimatif de leurs dommages et pertes matériels au plus tard dans les dix jours qui suivent la parution de l'arrêté interministériel au Journal officiel.

Sauf cas de force majeure (par exemple, après une inondation, tant que la décrue ne permet pas aux experts d'évaluer le préjudice), l'assureur verse l'indemnité dans un délai de trois mois à compter :

- soit de la date à laquelle l'agriculteur lui a remis l'état estimatif des dommages et pertes subis ;
- soit, si elle est plus tardive, de la date de publication de l'arrêté interministériel constatant l'état de catastrophe naturelle.

### 1.3.2.2 Le Fonds national de gestion des risques en agriculture

Le Fonds national de gestion des risques en agriculture (FNGRA) a été créé en 2010 (loi n.2010-874), en remplacement du Fonds national de garantie des calamités agricoles (FNGCA) lui aussi géré par CCR depuis sa création en 1964. Les modalités d'intervention du FNGRA, limité au territoire français, sont fixées par décret. Il a plusieurs missions :

- le premier rôle, auquel on ne s'intéresse pas ici, consiste au financement de l'indemnisation des pertes économiques liées à l'apparition d'un foyer de maladie animale ou végétale ou à un incident environnemental, par des fonds de mutualisation agréés par l'autorité administrative ;
- le deuxième rôle est l'indemnisation des calamités agricoles et intervient pour les récoltes non engrangées et les cultures non assurables ou non exclues du Fonds. Les calamités agricoles sont des dommages qui résultent de risques autres que ceux considérés comme assurables. Elles sont dues à des variations anormales d'intensité d'un agent naturel climatique (sécheresse, inondation, gel...) et reconnues par arrêté ministériel ;
- jusqu'en 2015, un troisième rôle consistait au financement des aides au développement de l'assurance récoltes. Ce rôle a été ensuite repris par le FEADER et ce, jusqu'en 2020. Cela consiste en une prise en charge d'une part des cotisations d'assurance afférentes à certains risques agricoles de façon forfaitaire et variable suivant l'importance du risque et la nature des productions.

Le financement du FNGRA est assuré par :

- une contribution additionnelle prélevée sur les cotisations d'assurance couvrant à titre exclusif ou principal : les dommages relatifs aux bâtiments et au cheptel mort affectés aux exploitations agricoles, et les risques de responsabilité civile et de dommages relatifs aux véhicules utilitaires affectés aux exploitations agricoles ;
- une contribution additionnelle particulière applicable aux exploitations conchyliques ;
- une subvention inscrite au budget de l'État.

D'après l'article L. 361-2 du code rural, les dommages non assurables survenus lors d'événements météorologiques exceptionnels, contre lesquels les moyens techniques de protection et de prévention se sont révélés inopérants, sont considérés comme calamités agricoles. Ce dispositif intervient en parallèle des assurances récoltes. Le caractère de calamité agricole est reconnu par un arrêté du ministre chargé de l'agriculture, pris sur proposition du préfet du département après consultation du Comité National de Gestion des Risques en Agriculture (CNGRA). La reconnaissance de calamité agricole est une condition nécessaire au dépôt de dossiers individuels de demande d'indemnisation de la part des exploitants sinistrés.

Lorsque l'état de calamité agricole est déclaré, les agriculteurs peuvent demander des indemnisations pour le périmètre suivant :

- pertes de récoltes : les dommages aux récoltes non assurables ou non exclues du FNGRA - c'est à dire autres que vignes et grandes cultures. Les exploitants qui ont souscrit un contrat d'assurance récoltes ne peuvent pas, pour les dommages assurés, prétendre à l'indemnisation au titre du FNGRA. Cela concerne l'arboriculture, l'horticulture ainsi que les prairies pour lesquelles l'exploitant peut faire le choix entre rester couvert par le FNGRA ou opter pour une assurance récoltes. Le FNGRA ne couvre plus depuis le 1er janvier 2011 les pertes de récoltes en grandes cultures et en viticulture.
- Pertes de fonds : toutes les cultures sont incluses dans le dispositif. L'arrêté du 17 décembre 2010 déterminant les conditions générales d'indemnisation des calamités agricoles et de prise en charge des frais afférents, reconnaît au titre des pertes de fonds : les sols, ouvrages, palissages, pépinières, ceps de vigne, arbres fruitiers, plantiers, cultures pérennes, clôtures, ruches, matériel technique professionnel, conchyliculture, cheptel vif, pisciculture, aquaculture. Les bâtiments, le cheptel mort et les stocks à l'extérieur peuvent être assimilés à des pertes de fonds, en l'absence de reconnaissance au titre des catastrophes naturelles ;
- les animaux en plein air.

La liste des risques assurables (périls et cultures), donc exclus du FNGRA, est fixée par l'arrêté interministériel du 29 décembre 2010 (Journal Officiel (JO) du 31 décembre 2010) pris sur avis du CNGRA.

Pour prétendre à une indemnisation au titre du FNGRA, il faut avoir souscrit une assurance multi-risque (également appelée incendie-tempête) portant sur les bâtiments d'exploitation et leur contenu. Si un exploitant n'est pas propriétaire de ses bâtiments, il peut être éligible aux indemnisations du FNGRA si les autres éléments en sa possession, notamment son matériel, sont couverts par une assurance incendie. Si l'exploitant sinistré apporte la preuve qu'aucun des éléments de son exploitation n'est assurable contre l'incendie, il peut prétendre à une indemnité non majorée s'il est assuré contre la grêle ou la

mortalité du bétail.

Pour résumer, plusieurs conditions sont nécessaires pour bénéficier d'une indemnisation au titre des calamités agricoles :

- assurance incendie pour les biens sinistrés ;
- reconnaissance de l'état de calamité agricole par les pouvoirs publics ;
- cultures et biens touchés par la calamité non exclus du FNGRA.

De plus, l'exploitant agricole ne peut prétendre à une indemnisation que s'il a subi des pertes de produit brut de l'exploitation supérieures à 13% et une perte de récoltes supérieure à 30% de la production annuelle. Par dérogation, le seuil de pertes à la culture est fixé à 42% pour les productions végétales continuant à bénéficier d'une aide couplée au titre du règlement (UE) n. 1307/2013 du Parlement européen et du Conseil du 17 décembre 2013 et du règlement délégué (UE) n. 639/2014 de la Commission du 11 mars 2014 (Code rural et de la pêche maritime - Article D361-30). Cela peut s'avérer pénalisant pour les exploitations très diversifiées.

Le CNGRA donne son avis sur le pourcentage d'indemnité à accorder en fonction de la nature des dégâts, de leur gravité et des possibilités du Fonds. Les taux d'indemnisation généralement appliqués par type de perte sont :

TABLE 1.8 – Taux d'indemnisation par type de perte du FNGCA entre 1964 et 2010

Type de perte	Taux de perte (en %)	Taux d'indemnisation (en %)	
		Taux de base	Taux majoré
<b>Pertes de récolte</b>			
Arbres fruitiers, petits fruits, raisin de table	27 à 50	20	30
	> 50 à 70	25	35
	> 70	35	45
Raisins de cuve	27 à 50	15	25
	> 50	25	35
Grandes cultures, maraîchage, fleurs, pépinières		25	38
Aquaculture, conchyliculture, pisciculture		12	
Production fourragère		28	
Tabac		15	25
Miel, escargot, cheptel, gibier		20	30
<b>Pertes de fonds</b>			
Sols, ouvrages, palissages		35	
Bâtiments, cheptel mort, stocks à l'extérieur (si non reconnaissance Cat Nat)		20	35
Pépinières		23	
Vigne, arbres fruitiers, plantiers, cultures pérennes		25	35
Clôtures, ruches, matériel technique professionnel		30	
Conchyliculture		12	
Cheptel vif, pisciculture, aquaculture		30	35

Source : loi n. 64-706 du 10 juillet 1964

L'article 6 de l'arrêté du 29 septembre 2005 prévoyait que si des cultures ont été sinistrées par un autre sinistre que la grêle, et que par ailleurs, elles étaient assurées contre la grêle au moment du sinistre, elles pouvaient bénéficier d'un taux majoré par le FNGCA. L'objectif était d'inciter les exploitants à s'assurer.

Concrètement, en cas de calamité agricole touchant les cultures, l'indemnisation était majorée si les agriculteurs justifiaient que les cultures sinistrées étaient assurées contre la grêle au moment du sinistre. Le capital assuré par hectare devait atteindre au moins pour chacune des cultures :

- 35% du produit brut pour les vignes, vergers, houblonnières, et les cultures florales, légumières et maraîchères sous verre et matières plastiques ;
- 50% pour les autres cultures.

TABLE 1.9 – Taux d'indemnisation par type de perte du FNGRA depuis 2010

Type de perte	Taux de perte (en %)	Taux d'indemnisation (en %)
<b>Pertes de récolte</b>		
Arbres fruitiers, petits fruits, raisin de table	30 à 50	20
	> 50 à 70	25
	> 70	35
Raisins de cuve	30 à 50	15
	> 50	25
Maraîchage, fleurs		25
Pépinières		25
Aquaculture, conchyliculture, pisciculture		12
Production fourragère		28
Tabac		15
Miel, escargot, cheptel, gibier		20
<b>Pertes de fonds</b>		
Sols, ouvrages, palissages		35
Bâtiments, cheptel mort, stocks à l'extérieur (si non reconnaissance Cat Nat)		20
Pépinières		23
Vigne, arbres fruitiers, plantiers, cultures pérennes		25
Clôtures, ruches, matériel technique professionnel		30
Conchyliculture		12
Cheptel vif, pisciculture, aquaculture		30

Source : JO du 25 septembre 2010

On remarque que les taux d'indemnisation ont très peu varié depuis 1964. Après 2010, les grandes cultures ont été exclues du périmètre des cultures indemnisées par le FNGRA et les taux majorés ont été supprimés, les politiques d'incitation à l'assurance ayant évolué vers de la subvention sur les primes payées.

Le tableau suivant présente le montant des indemnités versées au titre du régime des calamités agricoles entre 1980 et 2013 :

TABLE 1.10 – *Montant des indemnités versées au titre du régime des calamités agricoles entre 1980 et 2013*

	Sécheresse	Gel	Inondations	Intempéries	Tempêtes et ouragans
<b>Total 1980-2013</b>	2 600	752	289	268	115
<b>Moyenne annuelle</b>	76	22	8.5	7.9	3.4
<b>Montant annuel le plus élevé</b>	576	141	49	94	47
<b>Montant annuel le plus faible</b>	0	0.09	0.06	0	0

Source : CSO, 2017

### 1.3.2.3 Les assurances récoltes

L'essentiel de la couverture du risque climatique étant assuré par le régime des calamités agricoles, l'assurance récoltes n'a longtemps concerné que la grêle. De nombreuses politiques d'incitations à l'assurance récoltes ont été testées. Entre 2005 et 2015, la prise en charge d'une partie des primes d'assurance s'est faite via le FNGRA (alors FNGCA). Depuis 2015 et jusqu'en 2020, Le Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural (FEADER) a pris le relais.

Le taux de prise en charge des cotisations d'assurance par les pouvoirs publics a ensuite été variable selon les années. Depuis 2010, le montant annuel maximum des subventions versées par le FNGRA au titre de la prise en charge partielle des primes des contrats d'assurances récoltes correspond à une enveloppe totale maximum des primes subventionnables. La règle de définition du montant de la subvention est alors la suivante (<https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2011/9/16/AGRT1115317D/jo>) :

- si le montant total constaté pour l'année des primes subventionnables afférentes à la couverture de l'ensemble des cultures est inférieur ou égal au montant de l'enveloppe globale : le taux de prise en charge de ces primes est de 65% ;
- si le montant total constaté pour l'année des primes subventionnables afférentes à la couverture de l'ensemble des cultures est supérieur au montant de l'enveloppe globale : le taux de prise en charge des primes subventionnables afférentes à la couverture des cultures considérées comme assurables contre l'ensemble des risques climatiques est inférieur à 65%. Il est égal à la différence entre le montant annuel maximum des subventions et le montant de la prise en charge des contrats couvrant les cultures non assurables contre l'ensemble des risques climatiques divisée par la somme des montants des primes subventionnables afférentes à la couverture des cultures considérées comme assurables contre l'ensemble des risques climatiques.

Le tableau ci-dessous récapitule l'évolution du taux de subvention de l'assurance récoltes :

TABLE 1.11 – Historique du taux de subvention de l'assurance récoltes depuis 2006

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
<b>Taux de subvention</b>	35% et 40% pour les JA	35% et 40% pour les JA	35% et 40% pour les JA	35% et 40% pour les JA	A & V : 40%; GC : 25%	65%	65%
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
	65%	A & V : 65%; GC : 43%	65%	65%	contrats "socle" et "prairies" : 65%; garantie "com- plémentaire" : 45%	contrats "socle" et "prairies" : 65%; garantie "com- plémentaire" : 45%	

\* JA : jeunes agriculteurs

\* A & V : arboriculture et viticulture

\* GC : grandes cultures

Source : APREF, 2014

Les productions considérées comme assurables sont les grandes cultures et leurs semences (blé, maïs, colza, tournesol, pois, féveroles, les cultures dites industrielles comme la betterave, la pomme de terre, le lin...), la vigne et les prairies. Pour les autres cultures, à l'exception de l'arboriculture et l'horticulture, et pour les pertes de fond, le régime des calamités agricoles s'applique. En arboriculture et horticulture, les producteurs doivent faire le choix entre l'indemnisation du FNGRA ou l'assurance récoltes, subventionnée par le FNGRA. Ainsi, par exemple, si des vignes sont touchées par une inondation, l'assurance récoltes peut intervenir sur les pertes de récoltes. En revanche, le FNGRA intervient en calamité agricole sur les pertes de fonds (ceps de vignes par exemple).

L'offre d'assurance multi-risques climatiques sur récolte a débuté à partir de 2005. Depuis 2016 le contrat d'assurance récoltes appelé « socle » ou « coup dur » a été mis en place. C'est un contrat dont l'indemnisation permet de relancer le cycle de production en cas de sinistre, avec un capital assuré moins important et des primes d'assurance moins élevées, afin de faciliter l'accès à l'assurance récoltes.

Les contrats d'assurance récoltes couvrent les récoltes assurables contre plusieurs risques climatiques (grêle, tempête, gel, sécheresse, inondation ou excès d'eau...). Ces polices d'assurance couvrent les pertes de rendement (production par unité de surface) consécutives à la survenance d'événements climatiques. L'assurance intervient dès que le rendement d'un agriculteur donné est inférieur au rendement de référence (généralement la moyenne olympique des cinq dernières années), diminué d'une franchise, exprimée en pourcentage du rendement de référence. Les rendements de référence, le taux de franchise et le prix de référence sont définis à l'avance dans le contrat d'assurance. Cette

police ne couvre donc pas les variations de prix.

L'assurance récoltes propose différents niveaux de garanties, à savoir :

- **un premier niveau**, appelé **contrat socle** qui couvre les coûts engagés pour produire la culture sinistrée. Il permet ainsi à l'agriculteur de poursuivre son activité et de relancer un cycle de production après avoir subi des pertes de rendement dues à un événement climatique. L'indemnité versée correspond au montant des capitaux assurés, après déduction de la franchise :
  - une franchise absolue de 30% par nature de culture assurée (25% pour le contrat socle prairie);
  - une franchise de 20% pour les contrats à l'exploitation.
 Ce premier niveau bénéficie d'une subvention publique au taux maximum de 65% payée par le FNGRA ;
- **un second niveau** de couverture permet d'être garanti sur la base du chiffre d'affaires. Le complément de cotisation bénéficie également d'une subvention de l'État, à un taux néanmoins inférieur à celui du premier niveau de couverture (45%);
- **un troisième niveau** permet aux exploitants agricoles de souscrire des garanties complémentaires. Ce troisième niveau de garanties n'est pas subventionnable. Ces garanties optionnelles peuvent être :
  - la réduction ou le rachat de franchise ;
  - les frais supplémentaires de récoltes ;
  - les frais de resemis ;
  - la privation de jouissance des bâtiments d'exploitation et du logement rendus inutilisables à la suite d'un sinistre ;
  - la perte de loyers : le montant des loyers dont vous pouvez être privé en tant que propriétaire non exploitant pendant la durée de la remise en état ;
  - les frais de démolition et de déblaiement pour remettre les lieux en état ;
  - les pertes indirectes pour rembourser certains frais ;
  - l'indemnisation en valeur à neuf des bâtiments ;
  - le remboursement des honoraires de l'expert choisi par l'assuré ;
  - le coût de reconstitution des supports non informatiques d'information, les frais de duplication des supports informatiques d'information, y compris les dossiers d'étude et d'analyse informatiques ;
  - les accidents aux appareils électriques ;
  - les pertes par écoulement de vin, d'alcool et les pertes d'engrais ;
  - le contenu des chambres frigorifiques ou à atmosphère contrôlée ;
  - les actes de vandalisme ;
  - les risques spécialisés : séchage de grains, séchage de tabac, abattoirs de volailles, négoce d'animaux, etc.

Les dommages indemnifiables peuvent varier selon les productions. Il s'agit de :

- la destruction ou la détérioration des organes végétatifs et/ou reproducteurs ;
- la sénescence foliaire précoce et tous types de dégâts foliaires ;
- le dessèchement ou l'échaudage ;
- le déficit de fécondation ou l'avortement des grains dont la coulure ;
- l'asphyxie ou le pourrissement des racines ;
- les dommages directs aux récoltes si l'excès d'eau ne permet pas l'intervention des matériels de récolte.

Sont toujours exclus les dommages ou l'aggravation des dommages résultant :

- d'événements autres que les événements climatiques assurés ;
- de la perte de qualité des récoltes assurées ;
- des conséquences des décisions administratives entraînant la survenance d'un dommage ou son aggravation (interdiction d'irriguer, lâcher d'eau en zone d'expansion de crue par exemple) ;
- des ruptures, fissuration, infiltration de digue, barrage, batardeau ou tout autre édifice destiné à contenir de l'eau ;
- des excès d'eau dans les zones habituellement inondables ;
- de la coulure physiologique, quelle qu'en soit l'origine autre que la survenance d'un sinistre couvert par le contrat ;
- des maladies, parasites, ravageurs et traitements pouvant précéder, accompagner ou suivre un événement climatique ;
- de l'inefficacité ou de l'absence de traitement contre les maladies, parasites et ravageurs ;
- des conséquences de pratiques culturales inappropriées, des erreurs de conduite ainsi que des malfaçons culturales et des pratiques à risques ;
- des effets de la radioactivité ou d'un agent chimique pouvant accompagner l'événement climatique dommageable ;
- des pertes indirectes causées aux récoltes résultant des maladies induites, des malfaçons ainsi que de tout acte de mauvaise gestion culturale.

Le montant du capital garanti pour chaque production dépend des trois éléments suivants :

- la surface assurée ;
- un rendement historique de référence calculé, soit sur la moyenne des rendements sur les trois dernières années, soit sur la moyenne olympique au cours des cinq dernières années (à partir des rendements des cinq dernières années, on élimine le plus élevé et le plus faible, puis on calcule la moyenne des trois années restantes) ;
- un prix de référence, librement fixé par l'assuré pour chaque production. Concernant le premier niveau de garantie (contrat socle), ce prix est fixé dans la limite du plafond d'un barème validé chaque année par le CNGRA.

Le capital assuré pour l'ensemble du contrat de l'exploitation correspond à la somme du capital assuré pour chacune des productions assurées.

La période de garantie du contrat commence généralement après l'enlèvement de la récolte précédente et se termine à l'enlèvement de la récolte courante.

La figure suivante résume ces différents niveaux de couverture, les niveaux de subvention associés et les différences entre l'assurance multirisques climatiques agricole et l'assurance récoltes :

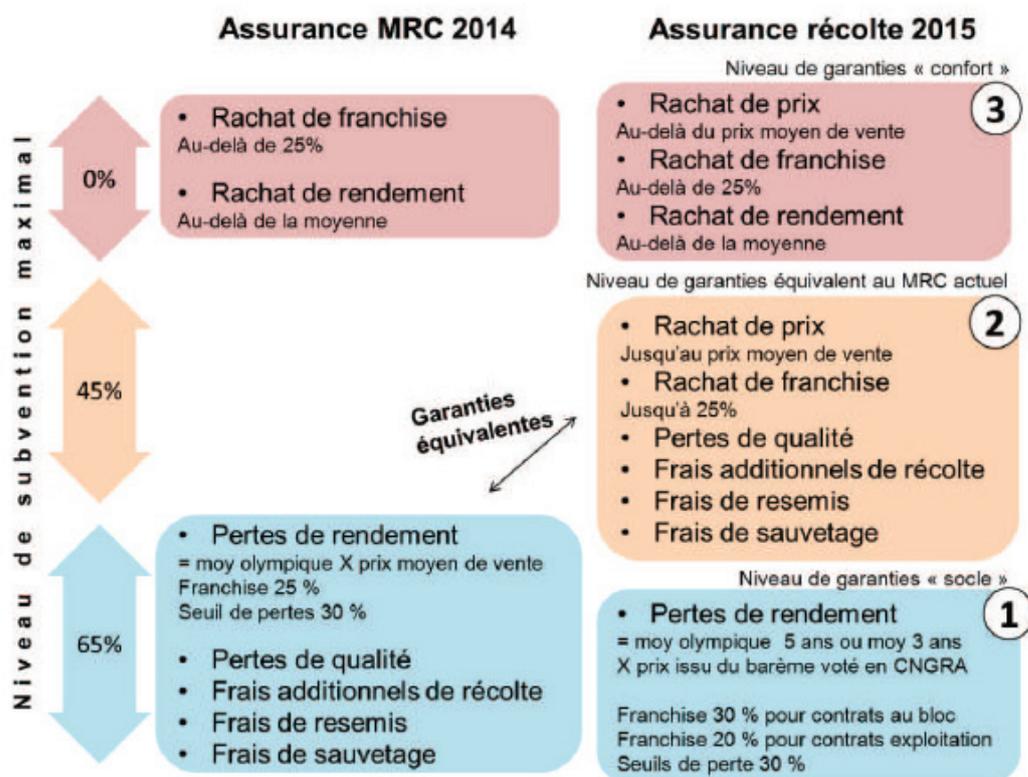


FIGURE 1.6 – Garanties et niveaux de subvention pour les contrats d'assurance récoltes 2015

Référence : *Agricultures & territoires et Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt, 2015*

Dans le cadre d'un contrat par nature de culture, la totalité (100%) des cultures d'un même groupe de cultures au sein de l'exploitation doivent être assurées. Cependant, pour les grandes cultures, le seuil minimum de la sole assurable (superficie cultivée assurable) est abaissé à 70%. L'exploitant peut également choisir de souscrire un contrat à l'exploitation couvrant au moins 2 natures de cultures assurables représentant au moins 80% de la sole assurable de l'exploitation.

#### a. L'assurance par nature de culture :

Pour un agriculteur, l'assurance par culture couvre la perte de rendement sur chaque culture de manière « indépendante ». Il intervient dès que pour une culture donnée, le rendement est inférieur au rendement de référence diminué de la franchise. Il n'y a pas de compensation entre les différentes cultures ; chaque culture est considérée de façon séparée. De plus, les niveaux de franchise sont fixés par culture.

#### b. L'assurance par exploitation :

Le contrat par exploitation couvre l'exploitant contre la perte de rendement total de son exploitation. Il assure au moins 80% de la superficie cultivée (et destinée à la vente) de l'exploitation et au moins deux natures de récolte différentes. Cette approche tient compte des compensations possibles entre les différentes cultures de l'exploitation et des

corrélations entre les rendements. Le "rendement" de l'exploitation est calculé comme le rendement monétaire sur l'exploitation. En effet, les différentes cultures produites par un exploitant agricole ne sont pas valorisées au même prix et n'ont pas la même pondération dans la perte totale sur l'exploitation. Ici, la franchise est égale à la somme des valeurs monétaires des franchises par culture.

Dans l'approche par exploitation, l'assuré est indemnisé moins souvent (avec un niveau d'indemnisation plus bas) que dans le cas de l'assurance par culture. Avec le même niveau de franchise sur toutes les cultures, les deux polices sont équivalentes dans le cas de la dépendance parfaite positive entre les différentes cultures (Odjo et Ritz, 2006).

### c. Le développement de l'assurance récoltes

Depuis 2005, l'évolution du marché de l'assurance récoltes a été très volatil. En 2015, afin de faire face aux difficultés de développement de l'assurance agricole, le gouvernement a décidé la mise en place du contrat socle, pour application au 1er janvier 2016. Pour permettre la mise en place de ce contrat dans des conditions favorables, il a décidé d'une aide exceptionnelle permettant de porter en 2015 le taux de subvention à son maximum - soit 65% - ce qui n'aurait pas été le cas sans cette aide (<http://agriculture.gouv.fr/assurance-recolte-stephane-le-foll-met-en-place-une-aide-exceptionnelle-pour-porter-en-2015-le-taux>).

Depuis 2005, la demande réelle a ainsi été difficile à apprécier, car soutenue par des gestes commerciaux des assureurs et par des montants variables de prise en charge de la prime d'assurance par l'État. La plupart des assurés payant peu de prime de risque additionnelle à la grêle pour bénéficier de l'offre multi-risques, cette « demande » subventionnée est restée principalement cantonnée à la filière des grandes cultures puis, dans une moindre mesure, en viticulture, arboriculture et légumes, suivant ainsi les parts de marché établies en grêle.

Le recours à l'assurance récoltes est très variable selon la nature des récoltes (figure 4) mais également selon la taille des exploitations. Il est beaucoup plus sensible pour les grandes exploitations (28%) que pour les moyennes (18%) et surtout les petites (5%).

### d. Avenir de l'assurance récoltes :

Sur la période 2005-2013, l'augmentation du soutien public (Subvention européenne et financement national) a aidé le marché de l'assurance récoltes à se développer. Cependant, elle devait constituer une alternative durable au FNGRA, ce que la Cour des Comptes, relayée par le Sénat, a remis en question dans un référé en 2013 (Cour des Comptes, 2013). Car même si cette assurance progresse globalement jusqu'en 2013, sa diffusion reste très inégale selon les secteurs agricoles et plafonne voire régresse depuis 2014, alors que le risque d'événements climatiques extrêmes paraît croissant.

Ces observations ont mené à la mise en place du contrat socle en 2016. Les résultats de l'année 2017 permettront de tirer des conclusions sur l'avenir du contrat socle (Lidsky et al., 2017) :

- si l'assurance récoltes est bien diffusée et satisfaisante, les subventions publiques pourront être réduites ;

- si le constat persiste, la mission du CSO (CSO, 2017) propose de s'orienter vers un système "à l'espagnole" dans lequel l'octroi des aides publiques serait conditionné à la couverture assurantielle de l'agriculture, ou bien à un encadrement des tarifs comme le pratique l'Italie.

La mise en place du contrat socle et la forte sinistralité de 2016, qui a impacté tous les périls couverts en touchant toutes les régions et toutes les cultures, devraient stimuler la souscription de contrats d'assurance récoltes pour l'année 2017.

#### 1.3.2.4 Les autres aides de crise

##### a. Aides complémentaires au régime des calamités agricoles

Une aide complémentaire aux calamités agricoles est proposée au niveau communautaire via l'article 18 du règlement FEADER (RÈGLEMENT (UE) N. 1305/2013 du 17 décembre 2013 relatif au soutien au développement rural par le Fonds européen agricole pour le développement rural (Feader)) : « Reconstitution du potentiel de production agricole endommagé par des catastrophes naturelles et des événements catastrophiques et mise en place de mesures de prévention appropriées ». Son activation peut être demandée par la direction départementale des territoires (DDT). Cette aide consiste en un complément d'indemnisation aux exploitations déjà indemnisées par le régime des calamités agricoles, pour les pertes de fonds seulement. Cette aide s'applique uniquement aux travaux réalisés après dépôt du dossier auprès de la DDT. Les conditions d'éligibilité sont les mêmes que pour la calamité agricole, mais les investissements éligibles incluent la réhabilitation des terres endommagées et les installations préventives visant à réduire l'impact de potentiels événements climatiques à venir. L'indemnité complémentaire versée peut aller jusqu'à 80% du montant des investissements préventifs et jusqu'à 100% des investissements de réhabilitation ou des investissements préventifs de groupe.

Aux niveaux régional et départemental, les conseils généraux et régionaux peuvent s'adosser aux calamités agricoles, en augmentant l'enveloppe d'indemnisation.

##### b. Mesures fiscales et sociales

Lorsqu'une crise d'ampleur exceptionnelle survient et touche fortement la trésorerie des exploitations, le Ministre de l'agriculture peut présenter un plan d'actions, comme ce fut le cas lors de la crue de la Seine de mai-juin 2016. Outre l'activation éventuelle des indemnisations par le régime des calamités agricoles et par les assurances récolte, ce plan peut inclure des mesures fiscales et sociales, telles que :

###### — Mesures sociales :

- la mobilisation d'un fonds d'allègement des charges (FAC) à destination des agriculteurs les plus endettés. La mise en place d'un FAC revient à une prise en charge partielle des intérêts des annuités en cours, frais financiers ou coûts liés à la restructuration des prêts des exploitations par l'État. L'État apporte ce soutien dans le cadre des aides de minimis, qui sont des aides d'État plafonnées à hauteur de 15 000 € sur trois exercices fiscaux. Peuvent être appliqués suivant les situations : un montant plancher par demande, des critères de priorisation des bénéficiaires ou une répartition de l'enveloppe par région ;
- la prise en charge partielle ou totale des cotisations MSA (personnelles ou employeur) ou le report de leur paiement. L'État apporte ce soutien dans le cadre

des aides de minimis. Le Conseil central d'administration de la MSA a fixé le montant maximum de prise charge des cotisations sociales à 3 800 € par chef d'exploitation et par an, plafond susceptible d'être dépassé (jusqu'à 5000 €) dans des cas exceptionnels tout en restant dans la limite du plafond des minimis. Les reports de paiement peuvent s'échelonner jusqu'à un maximum de 3 ans, si l'entreprise reste économiquement viable.

— **Mesures fiscales :**

- le report du paiement du solde de l'impôt sur le revenu et de l'impôt sur les sociétés. C'est une mesure intéressante lorsque les agriculteurs touchés font face à un besoin important de trésorerie ; toutefois il ne s'agit pas d'une aide mais d'un report de paiement ;
- la remise gracieuse ou la modération de la taxe foncière sur le foncier non bâti, sur demande au centre de finances publiques ;
- l'assouplissement des conditions d'accès aux remboursements mensuels de crédits de TVA, c'est à dire le passage à une périodicité mensuelle pour le reversement de la TVA (au lieu d'une périodicité annuelle, comme c'est souvent le cas dans les exploitations par simplicité).

### 1.3.2.5 Conclusion

Sur la période 2006 à 2015, les principales aides à l'agriculture se sont réparties de la façon suivante :

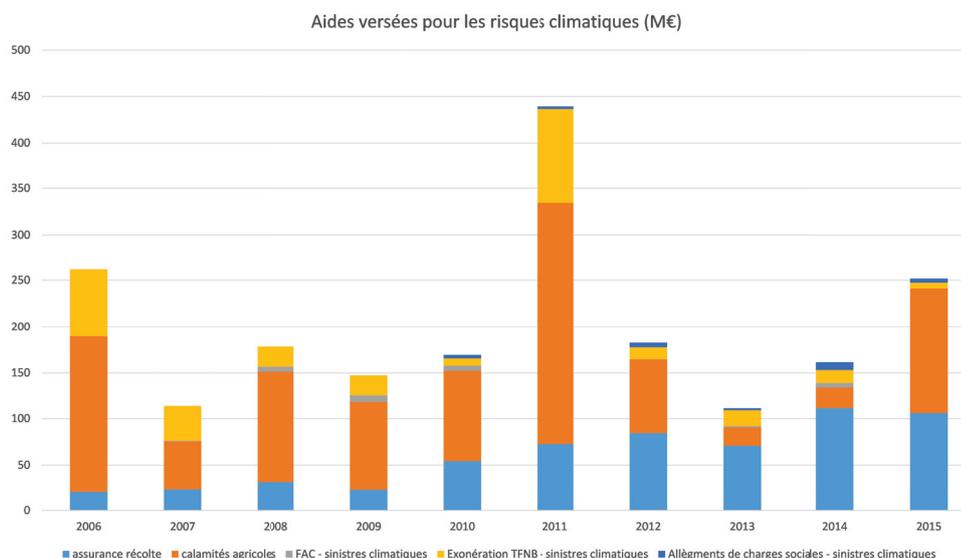


FIGURE 1.7 – Évolution du montant des aides et indemnisation versées à l'agriculture pour les aléas climatiques

La France dispose donc d'une large palette d'outils pour faire face aux aléas climatiques. Si cette variété d'outils est un atout, leur utilisation peine à s'inscrire dans une véritable stratégie d'ensemble. Or cela est nécessaire pour garantir efficacité et adéquation avec les besoins des agriculteurs (CSO, 2017). Cette observation a été formulée par Vincent Touzot, membre du bureau des Jeunes Agriculteurs en charge de la PAC durant le Congrès des Jeunes Agriculteurs le 8 juin 2017 à Dunkerque : "C'est bien une somme d'outils - tout ce qui est possible de mettre en place pour prévenir les risques - auxquels il nous faut recourir. Aujourd'hui, il nous faut trouver les bons outils, les bonnes combi-

naisons."

Pour certains, cela doit passer par l'accentuation d'une politique volontariste de développement de l'assurance récoltes. Durant le Congrès des Jeunes Agriculteurs de 2017, Mme Lambert a en effet observé que *"Nous voyons que ceux qui ont fait le choix de s'assurer face aux aléas climatiques sont beaucoup plus sereins"*. Ainsi, pour Georges-Pierre Malpel, *"il faut aller vers moins de soutien public et plus d'anticipation de l'assurance"*.

Cependant, le député européen Eric Andrieu assure que "le tout-assurantiel ne va pas tout régler", avis partagé par Arnaud Petit (Copa-Cogeca) : "Imposer un système assurantiel risquerait en effet de pénaliser des producteurs qui préfèrent agir sur les coûts de production. Il faut aussi bien comprendre que le système assurantiel n'est pas une prime. Et, en termes de soutien public, c'est assez gourmand, et donc un questionnement pour tous les contribuables."

Dans tous les cas, il convient de soutenir les expérimentations engagées par les assureurs pour le développement de nouveaux outils assurantiels testés par plusieurs acteurs comme l'assurance indiciaire prairie ou l'assurance chiffre d'affaires.

D'autres solutions sont également envisagées pour inciter les exploitants agricoles à prendre des mesures de prévention.

Les investissements de protection (filets para-grêle, dispositifs de lutte contre le gel, infrastructures d'irrigation...) peuvent d'ores et déjà être aidés, notamment dans le cadre du deuxième pilier de la PAC, mais ce soutien gagnerait à être renforcé et rendu plus visible.

Georges-Pierre Malpel a mis en avant, lors de la journée CCR Cat 2017, l'intérêt que représenterait la possibilité de constituer une épargne de précaution défiscalisée afin de compenser les mauvaises années de récolte par les bonnes ainsi que de l'utiliser comme relais de trésorerie en attendant les indemnités d'autres outils.

Au Congrès des Jeunes Agriculteurs, la proposition a été faite de rendre obligatoire un plan de gestion des risques pour tout projet de développement ou d'installation. Ce dispositif est décrit par Baptiste Gattouillat, l'un des responsables du syndicat des JA, comme une "sorte de permis de construire individuel avant installation, afin de connaître l'exposition aux risques", qu'ils soient climatiques, financiers ou sanitaires, fourni à chaque futur agriculteur. Cela a déjà été mis en place par la région des Hauts-de-France qui a lancé des "audits conseils" pour les agriculteurs en difficulté ou volontaires, a indiqué Xavier Bertrand, le président de la région (news-assurances pro, 2017).

En conclusion, il est donc important de mener des actions de suivi et d'évaluation afin de renforcer la transparence sur l'impact des différentes mesures, notamment pour les soutiens publics au développement de l'assurance au regard des objectifs poursuivis, en mobilisant les capacités d'expertise nécessaires. En premier lieu, un travail devrait être mené sur les barèmes en vigueur des contrats d'assurance récoltes, afin de s'assurer de la réalité et de la pertinence de l'approche du contrat socle. Ce besoin nécessite donc un travail préalable sur l'exposition aux risques climatiques des exploitations agricoles en France. Ce travail s'efforce d'entamer cette démarche pour le péril inondation.

### 1.3.3 Indemnisation de la Perte d'Exploitation en cas de catastrophe naturelle

Cette section est une étude des pratiques d'assurance en Perte d'exploitation (PE).

L'assurance des pertes d'exploitation n'est pas aussi réglementée que celle des bâtiments résidentiels et professionnels. Tout d'abord, il ne s'agit pas d'une assurance obligatoire. De plus, concernant les garanties couvertes dans le cadre du régime Cat Nat, la franchise et la surprime Cat Nat sont fixées par l'Etat. Cette surprime, nette du prélèvement au titre du Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM), est de  $12\% * (1 - 12\%)$  de la prime afférente à la garantie PE Cat Nat. Pour les autres garanties, les contrats relèvent totalement du domaine privé et il existe donc une très grande variabilité des pratiques.

Cette section présente dans un premier temps les pratiques les plus communes. Deux exemples de compagnies d'assurance ayant des pratiques très différentes permettront de voir cette grande latitude des couvertures d'assurance existant sur le marché.

#### 1.3.3.1 Périmètre

##### a. L'assurance de base

La garantie de base en PE couvre la perte consécutive à l'impossibilité ou à la difficulté de compenser ses charges fixes et de générer du résultat du fait de la baisse du chiffre d'affaires causée par l'interruption ou la réduction de l'activité, appelée aussi perte de marge brute. Cette garantie est généralement adossée aux assurances de dommages. De ce fait, les conditions d'ouverture du droit à l'indemnisation au titre des PE sont ([www.ffa-assurance.fr](http://www.ffa-assurance.fr)) :

- la survenance d'un dommage direct ;
- la souscription par l'entreprise d'une assurance couvrant pour un montant suffisant les dommages matériels directs causés par les événements garantis (incendie, explosion, dégât des eaux...).

Généralement, les garanties PE couvrent également le remboursement des frais supplémentaires d'exploitation (FSE). Il s'agit des frais engagés, en accord avec l'assureur, à la suite du sinistre, pour en limiter les conséquences et pour permettre une reprise plus rapide des activités (mise en place du travail de nuit ou d'heures supplémentaires pour utiliser au maximum les machines en état de fonctionnement, location de matériels ou de locaux, installations provisoires, recours à des fabrications extérieures, frais exceptionnels de transport, de publicité, de publipostage...) dans la limite où la somme des frais et des PE corrigées ne dépassent pas la PE initiale (sans frais) :

$$PE_{initiale} > PE_{corrigée} + FSE$$

##### b. Les assurances complémentaires

Pour l'entreprise, ces assurances ont pour objet de couvrir des dépenses qui, bien que résultant directement du sinistre, ne sont pas indemnisables au titre de l'assurance de base, à savoir :

- les frais supplémentaires additionnels (FSA), c'est à dire lorsque la somme des frais et des PE corrigées dépassent la PE initiale

$$PE_{initiale} < PE_{corrigee} + FSE + FSA$$

Ce sont souvent des frais engagés pour maintenir sur le marché des produits et/ou services fournis par l'entreprise assurée afin d'éviter une perte irrémédiable de clientèle. Il s'agit par exemple de sous-traiter son activité, ce qui permet de maintenir "artificiellement" son activité car les clients seront livrés même si dans les faits, cette activité sera assurée par une autre entreprise ;

- l'indemnisation des pénalités de retard éventuellement mises à la charge de l'entreprise en application des contrats passés avec les clients, par suite du retard ou de l'absence de livraison consécutifs à un sinistre garanti.

### c. Les extensions de garantie

Dans des cas moins fréquents, certaines pertes d'exploitation non consécutives à un dommage direct peuvent faire l'objet d'extensions de garantie. L'entreprise peut garantir :

- la carence des fournisseurs de matières premières, emballages et approvisionnements, ou la carence des sous-traitants, des prestataires et clients sous certaines conditions, si eux-mêmes ont subi des dommages matériels ;
- les impacts de la défaillance de certains réseaux de services. Il s'agit des coupures de routes induisant l'impossibilité ou l'interdiction d'accès aux locaux de l'entreprise ou des impacts de la coupure de certains réseaux de services nécessaires à l'activité (énergie et télécommunication) induisant une impossibilité pour l'entreprise de fonctionner.

Il s'agit cependant d'une pratique encore très rare sur le marché de l'assurance des pertes d'exploitation.

### 1.3.3.2 Indices pour le calcul des garanties et des indemnisations : le bénéfice brut ou la marge brute

#### a. Le bénéfice brut

Dans le cas du bénéfice brut, la perte indemnisée correspond à la différence entre le bénéfice brut que l'entreprise aurait généré sans l'événement et le bénéfice brut effectif après l'événement. Le bénéfice brut est la ressource d'exploitation (les revenus, après paiement des charges de personnel mais avant les amortissements, moins les coûts directs liés à la production ou à l'achat des produits ou des services qu'elle vend) dégagée au cours d'une période par l'activité principale de l'entreprise.

Ce type de contrat n'est pas défini par une limite de temps pour l'indemnisation, il couvre donc toute la durée de perte d'exploitation observée. Cependant, la définition de perte d'exploitation utilisée dans le contrat aura des conséquences sur l'indemnisation. En effet, la reprise d'activité peut être définie de deux façons :

- la fin de l'arrêt total d'activité, c'est à dire dès que l'activité reprend, quel que soit le niveau de production. Dans ce cas, seule la perte d'exploitation totale est indemnisée ;
- le jour de la reprise d'exploitation au même niveau de production qu'avant le sinistre. Dans ce cas, la perte d'exploitation partielle est également indemnisée.

### b. La marge brute

L'indice le plus utilisé dans le secteur des assurances français est la marge brute (MB). Elle représente la différence hors taxes (HT) entre le prix de vente et le coût de revient de biens ou de services, c'est à dire la somme des coûts supportés pour la production et la distribution d'un bien ou d'un service. Cette notion est néanmoins peu normalisée et son mode de calcul varie d'un secteur économique à l'autre. Dans le secteur de l'assurance, il existe deux méthodes pour estimer la marge brute :

#### Méthode par différence :

La marge brute est calculée en retranchant les charges variables au chiffre d'affaires (CA) :

$$MB = CA - \text{FraisVariables} - \text{FraisSemiVariables} - \text{VariationsStock}$$

Le CA représente le montant des affaires (HT) réalisé par l'entreprise avec les tiers dans l'exercice de son activité professionnelle normale et courante. Il correspond à la somme des ventes de marchandises, de produits fabriqués, des prestations de services et des produits des activités annexes. En pratique, le CA utilisé est le CA de l'année (n-1) compte tenu des tendances.

Une charge variable représente une dépense supportée par l'entreprise dont le montant varie en fonction de l'activité. Les postes comptables suivants sont considérés comme des charges variables : les achats de marchandises, les achats de matières premières, la sous-traitance, les consommations énergétiques (cas des entreprises de production), les salaires du personnel opérationnel (lorsqu'il est indexé sur l'activité), les commissions.

#### Méthode par addition :

$$MB = \text{ProfitNet} + \text{FraisFixes} + \text{VariationsStock}$$

Si cette méthode est en pratique plus compliquée à manipuler, elle est également plus précise.

Cette méthode inclut les pertes de vente dans la couverture d'assurance. L'estimation des dommages se faisant via l'étude des bilans, la perte d'exploitation partielle est automatiquement indemnisée - dans la limite de la durée indemnisée dans le contrat d'assurance.

Pour fixer le montant de la garantie, la marge brute du dernier exercice connu constitue une base de calcul qui est ensuite adaptée en tenant compte de la croissance prévisible de l'entreprise et du contexte économique. En cas de sinistre, la marge brute journalière associée à la durée indemnisée en pertes d'exploitation permet de calculer le montant de l'indemnisation.

#### 1.3.3.3 Franchise

La franchise a pour conséquence de laisser une partie des dommages à la charge de l'assuré. Depuis le 1er janvier 2001, une franchise légale reste toujours à la charge de l'assuré. Elle s'élève à trois jours d'activité, avec un minimum de 1 140 euros pour

la garantie pertes d'exploitation. Cette franchise est fixée par l'État, obligatoire, et non rachetable. Toutefois, c'est la franchise prévue par le contrat qui sera appliquée, si celle-ci est supérieure à ces montants.

#### 1.3.3.4 Plafond

Le plafond est généralement exprimé en durée maximum d'indemnisation (et non en montant).

##### a. La période d'indemnisation

C'est à l'entreprise de fixer la période maximale de garantie au moment de la souscription du contrat. Elle peut aller jusqu'à 36 mois. Il est important de retenir la période qui permettra à l'entreprise de redémarrer mais également de retrouver son plein équilibre financier et commercial tel qu'il aurait été en l'absence du sinistre. La mise en place d'un contrat en perte d'exploitation nécessite donc souvent la visite d'experts afin de dimensionner la durée à couvrir à la durée nécessaire pour la reprise estimée.

Pour évaluer la durée de l'interruption d'activité qu'il convient d'assurer, de nombreux éléments doivent être pris en compte :

- le temps nécessaire à la reconstruction des bâtiments en tenant compte de toutes les contraintes réglementaires liées soit à l'urbanisme soit à l'activité ;
- le délai de remplacement du matériel et de réapprovisionnement ;
- les délais de fabrication des produits ;
- le caractère saisonnier de l'activité (la période d'indemnisation doit alors comprendre la période de pointe et correspondre à une ou plusieurs périodes annuelles) ;
- la possibilité de maintenir une activité partielle sur le site malgré le sinistre ou sur un autre site ;
- l'existence de goulets d'étranglement, points de passage obligés de la production, et d'autres points névralgiques dont la destruction entraînerait une paralysie importante et/ou longue de la production (centres informatiques, chaufferie centralisée...);
- le secteur dans lequel l'entreprise exerce son activité (peu ou très concurrentiel) ;
- la possibilité pour l'entreprise de sous-traiter les opérations sensibles.

Sur le marché français, les experts rencontrés estiment que 75 à 80% des entreprises optent pour une durée d'indemnisation de 12 mois. Les industries chimiques et pharmaceutiques font exception car les durées d'indemnisation choisies sont souvent de 24 mois. En effet, en plus de réparer les dommages, ces industries doivent obtenir des agréments sur toute la ligne de production pour pouvoir reprendre leur activité. La durée de 36 mois est très rarement souscrite.

Les informations fournies par les cédantes et relatives aux polices permettent de se faire une idée plus précise des habitudes de durées souscrites en PE. Après traitement des données, on obtient l'historique de la durée de souscription moyenne par type de risque et la durée moyenne souscrite par secteur d'activité suivants :

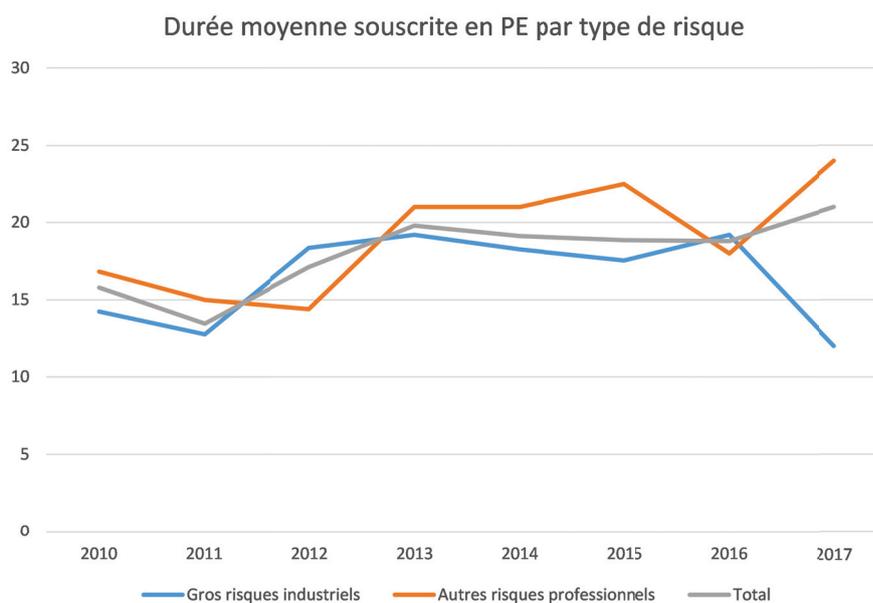


FIGURE 1.8 – Durée moyenne souscrite en PE par type de risque

TABLE 1.12 – Pertes aux entreprises : Saxe 2002

secteur	Total
Métallurgie, minerais et minéraux	12
Industrie du verre, ciment, céramiques	15
Travail des métaux, automobile, électronique	13
Chimie, cosmétiques, plastiques, caoutchouc	14
Industries textiles	18
Imprimeries, papier, carton	14
Industrie du bois	16
Agro-alimentaire	22
Énergie, traitements des déchets	18
Commerces, entrepôts, divers	16
PME-PMI	14
Risques Techniques	10
Syndics de copropriété / SCI	12
Autre	19
Total	17

### b. Les limitations

A l'issue d'une analyse de risque menée en concertation avec l'assureur, il est possible de prévoir contractuellement une limitation de l'indemnisation d'assurance. Les moyennes ou grandes entreprises peuvent être concernées si elles possèdent plusieurs établissements à activités indépendantes, au moins en partie. En cas de sinistre, l'entreprise n'est pas totalement touchée et la baisse du chiffre d'affaires est alors partielle. Dans ce cas, l'indemnité versée est inférieure au montant des sommes assurées : elle correspond à la perte d'exploitation maximale (PEM) dont le montant est fixé contractuellement.

### 1.3.3.5 Cas d'études d'offres de couverture d'assurance en Pertes d'exploitation

#### a. Assureur 1

L'assureur 1 est spécialisé dans l'assurance dommages des professionnels. Il présente la particularité d'être une structure mutualiste. Elle induit une forte implication des clients - alors sociétaires - dans la définition des contrats. Cela a des conséquences importantes sur les méthodes de souscription en mettant l'accent sur le long terme. Cela se traduit par des politiques de prévention et de réduction de l'exposition aux risques. En Mai 2017, nous avons rencontré le directeur technique souscription afin qu'il nous décrive les contrats PE.

#### Les garanties

En plus de la garantie de base d'indemnisation de la PE, l'assureur 1 propose les extensions de garantie suivante :

- **Accompagnement à la formation** : lorsque les machines endommagées ne sont pas remplaçables à l'identique, l'assureur 1 autorise une période supplémentaire d'indemnisation en PE le temps que le personnel soit formé à l'utilisation des nouvelles machines ;
- **Frais supplémentaires d'exploitation** : l'indemnisation est limitée au montant de la perte évitée ;
- **Frais supplémentaires additionnels** : il s'agit des dépenses permettant une reprise plus rapide de l'activité ;
- **Indemnisation des PE consécutives aux défaillances des réseaux de transport** : impossibilité d'accès au site ;
- **Indemnisation des PE consécutives aux défaillances des réseaux de service** : lorsque le service n'arrive pas sur le site, cet assureur indemnise les chocs induits (dommages) par ces interruptions (interruption de la chaîne du froid obligeant de jeter une partie de la production par exemple). Cette garantie est étendue sur site si la défaillance d'un réseau de service est due à une défaillance sur le site et non pas une défaillance du fournisseur.

L'assureur 1 étant un assureur mutualiste, ce sont les clients qui décident et poussent les évolutions des contrats. C'est pour cela que l'on trouve chez l'assureur 1 des extensions de garantie que l'on trouve rarement chez d'autres acteurs du marché.

#### Indices utilisés

Sur le marché français, le type de contrat le plus couramment rencontré est le contrat en marge brute. Cependant, l'assureur 1 fait exception car, étant une entreprise américaine, elle en adopte également les pratiques et elle propose de coupler marge brute et bénéfice brut dans chaque contrat.

Pour l'indemnisation en bénéfice brut de l'assureur 1, la période d'indemnisation s'étend du premier jour de PE au jour de la reprise d'exploitation au même niveau qu'avant le sinistre : la PE partielle est donc indemnisée.

Les contrats de l'assureur 1 incluent les deux méthodes de calcul de l'indemnisation et, suite au sinistre, le client choisit la méthode qui leur convient le mieux. En règle

générale, les clients se tournent vers la garantie en marge brute pour les petits (courts) sinistres et en bénéfice brut pour les longs sinistres.

### **Le chômage technique**

En France, il y a une obligation légale de payer les salariés au chômage technique. De fait, les salaires (si on exclut les intérimaires pouvant être arrêtés ou les CDD non renouvelés) sont inclus dans la marge brute et sont donc indemnisés via le contrat d'assurance PE.

La problématique est différente aux Etats-Unis dans les usines ou entreprises où les personnes sont payées et renouvelées à la semaine. Il est alors possible de ne pas renouveler les salariés pour éviter les frais induits par leur salaire (variable d'ajustement). Cela représente cependant un risque : les salariés peuvent ne pas revenir après car embauchés par la concurrence. L'assureur 1 propose alors une extension de garantie de 60 à 90 jours d'indemnisation des salaires versés aux salariés.

Il s'agit donc aux États-Unis d'une extension de garantie alors que le chômage technique est automatiquement pris en compte en France.

### **La problématique de la faillite d'une filiale**

En cas de faillite d'une filiale, l'assureur 1 propose de verser la somme qui aurait dû être versée au titre de la PE à condition qu'elle soit réinvestie dans les 2 ans par exemple pour reconstruire une usine (même ailleurs, dans un autre pays), racheter du matériel, construire une extension d'une autre usine, à condition, évidemment, que ce projet n'était pas prévu avant le sinistre.

Sinon, l'indemnisation versée à l'entreprise ne correspond qu'aux dommages : la valeur du site, vétusté déduite (valeur réelle de l'exploitation) est, elle, exclue de la PE.

### **La prévention**

De par sa structure mutualiste, l'objectif de l'assureur 1 est de garantir le niveau d'activité sur le long terme. L'accent est donc mis sur la prévention des risques et le « Business Risk Consulting » y est une activité à part entière. De plus, plus de prévention induit moins de sinistres pour l'assureur sur le long terme, ce qui est une situation gagnante pour les deux parties, assureur et assuré.

L'objectif est de mettre en place chez chaque client un Plan de Continuité d'Activité (PCA) afin de faire l'état des lieux de son exposition aux risques et de définir les mesures à prendre pour limiter sa vulnérabilité et améliorer sa résilience. Par exemple, le PCA comprend la définition de tous les fournisseurs, même indirects. Si un fournisseur isolé est repéré, il est alors conseillé de pouvoir facilement faire appel à un fournisseur alternatif. Cela permet de limiter les impacts, sur la production de l'assuré et des effets dominos sur la chaîne de production.

## b. Assureur 2

L'assureur 2 est un assureur spécialisé dans les risques industriels et commerciaux. En Octobre 2017, nous avons rencontré le directeur Technique et Administratif et le directeur de la Souscription - Dommages aux biens, qui ont pu nous éclairer sur les contrats PE proposés.

### Politique de souscription

L'assureur 2 mène une politique de souscription très sélective, notamment dans les industries agroalimentaire et en recyclage des déchets. Ils sont très spécialisés dans les risques industriels.

### Les garanties

En plus de la garantie de base d'indemnisation de la PE, l'assureur 2 propose également des garanties complémentaires, à savoir :

- **Garantie en frais et pertes** : elle permet d'aider au financement de tous les frais engagés ;
- **Frais supplémentaires d'exploitation** (location de matériel ou de locaux, installations provisoires, recours à des fabrications extérieures, frais exceptionnels de transport, de publicité, de publipostage...);
- **Frais supplémentaires additionnels** engagés afin de maintenir sur le marché des produits et/ou services fournis par l'entreprise assurée afin d'éviter une perte irréversible de clientèle ;
- **Garanties Pertes Indirectes** : Prise en compte que certains impacts sont inquantifiables car ils sont en partie immatériels et intangibles. Cette garantie est limitée à 10% des pertes en bâtiments et stocks ;
- **Garantie des frais de prévention** : C'est la garantie qui se développe de plus en plus sur le marché. Il s'agit de garantir le déplacement des stocks, les mesures de protection et les arrêts préventifs.

L'arrêt partiel est pris en compte dans les contrats de l'assureur 2. Le paiement d'une indemnisation en PE est conditionné à la survenance d'un dommage direct.

### Durée d'indemnisation

La période d'indemnisation s'adapte aux demandes des assurés. La durée la plus généralement souscrite est de 12 mois, puis de moins en moins fréquemment, 18, 24 et 36 mois. Plus un site est grand et plus il contient d'équipements sophistiqués, plus la reprise d'activité sera lente. Ainsi, seules quelques entreprises, les très grandes entreprises, optent pour des durées d'indemnisation supérieures à 12 mois.

### Les limitations de garantie

La PE est définie en durée et en limite contractuelle d'indemnité avec des sous-limites en montant pour :

- les carences fournisseurs et clients ;
- les carences de services (électricité, énergie) ;
- les arrêts administratifs (victimes/responsabilité) ;

— les interdictions d'accès - où la limite est également définie en fonction du temps.

Les niveaux de ces sous-limites sont variables en fonction des contrats, des montants assurés notamment.

### **Difficultés de la tarification et de l'estimation du risque**

Tout d'abord, les assureurs font face à des situations très complexes lorsqu'il s'agit d'estimer des PE dans le cadre de groupes ayant des filiales. Si un site d'une entreprise est touché, le calcul de la PE se fait à l'échelle de l'entreprise et non pas uniquement de la filiale. Or, dans les grands groupes internationaux, la chaîne de production peut être très complexe.

De plus, les assureurs manquent de données pour estimer les risques encourus. Pour les grands risques, il est nécessaire de faire du sur-mesure et de travailler sur avis d'experts. Car d'une part, les situations sont trop particulières pour pouvoir être traitées comme une affaire classique et d'autre part, il n'existe pas de masse statistique historique suffisante pour mener des études actuarielles. On observe également une évolution très rapide des outils de production et des technologies. Ainsi, les bases de données sur lesquelles on pourrait se baser pour calibrer les modèles deviennent au fur et à mesure obsolètes. Il est donc impossible de construire une base de données suffisante car il n'est pas pertinent de prendre du recul dans le temps. Les assureurs doivent donc faire appel aux avis d'experts et en collecter un maximum pour les challenger et les crédibiliser.

Enfin, les assureurs font face à de grosses incertitudes dans leurs estimations car ils ne disposent pas d'une bonne visibilité sur les fournisseurs indirects (les fournisseurs des fournisseurs). Ils peuvent donc se montrer frileux à couvrir certaines industries les plus sensibles aux conséquences sur les chaînes de production, notamment l'industrie automobile.

### **La problématique de la faillite d'une filiale**

Deux situations se présentent :

- soit l'entreprise décide de reconstruire et de reprendre l'activité : elle est alors indemnisée en dommages au prix de remplacement et en PE ;
- si l'entreprise décide de ne pas reconstruire : elle est alors indemnisée en dommages vétusté déduite mais elle ne reçoit pas d'indemnité en PE.

### **Politique de prévention**

Des ingénieurs visitent les sites et font des audits de risques (probabilité et intensité d'un sinistre s'il survient) et des recommandations. En collaboration avec l'entreprise assurée, ils mettent au point des plans de reprise d'activités et de plans de crise afin de diminuer l'impact d'un événement.

Le facteur réglementaire, notamment les règles environnementales, permet aussi d'améliorer la prévention du risque sur le long terme.

## 1.4 LA MODÉLISATION DES DOMMAGES INONDATIONS À CCR

Le développement du modèle inondation de CCR a suivi plusieurs objectifs scientifiques :

- développer un modèle pour estimer les dommages à l'échelle d'un événement inondation ;
- coupler ce modèle avec un générateur d'événements fictifs ;
- proposer une méthode d'estimation des dommages probables à l'échelle d'un portefeuille d'assurance.

Ce modèle répond également aux besoins de CCR, à savoir :

- provisionner le coût d'un événement ;
- tarifier les contrats de réassurance à l'exposition ;
- estimer une perte deux-centennale pour répondre aux exigences de Solvabilité 2.

Pour ce faire, CCR a fait le choix du développement d'un modèle physique sur exposition (Moncoulon, D. et Quantin, A. , 2013 ; Moncoulon, D., 2014 ; Moncoulon, D. et al., 2014). Un modèle déterministe, appelé ARTEMIS et une chaîne de modélisation probabiliste ont été développés. Le modèle ARTEMIS permet de simuler un événement spécifique et les dommages associés. La chaîne de modélisation probabiliste permet de générer un portefeuille d'événements probabilistes et de les coupler avec le modèle ARTEMIS pour obtenir une estimation probabiliste des dommages.

### 1.4.1 Développement du modèle déterministe ARTEMIS

La modélisation physique sur exposition consiste à développer plusieurs modèles liés entre eux : le modèle d'aléa, le modèle de vulnérabilité et le modèle de dommages. Le chaînage des modèles permet d'obtenir en output final le coût d'un événement (cf figure suivante)

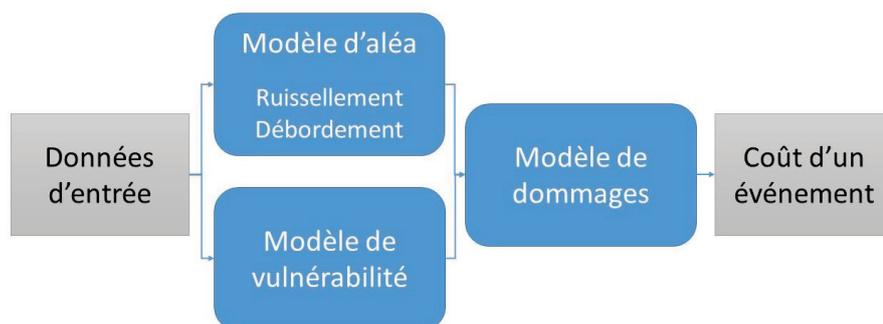


FIGURE 1.9 – Chaînage des modèles dans la modélisation physique sur exposition

Chaque modèle permet donc de modéliser chaque aspect de la catastrophe, les modèles CCR présentent les caractéristiques principales suivantes :

- le modèle d'aléa hydrologique présente trois composantes : une modélisation pluie/écoulement, un modèle de propagation sur le réseau hydrographique et un modèle d'inondation pour les plaines d'inondation. Ce modèle produit une distribution spatiale de la vitesse d'écoulement de surface et de la hauteur d'eau sur les rives du cours d'eau ;
- le modèle de vulnérabilité construit en grande partie à partir des bases de données assurantielles et dont l'objectif est de fournir la localisation et les caractéristiques

de chaque risque pris en compte dans le modèle, c'est-à-dire, chaque police d'assurance ;

- le modèle de dommages qui combine les sorties du modèle hydrologique et les données de vulnérabilité et estime les dommages à partir de distributions statistiques.

Dans le cadre de ce modèle, un événement répond aux caractéristiques suivantes :

- échelle temporelle de simulation : Dates de reconnaissance Cat Nat ou dates issues de données pluviométriques/hydrographiques ou de revues de presse ;
- échelle spatiale de simulation : Communes reconnues Cat Nat pour une même période ou zone géographique issue de données pluviométriques/hydrographiques ou de revues de presse ;
- condition pour que l'événement entre dans le catalogue : seuil de dommages à 10 M €.

Le modèle déterministe répond à plusieurs contraintes opérationnelles :

- fournir une estimation de coût sous quelques jours ;
- chaîne de modélisation intégrée utilisable par un non spécialiste ;
- programmation en Matlab et temps de calcul raisonnable.

#### 1.4.1.1 Le modèle d'aléa

Dans son fonctionnement standard, le modèle d'aléa permet de simuler les inondations les plus fréquentes et les plus coûteuses, à savoir les inondations par débordement et par ruissellement. Sont en revanche exclues, les inondations par remontée de nappes, ainsi que les phénomènes de submersion marine, un modèle spécifique étant développé pour ces dernières.

Il s'agit d'un modèle distribué permettant de simuler les écoulements d'eau en continu sur un modèle numérique de terrain (MNT). Ce modèle a été conçu pour intégrer les principaux processus hydrologiques qui peuvent conduire à une crue génératrice de dommages : transformation de la pluie en débits, infiltration, écoulement de l'eau, hydrologie des cours d'eau et débordement.

Le modèle utilise, en entrée, les données suivantes qui ne sont pas dépendantes des événements :

- MNT au format matriciel (BD Alti à 25m, Météo France) ;
- réseau hydrographique (BD Carthage, Météo France) ;
- occupation du sol (provenant de Corine Land Cover).

Les données d'entrée suivantes dépendent de chaque événement :

- ETP, données quotidiennes d'évapotranspiration potentielle de Météo France ;
- données de pluie : soit les pluies radar Antilope, soit les pluies horaires au pluviomètre de Météo France ;
- débits journaliers sur la période (si disponibles au moment de la simulation de l'événement) de la banque Hydro, base de données administrée par le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), service du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement ;
- débits maximums mensuels du ou des mois de l'événement de la banque Hydro

(si disponibles au moment de la simulation de l'événement et si les dates correspondent).

Merz et al. (2010) ont proposé une classification des paramètres influençant les dommages des inondations en fonction de leurs impacts. Ces paramètres sont la hauteur d'eau, la durée d'inondation, le débit, la pollution, les débris, la fréquence et le timing (jour/nuit ou vacances). Dans le modèle développé par CCR, la hauteur de débordement (m) et le débit associé aux écoulements de surface ( $m^3/s$ ) sont considérés comme étant les deux paramètres principaux. Les autres paramètres n'ont pas été modélisés. La raison principale est la difficulté de les estimer avec un modèle hydrologique (notamment la pollution et les débris). La seconde raison est le manque de données pour calibrer les fonctions de dommages via une approche statistique (la durée d'inondation, la fréquence et le timing). De plus, ces informations ne sont jamais incluses dans les bases de données sinistres des compagnies d'assurance. Enfin, comme il n'était pas réaliste de développer une base de données topographique et hydrologique détaillée dans l'approche macro (échelle métropolitaine), CCR a décidé de développer un modèle hydrologique simplifié.

Ainsi, pour chaque événement, pour chacune des mailles du MNT 25m, les valeurs maximales atteintes suivantes sont estimées :

- hauteur de débordement (m);
- débit associé aux écoulements de surface ( $m^3/s$ ).

Ces données entrent ensuite comme inputs du modèle de dommage.

#### 1.4.1.2 Modèles de vulnérabilité

Le coût d'un événement est estimé sur la base d'un portefeuille de risques assurés géolocalisés sur la zone touchée croisé à l'aléa simulé de l'événement.

Le modèle CCR a été initialement développé pour estimer les dommages aux maisons individuelles. Il a ensuite été élargi pour intégrer également les dommages professionnels.

Les données de vulnérabilités ont été construites par la collecte, année après année, des données des portefeuilles assurés par CCR, dans le contexte de ses relations commerciales avec ses clients. Par exemple, pour l'année 2013, ces données représentent 328 million de biens assurés et 1,8 million de sinistres. Sur la période 1995-2010, en fonction des années, jusqu'à 70% des risques et 50% des sinistres du marché de l'assurance français ont été collectés dans la base de données. Tous les risques et les sinistres sont ensuite géolocalisés en fonction de leur adresse avec les résultats suivants : 52% des risques sont géolocalisés à l'adresse (c'est-à-dire à leur localisation exacte sur la carte), 24% au centre de la rue (au centroïde de la rue), 23% au niveau de la commune (au centroïde de la commune) et 1% ne sont pas localisés.

#### 1.4.1.3 Modèles de dommages

L'estimation des dommages est effectuée au niveau de chaque bien assuré. Le modèle de dommages prend en compte quatre éléments : la probabilité que le bien soit sinistré, le taux de destruction associé, la probabilité que la commune fasse l'objet d'une reconnaissance Cat Nat et enfin la valeur assurée du bien. Au final, les coûts estimés pour chaque bien assuré sont agrégés à différentes échelles (commune, département, France)

et peuvent être calculés pour différents portefeuilles correspondant au marché ou aux entreprises d'assurance.

Deux distributions statistiques sont calibrées dans le modèle de dommage :

- la fréquence de sinistre (ou une probabilité d'être sinistré), en fonction de l'intensité de l'aléa à la localisation du risque ;
- le taux de destruction (un coût en cas de sinistre), appliqué à la valeur assurée, en cas de survenance et déclaration du sinistre.

#### a. La probabilité de sinistre

La probabilité de sinistre est calculée en distinguant les types de risques suivants :

- maison - Propriétaire occupant ou locataire ;
- appartement - Propriétaire occupant ou locataire ;
- propriétaire non occupant et copropriété ;
- risques professionnels (agricoles, industriels, autres risques professionnels).

Les variables prises en compte pour l'estimation de la probabilité de sinistre sont principalement :

- la hauteur de débordement ;
- le débit de ruissellement ;
- la probabilité d'être au Rez de Chaussée pour les habitats collectifs (estimée à partir des informations sur le nombre d'étages par immeuble fournies par l'INSEE).

La distribution est calibrée par ajustement d'un modèle logit sur les données empiriques intensité de l'aléa / occurrence de sinistre (0 ou 1) lors de la calibration des événements. La fonction logit est définie par :

$$\text{logit}(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right)$$

Le modèle de régression logistic est donc :

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_n$$

avec  $p$  une valeur entre 0 et 1. Dans ce modèle, les  $a_i$ ,  $i = 0, \dots, n$  sont les paramètres à calibrer. Les  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  représentent l'intensité de l'aléa. Cette fonction permet donc d'estimer la probabilité de sinistre à partir des variables d'aléa et de vulnérabilité et de calibrer à partir des risques couverts et des sinistres survenus lors d'événements passés afin de compenser, à l'échelle de l'événement, les erreurs de simulation. Ces données sont collectées par CCR auprès de ses clients dans le cadre de leurs relations bilatérales et à caractère confidentiel. Cette démarche rend cependant délicate l'analyse à une échelle fine.

#### b. Estimation des dommages

Les données de vulnérabilité, c'est-à-dire les paramètres de sensibilité du risque assuré à l'inondation, utilisés dans le modèle de dommage sont :

- valeurs assurées ;
- localisation du risque ;
- étage ;

- matériaux de construction (béton, brique, maçonnerie);
- secteur d'activité en cas de risque professionnel.

Les outputs du modèle d'aléa, c'est-à-dire les paramètres d'intensité de l'inondation, utilisés dans le modèle de dommage sont :

- hauteurs de débordement (m) pour les risques situés en zone de débordement;
- débit associé aux écoulements de surface (m<sup>3</sup>/s) pour les autres risques.

Le modèle de dommages est développé à partir de régressions statistiques (taux de destruction) construites par l'analyse des corrélations entre les outputs du modèle d'aléa et les données de sinistralité sur une sélection d'événements historiques. Une version donnée des fonctions de dommage est donc liée à une version donnée du modèle d'aléa. Des fonctions de dommages spécifiques sont développées pour les polices situées dans la zone de débordement (à partir de la hauteur de débordement) et celles situées dans la zone de ruissellement (à partir de la vitesse de ruissellement de surface maximum sur chaque cellule en dehors de la zone de débordement).

Le modèle de dommages est un modèle déterministe excepté à la fin du processus : une méthode de bootstrap est appliquée au niveau de dommages à la commune (comparés aux pertes historiques) pour déterminer un intervalle de confiance basé sur les différences entre simulations et extrapolation de sinistres.

Les résultats bruts du modèle, sans recalage avec les données réelles et avec un paramétrage global (tous les événements) sont les suivants :

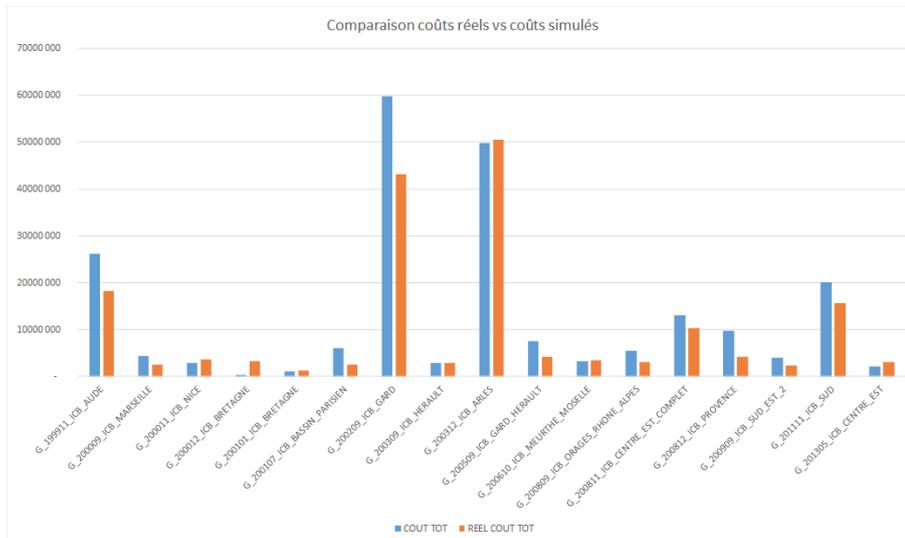


FIGURE 1.10 – Résultats du modèle de dommages

L'erreur moyenne du modèle est de 19% avec des écarts faibles en zone méditerranéenne et pour les orages mais avec une tendance à la sous-estimation pour les crues de plaine.

#### 1.4.1.4 Conclusion partielle sur le modèle ARTEMIS

Les performances du modèle sont les suivantes :

- modélisation hydrologique très simple dont les performances dépendent du paramétrage du modèle;

- avec un paramétrage unique : ruissellement et débordement restent les meilleures variables testées pour modéliser les sinistres ;
- limite : forte variabilité des performances selon les événements.

Ce modèle a été initialement développé pour simuler tous les types d'événements (crues de plaine, crues de montagne, crues cévenoles) rencontrés en France métropolitaine. Cependant, sa modélisation des nappes souterraines étant très simplifiée, il est de fait mieux adapté aux crues à régime rapide, crues de montagne et crues cévenoles. La non-prise en compte de la fonte du stock de neige constitue toutefois une limite en zone de montagne. L'un des principaux atouts de ce modèle est d'être utilisable pour simuler tout événement météorologique et/ou hydrologique survenant sur une superficie et une durée variable dans la limite des capacités de calcul de CCR. Il est ainsi utilisable sur toute la France métropolitaine et a notamment été testé et calibré sur les principaux événements des dix dernières années : la crue du Rhône en décembre 2003, les inondations du Gard en septembre 2002, celles ayant touché l'Aude en novembre 1999, ou le Sud-Est en novembre 2008 pour ne citer que les plus coûteux. Tout l'enjeu du calibrage est non seulement d'obtenir une simulation correcte des débits maximums observés sur différents tronçons des cours d'eau pendant un ancien épisode de crue, mais surtout de modéliser l'enveloppe de la zone inondée pour estimer au mieux les dommages d'un événement. Tous les paramètres du modèle sont ajustés sur la modélisation des dommages pour les événements passés cités ci-dessus. Certains choix simplificateurs dans la modélisation des phénomènes physiques se justifient par leur faible impact sur le coût d'un événement en sortie du modèle.

#### 1.4.2 Modélisation probabiliste

L'objectif de l'approche probabiliste est de mesurer l'exposition financière d'un portefeuille d'assurance inondations, c'est-à-dire de fournir un coût annuel et une période de retour aux événements.

Cette approche répond aux contraintes suivantes :

- données homogènes France entière ;
- utilisation d'un générateur d'événements existant ;
- temps de calcul raisonnable.

Le modèle développé adopte une approche de type monte carlo par événement pour :

- générer un grand nombre d'événements équiprobables ;
- calculer la fréquence de survenance de montants de dommages.

La modélisation probabiliste de l'inondation a été développée en tant qu'extension du modèle déterministe. Le calibrage de l'aléa et des dommages s'appuie sur les mêmes données. Le modèle probabiliste repose sur un catalogue comportant un grand nombre d'événements possibles non encore observés. Deux filières ont été mises en place : une filière reposant uniquement sur le débordement des cours d'eau et une filière issue d'un générateur de pluies fictives permettant de simuler l'aléa complet : pluie, ruissellement, débordement. En effet, les données de la CCR montrent que le débordement seul ne représente, sur les événements d'inondation depuis 1999, que 50% du montant total des sinistres. Les autres facteurs, dont le ruissellement, la submersion marine, les remontées de nappes, représentent l'autre moitié des dommages. L'essentiel est toutefois causé par

le ruissellement.

Pour simuler les aléas fictifs, la méthode retenue a été l'implémentation d'un générateur de précipitations fictives SAMPO-TBM (Leblois & Creutin, 2013) appliquée à la base SAFRAN (Durand, 1993) de Météo France.

## 1.5 ÉVOLUTIONS SOUHAITÉES, OBJECTIFS DE LA THÈSE

Le graphique suivant résume le fonctionnement du modèle :

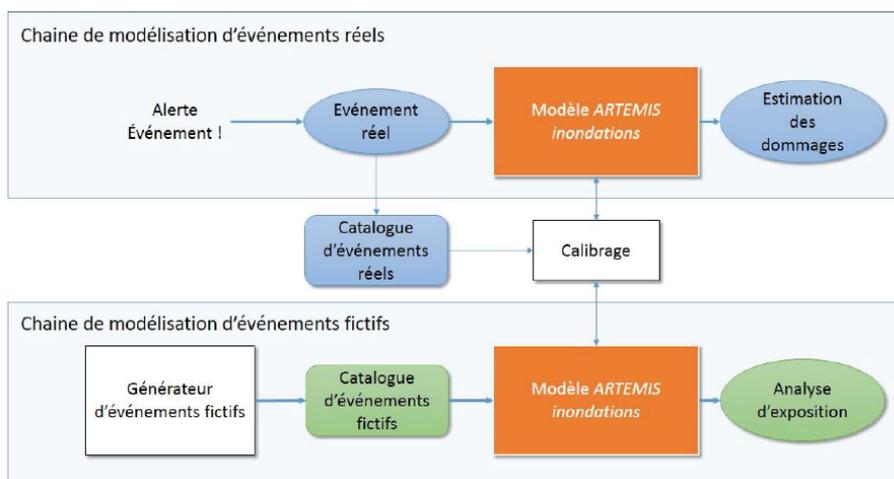


FIGURE 1.11 – Schéma global du modèle CCR

- La modélisation développée à CCR permet donc de répondre aux besoins suivants :
- estimation des dommages directs aux biens particuliers et professionnels consécutifs à un événement :
    - utilisable à l'échelle de l'événement ;
    - interface utilisateur ;
    - à ce jour une centaine d'événements simulés.
  - construction d'une courbe de probabilité de dépassement d'une perte annuelle :
    - exploitée dans le cadre de Solvabilité 2 à l'échelle du portefeuille d'assurance ;
    - validée sur les quantiles les plus fréquents.
  - cartographie de l'aléa débordement et ruissellement :
    - approche homogène France entière ;
    - validée par les données de sinistralité ;
    - comparée aux autres zonages (AZI, EAIP).

Le modèle présente aujourd'hui un certain nombre de limites, à savoir :

- estimation des dommages à une échelle fine peu réaliste qui ne permet pas une approche statistique pour les dommages ;
- fusion du débordement et du ruissellement probabilistes ;
  - réalisée uniquement à des fins opérationnelles ;
  - résultats très sensibles et dépendants de la méthode.
- estimation difficile de l'exposition dans les centres urbains ;
  - ouvrages de protection peu connus ;
  - écoulements en zones bâties ;
  - réseaux d'eaux pluviales et unitaires.

De plus, certaines mesures de prévention, qui peuvent être mises en œuvre sur des zones fortement exposées, peuvent réduire les coûts assurantiels. Or, cela n'est pas pris en compte dans le modèle de dommages. Les travaux de recherche de CCR se concentrent aujourd'hui sur trois axes :

- l'amélioration du modèle actuel ;
- l'estimation des pertes futures dues aux catastrophes naturelles (Le Bihan et al., 2017; Moncoulon et al., 2016) ;
- l'élargissement du périmètre des dommages étudiés.

Les travaux de cette thèse se situent dans ce 3ème axe. En effet, tel que vu dans la section 1, le périmètre des impacts estimés aujourd'hui par le modèle CCR se concentre sur une partie des dommages directs et ne permet pas de mesurer l'ampleur totale d'un événement.

L'objectif à long terme de CCR est de pouvoir fournir une estimation quantitative des impacts économiques des inondations afin de :

- aider les différentes parties prenantes de la gestion du risque d'inondation : en effet, CCR joue un rôle de conseiller envers l'Etat dans sa gestion des catastrophes naturelles. CCR travaille donc à l'élargissement de son périmètre d'étude pour pouvoir fournir l'estimation quantitative nécessaire dans le cadre d'ACB et d'AMC (Section 2) ;
- mieux comprendre et estimer certains risques partiellement ou non couverts par l'assurance aujourd'hui : tel que vu dans la Section 3, les systèmes de transfert de risque et notamment l'assurance permettent d'améliorer la résilience des sociétés. Or, pour qu'un risque soit assurable, l'assureur doit pouvoir estimer le risque qu'il encourt. Elargir le périmètre des risques étudiés par le modèle de CCR permettra de fournir aux assureurs ces estimations qui pourront ainsi développer de nouvelles couvertures d'assurances et CCR pourra par la suite tarifier au mieux ses couvertures de réassurance.

Dans un premier temps, nous nous sommes donc intéressés à la construction d'un modèle d'impact global et à la définition du processus de modélisation de ces impacts. En effet, depuis les travaux de J.P. Torterotot (1993), les travaux de recherche se sont spécialisés dans l'étude d'un impact précis. Si cette démarche est nécessaire pour l'amélioration de la compréhension et de l'estimation de chacun de ces impacts, il serait aujourd'hui intéressant de mener un travail de rassemblement de ces travaux afin de les implémenter dans un modèle global. Ces travaux de thèse permettent de faire un premier pas dans cette direction.

A partir de la classification des impacts définie dans la section 1 de ce chapitre, le modèle global proposé suivra le chaînage de modélisation des dommages suivant :

Les outputs des différents modèles serviront donc d'inputs pour les modèles suivants. Cette démarche permettra d'avoir une répartition des impacts par poste et une compréhension des effets en cascade des dommages directs vers les effets macro-économiques.

Les dommages aux véhicules, qui entrent dans le cadre du régime Cat Nat, ne sont pas encore modélisés aujourd'hui. Or, lors d'une crue éclair, ces dommages peuvent représenter une part non négligeable des dommages. Ils ont donc constitué le premier poste de dommages étudié dans ces travaux, dans le Chapitre 2. L'étude de ce risque, nous a permis d'explorer et de comparer différentes approches de modélisation : une régression

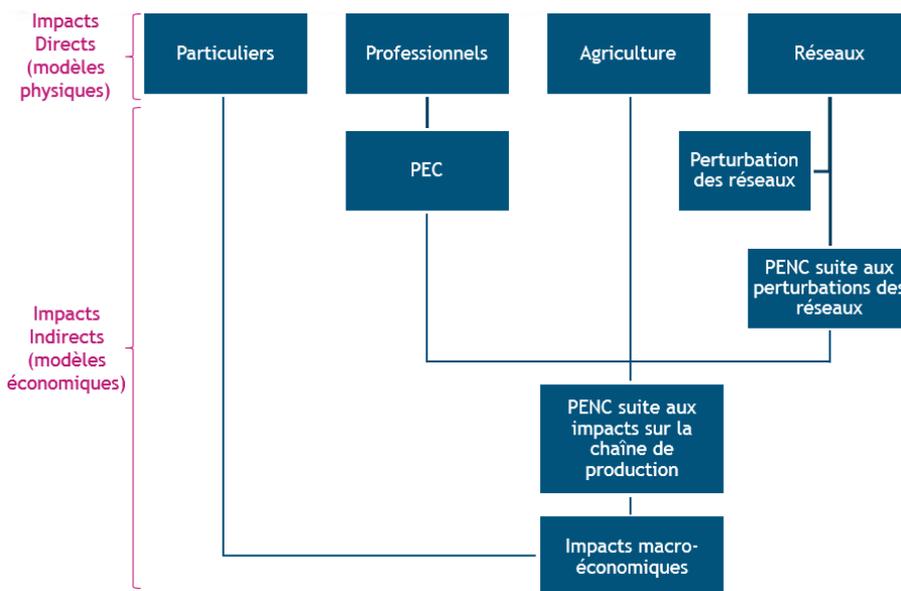


FIGURE 1.12 – Schéma global de la modélisation des impacts

linéaire, une modélisation fréquence x sévérité, une modélisation physique sur exposition. Ces méthodologies ont été décrites et implémentées, leurs limites actuelles ont été identifiées et la marche à suivre pour y faire face a été déterminée. La régression linéaire est la méthodologie aujourd’hui utilisée par CCR. Une amélioration de cette méthodologie a été proposée et ses limites mises en avant. Une modélisation fréquence x sévérité, très utilisée dans le monde de l’assurance, a ensuite été implémentée en l’associant à la théorie des valeurs extrêmes. Enfin, nous avons développé une modélisation physique sur exposition en s’appuyant sur le modèle d’aléa inondation CCR et en développant un module de vulnérabilité et de dommages propres à ce risque.

CCR étant chargée de la gestion comptable et financière du Fonds National de Gestion des Risques en Agriculture pour le compte de l’Etat, les travaux se sont poursuivis par la modélisation du risque agricole et sont présentés dans le chapitre 3. Dans ce chapitre, à partir d’un état de l’art sur la modélisation des conséquences agricoles des inondations, une modélisation de ce risque est proposée et implémentée. Le modèle s’intègre dans la démarche de modélisation physique sur exposition développée à CCR. Le travail a porté sur le développement des modules de vulnérabilité et de dommages spécifiques à l’agriculture. Le modèle de vulnérabilité a été développé à partir du registre parcellaire graphique et le module de dommages a été développé à partir des courbes de dommages à l’agriculture développées par le groupe de travail national Analyse Coûts-Bénéfices inondations à travers les travaux de l’IRSTEA (Agenais et al., 2013). Le modèle d’aléa utilisé est le modèle développé par CCR depuis 2003 et décrit dans la section 4 de ce chapitre.

Enfin, un dernier chapitre nous permettra de faire un état des lieux de l’avancement des travaux et de le replacer dans le contexte de la modélisation globale des impacts proposée à CCR. Pour les impacts non traités, nous présenterons les problématiques de modélisation, un court état de l’art et les conclusions que nous en avons tirées en terme de modélisation.

COMME décrit dans le chapitre précédent, le modèle de dommages directs développé à CCR couvre les dommages au bâti, résidentiel et professionnel, et son contenu. Les dommages aux véhicules, pourtant couverts dans le cadre du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, ne sont aujourd'hui pas inclus dans ce modèle. La modélisation Auto actuelle consiste à estimer le ratio Sinistres / Primes (S/P) Auto tous périls à partir de la sinistralité Non Auto hors sécheresse. Or, CCR souhaite pouvoir gagner en précision, différencier les périls et modéliser la sinistralité Auto à l'échelle d'un événement inondation Cat Nat.

Plusieurs approches de modélisation des dommages sont étudiées et implémentées sur le risque Auto. Tout d'abord, la méthodologie actuelle d'estimation du S/P Auto est implémentée et commentée. Les limites sont identifiées et une évolution qui lui permet de se rapprocher des attentes de CCR est proposée (Section 2). Cette modélisation, très simple, permet une première approche de ce risque. Deux démarches de modélisation, plus élaborées, sont alors proposées : une modélisation actuarielle de type Fréquence x Sévérité (Section 3) et une modélisation physique sur exposition (Section 4).

Si le modèle Fréquence x Sévérité ne permet pas d'obtenir un coût pour un événement spécifié, il présente l'intérêt d'analyser le comportement probabiliste de chaque variable constitutive du risque : sa fréquence et sa sévérité. Dans notre cas, la fréquence correspond à la fréquence des événements inondation et la sévérité correspond au coût de ces événements sur le portefeuille marché de CCR. Dans le cadre de l'étude d'un risque de type catastrophe naturelle, la théorie des valeurs extrêmes, et plus précisément, la méthode de dépassement de seuil, permet d'estimer au plus juste la sévérité.

Ce travail s'intéresse ensuite à l'élaboration d'un modèle physique sur exposition. Cette démarche s'inscrit dans la logique de modélisation actuelle de CCR. Ce modèle, qui s'imbriquera dans le modèle inondation développé par CCR, se décompose en plusieurs modules : le module d'aléa, le module de vulnérabilité et le module de dommages. Le module d'aléa, qui simule les caractéristiques physiques de l'inondation, se base sur le module d'aléa déjà développé en interne. Le module de vulnérabilité, qui fait l'inventaire des éléments exposés à l'inondation et leurs caractéristiques, et le module de dommages,

qui croise les deux premiers modules et applique des taux de destruction pour obtenir la sinistralité, seront ensuite développés pour le risque Auto.

## 2.1 MÉTHODOLOGIE ACTUELLE DE LA MODÉLISATION DU S/P AUTO

### 2.1.1 Approche méthodologique générale

L'objectif actuel du calcul de la sinistralité automobile est d'estimer le ratio sinistre sur prime du parc automobile français réassuré auprès de CCR, tous périls confondus et pour un exercice donné. Comme illustré dans les diagrammes du processus du Modèle Interne Partiel ci-dessous, cette estimation est calculée après et à partir du calcul de la sinistralité non-Auto.

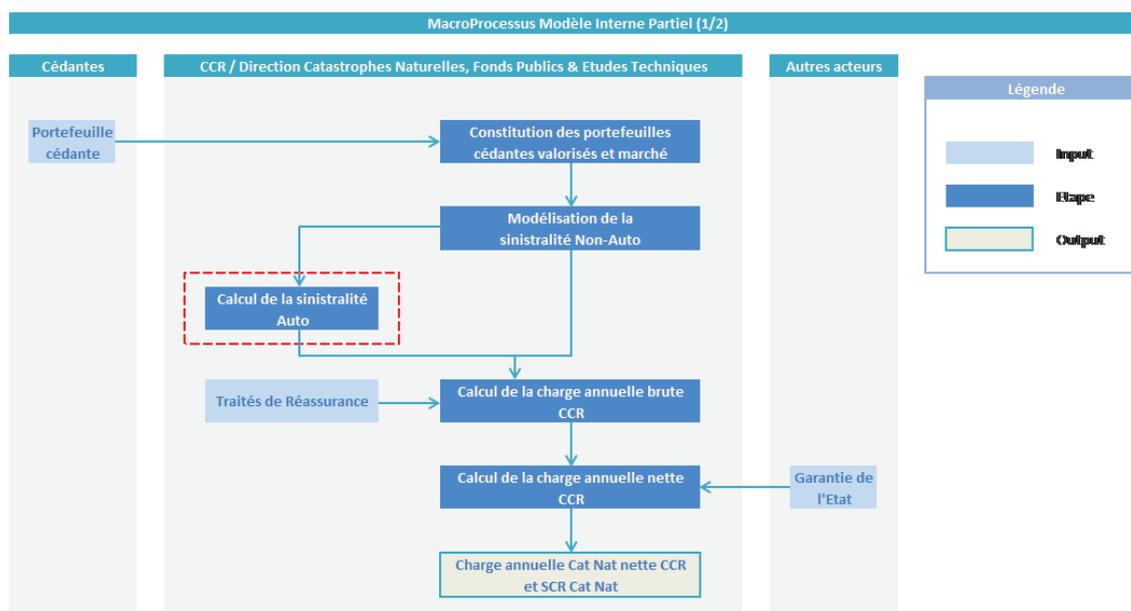


FIGURE 2.1 – MacroProcessus MIP Auto (1/2)

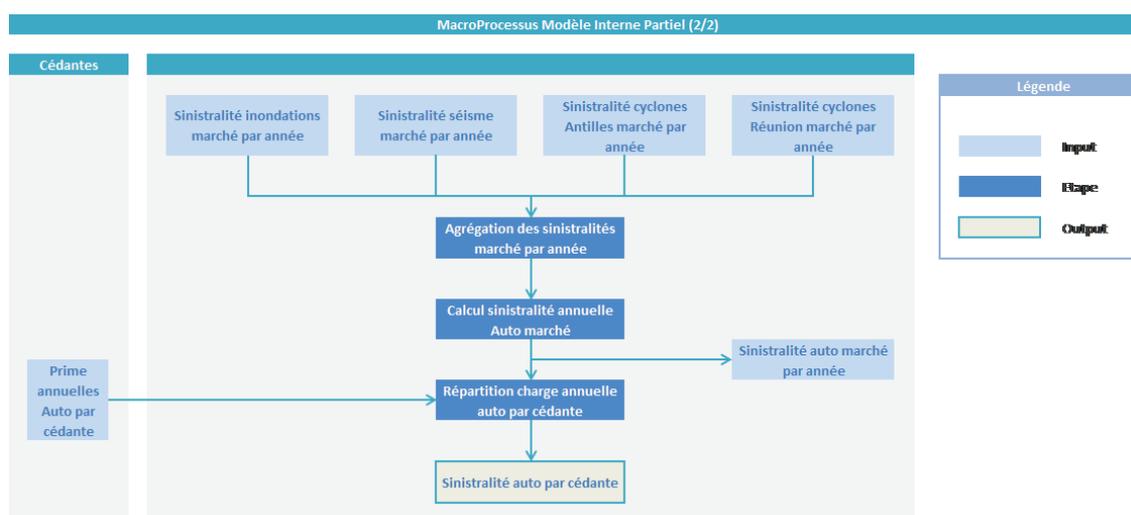


FIGURE 2.2 – MacroProcessus MIP Auto (1/2)

## 2.1.2 Estimation de la sinistralité auto à partir de la sinistralité non-auto

### 2.1.2.1 Les données

#### a. Données utilisées

Les données utilisées sont les données comptables auto et non-auto (hors sécheresse) sur la période 2000-2012, la cession en quote-part auto Cat Nat n'étant obligatoire que depuis 2000. Plus précisément, ce sont les rapports sinistres sur primes (S/P) auto et non-auto qui sont utilisés dans le modèle de régression.

Afin d'obtenir une modélisation « marché », les données auto utilisées sont les données issues des contrats quote-part. En effet, le quote-part étant à 50% depuis 2000, en multipliant les montants des primes et des sinistres par deux, on obtient les primes et les sinistres du point de vue des cédantes.

Les données comptables étant des données tous périls confondus, il convient de soustraire la sinistralité sécheresse, celle-ci ne provoquant pas de dommages auto. La sinistralité hors sécheresse est donc déduite de la sinistralité comptable tous périls par exercice et par cédante à laquelle on soustrait le montant des sinistres sécheresse estimés. La sécheresse étant une branche longue, on estime la sinistralité sécheresse par des triangles de liquidation.

#### b. La statistique modélisée : les S/P

Si cela pouvait paraître naturel de s'intéresser aux montants des sinistres, cette modélisation s'attache à calculer les S/P car ils permettent de constituer un historique de données beaucoup plus fiable.

Modéliser la loi représentative du montant de sinistralité CCR à 100% implique de considérer que l'exposition de CCR aux Cat Nat est constante sur l'historique étudié. Cette hypothèse est trop forte car outre l'ampleur d'un événement, la sinistralité Cat Nat évolue notamment avec :

- le nombre de risques exposés. Ainsi, considérer un montant de sinistralité sans le confronter à la matière assurable paraît biaisé : une inondation en 1990 aurait causé en 2005 des dégâts significativement plus importants du fait d'une plus grande vulnérabilité, de l'inflation et de la croissance du portefeuille ;
- le coût des véhicules. Il existe des indices pouvant être utilisés pour actualiser le coût des sinistres comme l'IPC (Indice des Prix à la Consommation) mais cela ajoute une incertitude supplémentaire.

L'approche qui consiste à modéliser les S/P paraît à ce titre préférable car la prime peut être vue comme une mesure de la matière assurable. Bien que la prime n'évolue pas uniquement en fonction du nombre de risques mais également en fonction des politiques tarifaires pratiquées pour les sociétés d'assurance, rapporter la sinistralité à la prime permet néanmoins d'intégrer de façon simple, bien qu'un peu approximative l'évolution de la matière assurable.

Également, même si les primes et le coût des sinistres n'évoluent pas de façon identique, considérer les S/P plutôt que les montants de sinistres permet de gommer au

moins partiellement l'effet d'inflation.

De même, bien que le périmètre réassuré par CCR soit assez stable, le fonctionnement en S/P permet d'occulter les résiliations et affaires nouvelles observées sur l'historique de l'étude.

Modéliser en S/P n'aplanit pas pour autant toutes les difficultés. Les cédantes ayant résilié ou souscrit un traité sur la période n'avaient pas forcément une exposition aux Cat Nat Auto et Non Auto dans la « moyenne » et les véhicules ont beaucoup évolué durant la période 2000-2012 (introduction de nombreux systèmes électroniques fragilisant les automobiles mais plus grande sophistication).

Par ailleurs, l'évolution probable du coût des catastrophes naturelles (due d'une part au changement climatique et d'autre part à l'augmentation de la matière assurable ce qui implique donc une plus grande exposition) souligne encore plus l'intérêt de travailler sur les S/P. En effet, l'augmentation de la matière assurable, qui participe en partie à l'évolution du coût des événements, est directement intégrée dans l'évolution de la prime. Cela a pour effet de gommer une partie de la hausse observée.

On pourrait même supposer que toute dérive de la sinistralité est répercutée dans la tarification. Certes les assureurs n'ont pas aujourd'hui la main sur la surprime Cat Nat, fixée par décret, mais nous pouvons penser que les pouvoirs publics réagiraient à l'apparition d'un déséquilibre du régime Cat Nat.

Nous pouvons donc supposer que, si le coût des catastrophes naturelles est éventuellement amené à évoluer sous l'impulsion du réchauffement climatique et l'augmentation de l'exposition de la matière assurable, le S/P est une mesure suffisamment stationnaire puisque l'impact sera également répercuté au niveau de la prime.

Compte tenu de toutes ces réflexions, le choix de modéliser les S/P a donc paru préférable à celui de la charge de sinistres. Il reste cependant à traiter un dernier point pour obtenir les données sources de notre modèle : les conditions réglementaires sur la surprime Cat Nat n'ont pas toujours été les mêmes et il convient d'effectuer ce que l'on appelle communément un "as-if" des primes afin que chaque assiette soit recalculée aux conditions au moment de l'étude.

#### **2.1.2.2 La mise en as-if des données**

##### **a. Retraitement des données : mise en as-if**

La première étape de la modélisation consiste à redresser l'échantillon de statistiques historiques, afin de le rendre représentatif des conditions de souscription et économiques de l'année de couverture à évaluer. Ce redressement, ou revalorisation des données historiques est appelé « as-if ».

Comme expliqué précédemment, modéliser les S/P permet de lisser en partie l'effet de changement de politique tarifaire et l'impact de l'inflation. Ainsi, mettre en « as if » nos données correspond dans notre cas à effectuer des ajustements sur la prime Cat Nat, impactée par les évolutions du taux de surprime Cat Nat ( $\tau$ ) et du niveau de prélèvement ( $\pi$ ) alimentant le Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM), pour

rendre les primes comparables entre elles d'un exercice sur l'autre. Il s'agit donc de calculer une valeur actualisée de la prime, dans une situation dite « as-if », c'est-à-dire dans laquelle les taux de surprime et de prélèvement n'auraient pas changé.

Sur la période 2000-2012,  $\tau$  est resté constant et égal à 12%. Cependant,  $\pi$  a énormément fluctué sur la période. Fixé à 2,5% en 1995, il est passé à 2% suite à l'arrêté du 24/07/2003, à 4% à partir du 01/09/2006, à 8% à compter de la publication de l'arrêté du 12/08/2008 et enfin à 12% depuis l'arrêté du 04/03/2009. On choisit donc d'actualiser à un taux de surprime constant  $\tau$  de 12% et un prélèvement nul  $\pi$  au titre du FPRNM pour se mettre dans une situation actuelle « brute de prélèvement ». Les notations  $\tau$  et  $\pi$  désigneront dans la suite les paramètres de cette situation « as-if », fixés aux valeurs suivantes :

$$\tau = 12\% \text{ et } \pi = 0$$

On note  $PE_n$  la prime émise l'année  $n$  et  $PA_n$  la prime acquise l'année  $n$ .

### b. Retraitement des prélèvements FPRNM

On pose ici plusieurs hypothèses :

- le rythme mensuel d'émission des primes suit celui des recettes du FPRNM;
- ce rythme est identique pour tous les exercices;
- l'émission des primes au cours d'un mois est uniforme.

En répartissant uniformément le rythme mensuel d'émission des primes sur le nombre de jours du mois correspondant, il est possible de calculer  $\rho_j$  le rythme quotidien d'émission de prime au cours du  $j^{\text{ème}}$  jour de l'exercice  $n$ . Ce jour-là, il est donc émis la prime  $PE_n * \rho_j$ . En supposant que l'exercice  $n$  comporte 365 jours, il apparaît que :

$$PE_n = \sum_{j=1}^{365} PE_n * \rho_j \text{ sachant que } \sum_{j=1}^{365} \rho_j = 1 \quad (2.1)$$

En notant  $\pi_j$  la valeur du taux de prélèvement FPRNM au jour  $j$ , le total des primes émises lors de l'exercice, prélèvement FPRNM déduit, est égal à :

$$PE_n^{brute} = PE_n * \frac{1}{\sum_{j=1}^{365} \rho_j * (1 - \pi_j)} \quad (2.2)$$

En particulier si le prélèvement FPRNM est resté constant à la valeur  $\bar{\pi}$  tout au long de l'exercice  $n$ ,

$$PE_n^{brute} = \frac{PE_n}{(1 - \bar{\pi})} \quad (2.3)$$

### c. Mise en as-if des primes émises

L'as-if de la prime émise lors d'un exercice  $n$  vaut :

$$PE_n^{as-if} = PE_n * \frac{\tau * (1 - \pi)}{\sum_{j=1}^{365} \rho_j * \tau * (1 - \pi_j)} = PE_n * \frac{1 - \pi}{\sum_{j=1}^{365} \rho_j * (1 - \pi_j)} \quad (2.4)$$

#### d. Passage des primes émises aux primes acquises

La prime acquise à un exercice  $n$  est constituée de la somme de la part de prime émise l'année précédente ( $n - 1$ ) acquise à l'année  $n$ , et de la part de prime émise l'année  $n$  acquise à l'année  $n$ . Ce qui s'écrit (pour deux années consécutives de 365 jours) :

$$PA_n = \sum_{\substack{j=1 \\ \text{annee}(n-1)}}^{365} \frac{PE_{n-1}^{as-if}}{\tau * (1 - \pi)} * \frac{j}{365} * \rho_j * \tau_j * (1 - \pi_j) + \sum_{\substack{k=1 \\ \text{annee}(n)}}^{365} \frac{PE_n^{as-if}}{\tau * (1 - \pi)} * (1 - \frac{k}{365}) * \rho_k * \tau_k * (1 - \pi_k) \quad (2.5)$$

La même formule donne l'as-if de la prime acquise, qui est la prime qui aurait été perçue si le taux de prélèvement  $\pi_j$  était resté constant à la valeur  $\pi$ , c'est-à-dire :

$$PA_n^{as-if} = \sum_{\substack{j=1 \\ \text{annee}(n-1)}}^{365} PE_{n-1}^{as-if} * \frac{j}{365} * \rho_j + \sum_{\substack{k=1 \\ \text{annee}(n)}}^{365} PE_n^{as-if} * (1 - \frac{k}{365}) * \rho_k \quad (2.6)$$

soit, en factorisant par  $PE_{n-1}^{as-if}$ ,

$$PA_n^{as-if} = PE_{n-1}^{as-if} * \left( \sum_{\substack{j=1 \\ \text{annee}(n-1)}}^{365} \frac{j}{365} * \rho_j + \sum_{\substack{k=1 \\ \text{annee}(n)}}^{365} \frac{PE_n^{as-if}}{PE_{n-1}^{as-if}} * (1 - \frac{k}{365}) * \rho_k \right) \quad (2.7)$$

En factorisant pareillement l'équation (5) et en la combinant avec l'équation (7), on obtient  $PA_n^{as-if}$  en fonction de  $PA_n$ ,  $PE_n^{as-if}$ ,  $PE_{n-1}^{as-if}$ ,  $\tau$  et  $\pi$  :

$$PA_n^{as-if} = PA_n * \tau * (1 - \pi) * \frac{\sum_{\substack{j=1 \\ \text{annee}(n-1)}}^{365} \frac{j}{365} * \rho_j + \sum_{\substack{k=1 \\ \text{annee}(n)}}^{365} \frac{PE_n^{as-if}}{PE_{n-1}^{as-if}} * (1 - \frac{k}{365}) * \rho_k}{\sum_{\substack{j=1 \\ \text{annee}(n-1)}}^{365} \frac{j}{365} * \rho_j * \tau_j * (1 - \pi_j) + \sum_{\substack{k=1 \\ \text{annee}(n)}}^{365} \frac{PE_n^{as-if}}{PE_{n-1}^{as-if}} * (1 - \frac{k}{365}) * \rho_k * \tau_k * (1 - \pi_k)} \quad (2.8)$$

#### e. Coefficient d'as-if

Les coefficients d'as-if sont donc :

— pour les primes émises :

$$\frac{PE_n^{as-if}}{PE_n} = \frac{\tau * (1 - \pi)}{\sum_{j=1}^{365} \rho_j * \tau * (1 - \pi_j)} \quad (2.9)$$

— pour les primes acquises :

$$\frac{PA_n^{as-if}}{PA_n} = \tau * (1 - \pi) * \frac{\sum_{\substack{j=1 \\ \text{annee}(n-1)}}^{365} \frac{j}{365} * \rho_j + \sum_{\substack{k=1 \\ \text{annee}(n)}}^{365} \frac{PE_n^{as-if}}{PE_{n-1}^{as-if}} * (1 - \frac{k}{365}) * \rho_k}{\sum_{\substack{j=1 \\ \text{annee}(n-1)}}^{365} \frac{j}{365} * \rho_j * \tau_j * (1 - \pi_j) + \sum_{\substack{k=1 \\ \text{annee}(n)}}^{365} \frac{PE_n^{as-if}}{PE_{n-1}^{as-if}} * (1 - \frac{k}{365}) * \rho_k * \tau_k * (1 - \pi_k)} \quad (2.10)$$

On multiplie alors ces coefficients par les prévisions de primes émises et acquises pour obtenir les valeurs « as-if » des primes. Comme précisé précédemment, le fonctionnement en S/P permet de lisser en partie les changements de politique tarifaire et l'inflation et ainsi, la mise en « as-if » des S/P passe par l'ajustement sur les primes Cat Nat des évolutions du taux de surprime Cat Nat ( $\tau$ ) et du niveau de prélèvement ( $\pi$ ) alimentant le FPRNM.

### 2.1.2.3 Estimation par régression linéaire simple

#### a. Méthode

Afin d'estimer la sinistralité auto, CCR a fait le choix d'utiliser une régression linéaire des S/P non-auto historiques hors sécheresse (périls inondations, cyclones et séismes) et des S/P auto historiques. On note donc  $Y = \frac{S}{P}Auto$  la variable aléatoire réelle à expliquer et  $X = \frac{S}{P}Non\ Auto$  la variable explicative. Le modèle s'écrit :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 * X + \epsilon \quad (2.11)$$

Où  $\beta_0$  et  $\beta_1$  sont les paramètres de la régression et  $\epsilon$  l'erreur.

Les hypothèses relatives à ce modèle sont les suivantes :

- la distribution de l'erreur  $\epsilon$  est indépendante de  $\frac{S}{P}Non\ Auto$ ,
- l'erreur est centrée et de variance constante (homocédasticité) :

$$\forall i = 1, \dots, n \ E(\epsilon_i) = 0, \text{Var}(\epsilon_i) = \sigma^2$$

- $\beta_0$  et  $\beta_1$  sont constants (pas de rupture du modèle),
- les résidus suivent une loi normale :  $\epsilon \hookrightarrow N(0, \sigma^2)$

Les paramètres de la régression sont estimés par la méthode des moindres carrés à partir des historiques des données auto et non-auto (hors sécheresse) sur la période 2000-2012. Pour une séquence d'observation  $(x_i, y_i)_{i=1, \dots, n}$ , le critère des moindres carrés s'écrit :

$$\min_{\beta_0, \beta_1} \sum_{i=1}^n (y_i - (\beta_0 + \beta_1 * x_i))^2$$

Dans notre cas, avec 13 années d'historique,  $n = 13$ . On pose :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$s_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x * s_y}$$

Soient  $\hat{\beta}_0$  et  $\hat{\beta}_1$  les estimateurs de  $\beta_0$  et  $\beta_1$ . Les moindres carrés sont minimisés par :

$$\hat{\beta}_1 = \frac{s_{xy}}{s_x^2}$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 * \bar{x}$$

## b. Résultats

On obtient ainsi la régression suivante :

$$\frac{S}{P} Auto = 0,9092 * \frac{S}{P} NonAuto - 0,0819 \quad (2.12)$$

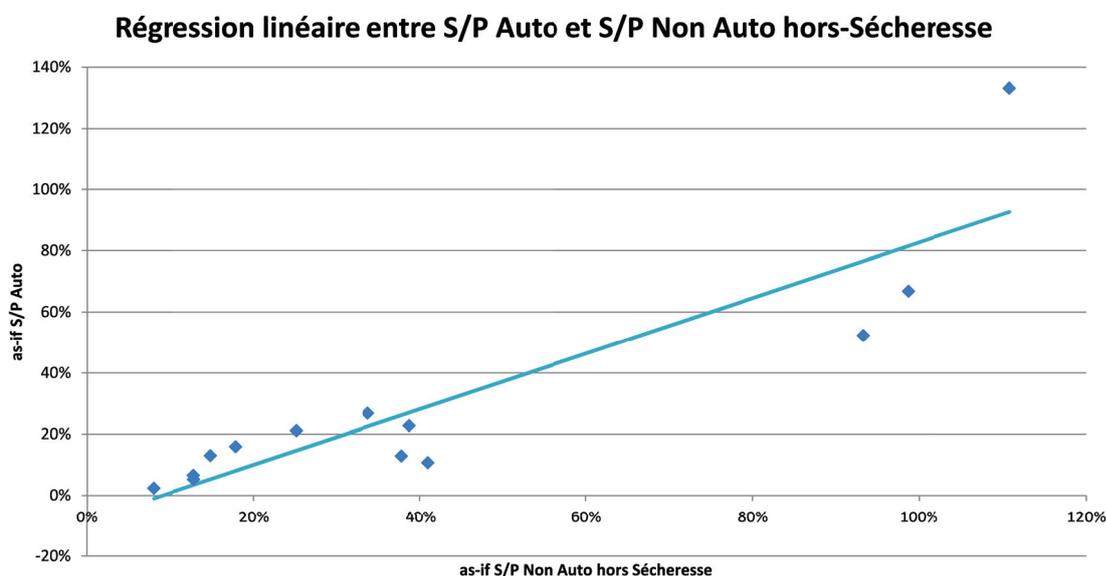


FIGURE 2.3 – Estimation du S/P Auto à partir du S/P Non Auto

L'illustration ci-dessus représente la droite de régression linéaire issue des données de primes et de sinistres sur la période 2000-2012, connues de CCR en octobre 2013.

Chaque point bleu sur le graphe représente une année de sinistralité. 13 années sont représentées ici, de 2000 à 2012. L'année 2000 marque le début de l'historique de sinistralité car c'est à partir de cette année que les données automobiles sont systématiquement disponibles.

Le modèle de régression est utilisé pour l'estimation de la sinistralité auto pour l'ensemble du marché. La sinistralité marché est ensuite répartie par cédante à partir des primes annuelles auto.

### 2.1.2.4 Qualité d'ajustement, prédiction

#### a. Étude de la fiabilité du modèle

Les résidus calculés sont :

$$\epsilon_i = y_i - \hat{y}_i$$

La variance  $\sigma^2$  est estimée par la variation résiduelle :

$$s^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2$$

On obtient ici  $s^2 = 0,03$ .

Il est d'usage de décomposer les sommes de carrés des écarts à la moyenne sous la forme ci-dessous :

Total sum of squares :

$$SST = (n-1) * s_y^2$$

Regression sum of squares :

$$SSR = (n-1) * \frac{s_{xy}^2}{s_x^2}$$

Error sum of squares

$$SSE = (n-2) * s^2$$

On a la relation :  $SST = SSR + SSE$

Le coefficient de détermination,  $R^2 = \frac{s_{xy}^2}{s_x^2 * s_y^2} = 1 - \frac{n-2}{n-1} \frac{s^2}{s_y^2} = \frac{SSR}{SST}$ , qui exprime le rapport entre la variance expliquée par le modèle et la variance totale, est d'environ 80%, ce qui est très bon pour une régression linéaire dans ce contexte.

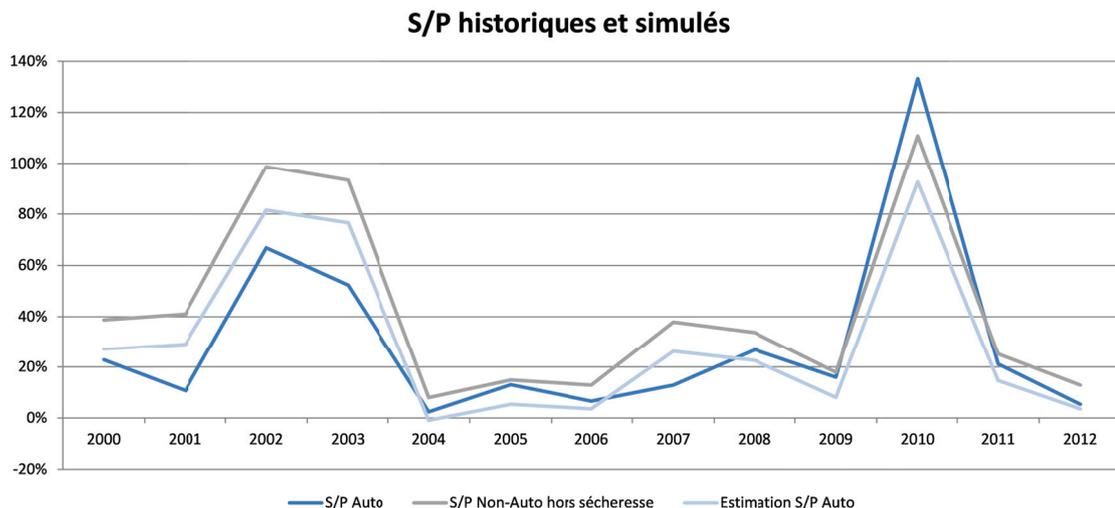


FIGURE 2.4 – S/P Historiques et simulés

L'historique des ratios S/P auto et non-auto présenté ci-dessus montre une évolution similaire des deux courbes c'est-à-dire que les S/P auto simulés se comportent d'une manière comparable aux S/P auto historiques. Ceci est confirmé par le coefficient de corrélation linéaire, qui permet de mesurer l'adéquation du modèle linéaire, élevé de la régression linéaire (89%). Le coefficient de corrélation linéaire est d'autant plus proche de

1 que la somme des résidus est proche de 0. Ici, la somme des résidus est égale à 0,32.

Cependant, bien que le coefficient de corrélation soit élevé, l'historique des ratios S/P sur lequel la régression se base est relativement restreint (13 années). L'approximation par la régression linéaire n'est donc pas parfaite. Ceci peut notamment être observé pour l'année 2010 où les S/P auto simulés sous-estiment nettement les S/P auto historiques.

Cela s'explique par le fait que l'année 2010 fut une année atypique du fait de deux événements majeurs : les inondations de juin dans le Var et de la tempête Xynthia de février-mars. Or, on remarque que lors d'événements brutaux et violents, les dommages automobiles augmentent proportionnellement plus que les dommages non auto. En effet, lorsque les personnes sont prévenues de la survenance d'un événement, elles prennent leur précaution et déplacent leur voiture. Le montant des dommages auto dépend donc des caractéristiques de l'événement. Or l'événement du Var correspond à une crue éclair (crue soudaine et violente) et les principaux dommages causés par la tempête Xynthia sont dus au phénomène de submersion marine survenue avec la rupture de digues. La relation observée sur l'historique 2000-2012 entre les S/P non auto et les S/P auto ne fonctionne alors pas pour l'année 2010.

On remarque donc là une limite de cette régression : les dommages auto n'ont pas une relation parfaitement linéaire aux dommages non auto car celle-ci dépend du type d'événement.

### b. Loi des paramètres

Les estimateurs  $\hat{\beta}_0$  et  $\hat{\beta}_1$  sont des variables aléatoires réelles de matrices de covariance :

$$\sigma^2 * \begin{bmatrix} \frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{(n-1)*s_x^2} & \frac{\bar{x}^2}{(n-1)*s_x^2} \\ \frac{\bar{x}^2}{(n-1)*s_x^2} & \frac{1}{(n-1)*s_x^2} \end{bmatrix}$$

Qui est estimée en remplaçant  $\sigma^2$  par son estimation  $s^2$ , et on obtient donc :

$$\begin{bmatrix} 0,0056 & 0,2773 \\ 0,2773 & 0,0192 \end{bmatrix}$$

Sous l'hypothèse que les résidus sont gaussiens, on montre que :

$$\frac{(n-2) * s^2}{\sigma^2} \hookrightarrow X_{n-2}^2$$

Et donc les statistiques

$$\frac{\hat{\beta}_0 - \beta_0}{s * \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{(n-1)*s_x^2} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

Et

$$\frac{\hat{\beta}_1 - \beta_1}{s * \left( \frac{1}{(n-1)*s_x^2} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

Suivent des lois de Student à (n-2) degrés de liberté, soit 11 sans notre cas. Ceci permet de construire les intervalles de confiance :

$$\hat{\beta}_0 \pm t_{1-\frac{\alpha}{2};(n-2)} * s * \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{(n-1) * s_x^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\hat{\beta}_1 \pm t_{1-\frac{\alpha}{2};(n-2)} * s * \left(\frac{1}{(n-1) * s_x^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Dans notre cas, avec  $\alpha = 5\%$ , on obtient ainsi les intervalles de confiance suivant :  
 Pour le paramètre  $\beta_0$  :  $[-0,2468 \quad 0,0831]$   
 Pour le paramètre  $\beta_1$  :  $[0,6044 \quad 1,2141]$

Cependant, une inférence conjointe sur  $\beta_0$  et  $\beta_1$  ne peut être obtenue en considérant séparément les intervalles de confiance. La région de confiance est une ellipse d'équation :

$$n * (\hat{\beta}_0 - \beta_0)^2 + 2 * (\hat{\beta}_0 - \beta_0) * (\hat{\beta}_1 - \beta_1) * \sum_{i=1}^n x_i + (\hat{\beta}_1 - \beta_1)^2 * \sum_{i=1}^n x_i^2 = 2 * s^2 * F_{\alpha;2,(n-2)}$$

Soit :

$$13 * (-0,0819 - \beta_0)^2 + 10,9164(-0,0819 - \beta_0) * (0,9092 - \beta_1) + 3,8057 * (0,9092 - \beta_1)^2 = 0.2312$$

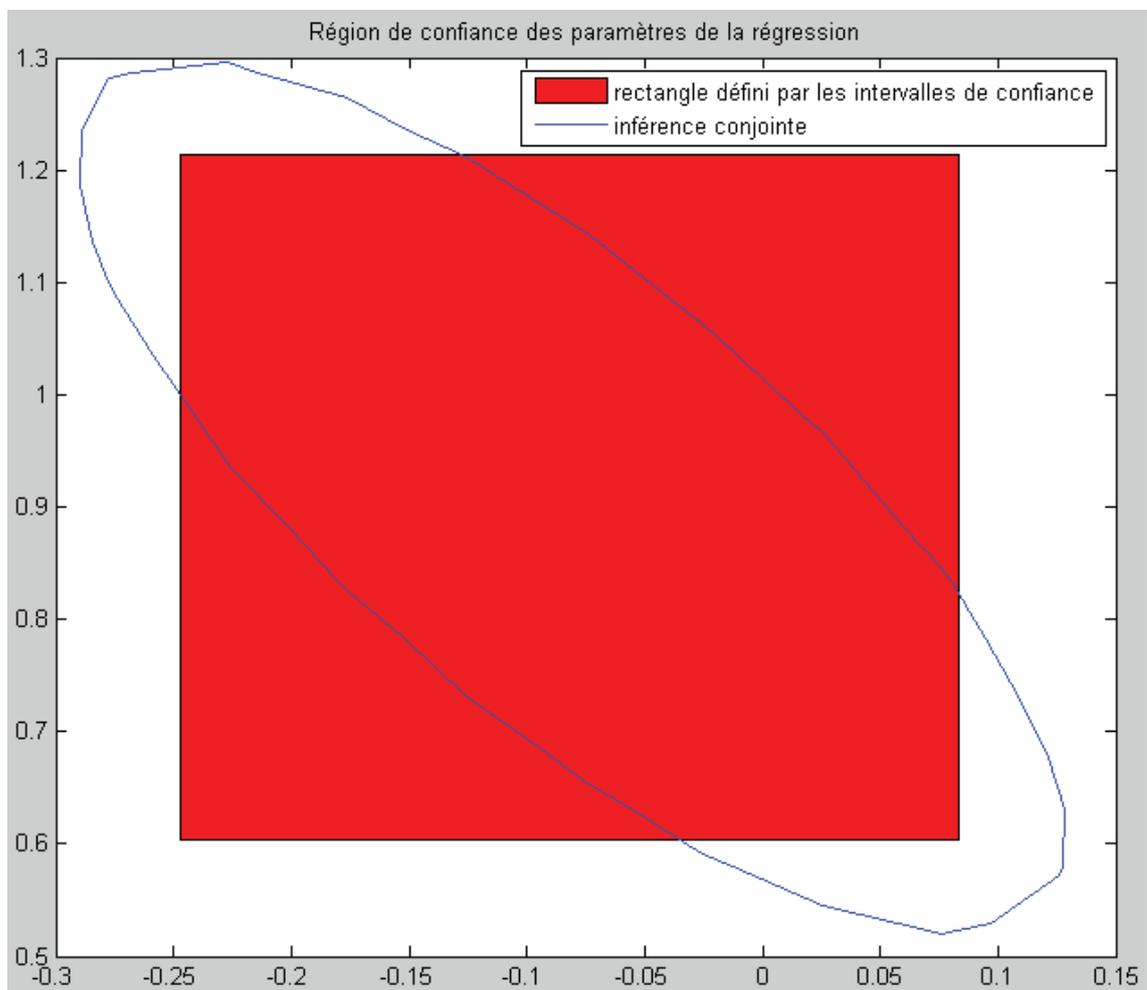


FIGURE 2.5 – Région de confiance des paramètres de la régression,  $\beta_0$  en abscisse et  $\beta_1$  en ordonné

La région de confiance est définie par l'intersection entre le rectangle obtenu grâce aux intervalles de confiance de  $\beta_0$  et  $\beta_1$  et de l'ellipse représentant l'inférence conjointe des paramètres. Une grande partie des valeurs du couple  $(\beta_0, \beta_1)$  est donc exclue de la région de confiance.

### c. Prévision par intervalle de confiance

L'objectif ici est de donner un intervalle de confiance de niveau  $1 - \frac{\alpha}{2}$  pour chaque observation, c'est-à-dire pour tout couple  $(X, Y)$ . Connaissant une valeur  $x_0$ , on définit un intervalle de confiance de prévision à partir de la valeur prédite  $\hat{y}_0 = \beta_0 + \beta_1 * x_0$ .

Avec les notations et les hypothèses précédentes, on a :

$$\frac{y_0 - \hat{y}_0}{s * \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{(n-1) * s_x^2}}} \hookrightarrow t_{n-2}$$

D'où on déduit l'intervalle de confiance pour  $y_0$  :

$$\left[ \hat{y}_0 \pm t_{1 - \frac{\alpha}{2}; (n-2)} * s * \left( 1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{(n-1) * s_x^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

Avec  $\alpha = 5\%$ , on obtient les intervalles de confiance suivants :

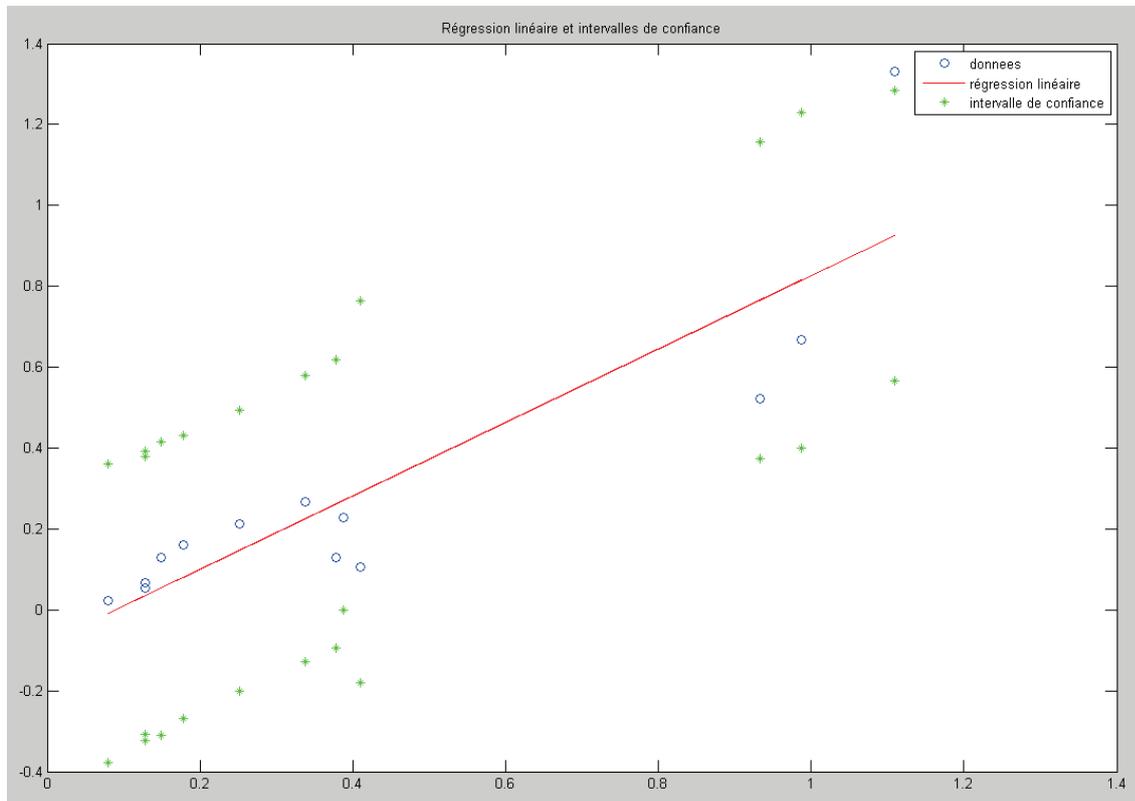


FIGURE 2.6 – Intervalles de confiance

On remarque que seule une observation sort de son intervalle de confiance. Il s'agit à nouveau de l'année 2010 au courant de laquelle des événements extrêmes sont survenus.

### 2.1.3 Limites

Cette modélisation actuelle présente plusieurs problèmes.

Tout d'abord, cette modélisation se base sur un historique très court (13 années). La régression obtenue ne peut donc pas être considérée comme représentative et contient en

effet des imperfections.

De plus, le S/P Auto calculé est un S/P annuel tous périls hors sécheresse. Or CCR souhaite développer une modélisation pour chaque péril et chaque événement. Afin de rester dans cette logique, il convient donc de développer une modélisation Auto propre à chaque péril, à commencer par le péril inondation.

#### 2.1.4 Estimation de la sinistralité auto à partir de la sinistralité non-auto pour le péril inondation seul

Une première étape à effectuer dans notre réflexion est d'adapter cette régression en ne l'estimant qu'à partir des S/P Non Auto Inondations. Il s'agit donc ici simplement d'adapter la méthodologie actuelle au péril inondation seul.

##### 2.1.4.1 Régression linéaire

En procédant de la même façon que précédemment, on obtient ainsi la régression suivante :

$$\frac{S}{P} Auto = 0,9229 * \frac{S}{P} NonAuto - 0,0591 \quad (2.13)$$

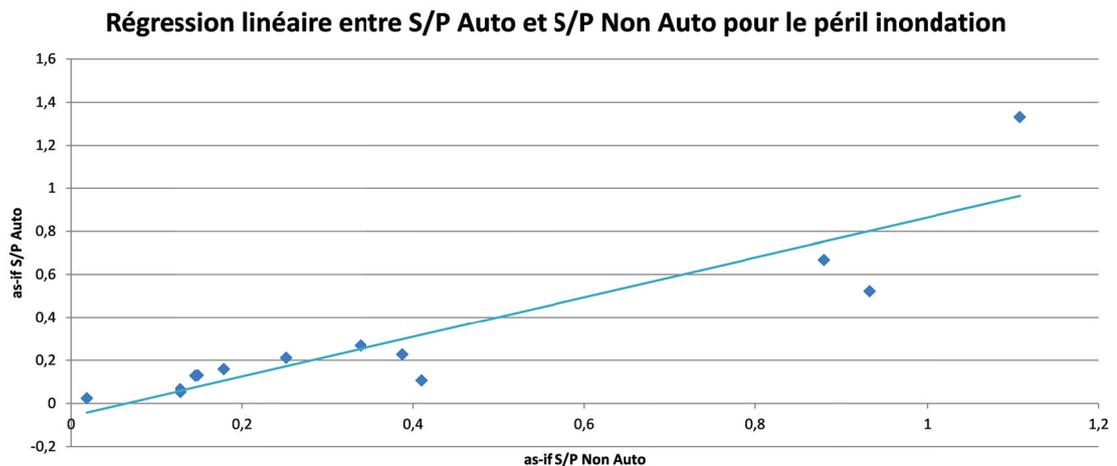


FIGURE 2.7 – Estimation du S/P Auto à partir du S/P Non Auto inondations

##### 2.1.4.2 Qualité d'ajustement, prédiction

###### a. Étude de la fiabilité du modèle

Avec cette régression, on obtient une variation résiduelle  $s^2$  égale à 0,03. Le coefficient de détermination est égal à 82% ce qui est meilleur que pour la régression précédente.

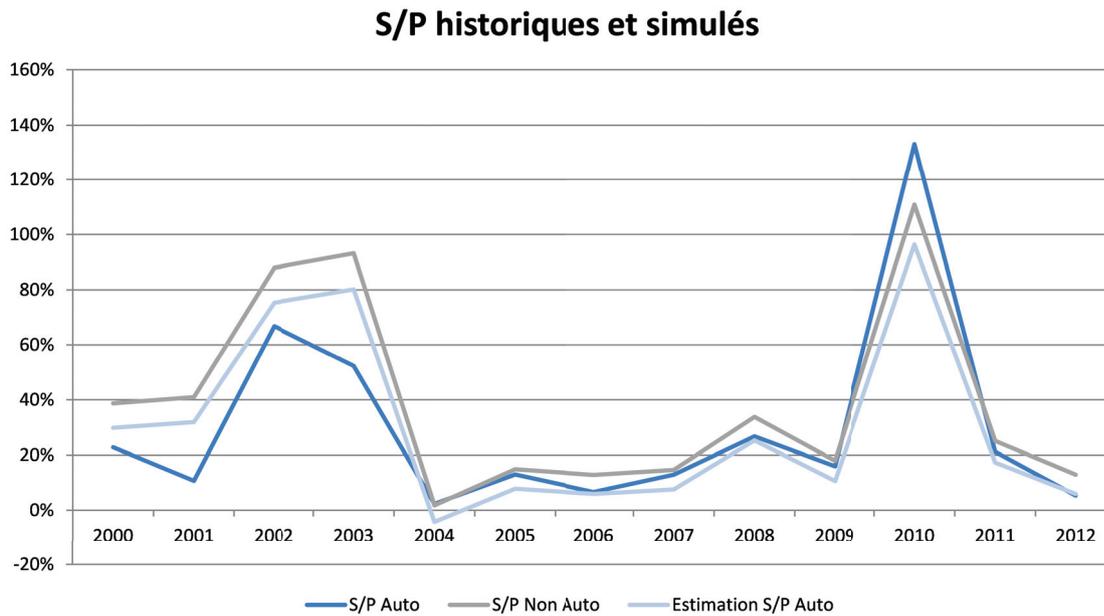


FIGURE 2.8 – S/P historiques et simulés

L'historique des ratios S/P auto et non-auto présenté ci-dessus montre une évolution similaire des deux courbes c'est-à-dire que les S/P auto simulés se comportent d'une manière comparable aux S/P auto historiques. Ceci est confirmé par le coefficient de corrélation linéaire, qui permet de mesurer l'adéquation du modèle linéaire, élevé de la régression linéaire (90,5%). Le coefficient de corrélation linéaire est d'autant plus proche de 1 que la somme des résidus est proche de 0. Ici, la somme des résidus est égale à 0,28.

Cependant, tout comme précédemment, la régression linéaire n'est pas suffisante car les dommages Auto dépendent des types de crues et cela n'est donc pas pris en compte dans une modélisation du S/P Non Auto Inondations annuel. Ainsi, on remarque ici un décalage important pour les années 2003 et 2010.

Enfin, le problème d'une régression linéaire est que pour les S/P Non Auto faibles, on obtient des S/P Auto estimés négatifs, comme on peut l'observer pour l'année 2004.

### b. Loi des paramètres

Les estimateurs  $\hat{\beta}_0$  et  $\hat{\beta}_1$  sont des variables aléatoires réelles de matrices de covariance :

$$\begin{bmatrix} 0,0046 & 0,0026 \\ 0,0026 & 0,0171 \end{bmatrix}$$

On obtient ainsi les intervalles de confiance à 95% ( $\alpha = 5\%$ ) suivant :

Pour le paramètre  $\beta_0$  :  $[-0,2081 \quad 0,0899]$

Pour le paramètre  $\beta_1$  :  $[0,6347 \quad 1,2110]$

Cependant, une inférence conjointe sur  $\beta_0$  et  $\beta_1$  ne peut être obtenue en considérant séparément les intervalles de confiance. La région de confiance est une ellipse d'équation :

$$n * (\hat{\beta}_0 - \beta_0)^2 + 2 * (\hat{\beta}_0 - \beta_0) * (\hat{\beta}_1 - \beta_1) * \sum_{i=1}^n x_i + (\hat{\beta}_1 - \beta_1)^2 * \sum_{i=1}^n x_i^2 = 2 * s^2 * F_{\alpha,2,(n-2)}$$

Soit :

$$13 * (-0,0591 - \beta_0)^2 + 10,1142(-0,0591 - \beta_0) * (0,9229 - \beta_1) + 3,4777 * (0,9229 - \beta_1)^2 = 0.2061$$

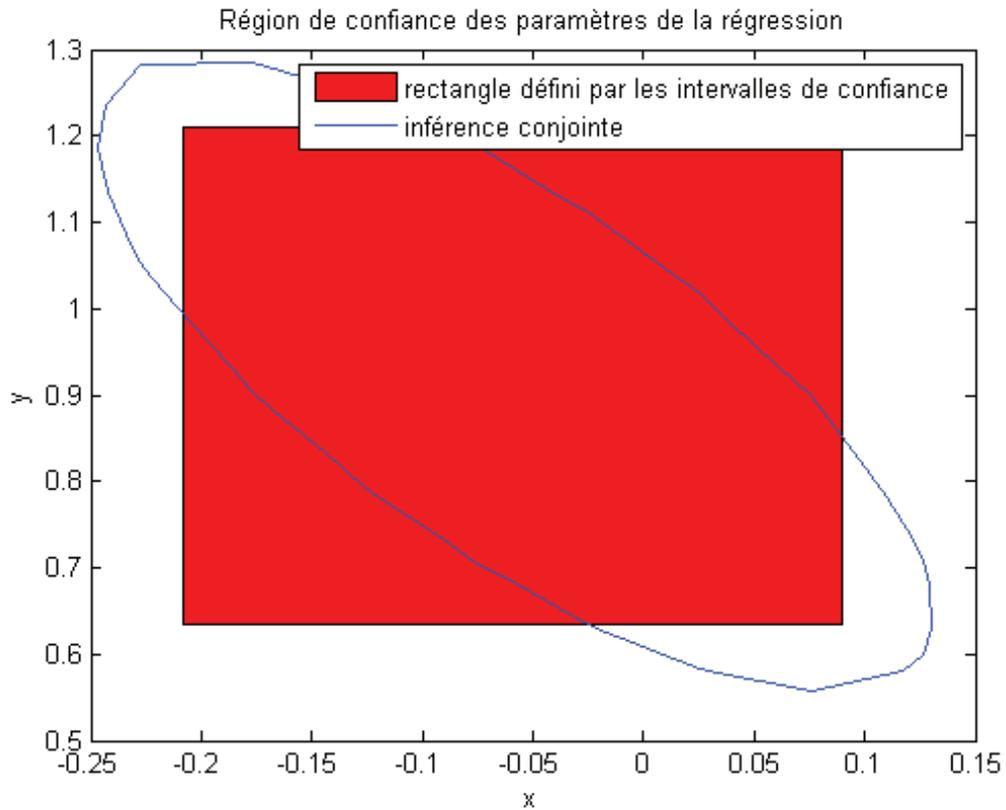


FIGURE 2.9 – Région de confiance des paramètres de la régression inondation

### c. Prévision par intervalle de confiance

Comme précédemment, on cherche à donner un intervalle de confiance de niveau  $1 - \frac{\alpha}{2}$  pour chaque observation, c'est-à-dire pour tout couple  $(X, Y)$ .

Avec  $\alpha = 5\%$ , on obtient les intervalles de confiance suivants :

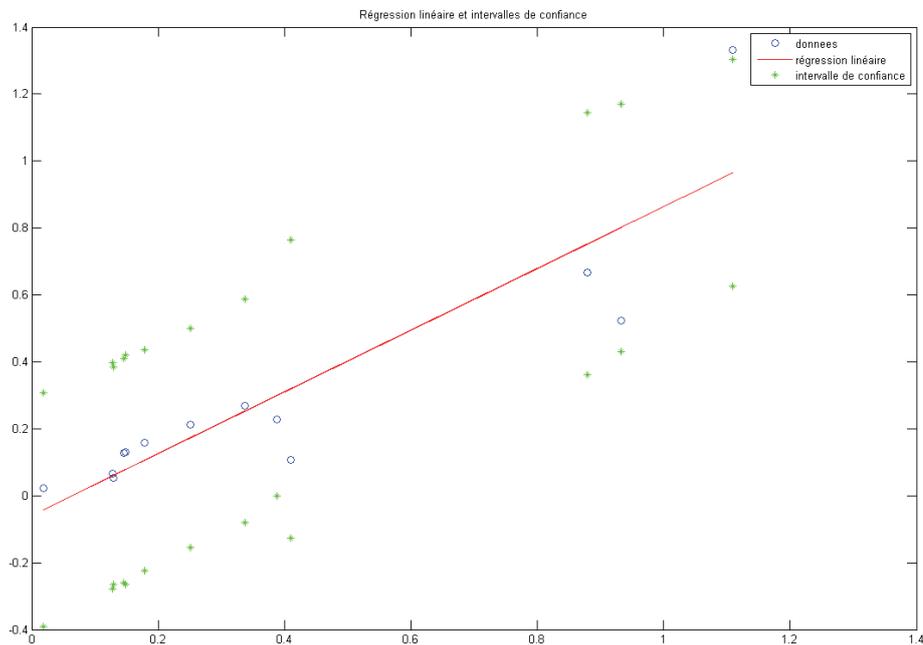


FIGURE 2.10 – Intervalles de confiance de la régression inondation

Pour la régression inondation seule, on remarque que, de nouveau, seule l'année 2010 sort de l'intervalle de confiance. On rappelle que cette année fut atypique du fait des événements particulièrement violents survenus.

### 2.1.4.3 Conclusions

Nous avons donc ici restreint l'étude par régression linéaire au péril inondation seul. On remarque que la régression est légèrement meilleure bien que l'on ne s'affranchit pas des problèmes mis en avant précédemment :

- faible historique ;
- S/P Auto estimés pouvant être négatifs en cas de S/P Non Auto faible ;
- non prise en compte des types de crues ;
- non estimation des dommages par événement.

Malgré ces limites, cette évolution du modèle initial ouvre à des perspectives d'études intéressantes. En effet, si les données nécessaires pouvaient être rassemblées, il serait possible de construire un modèle pour chaque type de crues, ce qui permettrait de résoudre une des limites actuelles, à savoir leur non prise en compte, et éviter ce qui a pu être observé pour l'année 2010. Pour cela, nous allons implémenter dans la partie suivante une modélisation actuarielle de type fréquence x sévérité.

## 2.2 MODÉLISATION ACTUARIELLE DE TYPE FRÉQUENCE X SÉVÉRITÉ

### 2.2.1 L'approche probabiliste en fréquence et sévérité

La sinistralité relative à un portefeuille de réassurance peut être caractérisée par deux composantes, le nombre de sinistres par année, aussi appelé fréquence (notée  $N$ ) et le coût de chaque événement individuel, aussi appelé la sévérité ( $X_i$  étant le  $i^{\text{ème}}$  sinistre) (Nguyen, 2008). Les sinistres, dans notre étude, se réfèrent aux événements inondation. Ainsi, lorsque nous étudierons la fréquence, nous étudierons le nombre d'événements inondation en une année et lorsque nous étudierons la sévérité, nous étudierons le coût de chaque événement inondation pour les particuliers.

Ce modèle étudie les coûts Non Auto des événements et non directement les coûts Auto à cause du manque de données statistiques par événement pour l'Auto (un seul événement). Nous disposons cependant de quelques informations qui nous permettront ensuite de nous ramener au coût Auto à partir du coût Non Auto.

Dans le cadre d'un modèle fréquence x sévérité pour un contrat en Stop Loss, l'approche probabiliste prendra la forme d'un modèle collectif de la charge sinistre annuelle (Hess, 2009).

On pose :

- $S$  : la charge sinistre annuelle
- $N$  : la variable aléatoire à valeur dans  $\mathbb{N}$  représentant le nombre d'inondations pour une période annuelle

Pour  $i \geq 1$ ,  $X_i$  est une variable aléatoire à valeurs dans  $\mathbb{R}^+$  représentant le coût du  $i^{\text{ème}}$  sinistre, alors :

$$S = \sum_{i=1}^N X_i$$

On pose 2 hypothèses :

- 1)  $S = 0$  si  $N = 0$
- 2) Les  $X_i$  sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d.) et indépendantes de  $N$ . Ils suivent tous la loi du montant de sinistre notée  $X$ .

On peut alors écrire la fonction de répartition de  $S$  en conditionnant par le nombre d'inondations  $N$  :

$$F_S(x) = \sum_{n \geq 0} P(N = n) F_X^{*n}(x)$$

Où  $F_X^{*n}$  est la fonction de répartition de  $X_1 + \dots + X_n$  et vérifie la relation de récurrence :

$$\text{pour } n \geq 0, F_X^{*(n+1)}(x) = \int_0^x F_X^{*n}(x-y) dF_X(y)$$

On obtient par conditionnement sur  $N$  les premiers moments de  $S$  :

$$E[S] = E[E(S|N)] = E[N \cdot E(X)] = E(N) \cdot E(X)$$

Et

$$\begin{aligned} \text{Var}(S) &= E[\text{Var}(S|N)] + \text{Var}[E(S|N)] \\ \text{Var}(S) &= E[N \cdot \text{Var}(X)] + \text{Var}[N \cdot E(X)] \\ \text{Var}(S) &= E(N) \cdot \text{Var}(X) + [E(X)]^2 \cdot \text{Var}(N) \end{aligned}$$

On remarque ici que la variance de  $S$  est décomposée en deux termes : le premier correspond à la variabilité des coûts des inondations autour du coût moyen, le second correspond à la variabilité du nombre d'inondations autour de la moyenne.

Une fois définie  $S$ , la charge sinistre annuelle, on cherche à définir le montant à la charge de la tranche  $\infty$  SL  $F$  avec  $F$  la priorité étudiée.

On rappelle que le schéma de réassurance Cat Nat Auto de CCR se compose dans un premier temps d'un Quote-Part à 50% puis d'un Stop-Loss non plafonnée de priorité  $F$ .

Soient :

- $P$  : le revenu brut global des primes
- $t^{QP}$  : le taux de quote-part, dans notre cas égal à 1/2
- $S^{QP}$  : la charge sinistres cédante après quote-part
- $P^{QP}$  : la rétention de primes cédante après quote-part (égale à la rétention de primes CCR)
- $S^{SL}$  : le montant à la charge de la tranche  $\infty$  SL  $F$

Donc,

$$S^{QP} = (1 - t^{QP}) * S = \frac{1}{2} * S \text{ et } P^{QP} = (1 - t^{QP}) * P = \frac{1}{2} * P$$

Et :

$$S^{SL} = \max(0, S^{QP} - FP^{QP})$$

La fonction de distribution de la tranche s'écrit :

$$F_{S^{SL}}(y) = \begin{cases} 0 & \text{si } y \leq FP^{QP} \\ F_{S^{QP}}(y + FP^{QP}) & \text{si } y > FP^{QP} \end{cases}$$

Donc :

$$F_{S^{SL}}(y) = \begin{cases} 0 & \text{si } y \leq FP^{QP} \\ F_S(2y + FP) & \text{si } y > FP^{QP} \end{cases}$$

Il convient donc maintenant de définir les lois de  $N$  et de  $X$ .

Nous modéliserons tout d'abord la fréquence annuelle des inondations. Nous étudierons ensuite le montant d'un événement inondation. Cette étude se fera en trois étapes : dans un premier temps, nous chercherons un seuil pour distinguer les événements ordinaires des événements extrêmes et séparer ainsi l'échantillon en deux. Ces deux échantillons de montants de coûts seront ensuite modélisés séparément. Enfin, nous nous intéresserons à la charge totale. Comme il n'y a pas d'expressions simples pour cette loi, on aura recours à une méthode de type Monte Carlo.

## 2.2.2 Distribution du nombre d'événements : la Fréquence

### 2.2.2.1 Échantillon du nombre d'événements et méthodologie

#### a. Les données et seuil de modélisation

Pour procéder à cette étude, nous disposons de données des coûts par événement inondation Cat Nat hors automobiles (dommages pour le marché à 100% pour les particuliers et les professionnels) de 1990 à 2013. Chaque année représente donc une observation.

Il a cependant fallu procéder à un ajustement de ces données. En effet, un événement inondation est défini à CCR comme un aléa climatique de type débordement de cours d'eau, ruissellement ou pluies intenses, survenant sur une durée et un territoire définis, dès lors que ses dommages sont estimés, *a priori* ou *a posteriori*, à plus de 10 M€ pour le marché de l'assurance des catastrophes naturelles. Certains petits événements ne sont donc pas répertoriés de par leur petite taille et donc les informations de fréquence concernant ces événements sont erronées. Afin de s'appuyer sur des données complètes et fiables, la modélisation sera calibrée pour des événements Cat Nat inondation dont le coût est supérieur à 10M€.

Une fois le seuil de modélisation fixé, l'étape suivante consiste à construire une distribution de fréquence des inondations dont le coût a dépassé 10M€. Après avoir filtré les données, les inondations sont recensées pour chaque année d'expérience, ce qui permet d'obtenir un échantillon de fréquence.

L'échantillon obtenu est de taille  $n = 2013 - 1990 + 1 = 24$  et est le suivant :

$$\{k_i\}_{i=1,\dots,24} = \{2, 1, 3, 6, 2, 3, 4, 4, 6, 5, 8, 5, 6, 3, 0, 4, 1, 4, 6, 4, 3, 1, 2, 3\}$$

#### b. Premières observations

Ce qui nous donne l'histogramme suivant :

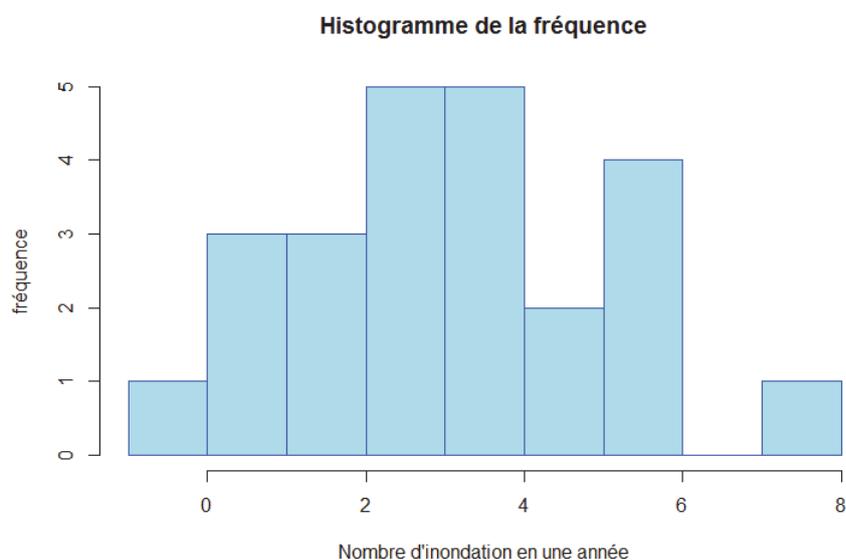


FIGURE 2.11 – Histogramme de la fréquence du nombre d'inondations par année

La moyenne empirique  $\bar{k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i$  est égale à 3.5833 et la variance empirique  $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (k_i - \bar{k})^2$  à 3.9058. Le coefficient de dispersion empirique est donc de  $DI = \frac{s^2}{\bar{k}} = 1.0900$  très élevé, ce qui constitue un premier indicateur de la volatilité conséquente autour de la moyenne.

Le but de cette partie est d'estimer la loi du nombre d'événements pendant une année, appelé la fréquence.

Nous décrirons tout d'abord les différents outils permettant d'évaluer les paramètres des lois à ajuster et les lois envisagées pour modéliser la fréquence. Puis nous étudierons les résultats obtenus grâce à une méthode graphique et à des tests d'adéquation, ce qui nous permettra de choisir la loi la plus adaptée pour la fréquence.

### 2.2.2.2 Modélisation de la fréquence

Pour estimer la fréquence annuelle des inondations, plusieurs lois discrètes peuvent être testées. Sont traditionnellement testées les lois de Poisson, Binomiale, Binomiale négative.

Cependant, on peut déjà observer que nos données sont sur-dispersées. C'est-à-dire que  $V(N) > E(N)$ . Les lois testées doivent donc respecter cette condition. La loi Binomiale peut donc directement être exclue du périmètre des lois étudiées car elle vérifie  $E(N) > V(N)$  et elle ne s'ajustera donc pas aux données. La loi de Poisson, pour laquelle la moyenne et la variance sont égales, sera tout de même testée car la moyenne et la variance sont proches.

#### a. Méthodes d'estimation des paramètres des lois retenues

Il existe de nombreuses méthodes pour estimer un paramètre  $\theta$ . Les deux méthodes les plus usuelles pour estimer les paramètres d'une loi de probabilité sont la méthode des moments et la méthode du maximum de vraisemblance.

On suppose que  $x_1, \dots, x_n$  sont les réalisations de variables aléatoires  $X_1, \dots, X_n$  indépendantes et de même loi.

On note  $\theta$  le paramètre inconnu de la loi que l'on veut appliquer à notre échantillon. Il s'agit donc de donner, à partir des observations  $x_1, \dots, x_n$ , une approximation de  $\theta$  que l'on espère la plus proche possible de la vraie valeur inconnue.

On note  $F(x; \theta)$  la fonction de répartition des  $X_i$ . Pour les variables aléatoires discrètes on notera  $P(X = x; \theta)$  les probabilités élémentaires, et pour les variables aléatoires continues on notera  $f(x; \theta)$  la densité.

#### b. Définition d'un estimateur

Pour estimer  $\theta$  on ne dispose que des données  $x_1, \dots, x_n$ , donc une estimation de  $\theta$  sera une fonction de ces observations.

Une statistique  $t$  est une fonction des observations  $x_1, \dots, x_n$  :

$$t : \begin{cases} \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m \\ (x_1, \dots, x_n) \rightarrow t(x_1, \dots, x_n) \end{cases}$$

Puisque les observations  $x_1, \dots, x_n$  sont des réalisations des variables aléatoires  $X_1, \dots, X_n$ , la quantité calculable à partir des observations  $t(x_1, \dots, x_n)$  est une réalisation de la variable aléatoire  $t(X_1, \dots, X_n)$ . Pour simplifier les écritures, on note  $t_n = t(x_1, \dots, x_n)$  et  $T_n = t(X_1, \dots, X_n)$ .

Un estimateur d'une grandeur  $\theta$  est une statistique  $T_n$  à valeurs dans l'ensemble des valeurs possibles de  $\theta$ . Une estimation de  $\theta$  est une réalisation  $t_n$  de l'estimateur  $T_n$ .

Un estimateur est donc une variable aléatoire, alors qu'une estimation est une valeur déterministe.

### c. La méthode des moments

L'idée de base est d'estimer une espérance mathématique par une moyenne empirique, une variance par une variance empirique, etc...

Si le paramètre à estimer est l'espérance de la loi des  $X_i$ , alors on peut l'estimer par la moyenne empirique de l'échantillon. Autrement dit, si  $\theta = E(X)$ , alors l'estimateur de  $\theta$  par la méthode des moments est  $\tilde{\theta}_n = \bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ .

Plus généralement, pour  $\theta \in \mathbb{R}$ , si  $E(X) = \varphi(\theta)$ , où  $\varphi$  est une fonction inversible, alors l'estimateur de  $\theta$  par la méthode des moments est  $\tilde{\theta}_n = \varphi^{-1}(\bar{X}_n)$ . De la même manière, on estime la variance de la loi des  $X_i$  par la variance empirique de l'échantillon  $S_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}_n)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{X}_n^2$ .

Plus généralement, si la loi des  $X_i$  a deux paramètres  $\theta_1$  et  $\theta_2$  tels que  $(E(X), Var(X)) = \varphi(\theta_1, \theta_2)$ , où  $\varphi$  est une fonction inversible, alors les estimateurs de  $\theta_1$  et  $\theta_2$  par la méthode des moments sont  $(\tilde{\theta}_{1n}, \tilde{\theta}_{2n}) = \varphi^{-1}(\bar{X}_n, S_n^2)$ .

Ce principe peut naturellement se généraliser aux moments de tous ordres, centrés ou non centrés :  $E[(X - E(X))^k]$  et  $E(X^k)$ ,  $k \geq 1$ .

### d. La méthode du maximum de vraisemblance

#### La fonction de vraisemblance

Quand les observations sont toutes discrètes ou toutes continues, on appelle fonction de vraisemblance (ou plus simplement vraisemblance) pour l'échantillon  $x_1, \dots, x_n$ , la fonction du paramètre  $\theta$  :

$$L(\theta; x_1, \dots, x_n) : \begin{cases} P(X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n; \theta) & \text{si les } X_i \text{ sont discrètes} \\ f_{X_1, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n; \theta) & \text{si les } X_i \text{ sont continues} \end{cases}$$

Dans notre situation, nous considérons que les  $X_i$  sont indépendantes et de même loi. Dans ce cas, la fonction de vraisemblance s'écrit :

$$L(\theta; x_1, \dots, x_n) : \begin{cases} \prod_{i=1}^n P(X_i = x_i; \theta) = \prod_{i=1}^n P(X = x_i; \theta) & \text{si les } X_i \text{ sont discrètes} \\ \prod_{i=1}^n f_{X_i}(x_i; \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta) & \text{si les } X_i \text{ sont continues} \end{cases}$$

### L'estimateur du maximum de vraisemblance

En suivant le raisonnement précédent, pour  $n$  quelconque, il est logique de dire que la valeur la plus vraisemblable de  $\theta$  est la valeur pour laquelle la probabilité d'observer  $x_1, \dots, x_n$  est la plus forte possible. Cela revient à faire comme si c'était l'éventualité la plus probable qui s'était produite au cours de l'expérience.

L'estimation de maximum de vraisemblance de  $\theta$  est la valeur  $\hat{\theta}_n$  de  $\theta$  qui rend maximale la fonction de vraisemblance  $L(\theta; x_1, \dots, x_n)$ . L'estimateur de maximum de vraisemblance de  $\theta$  est la variable aléatoire correspondante.

Comme dans l'exemple, dans la plupart des cas, la fonction de vraisemblance s'exprime comme un produit. Donc  $\hat{\theta}_n$  sera en général calculé en maximisant la log-vraisemblance :

$$\hat{\theta}_n = \max_{\theta} [\ln(L(\theta; x_1, \dots, x_n))] ]$$

Quand  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_d) \in \mathbb{R}^d$  et que toutes les dérivées partielles ci-dessous existent,  $\hat{\theta}_n$  est solution du système d'équations appelées équations de vraisemblance :

$$\forall j \in \{1, \dots, d\}, \frac{\delta}{\delta \theta_j} \ln(L(\theta; x_1, \dots, x_n)) = 0$$

### e. Caractéristiques des lois étudiées

#### La loi de Poisson

La loi de Poisson, notée  $P(\lambda)$ , est donnée par  $P(N = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$ .

On note  $\underline{k} = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ , l'échantillon du nombre de sinistres de taille  $n$ .

La fonction de vraisemblance  $L$  s'écrit :

$$L\left(\frac{\lambda}{\underline{k}}\right) = \prod_{i=1}^n P_{\lambda}(N = k_i) = \prod_{i=1}^n \frac{\lambda^{k_i} e^{-\lambda}}{k_i!}$$

D'où ( $\ln$  désignant le logarithme népérien) :

$$\ln\left(L\left(\frac{\lambda}{\underline{k}}\right)\right) = \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{\lambda^{k_i} e^{-\lambda}}{k_i!}\right) = n \cdot \ln(\lambda) \cdot \underline{k} - n\lambda - \sum_{i=1}^n \ln(k_i!)$$

La maximisation du logarithme népérien de la fonction de vraisemblance s'effectue en annulant la dérivée partielle par rapport à  $\lambda$  :

$$\frac{\delta \ln(L(\frac{\lambda}{\underline{k}}))}{\delta \lambda} = 0 \Leftrightarrow \hat{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i = \bar{k}$$

$\hat{\lambda}$  est l'estimateur  $\lambda$  par le maximum de vraisemblance. La méthode de maximisation de la vraisemblance appliquée à la loi de Poisson a pour avantage d'aboutir à une formule fermée pour l'estimation du paramètre  $\lambda$ .

### La loi binomiale négative

La loi Binomiale négative, notée  $BN(r, p)$ , est donnée par

$$P(N = k) = \binom{k+r-1}{k} p^r (1-p)^k.$$

On pose  $\beta = \frac{p}{1-p}$ .

La fonction de vraisemblance  $L$  s'écrit :

$$L\left(r, \frac{\beta}{\underline{k}}\right) = \prod_{i=1}^n \frac{\Gamma(r\beta + k_i)}{\Gamma(k_i + 1)\Gamma(r\beta)} p^{r\beta} (1-p)^{k_i}$$

En utilisant la propriété de la loi gamma :  $\Gamma(r+1) = r\Gamma(r)$ , on obtient par récurrence  $\forall k, \Gamma(r+k) = \prod_{i=0}^{k-1} (r+i)\Gamma(r)$ . En passant au logarithme, on obtient :

$$\ln(L(r, \frac{\beta}{\underline{k}})) = \sum_{i=1}^n \frac{\Gamma(r\beta + k_i)}{\Gamma(k_i + 1)\Gamma(r\beta)} + n.v.\ln(p) + n.\bar{k}.\ln(1-p)$$

Avec  $v = \sum_{i=1}^r \beta$ .

Pour la Binomiale Négative, l'annulation des dérivées partielles du logarithme de la fonction de vraisemblance ne permet pas d'aboutir à des formules fermées pour l'estimation des paramètres. Il faut recourir à un algorithme itératif de recherche de maximum sur la surface que représente le maximum de vraisemblance, comme l'algorithme d'optimisation non-linéaire de Nelder-Mead. Pour trouver le couple  $(r, \beta)$  qui maximise la fonction du maximum de vraisemblance, on utilisera la fonction optim dans R.

### f. Résultats

#### La loi de Poisson

Le paramètre  $\lambda$  de la loi de Poisson estimée est :  $\hat{\lambda} = 3,5833$ . On obtient alors le graphique suivant :

#### La loi binomiale négative

Les paramètres  $r$  et  $p$  de la loi Binomiale négative estimée sont :  $\hat{r} = 39,8201$  et  $\hat{p} = 0,9174$ . On obtient alors le graphique suivant :

### g. Choix de la loi

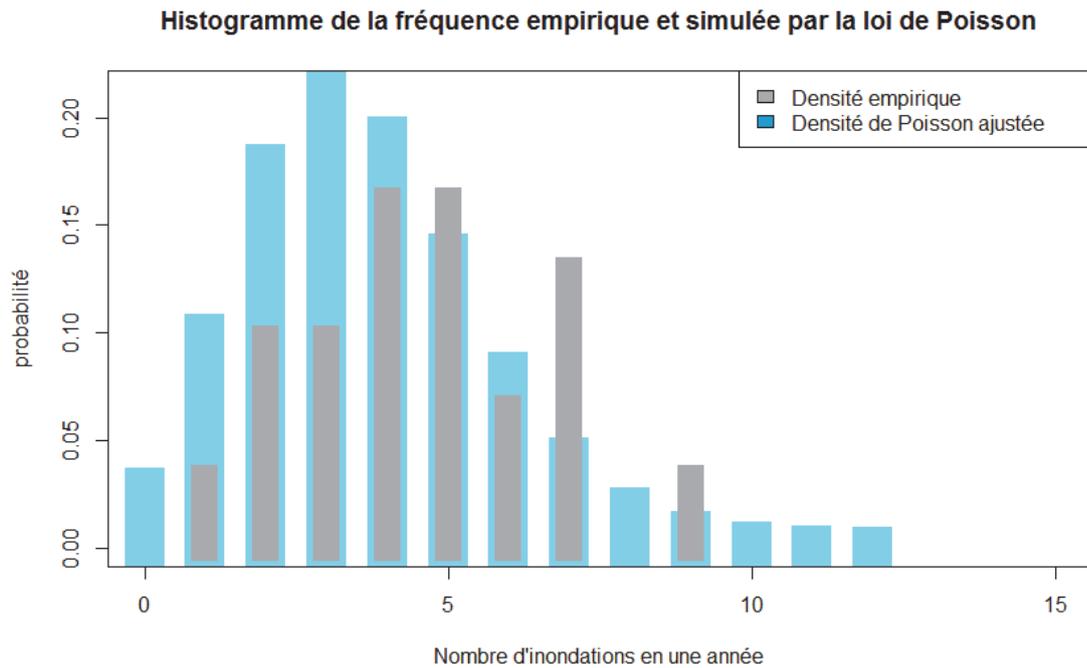


FIGURE 2.12 – Histogrammes empirique &amp; Poisson pour la fréquence

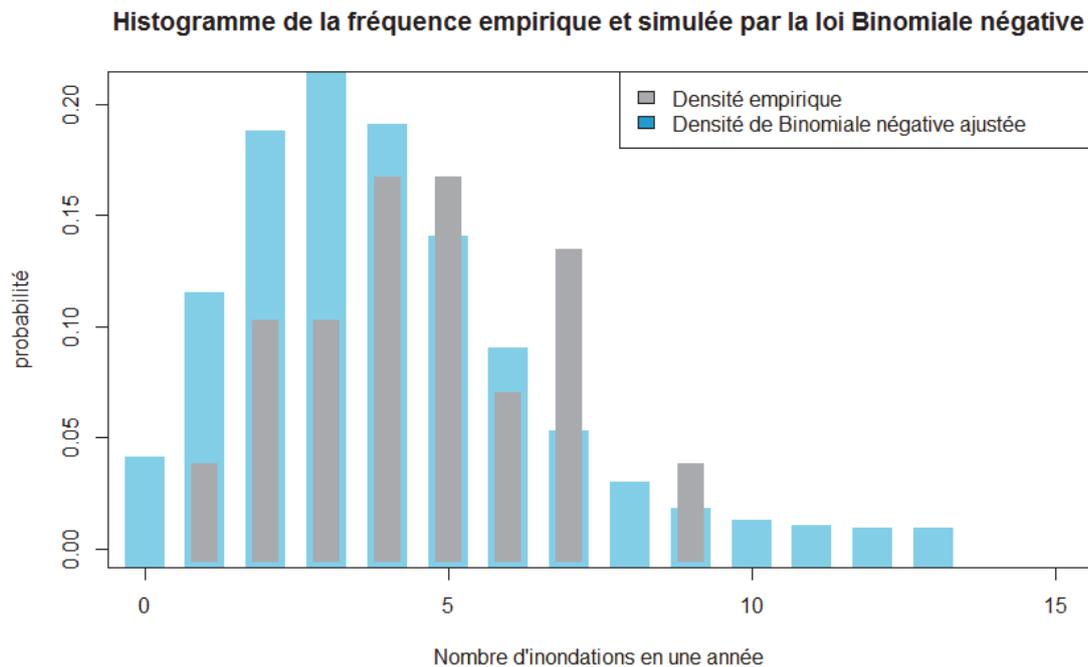


FIGURE 2.13 – Histogrammes empirique &amp; Binomiale négative pour la fréquence

### QQ Plot

Le diagramme Quantile-Quantile, ou QQ plot, est un outil graphique permettant d'évaluer la pertinence de l'ajustement d'une distribution donnée à un modèle théorique en comparant la position de certains quantiles dans la population observée avec leur

position dans la population théorique.

Si la série statistique suit bien la distribution théorique choisie, on devrait avoir les quantiles observés  $x_i$  égaux aux quantiles  $x_i^*$  associés au modèle théorique.

On place alors le nuage de points  $M_i(x_i, x_i^*)$ . En abscisse se trouvent donc les quantiles observés et en ordonnée les quantiles théoriques. Si la distribution théorique choisie est pertinente, les points doivent se positionner suivant la première diagonale. Si les points sont alignés suivant une droite d'équation  $x_i^* = ax_i + b$  c'est que le modèle choisi est valable à une transformation affine près.

Pour les deux lois étudiées pour la fréquence des inondations, on obtient les QQ plots suivant :

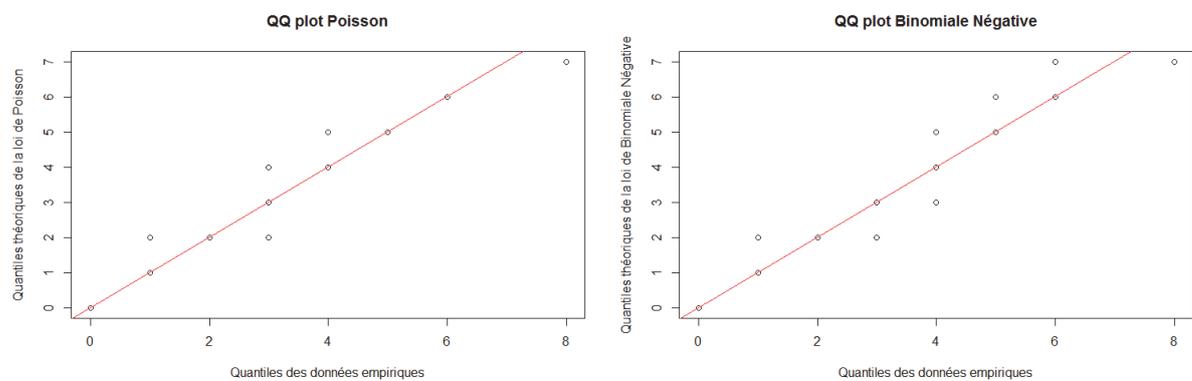


FIGURE 2.14 – QQ plots des lois de Poisson & Binomiale négative

Les QQ plots nous permettent d'observer que les deux lois semblent bien s'ajuster à l'échantillon étudié. Ils ne nous permettent cependant pas de faire un choix entre les deux lois.

### Le test d'adéquation du $\chi^2$

#### Test du $\chi^2$

Soit  $F$  la fonction de répartition inconnue des  $X_i$ . Il s'agit de tester :

$$H_0 : "F = F_0" \text{ contre } H_1 : "F \neq F_0"$$

où  $F_0$  est la fonction de répartition de la loi dont on souhaite tester que les observations sont issues.

Quand les variables aléatoires observées sont discrètes, c'est à dire à valeurs dans un ensemble fini ou dénombrable, les  $n$  observations  $x_1, \dots, x_n$  ont pris  $k$  valeurs différentes  $e_1, \dots, e_k$ . Soit  $n_j = \sum_{i=1}^n \mathbb{1}_{\{e_j\}}(x_i)$  le nombre d'observations égales à  $e_j$ . Sous l'hypothèse  $H_0$  que les  $X_i$  sont indépendantes et de loi donnée, on peut calculer les  $p_j = P(X = e_j)$ .

$(N_1, \dots, N_k)$  est bien de loi multinomiale  $M(n; p_1; \dots; p_k)$ . Or, d'après le théorème de Pearson, si  $(N_1, \dots, N_k)$  est de loi multinomiale  $M(n; p_1; \dots; p_k)$ , alors  $\Delta_n^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(n_j - np_j)^2}{np_j} \rightarrow L$

$\chi_{k-1}^2$ .

On peut donc utiliser le test du  $\chi^2$  pour tester l'adéquation de l'échantillon à cette loi.

### Résultats et choix de la loi de fréquence

Les résultats du test du  $\chi^2$  sont les suivants :

	Loi de Poisson	Loi Binomiale Négative
Statistique du $\chi^2$	<b>3,6747</b>	<b>3,6516</b>
p-value	<b>18,36%</b>	<b>18,11%</b>

FIGURE 2.15 – Résultats des tests du  $\chi^2$

L'adéquation de la loi Binomiale négative est légèrement meilleure que celle de la loi de Poisson. L'adéquation de la loi de Poisson n'est pas éloignée de celle de la loi Binomiale négative car l'espérance (3,5833) et la variance (3,9058) des données de fréquence sont proches.

On retient donc la loi Binomiale négative pour modéliser la fréquence des sinistres.

#### 2.2.2.3 Incertitude des paramètres de la fréquence

Dans cette section, nous allons évaluer l'incertitude des paramètres des lois de fréquence discrètes (dans notre cas, nous les appliquerons à la loi Binomiale négative) ajustées aux échantillons de nombre annuel d'inondations. L'incertitude sur les paramètres de la distribution de fréquence provient de la difficulté à évaluer les bons paramètres du fait du petit échantillon dont nous disposons pour l'étude.

Comme décrit dans le paragraphe "Méthodes d'estimation des paramètres des lois retenues", l'estimation des paramètres se fait par la méthode du maximum de vraisemblance ou la méthode des moments. Mais ces estimateurs sont eux aussi des variables aléatoires, par exemple si l'on prend deux échantillons finis d'une même distribution, les estimateurs par maximum de vraisemblance des paramètres vont être différents. Utiliser des paramètres fixes dans un modèle fréquence x sévérité peut conduire à une sous-évaluation du risque, car les estimateurs des paramètres sont calculés sur une quantité trop faible de données d'expérience.

Il existe plusieurs approches permettant la prise en compte de l'incertitude des paramètres. Nous en implémenterons deux, à savoir la limite asymptotique normale des estimateurs par le maximum de vraisemblance et une méthode empirique : le bootstrap paramétrique (Poulin, 2012).

##### a. La limite asymptotique du maximum de vraisemblance

On note :

- $\Theta = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_p)$  les  $p$  paramètres de la loi du nombre annuel d'inondations
- $\hat{\Theta} = (\hat{\Theta}_1, \hat{\Theta}_2, \dots, \hat{\Theta}_p)$  les  $p$  variables aléatoires estimateurs des paramètres de la loi par le maximum de vraisemblance

—  $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_p)$  la réalisation de  $\hat{\Theta}$  obtenue par maximisation de la fonction de vraisemblance sur la base des échantillons étudiés

Pour évaluer l'incertitude des paramètres, la théorie statistique classique stipule que lorsque la taille de l'échantillon de données tend vers l'infini, les estimateurs des paramètres de la loi à  $p$  paramètres par le maximum de vraisemblance, notés  $\hat{\Theta} = (\hat{\Theta}_1, \hat{\Theta}_2, \dots, \hat{\Theta}_p)$ , sont des variables aléatoires qui suivent approximativement une loi Normale multivariée avec la matrice de variance covariance donnée par l'inverse de la matrice d'information de Fisher :

$$\hat{\Theta}\sqrt{n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} N(\hat{\Theta}\sqrt{n}, I(\hat{\Theta})^{-1})$$

La matrice d'information de Fisher s'écrit :

$$I(\theta)|_{i,j} = E\left[-\frac{\delta^2}{\delta\theta_i\delta\theta_j}\ln\left(f\left(\frac{x}{\theta}\right)\right)\right], (i, j) \in [1, p]^2$$

Pour une variable  $X \sim BN(r, p)$ , en notant  $B$  la fonction Beta :

$$\ln\left(f\left(\frac{x}{r}, p\right)\right) = -\ln(x) - \ln(B(r; x)) + r.\ln(p) + x\ln(1-p)$$

$$\frac{\delta^2}{\delta p^2}\ln\left(f\left(\frac{x}{r}, p\right)\right) = -\frac{r}{p^2} - \frac{x}{(1-p)^2}$$

$$\frac{\delta^2}{\delta r^2}\ln\left(f\left(\frac{x}{r}, p\right)\right) = -\frac{\delta^2\ln(B(r; x))}{\delta r^2}$$

$$\frac{\delta^2}{\delta r\delta p}\ln\left(f\left(\frac{x}{r}, p\right)\right) = \frac{1}{p}$$

Comme  $E[X] = \frac{r(1-p)}{p}$ , on obtient la matrice d'information de Fisher pour une loi Binomiale Négative suivante :

$$I(\hat{r}, \hat{p}) = \begin{pmatrix} E\left[\frac{\delta^2\ln(B(r; x))}{\delta r^2}\right] & -\frac{1}{p} \\ -\frac{1}{p} & \frac{-r}{p^2(1-p)} \end{pmatrix}.$$

La dérivée de la fonction  $B(r; x)$  peuvent s'exprimer en fonction de  $\Gamma$  et  $\Psi$  où  $\Psi(\alpha) = \frac{\delta\ln(\Gamma(\alpha))}{\delta\alpha} = \frac{\Gamma'(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}$  :

$$\frac{\delta^2\ln(B(r; X))}{\delta r^2} = \Psi'(r) + \Psi'(r+X) = \frac{\Gamma''(r)\Gamma(r) - (\Gamma'(r))^2}{\Gamma^2(r)} + \frac{\Gamma''(r+X)\Gamma(r+X) - (\Gamma'(r+X))^2}{\Gamma^2(r+X)}$$

On obtient donc la matrice d'information de Fisher suivante :

$$I(r, p) = \begin{pmatrix} 0,0487 & -1,0900 \\ -1,0900 & -573,0362 \end{pmatrix}.$$

Et son inverse :

$$I(r, p)^{-1} = \begin{pmatrix} 19,6806 & -0,0374 \\ -0,0374 & -0,0017 \end{pmatrix}.$$

Donc :

$$(\hat{r}, \hat{p}) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} N((\hat{r}, \hat{p}), \frac{1}{\sqrt{n}} \begin{pmatrix} 19,6806 & -0,0374 \\ -0,0374 & -0,0017 \end{pmatrix}).$$

Cependant, l'échantillon n'est pas suffisamment grand pour considérer que l'approximation de la distribution des estimateurs des paramètres par une loi Normale multivariée est adéquate. L'utilisation de la méthode de bootstrap pour l'estimation de l'incertitude des paramètres est alors plus appropriée.

### b. Le bootstrap paramétrique

Cette méthode consiste à approximer la distribution des estimateurs des paramètres en échantillonnant un grand nombre de fois à partir de la distribution ajustée sur l'échantillon de départ. Cette distribution ajustée correspond à l'hypothèse de départ sur la population. A chaque échantillonnage, l'ajustement donne lieu à de nouvelles valeurs pour les estimateurs des paramètres. La distribution empirique de ces estimateurs permet de rendre compte de la variation des estimations que l'on aurait pu faire si on avait observé un très grand nombre de fois un échantillon de taille  $n$  issu de la distribution de la population. Au lieu de l'approximation en Normale multivariée de la théorie classique, une distribution empirique de  $\hat{\Theta}$  est obtenue.

L'algorithme consiste dans un premier temps à estimer, par le maximum de vraisemblance, les  $p$  paramètres de la loi de fréquence ajustée  $P_{\Theta}$ , sur l'échantillon d'origine  $k$ , ce qui permet d'obtenir  $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_p)$ . Le meilleur estimateur de la loi de la population  $P_{\Theta}$  dont est issu l'échantillon  $k$  de nombre étudié est  $\hat{P}_{\Theta} = P_{\hat{\theta}}$ . Ce qui a été fait précédemment et nous avons obtenu  $\hat{\theta} = (\hat{r}; \hat{p}) = (39,8201; 0,9174)$ .

A lieu ensuite un tirage aléatoire dans  $P_{\hat{\theta}}$  d'un nombre  $B$  suffisamment grand d'échantillons de même taille  $n$  que l'échantillon d'origine. Pour chaque échantillon  $j = 1, \dots, B$  simulé  $\underline{k}_j$ , le maximum de la fonction de vraisemblance  $L(\frac{\Theta}{\underline{k}_j})$  est calculé pour en déduire les réalisations des estimateurs des paramètres  $\hat{\theta}_j = (\hat{\theta}_{j,1}, \dots, \hat{\theta}_{j,p})$ . Un échantillon de taille  $B$  d'estimateurs de paramètres  $\{\hat{\theta}_j\}_{j=1, \dots, B}$  est ainsi obtenu par le bootstrap.

La distribution empirique des estimateurs des paramètres qui en découle sert à l'estimation de l'incertitude des paramètres. Lorsque l'échantillon est de taille  $n$  très grande, la distribution empirique de  $\Theta$  obtenue par le bootstrap doit correspondre à la loi Normale multivariée prévue par la théorie classique.

Dans le cas de la loi Binomiale Négative,  $B = 100\ 000$  échantillons bootstrap de taille  $n = 24$  sont générés avec  $P_{\hat{r}=39,8201; \hat{p}=0,9174}$ . Pour chaque échantillon généré, les estimateurs des paramètres  $\hat{r}$  et  $\hat{p}$  sont recalculés de sorte qu'un échantillon de  $B$  réalisations des paramètres, noté  $\{\hat{r}_j^{Boot}, \hat{p}_j^{Boot}\}$ , est obtenu.

Les tableaux suivant montrent l'analyse des estimateurs des paramètres de la loi Binomiale Négative :

$\hat{f}$	Echantillon bootstrap	$\hat{p}$	Echantillon bootstrap
Espérance	<b>36,9100</b>	Espérance	<b>0,8182</b>
Ecart type	<b>70,8049</b>	Ecart type	<b>0,1371</b>
Coeff de variation	<b>191,83%</b>	Coeff de variation	<b>16,76%</b>

Probabilité cumulée	Valeur de $\lambda$	Probabilité cumulée	Valeur de $p$
0%	<b>1,4215</b>	0%	<b>0,2938</b>
5%	<b>4,5578</b>	5%	<b>0,5718</b>
10%	<b>5,6494</b>	10%	<b>0,6242</b>
15%	<b>6,6176</b>	15%	<b>0,6618</b>
20%	<b>7,5501</b>	20%	<b>0,6932</b>
25%	<b>8,5666</b>	25%	<b>0,7203</b>
30%	<b>9,6064</b>	30%	<b>0,7454</b>
35%	<b>10,7783</b>	35%	<b>0,7688</b>
40%	<b>12,0787</b>	40%	<b>0,7914</b>
45%	<b>13,5368</b>	45%	<b>0,8125</b>
50%	<b>15,3113</b>	50%	<b>0,8330</b>
55%	<b>17,3452</b>	55%	<b>0,8538</b>
60%	<b>19,8374</b>	60%	<b>0,8745</b>
65%	<b>23,0458</b>	65%	<b>0,8946</b>
70%	<b>27,2251</b>	70%	<b>0,9147</b>
75%	<b>32,7988</b>	75%	<b>0,9350</b>
80%	<b>41,0195</b>	80%	<b>0,9559</b>
85%	<b>53,8435</b>	85%	<b>0,9776</b>
90%	<b>78,6747</b>	90%	<b>1,0000</b>
95%	<b>141,6267</b>	95%	<b>1,0000</b>
100%	<b>885,5590</b>	100%	<b>1,0000</b>

FIGURE 2.16 – Résultats du Bootstrap

### 2.2.3 Distribution du montant des sinistres : la Sévérité

#### 2.2.3.1 Données, premières observations et méthodologie

##### a. Données à disposition et démarche

Les données utilisées dans le cadre de l'étude du coût des événements inondations sont les mêmes que celles utilisées dans la partie précédente pour l'étude de la fréquence, à savoir les données des coûts par événement inondation Cat Nat hors automobiles de 1990 à 2013 après filtrage des données au-dessus d'un seuil de 10M€.

Afin d'actualiser les coûts, on se base sur les primes comptables annuelles Cat Nat CCR ce qui permet de prendre en compte l'inflation, l'évolution des tendances tarifaires et l'évolution du portefeuille. En notant  $X_t^i$  le  $i$ ème sinistre de l'exercice  $t$  et  $P^t$  la prime CCR globale de l'année  $t$ , les coûts ramenés en €<sub>2013</sub> sont :

$$X_i^{2013} = X_i^t * \frac{P^{2013} - P^t}{P^t}$$

Pour étudier les coûts des événements Inondations Auto, on va procéder en deux étapes. En effet, les informations des coûts par événement Auto sont insuffisantes pour pouvoir les utiliser pour une modélisation.

Ainsi, on modélisera tout d'abord les dommages Non Auto que l'on ramènera ensuite aux coûts Auto grâce aux données dont l'on dispose et en tenant compte du type d'inondation (éclair, lente, autre). En effet, pour quelques événements et pour quelques cédantes, on dispose d'informations sur les dommages Auto et Non Auto, ce qui nous permettra d'étudier cette relation.

La modélisation des dommages marché Non Auto se fera également en deux étapes : d'une part on étudiera le coût des événements ordinaires dits « attritionnels » et d'autre part le coût des événements exceptionnels. Il faudra pour cela définir un seuil de coût à partir duquel un événement sera considéré exceptionnel.

Ainsi donc, les sinistres de montants inférieurs à ce seuil critique  $u$  sont modélisés séparément des sinistres dépassant le seuil. Concrètement, la fonction de répartition des coûts  $F$  est donc égale à :

$$\begin{cases} F_{SinistresOrdinaires}(t) & \text{si } t \leq u \\ F_{SinistresOrdinaires}(u) * F_{SinistresOrdinaires}(t - u) & \text{si } t > u \end{cases}$$

### **b. La distribution empirique et empirique multi-ajustée**

L'ensemble des sinistres revalorisés en €<sub>2013</sub> forment un échantillon de sinistres  $\{x_i\}_{i=1,\dots,k}$ . Cet échantillon permet de construire une distribution empirique de probabilité,  $F_{emp}$ , comme première approximation de la distribution de la variable aléatoire montant de sinistre individuel  $X$ .  $F_{emp}$  est une fonction en escalier définie comme suit :

$$F_{emp}(x) = P(X \leq x) = \frac{\sum_{i=1}^k I(x_i \leq x)}{k}.$$

Où  $I(A)$  est la fonction indicatrice de l'événement  $A$ .

On obtient alors la fonction de répartition empirique suivante :

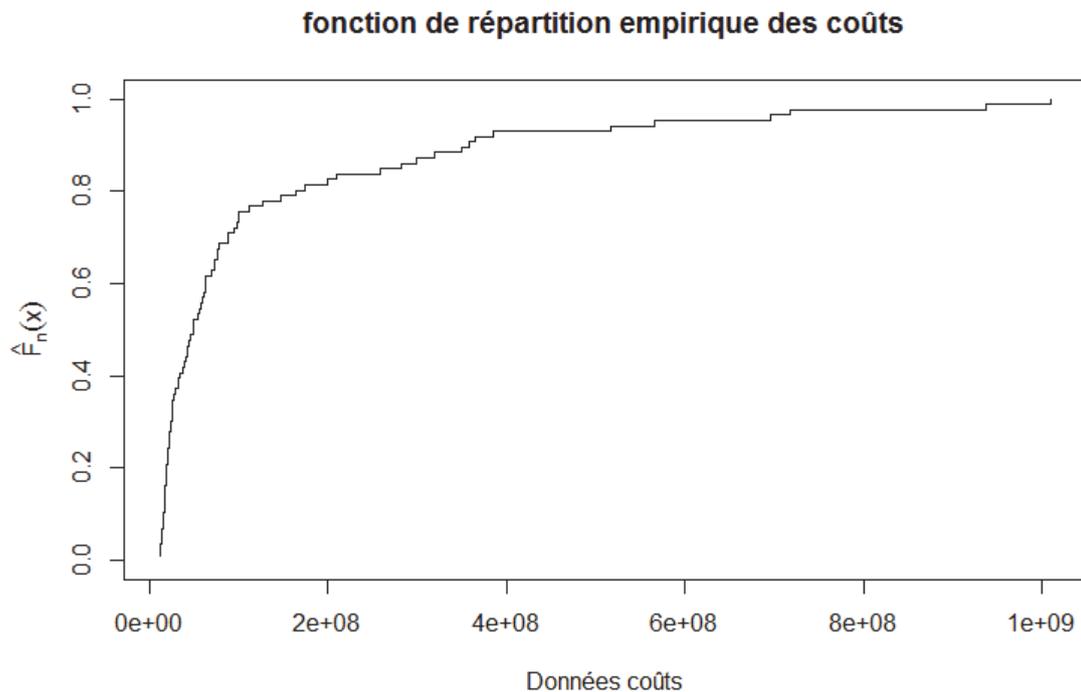


FIGURE 2.17 – Fonction de répartition empirique des coûts

La distribution empirique ainsi construite présente deux problèmes majeurs :

1. Elle peut mener à des incohérences de primes pures entre des tranches de hauteurs différentes. Il suffit de penser à deux tranches de réassurance adjacentes, de même amplitude mais de hauteur différente se trouvant sur un plateau de la fonction empirique en escalier. Par conséquent, la prime pure est la même pour les deux tranches, ce qui n'est pas acceptable. Nous pouvons corriger ce problème en construisant une distribution empirique de sévérité dite "multi-ajustée".
2. La distribution empirique est construite à partir de l'échantillon de sinistres au dessus du seuil de modélisation. Si cet échantillon peut être considéré comme représentatif de la sinistralité attritionnelle, il capte souvent mal la sinistralité extrême. La distribution empirique s'arrête au maximum des montants de sinistre de l'échantillon. Au-delà, les probabilités de montants de sinistre sont nulles par construction. Ainsi par exemple, dans le cas de la réassurance, si les tranches étudiées commencent au-dessus de ce maximum, la prime pure est alors nulle si elle est calculée sur la distribution empirique.

La distribution empirique multi-ajustée a été créée afin d'obtenir une fonction de distribution strictement croissante dérivée de la distribution empirique de sévérité. Cela permet d'assurer la cohérence des primes pures des tranches de réassurance cotées (Poulin, 2012).

La fonction de distribution empirique multi-ajustée  $F_{multi-ajustee}$  respecte les contraintes suivantes :

- $F_{multi-ajustee}(x_{min}) = 0$  alors que  $F_{emp}(x_{min}) \neq 0$

- $F_{multi-ajustee}$  passe au milieu de chaque saut de probabilité de  $F_{emp}$  et conserve la prime pure entre deux valeurs de l'échantillon de sinistres  $\{x_i, x_{i+1}\}$  :

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} (1 - F_{multi-ajustee}(x)) dx = \int_{x_i}^{x_{i+1}} (1 - F_{emp}(x)) dx.$$

ce qui permet de définir le point de croisement entre les deux fonctions sur chaque plateau de la fonction empirique.

- $F_{multi-ajustee}(x_{max}) = 1$

On obtient ainsi la fonction de répartition empirique multi-ajustée suivante :

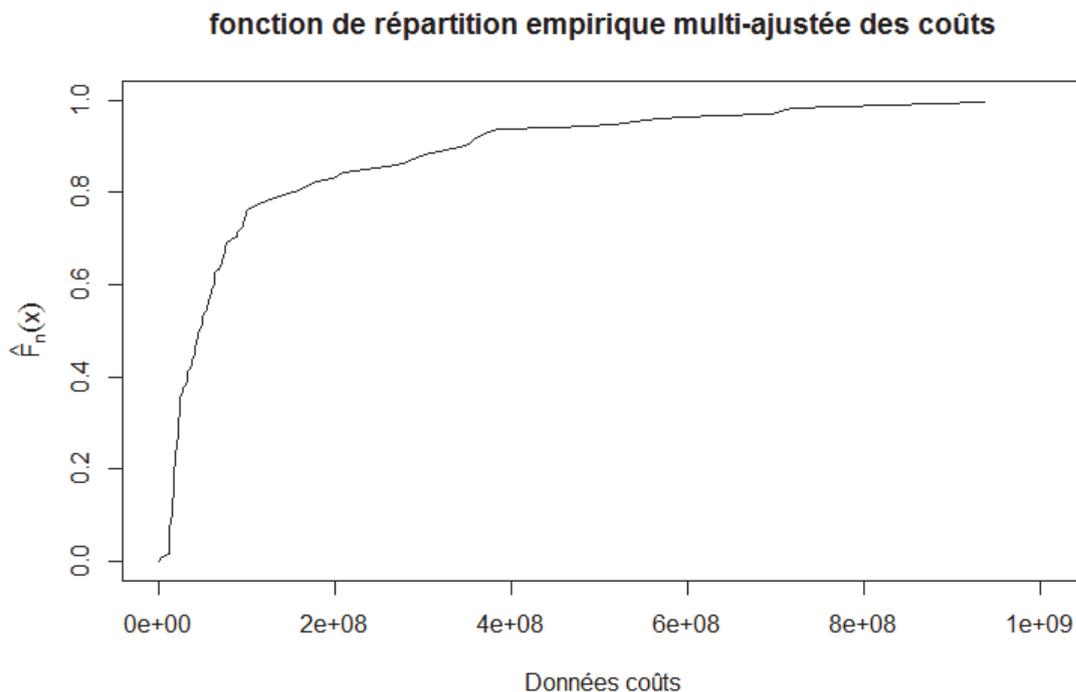


FIGURE 2.18 – Fonction de répartition empirique multi-ajustée des coûts

La construction de la fonction de distribution empirique multi-ajustée permet de parer au problème de cohérence entre les primes pures des tranches de réassurance. Elle ne permet cependant pas de régler le second problème de limitation de la fonction empirique au maximum des montants des sinistres de l'échantillon.

### c. Rappels de la théorie des valeurs extrêmes

La théorie des valeurs extrêmes s'applique à des phénomènes rares et extrêmes (événements climatiques, terroristes, certaines fluctuations des marchés financiers) qui sortent du cadre de la théorie classique des probabilités du fait de leur probabilité d'occurrence nulle ou presque. Or, de par leur magnitude, les assureurs doivent les prendre en compte dans leur gestion des risques. La théorie des valeurs extrêmes permet de mieux modéliser et appréhender ces risques en étudiant le comportement de la queue de distribution des lois de probabilité (Charpentier, 2013).

### Distribution des extrema dans le cas d'un échantillon de taille finie

On définit la variable aléatoire réelle  $M_n$ , qui traduit le maximum d'un n-échantillon d'une variable aléatoire réelle  $X$  (les variables aléatoires  $X_i$  sont indépendantes et suivent la même loi que  $X$ ), par :

$$M_n = \max(X_i)_{1 \leq i \leq n}.$$

Le but visé est de déterminer la loi limite que suit le maximum en fonction de celle de la variable aléatoire  $X$ .

Notons  $F_X$  la fonction de répartition de la variable  $X$  de loi de probabilité  $P$ , à savoir  $F_X(x) = P(X < x)$ .

La fonction de répartition de  $M_n$  est alors définie par :

$$\begin{aligned} F_{M_n}(x) &= P(M_n < x) = P(X_1 < x, \dots, X_n < x). \\ &= P(X_1 < x) \dots P(X_n < x) \text{ car les } X_i \text{ sont iid.} \\ &= [F_X(x)]^n \text{ (idem).} \end{aligned}$$

La fonction de répartition de  $X$  étant souvent inconnue, il n'est généralement pas possible de déterminer la distribution du maximum à partir de ce résultat. Comme les valeurs extrêmes se trouvent à droite et à la fin du support de la distribution, intuitivement le comportement asymptotique de  $M_n$  doit permettre de rendre compte de la fin de la distribution.

Notons  $x_F = \sup\{x \in R : F_X(x) < 1\}$  le point terminal à droite de la fonction de répartition. Ce point terminal peut être infini ou fini.

On s'intéresse alors à la distribution asymptotique du maximum en faisant tendre  $n$  vers l'infini. On a :

$$\lim_{x \rightarrow \infty} F_{M_n}(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} [F_X(x)]^n = \begin{cases} 0 & \text{si } x < x_F \\ 1 & \text{si } x \geq x_F \end{cases}$$

On constate que la distribution asymptotique du maximum donne une loi dégénérée, une masse de Dirac en  $x_F$ , puisque pour certaines valeurs de  $x$ , la probabilité peut être égale à 1 dans le cas où  $x_F$  est fini. Cette méthode ne fournit pas assez d'informations, d'où l'idée d'utiliser une transformation afin d'obtenir des résultats plus exploitables pour les lois limites des maxima  $M_n$ . La transformation la plus simple est l'opération de standardisation.

### Distributions asymptotiques du maximum

Comme la loi limite de la fonction de répartition précédente est dégénérée, on recherche une loi non dégénérée pour le maximum des maxima  $M_n$ . La théorie des valeurs extrêmes permet de donner une réponse à cette problématique.

**Définition 1 :** Soit  $X_1, \dots, X_n$  une suite de  $n$  variables aléatoires réelles iid, de somme  $S_n$ . On dit que  $X$  (ou  $F_X$ ) appartient au **domaine d'attraction** d'une fonction de répartition non dégénérée  $H$  s'il existe une suite de réels  $(a_n)_{n \geq 1}$  et une suite  $(b_n)_{n \geq 1}$  à termes strictement positifs telles que :

$\frac{S_n - a_n}{b_n}$  converge faiblement (ou en distribution) vers  $H$ .

Dans ce cas, on note :  $\frac{S_n - a_n}{b_n} \xrightarrow{d} H$ .

**Théorème de Fisher-Tippett :** Soit  $X_1, \dots, X_n$  une suite de  $n$  variables aléatoires réelles iid de loi continue  $P$  et  $M_n = \max(X_i)_{1 \leq i \leq n}$ . S'il existe une suite de réels  $(a_n)_{n \geq 1}$  et une suite  $(b_n)_{n \geq 1}$  à termes strictement positifs et une fonction de répartition non-dégénérée  $G$  telle que  $\frac{S_n - a_n}{b_n} \xrightarrow{d} G$  lorsque  $n$  tend vers l'infini, alors  $G$  est nécessairement de l'un des trois types suivant :

$$G_0(x) = \exp(-\exp(-x)) \quad \forall -\infty < x < +\infty.$$

$$G_{1,\alpha}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 0 \\ \exp(-x^{-\alpha}) & \text{si } x > 0 \end{cases}$$

$$G_{2,\alpha}(x) = \begin{cases} \exp(-(-x)^\alpha) & \text{si } x \leq 0 \\ 1 & \text{si } x > 0 \end{cases}$$

Correspondant respectivement aux lois de Gumbel, de Fréchet et de Weibull. On dit alors que  $X$  (ou  $F_X$ ) **appartient au domaine d'attraction maximum de  $G$**  et on note  $X \in DAM(G)$ .

En introduisant les paramètres de localisation  $\mu$  et de dispersion  $\sigma$ , qui dépendent des suites  $(a_n)$  et  $(b_n)$ , dans l'expression des distributions extrêmes, on obtient la loi unifiée de la distribution des valeurs extrêmes, notée GEV (Generalized Extreme Value Distribution).

Elle correspond à :

$$G_{\mu,\sigma,\xi}(x) = \exp\left\{-\left[1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right\}.$$

où  $\xi$  est un paramètre de forme encore appelé indice des valeurs extrêmes ou indice de queue qui ne dépend que de la loi de  $X$ . Plus cet indice est élevé en valeur absolue, plus le poids des extrêmes dans la distribution initiale est important. On parle alors de distributions à « queues épaisses ».

Pour  $\xi$  non nul, on a  $\xi = \frac{1}{\alpha}$  et le signe de  $\xi$  nous renseigne sur le type de la loi asymptotique du maximum. La fonction de répartition  $G_{\mu,\sigma,\xi}$  est dans le domaine d'attraction maximum, respectivement, de Fréchet, Gumbel ou Weibull selon que  $\xi > 0$ ,  $\xi = 0$ ,  $\xi < 0$ .

On note  $G_\xi = G_{0,1,\xi}$ .

La connaissance de  $\xi$  permet, à elle seule, de caractériser à un changement d'échelle près, le comportement asymptotique du maximum normalisé.

### Distribution conditionnelle des excès

Bien que les DAM soient définis par référence au comportement asymptotique de la loi du maximum, les résultats les plus utiles d'un point de vue opérationnel en assurance proviennent du comportement des excès au-delà d'un seuil élevé. On modélisera donc les coûts de sinistres par la méthode à dépassement de seuil ou méthode POT (Peak over Threshold). Cette méthode consiste à utiliser les observations qui dépassent un certain seuil suffisamment élevé et plus particulièrement les différences entre ces observations et le seuil, appelées excès (Benlagha et al., 2009).

**Définition 2 :** Soit  $X_1, \dots, X_n$   $n$  variables aléatoires réelles iid de fonction de répartition commune  $F$  et  $u$  un réel suffisamment grand, inférieur au point terminal  $x_F$ , appelé seuil.

Notons  $E_u = \{j \in \{1, 2, \dots, n\} | X_j > u\}$ .

On définit les **excès au-delà du seuil**  $u$  comme l'ensemble des variables aléatoires  $Y_j$  définies par :  $Y_j = X_j - u$  pour  $j \in E_u$ .

On cherche à partir de la distribution de  $F$  de  $X$  à définir une distribution conditionnelle  $F_u$  par rapport au seuil  $u$  pour les variables aléatoires dépassant ce seuil.

**Définition 3 :** La **distribution conditionnelle des excès** au-delà du seuil  $u$  est définie par :

$$F_u(y) = P(Y \leq y | Y > 0) = \frac{F(u+y) - F(u)}{1 - F(u)} \text{ avec } 0 \leq y \leq x_F - u.$$

L'objectif de la méthode POT est de déterminer par quelle loi de probabilité on peut approcher cette distribution conditionnelle.

**Théorème :** Soit  $F_u$  la distribution conditionnelle des excès au-delà d'un seuil  $u$ , associée à une fonction de répartition inconnue  $F$ . Cette fonction  $F$  appartient au domaine d'attraction maximum de  $G_{\xi}$  si et seulement si il existe une fonction positive  $\sigma$  telle que :

$$\lim_{u \rightarrow x_F} \text{Sup}_{0 \leq y \leq x_F - u} |F_u(y) - F_{\xi, \sigma}^{GPD}(y)| = 0.$$

Où  $F_{\xi, \sigma}^{GPD}$  est la fonction de répartition de la loi de Pareto généralisée (GPD), définie par :

$$F_{\xi, \sigma}^{GPD}(y) = \begin{cases} 1 - (1 + \frac{\xi y}{\sigma})^{-\frac{1}{\xi}} & \text{si } \xi \neq 0 \\ 1 - \exp(-\frac{y}{\sigma}) & \text{si } \xi = 0 \end{cases}$$

Pour  $y \in [0, (x_F - u)]$  si  $\xi \geq 0$  et  $y \in [0, \min(-\frac{\sigma}{\xi}, x_F - u)]$  si  $\xi < 0$ .

Ce théorème établit le lien entre le paramètre de la loi du domaine d'attraction maximum et le comportement limite des excès au-delà d'un seuil assez grand. En particulier, l'indice de queue  $\xi$ , obtenu dans l'étude du maximum, est identique au paramètre de la loi de Pareto généralisée.

Ceci permet de distinguer les lois à queue épaisse qui appartiennent au domaine d'attraction de Fréchet des lois à queue fine ou légère qui appartiennent au domaine

d'attraction de Gumbel. Une queue de distribution est d'autant plus épaisse qu'elle se distingue de la loi normale en s'étalant plus lentement, et donc avec un coefficient d'aplatissement (kurtosis) supérieur à celui de la loi normale (égal à trois).

La loi de Pareto généralisée peut aussi s'écrire sous la forme :

$$F_{\xi, \sigma}^{GPD}(y) = 1 + \ln(G(y)).$$

où  $G(y)$  correspondant à la loi GEV (Generalized Extreme Value) avec  $\mu = 0$ .

Lors de l'estimation des paramètres de la loi GPD, on se trouve devant un problème d'estimation du seuil  $u$ . Plusieurs méthodes de détermination du seuil au-delà duquel les observations sont extrêmes seront présentées dans une partie ultérieure.

### 2.2.3.2 Distinction entre sinistres graves et sinistres ordinaires

#### a. Les coûts suivent-ils une loi extrême ?

Cette partie vise à déterminer si la théorie des valeurs extrêmes s'applique bien aux coûts et si oui à choisir quel est le seuil  $u$  approprié. On vérifie d'abord que nos intuitions sont justes et que la loi est bien à queue épaisse (Boyer Chammard, 2008). Un premier critère consiste à tracer un QQ plot avec la loi exponentielle, c'est à dire le graphe des  $(q_{empirique}; q_{exponentiel})$  où les  $q$  sont les quantiles empiriques et de la loi  $exp(1)$ . Si les coûts croissent suivant une loi exponentielle, le graphe sera à peu près une droite. Si la queue est moins épaisse (par exemple normale), le graphe sera convexe. Si la queue est plus lourde, il sera concave.

On obtient le QQplot suivant :

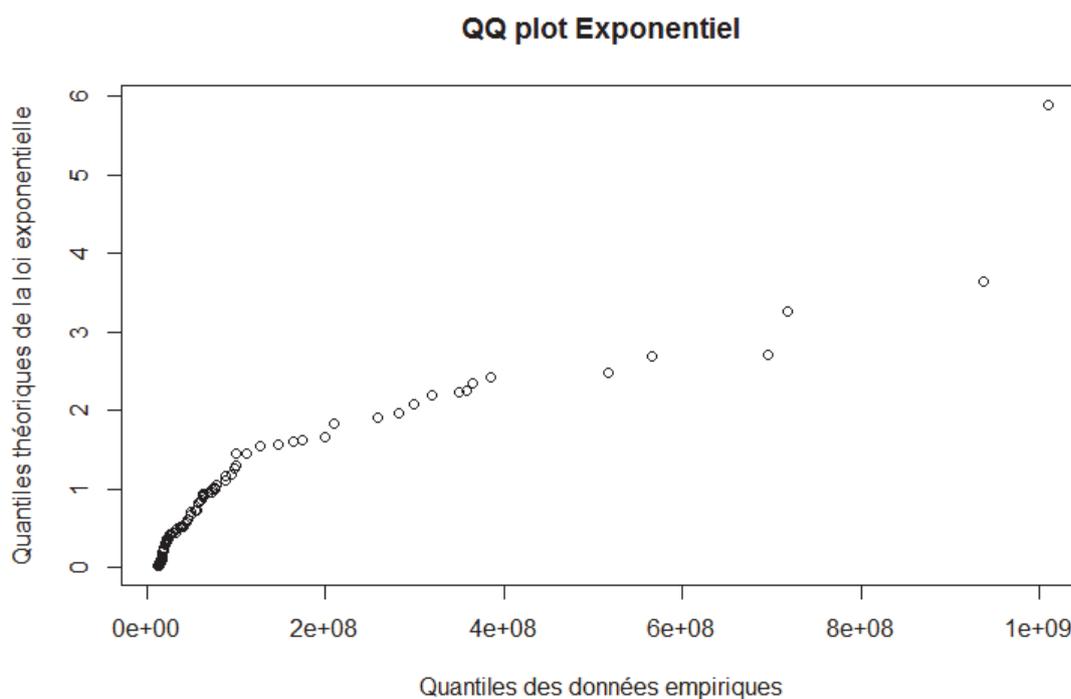


FIGURE 2.19 – QQ plot Exponentiel

On observe donc que nos données ont une tendance concave. On suppose donc que la loi des coûts des sinistres est à queue épaisse.

### b. Estimation du seuil de modélisation des sinistres extrêmes

Il s'agit ici de déterminer le seuil  $u$  à partir duquel les sinistres sont considérés comme extrêmes. Ce point conduit à une limite opérationnelle dans la mesure où, en pratique, on dispose d'un échantillon fini d'observations ce qui conduit à un arbitrage. En effet, plus le seuil est élevé, meilleure est l'approximation, mais moins on dispose d'observations au-delà du seuil pour calibrer la distribution Pareto généralisée. Une mauvaise estimation du seuil peut donc avoir deux conséquences :

- si on choisit un seuil  $u$  trop faible, on va prendre en compte dans l'estimation de la loi de queue des coûts moyennement élevés en plus des sinistres réellement extrêmes. En pratique, cela conduit généralement à sous-estimer le risque de très gros sinistres. Or on a vu que les coûts les plus élevés jouent un rôle prépondérant ;
- si on choisit  $u$  trop élevé, la loi des coûts va être sur un grand intervalle la loi des sinistres ordinaires : on sous-estime donc les sinistres intermédiaires. De plus, on risque de ne pas avoir assez de données pour modéliser de façon robuste la loi de la queue.

Avant toute chose, il est naturel de regarder le graphique des coûts triés par ordre croissant afin de voir si on peut observer un effet de décrochage des coûts. On note  $X_{1,n}, \dots, X_{n,n}$  les statistiques d'ordre associées à l'échantillon  $X_1, \dots, X_n$  des coûts. On obtient le graphique suivant :

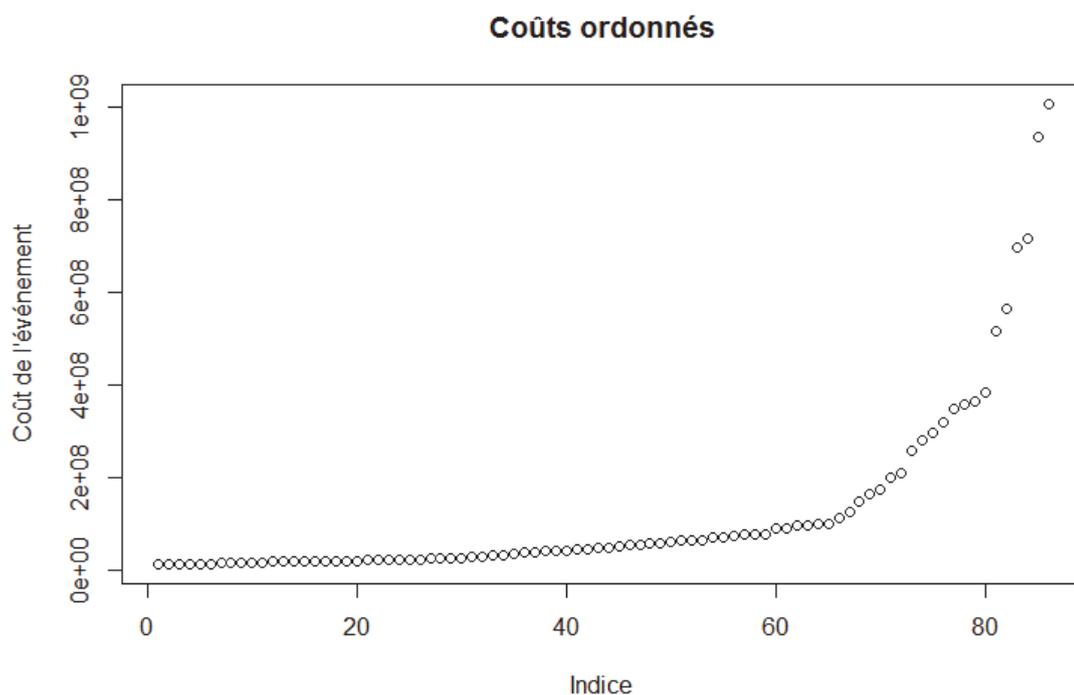


FIGURE 2.20 – Coûts ordonnés

On peut remarquer que les coûts présentent un décrochage à partir du 67ème point,

soit un seuil à 126 488 087€.

Il existe cependant plusieurs méthodes plus spécifiques pour estimer ce seuil (Vegni, 2011) que l'on va maintenant implémenter.

### L'espérance résiduelle

Cette méthode consiste à tracer la courbe de la fonction moyenne des excès (FME) qui permet de décrire la prédiction du dépassement du seuil  $u$  lorsqu'un excès se produit. Soit  $X$  une v.a.r. telle que  $E(X) < \infty$ , la fonction moyenne des excès est définie par :

$$e(u) = E(X - u | X > u).$$

Pour chaque seuil  $u$ , la moyenne des excès supérieurs à ce seuil est calculée. La fonction moyenne des excès empirique est donc définie par :

$$\hat{e}(u) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - u)^+}{\sum_{i=1}^n I_{\{X_i > u\}}} = \frac{1}{N_u} \sum_{i=1}^n (X_i - u)^+.$$

C'est-à-dire la somme des excès au-dessus du seuil  $u$  divisé par le nombre  $N_u$  de données qui excèdent  $u$ .

Il est possible de déterminer graphiquement le seuil le plus adéquat en le prenant égal à la valeur de  $u$  à partir de laquelle la fonction  $\hat{e}$  est linéaire. Trois cas peuvent alors se présenter : si à un certain seuil, la FME empirique est marquée par une pente positive, alors les données suivent une distribution de Pareto généralisée avec un paramètre  $\zeta$  positif. Si la FME empirique présente une pente horizontale, les données suivent une distribution exponentielle. Enfin, si la FME empirique est décroissante, on a une distribution bornée à droite. Les données suivent alors une distribution à queue légère. Nos résultats sont présentés dans la figure 2.21.

Le choix du seuil  $u$  est donc ici délicat. Une première option serait de ne considérer que les 5 derniers points, soit poser le seuil  $u$  à 565 002 122€. Or 5 données ne seront pas suffisantes pour estimer de façon robuste la loi de la queue. De plus, bien que 2 points s'écartent légèrement de la droite, la tendance linéaire semble s'exprimer dès le 74ème point voir dès le 67ème point. Il semblerait donc plus adéquat de fixer le seuil  $u$  à l'une de ces deux valeurs. Cela nous donnerait donc un seuil à 281 376 723€ ou à 126 488 087€. Il faut cependant utiliser des méthodes complémentaires pour confirmer cette observation et faire un choix.

De plus, on remarque que la pente de la fonction moyenne des excès empirique est positive. On peut donc en conclure que l'on se situe dans le premier cas présenté précédemment à savoir que les données suivent une distribution de Pareto généralisée avec un paramètre  $\zeta$  positif.

### L'estimateur de Hill

Une seconde méthode consiste à calculer l'excès empirique moyen des logarithmes des coûts. On note  $X_{1,n} \dots X_{n,n}$  les statistiques d'ordre associées à l'échantillon  $X_1 \dots X_n$  des coûts. Dans notre cas,  $n = 86$ . L'estimateur de Hill est défini de la manière suivante :

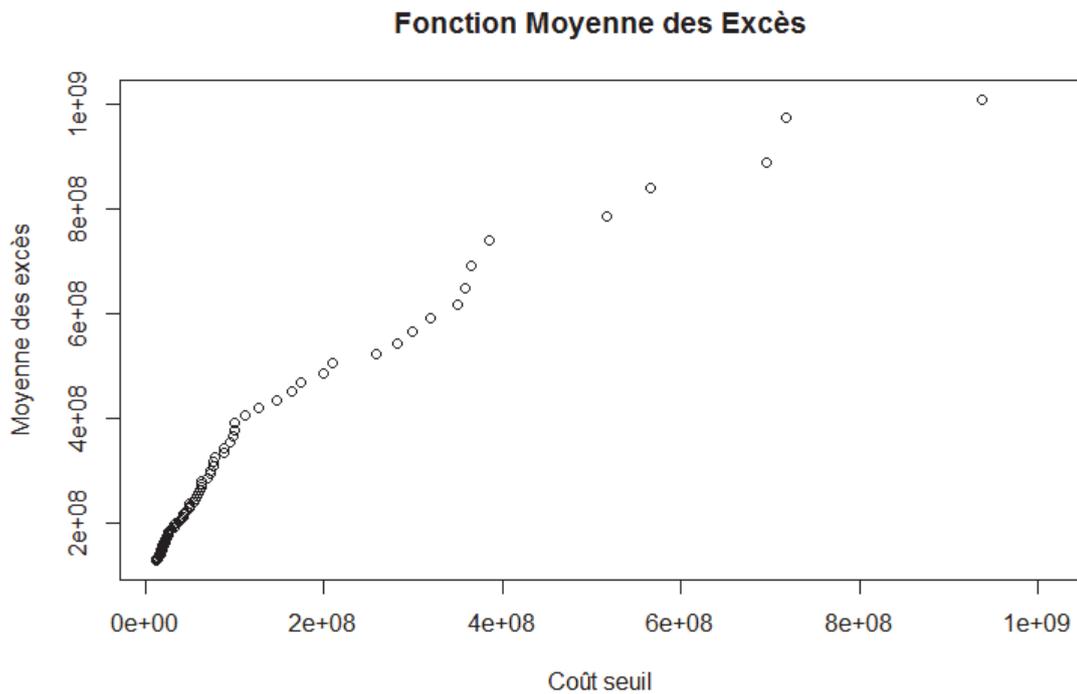


FIGURE 2.21 – Fonction Moyenne des Excès

$$\hat{\gamma}_{X,k,n}^{Hill} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \ln(X_{n-j+1,n}) - \ln(X_{n-k,n}).$$

On cherche donc à nouveau l'indice à partir duquel on observe une stabilisation linéaire du graphique, qui devrait correspondre à la valeur de l'indice de queue - c'est-à-dire le seuil  $u$  à partir duquel les valeurs sont considérées comme extrêmes.

Avec nos données, on obtient le graphique suivant :

Ce graphique manque de précision et la phase de stabilisation est difficile à identifier.

Cependant, il est également possible d'interpréter graphiquement l'estimateur de Hill à travers le graphique appelé « Pareto quantile plot » de coordonnées :

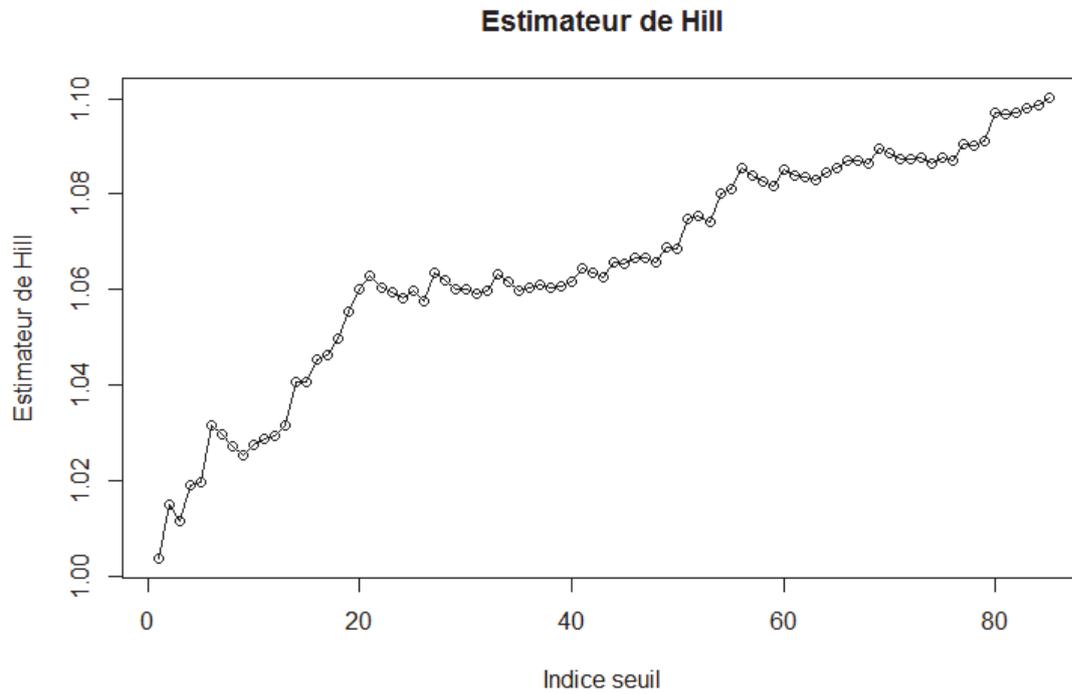
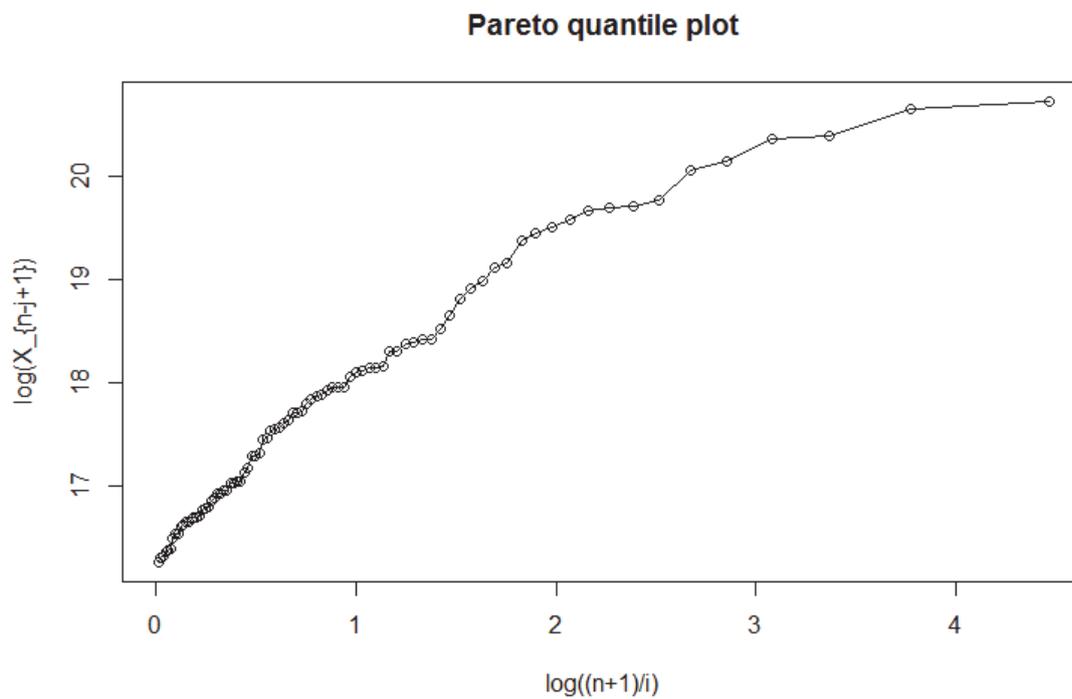
$$\left( \ln\left(\frac{n+1}{i}\right), \ln(X_{n-i+1,n}) \right).$$

En effet, en formant la vraisemblance basée sur cette distribution limite, on peut vérifier que l'estimateur de Hill est l'estimateur du maximum de vraisemblance dans le cas où le seuil  $u$  est égal à  $X_{n-k,n}$ .

Dans le cas de distributions de type Pareto, ce graphique sera approximativement linéaire dans les points extrêmes avec une pente  $\gamma$ . L'estimateur de Hill est alors l'estimateur naïf de cette pente et donc de  $\gamma$ . Il faut donc déterminer graphiquement le seuil à partir duquel le graphique présente une stabilisation linéaire.

On obtient le graphique suivant :

Le Pareto quantile plot est plus lisible et interprétable que le graphique des estimateurs de Hill. Le choix du seuil reste cependant délicat. Tout comme lorsqu'on étudiait la fonc-

FIGURE 2.22 – *Estimateur de Hill*FIGURE 2.23 – *Pareto quantile plot*

tion moyenne des excès, on peut considérer une stabilisation linéaire sur les 6 dernières données mais cela nous amènera à trop d'incertitude lors de l'estimation de la loi des extrêmes. On peut cependant considérer que la stabilisation linéaire démarre à la 73ème

donnée. La méthode de l'estimateur de Hill nous amène donc à considérer comme seuil  $u = 258\,965\,232\text{€}$ .

### Stabilité des coefficients

Il s'agit ici d'estimer les coefficients de la distribution de Pareto généralisée de la queue de distribution pour plusieurs valeurs de seuil. On étudie ensuite la stabilité du paramètre d'échelle modifié défini par  $\sigma^* = \sigma_u - \xi * u$  où  $\sigma_u$  et  $\xi$  sont respectivement le paramètre d'échelle et le paramètre de forme de la GPD estimée.

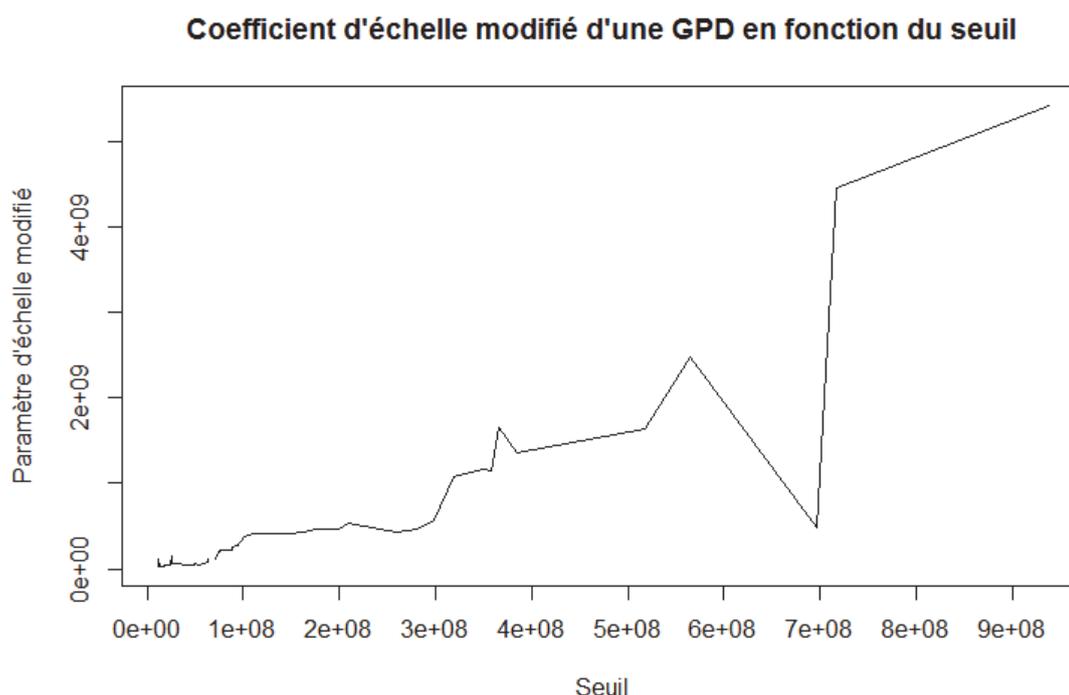


FIGURE 2.24 – Coefficient d'échelle modifié d'une GPD en fonction du seuil

Le coefficient d'échelle modifié est stable dans l'intervalle  $[11\,430\,000 ; 300\,000\,000]$ . Le seuil des valeurs extrêmes est donc proche de  $300\,000\,000\text{€}$ . Si cette méthode est encore une fois imprécise, elle nous oriente vers le choix du seuil à la 73ème ou 74ème valeur.

### Choix du seuil

Les différentes méthodes expérimentées nous donnent donc des résultats très approximatifs pour l'estimation du seuil  $u$ . On peut tout de même supposer que le seuil se situera entre la 67ème valeur et la 74ème valeur, sachant que le choix d'un seuil à la 67ème valeur impliquera l'intégration des sinistres intermédiaires dans l'étude des extrêmes ce qui aura pour conséquence de sous-estimer le risque des sinistres les plus extrêmes et que le choix d'un seuil à la 74ème valeur ne prendra en compte que les risques les plus extrêmes et les risques intermédiaires seront donc eux aussi sous-estimés.

Il nous faut donc procéder à un arbitrage. Le choix s'est alors porté à prendre la moyenne entre la 67ème et la 74ème valeur, soit un seuil à  $203\,932\,405\text{€}$ . Ainsi, l'échantillon des sinistres ordinaires sera composé des coûts des événements allant du 1er au

71ème indice et celui des sinistres extrêmes sera composé des coûts des événements allant du 72ème ou 86ème indice.

### 2.2.3.3 Modélisation des sinistres attritionnels

Dans cette partie, on étudie donc la loi du coût des événements se situant sous le seuil  $u$ . Il s'agit donc des risques attritionnels. Après avoir décrit les lois qui seront testées, nous appliquerons la même méthodologie que lors de la modélisation de la fréquence sur des lois adaptées à l'étude de la sévérité.

#### a. Lois étudiées

On s'intéresse ici aux sinistres de moins de 203 932 405€, soit, l'échantillon  $(X_{1,86}, \dots, X_{71,86})$ . On est donc en présence d'une variable aléatoire continue bornée.

On essaiera de modéliser les sinistres attritionnels par une loi à support dans  $R^+$ . Dans ce cas, on cherchera seulement à avoir une bonne adéquation pour les valeurs de  $[0; 203 932 405]$ . Les valeurs de coûts supérieurs à 203 932 405€ seront étudiées par la méthode POT (paragraphe 3.4.). On donne les différentes lois envisagées, classées par épaisseur de queue.

#### La loi exponentielle

On appelle loi exponentielle, notée  $\epsilon(\lambda)$ , de paramètre  $\lambda \in R_+^*$ , la loi de probabilité absolument continue dont la densité est donnée par :

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad x \in R.$$

Moments :

$$E[X] = \frac{1}{\lambda} \text{ et } V[X] = \frac{1}{\lambda^2}.$$

L'estimateur de  $\lambda$  par la méthode du maximum de vraisemblance est  $\hat{\lambda} = \frac{1}{\bar{x}}$  où  $\bar{x}$  est la moyenne arithmétique des coûts.

#### La loi gamma

On appelle loi gamma, notée  $\Gamma(k, \lambda)$ , de paramètres  $k \in R_+^*$  et  $\lambda \in R_+^*$ , la loi de probabilité absolument continue dont la densité est donnée par :

$$f(x) = x^{k-1} \frac{\lambda^k e^{-\lambda x}}{\Gamma(k)} \quad x \in R.$$

Moments :

$$E[X] = \frac{k}{\lambda} \text{ et } V[X] = \frac{k}{\lambda^2}.$$

L'estimateur de  $\lambda$  par la méthode du maximum de vraisemblance est  $\hat{\lambda} = \frac{\hat{k}}{\bar{x}}$  où  $\hat{k}$  est solution de  $\ln(u) - \Psi(u) = \ln\left(\frac{\bar{x}}{\bar{x}^{\hat{k}}}\right)$  où  $\bar{x}$  est la moyenne arithmétique des coûts,  $\bar{x}^{\hat{k}}$  est la moyenne géométrique et  $\Psi(t) = \frac{\Gamma'(t)}{\Gamma(t)}$ .

### La loi log-normale

On appelle loi log-normale, notée  $LN(\mu, \sigma)$ , de paramètres  $\sigma \in R_+^*$  et  $\mu \in R$ , la loi de probabilité absolument continue dont la densité est donnée par :

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[\ln(x) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right).$$

Moments :

$$E[X] = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \text{ et } V[X] = (e^{\sigma^2} - 1)e^{(2\mu + \sigma^2)}.$$

Les estimateurs de  $\mu$  et  $\sigma$  par la méthode du maximum de vraisemblance sont donnés par la moyenne empirique et la variance empirique du logarithme des coûts. Ces estimateurs sont biaisés mais asymptotiquement sans biais.

### La loi de Pareto

On appelle loi de Pareto, notée  $P(k, \lambda)$ , de paramètres  $k \in R_+^*$  et  $\lambda \in R_+^*$ , la loi de probabilité dont la densité est donnée par :

$$f(x) = \frac{k\lambda^k}{x^{k+1}}.$$

L'estimateur du maximum de vraisemblance vérifie les équations :

$$\begin{cases} \text{moyenne}\left(\frac{1}{1+\frac{x}{\hat{m}}}\right) * (1 + \text{moyenne}(\ln(1 + \frac{x}{\hat{m}}))) = 1 \\ \hat{\alpha} = (1 + \text{moyenne}(\ln(1 + \frac{x}{\hat{m}})))^{-1} \end{cases}$$

#### b. Résultats

##### La loi exponentielle

Le paramètre  $\lambda$  de la loi exponentielle estimé est :  $2,0025e^{-08}$ . On obtient alors le graphique suivant :

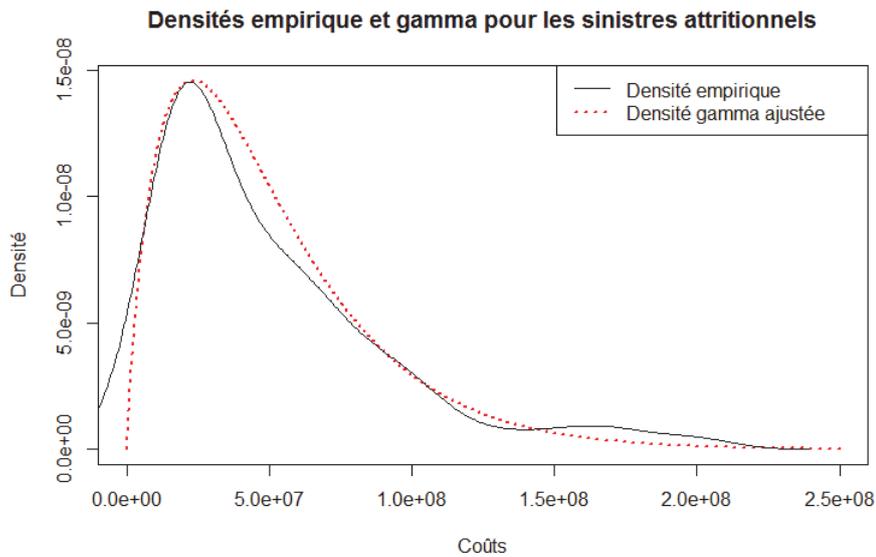


FIGURE 2.25 – Loi exponentielle ajustée pour l'attritionnel

### La loi gamma

Les paramètres  $k$  et  $\lambda$  de la loi gamma estimés sont :  $k = 1,8653$  et  $\lambda = 0,0374$ . On obtient alors le graphique suivant :

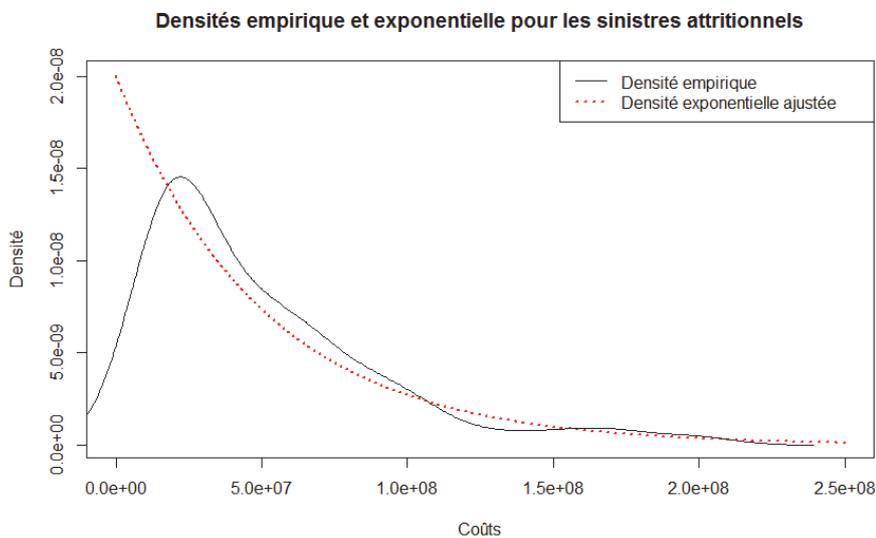


FIGURE 2.26 – Loi gamma ajustée pour l'attritionnel

### La loi log-normale

Les paramètres  $\sigma$  et  $\mu$  de la loi log-normale estimés sont :  $\sigma = 0,7551$  et  $\mu = 17,4349$ . On obtient alors le graphique suivant :

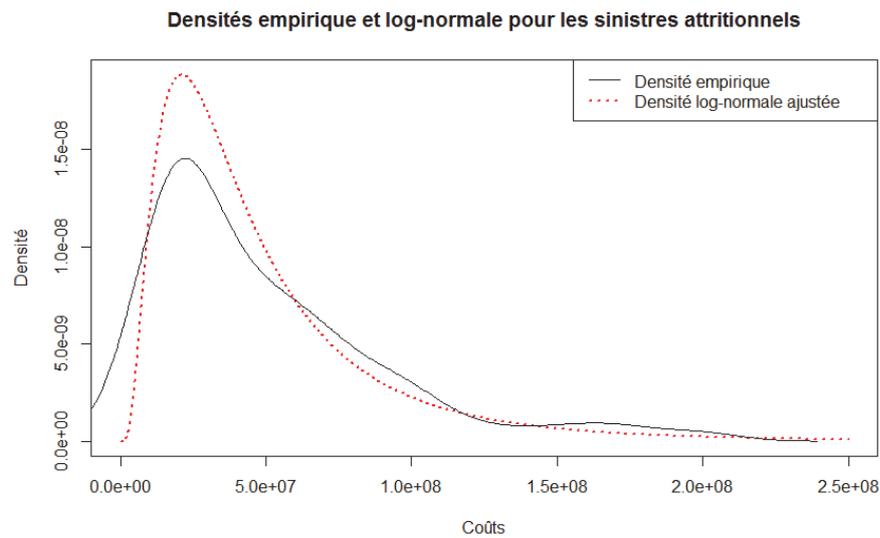


FIGURE 2.27 – Loi log normale ajustée pour l'attritionnel

### La loi de Pareto

Les paramètres  $k$  et  $\lambda$  de la loi de Pareto estimés sont :  $k = 0,8449$  et  $\lambda = 11\,426\,103$ . On obtient alors le graphique suivant :

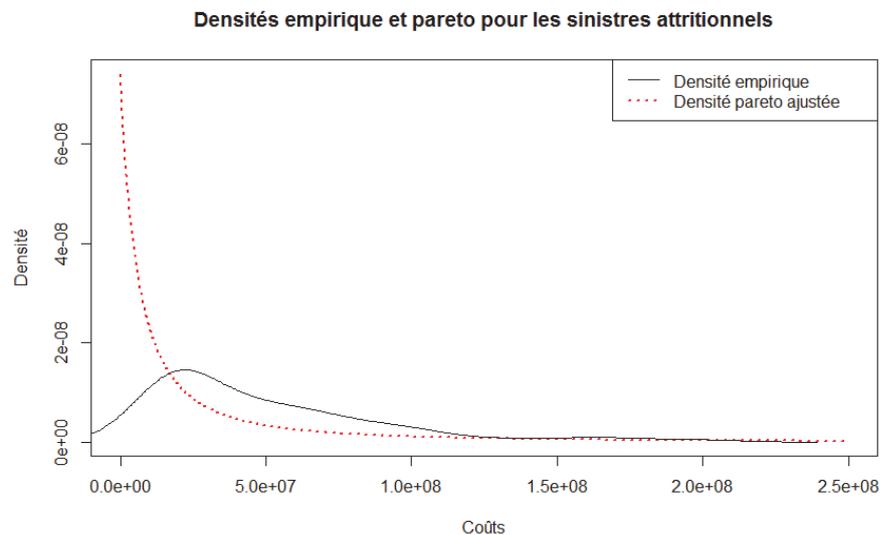


FIGURE 2.28 – Loi pareto ajustée pour l'attritionnel

### c. Choix du modèle pour la sévérité attritionnelle

Tout comme pour l'étude de la fréquence, le problème est de déterminer si ces observations peuvent être considérées comme des réalisations de variables aléatoires  $X_1, \dots, X_n$  indépendantes et de même loi donnée (exponentielle, gamma, log-normale, etc...). Pour cela, nous allons à nouveau utiliser la méthode graphique du QQ plot puis nous allons effectuer des tests statistiques appelés tests d'adéquation ou tests d'ajustement : le test du  $\chi^2$  déjà utilisé dans l'étude de la fréquence et le test de Kolmogorov-Smirnov.

## QQ plot

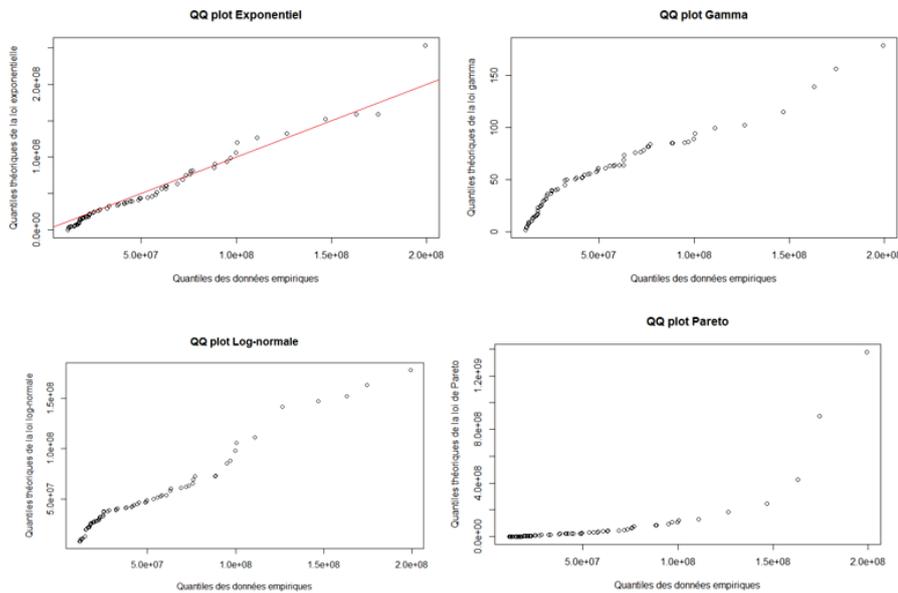


FIGURE 2.29 – QQ plots des lois ajustées

Les QQ plots nous permettent déjà de rejeter la loi de Pareto. Pour les quatre autres lois, les tests d'adéquation sont nécessaires pour pouvoir choisir la loi de sévérité attritionnelle.

## Les tests d'adéquation : les tests du $\chi^2$ et de Kolmogorov-Smirnov

### Le test du $\chi^2$

Quand les variables aléatoires observées sont continues, ce qui sera notre cas étant données les lois étudiées, il faut regrouper les observations en classes, comme pour un histogramme. On partitionne le support de la loi à tester en  $k$  intervalles  $]a_{j-1}; a_j]$  et on compte les nombres d'observations appartenant à chaque classe :  $n_j = \sum_{i=1}^n I_{]a_{j-1}; a_j]}(x_i)$ . Sous  $H_0$  : " $F = F_0$ ", la probabilité qu'une observation appartienne à la classe  $j$  est  $p_j = P(a_{j-1} < X \leq a_j) = F_0(a_j) - F_0(a_{j-1})$ . On se retrouve alors bien dans le cadre du théorème de Pearson et on peut appliquer le test du  $\chi^2$ .

### Le test de Kolmogorov-Smirnov

Le test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov est un test non paramétrique qui permet de tester l'hypothèse  $H_0$  selon laquelle les données observées sont engendrées par une loi de probabilité théorique considérée comme étant un modèle convenable.

Dans ce test, les calculs sur les lois de probabilité se font sur les fonctions de répartition : on mesure l'écart entre la fonction de répartition théorique et la fonction de répartition observée.

On considère ainsi une variable aléatoire  $X$  de fonction de répartition  $F$ , que l'on veut comparer à une fonction de répartition théorique  $F_0$  continue.

On souhaite donc toujours tester :

$$H_0 : "F = F_0" \text{ contre } H_1 : "F \neq F_0".$$

Si  $(X_1, \dots, X_n)$  est un n-échantillon de  $X$ , la fonction de répartition empirique associée à cet échantillon est :

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I_{]-\infty, x]}(X_k).$$

$F_n(x)$  est la proportion des observations dont la valeur est inférieure ou égale à  $x$ .

L'écart entre les valeurs observées et les valeurs théoriques du modèle déduites de la fonction de répartition  $F_0$  peut donc être mesuré par la variable aléatoire :

$$\Delta_n = \text{Sup}_{x \in \mathbb{R}} |F_n(x) - F_0(x)|.$$

qui sera la variable de décision, ou fonction discriminante, du test.

En posant  $U_n = \sqrt{n}\Delta_n$ , on démontre que lorsque  $H_0$  n'est pas vraie,  $U_n$  tend vers  $+\infty$ , et, lorsque  $H_0$  est vraie,  $U_n$  suit asymptotiquement une loi sur  $\mathbb{R}^+$  définie par sa fonction de répartition  $K(y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{-2n^2y^2}$ .

La région critique du test est donc constituée des grandes valeurs de  $\Delta_n$ .

Le niveau  $\alpha$  étant donné, on peut définir la valeur critique de deux façons :

- la loi de  $\Delta_n$  étant tabulée, le fractile  $c_n(1 - \alpha)$  d'ordre  $1 - \alpha$  de cette loi, fournit un test exact de niveau  $\alpha$  en rejetant l'hypothèse  $H_0$  si la valeur observée  $\delta_n$  de  $\Delta_n$  dépasse  $c_n(1 - \alpha)$ , et en l'acceptant dans le cas contraire ;
- la loi limite étant tabulée, le fractile  $c(1 - \alpha)$  d'ordre  $1 - \alpha$  de cette loi, fournit un test asymptotique de niveau  $\alpha$  en rejetant l'hypothèse  $H_0$  si la valeur observée  $\delta_n$  de  $\Delta_n$  dépasse  $c(1 - \alpha)$ , et en l'acceptant dans le cas contraire.

#### d. Résultats

Les résultats des tests du  $\chi^2$  sont les suivants :

	Loi Exponentielle	Loi Gamma	Loi Log Normale	Loi Pareto
Statistique du $\chi^2$	<b>9,1416</b>	<b>14,3275</b>	<b>12,9332</b>	<b>62,4797</b>
p-value	<b>4,36%</b>	<b>29,25%</b>	<b>20,45%</b>	<b>100,00%</b>

FIGURE 2.30 – Résultats des tests du  $\chi^2$  sur l'attritionnel

Les résultats des tests de Kolmogorov-Smirnov sont les suivants :

	Loi Exponentielle	Loi Gamma	Loi Log Normale	Loi Pareto
Statistique de KS	<b>0,2045</b>	<b>0,1444</b>	<b>0,124</b>	<b>0,4433</b>
p-value	<b>0,44%</b>	<b>9,34%</b>	<b>20,69%</b>	<b>0,00%</b>

FIGURE 2.31 – Résultats des tests de Kolmogorov-Smirnov sur l'attritionnel

Le test du  $\chi^2$  nous orienterait vers le choix de la loi Exponentielle. Le test de Kolmogorov-Smirnov donne aussi de bons résultats pour la loi Gamma bien que ceux-ci restent moins bons que ceux de la loi Exponentielle.

On retient donc la loi Exponentielle pour modéliser les coûts des événements attritionnels.

### e. Incertitude des paramètres de la sévérité

#### La limite asymptotique du maximum de vraisemblance

Pour une variable  $X \sim \text{Exp}(\lambda)$  :

$$\ln(f(\frac{x}{\lambda})) = \ln(\lambda) - \lambda x.$$

$$\frac{\delta^2}{\delta \lambda^2} \ln(f(\frac{x}{\lambda})) = -\frac{1}{\lambda^2}.$$

Donc, l'information de Fisher pour une loi Exponentielle est :  $I(\hat{\lambda}) = \frac{1}{\lambda^2}$

Et son inverse :  $I(\hat{\lambda})^{-1} = \lambda^2$

Donc :

$$\hat{\lambda} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} N(\hat{\lambda}, \frac{\lambda^2}{\sqrt{n}}).$$

Cependant, l'échantillon n'est pas suffisamment grand pour considérer que l'approximation de la distribution des estimateurs des paramètres par une loi Normale multivariée est adéquate. L'utilisation de la méthode de bootstrap pour l'estimation de l'incertitude des paramètres est alors plus appropriée.

#### Le bootstrap paramétrique

Tout comme pour la loi de fréquence, l'algorithme consiste dans un premier temps à estimer, par le maximum de vraisemblance, les  $p$  paramètres de la loi de fréquence ajustée  $P_{\Theta}$ , sur l'échantillon d'origine  $\underline{k}$ , ce qui permet d'obtenir  $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_p)$ . Le meilleur estimateur de la loi de la population  $P_{\Theta}$  dont est issu l'échantillon  $\underline{k}$  de nombre étudié est  $\widehat{P}_{\Theta} = P_{\hat{\Theta}}$ . Ce qui a été fait précédemment et nous avons obtenu  $\hat{\theta} = \hat{\lambda} = (2,0025e^{-08})$ .

A lieu ensuite un tirage aléatoire dans  $P_{\hat{\Theta}}$  d'un nombre  $B$  suffisamment grand d'échantillons de même taille  $n$  que l'échantillon d'origine. Pour chaque échantillon  $j = 1, \dots, B$  simulé  $\underline{k}_j$ , le maximum de la fonction de vraisemblance  $L(\frac{\Theta}{\underline{k}_j})$  est calculé pour en déduire les réalisations des estimateurs des paramètres  $\hat{\theta}_j = (\hat{\theta}_{j,1}, \dots, \hat{\theta}_{j,p})$ . Un échantillon de taille  $B$  d'estimateurs de paramètres  $\{\hat{\theta}_j\}_{j=1, \dots, B}$  est ainsi obtenu par le bootstrap.

La distribution empirique des estimateurs de  $\lambda$  qui en découle sert à l'estimation de l'incertitude du paramètre. Lorsque l'échantillon est de taille  $n$  très grande, la distribution empirique de  $\Theta$  obtenue par le bootstrap doit correspondre à la loi Normale multivariée prévue par la théorie classique.

Dans le cas de la loi Exponentielle,  $B = 100000$  échantillons bootstrap de taille  $n = 71$  sont générés avec  $P_{\hat{\lambda}=2,0025e^{-08}}$ . Pour chaque échantillon généré, les estimateurs du paramètre  $\hat{\lambda}$  sont recalculés de sorte qu'un échantillon de  $B$  réalisations du paramètre, noté  $\{\hat{\lambda}_j^{Boot}\}$ , est obtenu.

Les tableaux suivants montrent l'analyse de l'estimateur de la moyenne du coût annuel des sinistres dans le cas du choix de la loi Exponentielle. On a le coût à gauche et le paramètre  $\lambda$  à droite :

	Echantillon bootstrap		Echantillon bootstrap
Espérance	49 939 000	Espérance	2,0310E-08
Ecart type	5 925 600	Ecart type	2,4436E-09
Coeff de variation	11,87%	Coeff de variation	12,03%

FIGURE 2.32 – Analyse de l'estimateur de la moyenne des coûts sinistres attritionnels

Le coefficient de variation (égal à l'espérance sur l'écart type) du paramètre  $\lambda$  de la loi Exponentielle est de 12,03%, ce qui fait état d'une incertitude non négligeable sur l'estimation du montant de la charge sinistre annuelle.

Probabilité cumulée	Valeur de $\lambda$	Espérance associée
0%	1,2240E-08	8,1699E+07
5%	1,6644E-08	6,0082E+07
10%	1,7335E-08	5,7687E+07
15%	1,7822E-08	5,6110E+07
20%	1,8235E-08	5,4840E+07
25%	1,8593E-08	5,3784E+07
30%	1,8912E-08	5,2876E+07
35%	1,9232E-08	5,1997E+07
40%	1,9526E-08	5,1214E+07
45%	1,9835E-08	5,0416E+07
50%	2,0131E-08	4,9675E+07
55%	2,0428E-08	4,8952E+07
60%	2,0745E-08	4,8204E+07
65%	2,1070E-08	4,7461E+07
70%	2,1425E-08	4,6674E+07
75%	2,1817E-08	4,5836E+07
80%	2,2272E-08	4,4899E+07
85%	2,2803E-08	4,3854E+07
90%	2,3512E-08	4,2531E+07
95%	2,4623E-08	4,0612E+07
100%	3,3720E-08	2,9656E+07

FIGURE 2.33 – Distribution de l'estimateur de la moyenne des coûts des sinistres attritionnels

Ce tableau illustre bien la grande variation du coût d'un événement déjà mis en avant par le coefficient de variation. Le quantile à 95% de l'estimateur de  $\lambda$  correspond à la valeur que nous choisirions si nous n'acceptons que 5% de probabilité de sous-estimer le montant du coût d'un sinistre. Il est égal à  $2,4623e^{-08}$ . En d'autres termes, la prise en compte de l'incertitude du paramètre de la loi de Exponentielle pourrait mener à prendre une sécurité de  $4,3130e^{-09}$  par rapport à la moyenne de  $2,0310e^{-08}$ , soit une sécurité de 9,3266 M€. Cela montre bien le caractère non négligeable de l'incertitude du paramètre de la loi Exponentielle. L'impact sur les résultats de prime pure des tranches à coter serait significatif.

### 2.2.3.4 Modélisation des sinistres extrêmes

#### a. La loi de Pareto généralisée

Depuis 1990, on a 15 événements dépassant le seuil  $u = 203\,932\,405\text{€}$ . Avec une médiane à  $365\,386\,471\text{€}$  et une moyenne à  $484\,399\,489\text{€}$ , on peut noter que l'échantillon est fortement influencé par des valeurs élevées on peut ainsi noter que le maximum est de  $1\,009\,338\,048\text{€}$ .

Comme présenté dans la partie 3.1., pour étudier les sinistres extrêmes, on s'intéressera à la loi des excès au-delà du seuil  $u$  comme l'ensemble des variables aléatoires  $Y_j$  définies par :  $Y_j = X_j - u$ . On cherche ainsi à estimer la distribution conditionnelle des excès  $F_u$  par une loi Pareto généralisée.

On s'intéresse ici à la distribution des excès au-delà d'un certain seuil  $u$ .

$$F_u(y) = E(X - u \leq y | X > u).$$

Pour les distributions vérifiant le théorème des valeurs extrêmes et pour un seuil  $u$  suffisamment grand, il existe  $\zeta$  et  $\beta$  tels que  $F_u$  converge vers la distribution de Pareto Généralisée. Sa fonction de répartition est donnée par :

$$G_{\zeta, \beta}(y) = \begin{cases} 1 - (1 + y \frac{\zeta}{\beta})^{-\frac{1}{\zeta}} & \text{si } \zeta \neq 0 \\ 1 - \exp(-\frac{y}{\beta}) & \text{sinon} \end{cases}$$

Son ensemble de définition est  $R^+$  si  $\zeta \geq 0$  ou  $[0, \frac{-\beta}{\zeta}[$  si  $\zeta < 0$ .

Elle dépend de deux paramètres :

- $\beta > 0$  est un paramètre d'échelle
- $\zeta \in R$  est un paramètre de forme

On a deux cas particuliers : si  $\zeta = 0$ , c'est une loi exponentielle d'espérance  $\beta$  et si  $\zeta = -1$ , c'est une loi uniforme sur  $[0, \beta]$ .

On peut directement estimer la VaR : Si  $n$  est le nombre total de l'échantillon et  $N_u$  le nombre de valeurs dépassant  $u$ , alors un estimateur de  $F_u(y)$  est :

$$F_u(y) = 1 - \frac{N_u}{n} (1 + \zeta \frac{y - u}{\beta}).$$

$$VaR_q = u + \frac{\beta}{\zeta} \left( \left( \frac{n}{N_u} (1 - q) \right)^{-\zeta} - 1 \right).$$

On peut également estimer l'Expected Shortfall, c'est à dire estimer la perte moyenne en cas de dépassement de la VaR :

$$ES_q = E[X | X > VaR_q] = VaR_q + [X - VaR_q | X > VaR_q].$$

$$\frac{ES_q}{VaR_q} = \frac{1}{1 - \zeta} + \frac{-\zeta u}{(1 - \zeta) VaR_q}.$$

#### b. Résultats

### Paramètres

Les paramètres  $\beta$  et  $\zeta$  de la loi de Pareto généralisée estimés sont :  $\beta = 380\,894\,630$  et  $\zeta = -0,3296$  et de matrice de covariance :

$$\begin{pmatrix} 0,0197 & 0,1376 \\ 0,1376 & 7,0369e^{+07} \end{pmatrix}$$

On remarque tout d'abord que le paramètre de forme de la loi de Pareto généralisée ajustée est négatif, ce qui signifie que le coût est borné. En effet, lors de la survenance d'un événement - même extrême - le nombre d'habitations dans la zone d'aléa est fini, ce qui implique donc que la destruction maximale est limitée à la destruction de toutes les habitations de la zone. Le coût, pour chaque événement, est donc borné.

Le graphique des densités empiriques et de la GPD ajustée est le suivant :

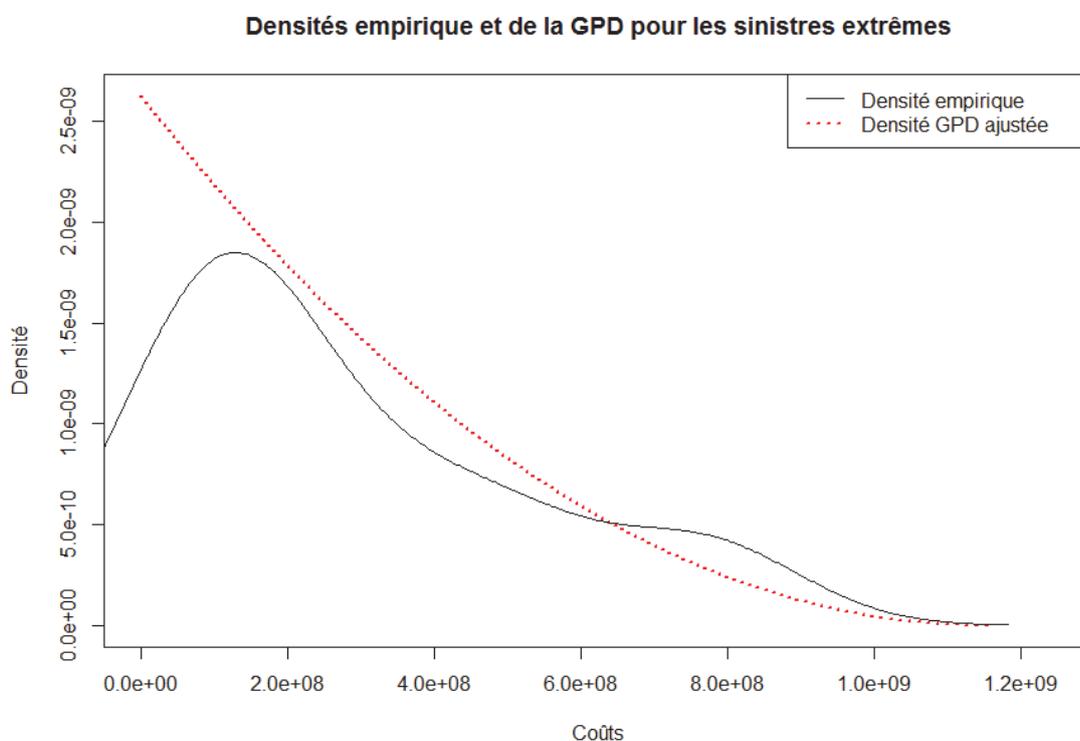


FIGURE 2.34 – Loi Pareto généralisée ajustée pour les sinistres extrêmes

## QQ plot

Le QQ plot associé à la loi de Pareto généralisée estimée est :

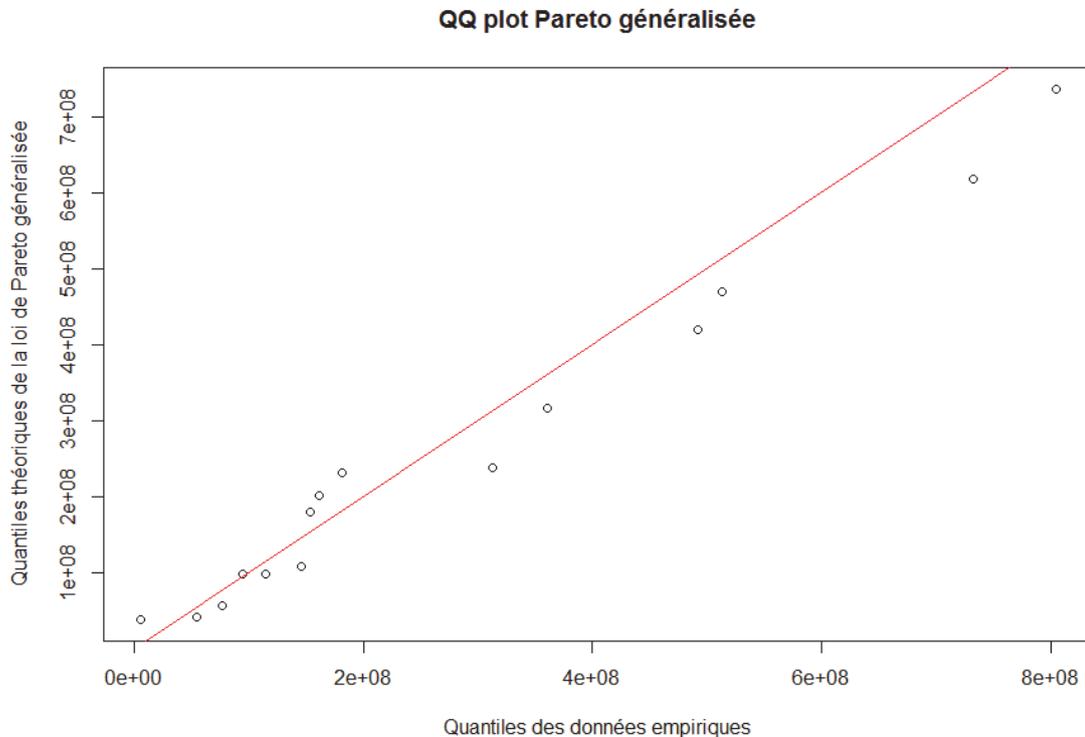


FIGURE 2.35 – QQ plot de la loi de Pareto généralisée ajustée

Le QQ plot nous montre que la loi de Pareto généralisée semble être bien adaptée pour modéliser les sinistres extrêmes.

### 2.2.3.5 Blending des lois des sinistres attritionnels et des sinistres extrêmes

La modélisation des dommages marché particuliers se fait donc en deux étapes : d'une part on a déterminé la loi du coût des événements attritionnels et d'autre part celle du coût des événements exceptionnels.

Ainsi donc, les sinistres de montants inférieurs au seuil critique  $u$  sont modélisés séparément des sinistres dépassant le seuil. Concrètement, la fonction de répartition des coûts  $F$  est donc égale à :

$$\begin{cases} F_{\text{SinistresOrdinaires}}(t) & \text{si } t \leq u \\ F_{\text{SinistresOrdinaires}}(u) * F_{\text{SinistresGraves}}(t - u) & \text{si } t > u \end{cases}$$

Avec :

- $u = 203\,932\,405$  €
- $F_{\text{SinistresOrdinaires}}$  la fonction de répartition de la loi exponentielle de paramètre  $\lambda = 2,0025e^{-08}$
- $F_{\text{SinistresGraves}}$  la fonction de répartition de la loi de Pareto généralisée de paramètres  $\beta = 380\,894\,630$  et  $\zeta = -0,3296$

Lors de la génération du coût d'un événement  $X_i$ , il faut également pouvoir déterminer si celui-ci suit la loi des sinistres attritionnels ou celle des sinistres extrêmes. Pour cela, nous utiliserons une loi binomiale.

On pose  $T \sim B(n, p)$  la variable du nombre de sinistres attritionnels. Le nombre d'épreuves de Bernoulli sera donc le résultat de la loi de fréquence  $N$ . On calcule la probabilité de succès grâce à notre échantillon. Sur les 86 événements de l'échantillon, 71 sont sous le seuil de sinistralité extrême. Ainsi on a :  $p = 0,8256$ . On a donc :

$$T \sim B(N, 0,8256).$$

### 2.2.3.6 Modélisation des sinistres Auto à partir des coûts sinistres Non Auto

Cette démarche nous a donc permis de modéliser d'une part la fréquence annuelle des inondations et d'autre part le coût marché Non Auto de ces événements, ce qui nous permet de modéliser la charge annuelle inondations pour les dommages aux particuliers  $S^{NA}$  :

$$S^{NA} = \sum_{i=1}^N X_i.$$

#### a. Adaptation des résultats aux coûts des dommages auto

Ainsi, il nous faut maintenant nous ramener aux coûts Auto grâce aux données dont l'on dispose et en tenant compte du type d'inondation (éclair, lente, autre). En effet, pour quelques événements et pour quelques cédantes, on dispose d'informations sur les dommages Auto et Non Auto, ce qui nous permettra d'étudier cette relation :

	Var 2010	Xynthia 2010	Sud Ouest 2013	Sud 2011	Rhône 2003	Aude 1999
Type de crue	éclair	submersion marine	éclair	lente	lente	éclair
Coût Non Auto	182 186 423,52	483 903 801,01	49 837 284,54	85 500 796,15	596 617 097,00	25 278 489,28
Coût Auto	65 961 690,44	60 961 753,08	2 533 886,30	17 914 134,16	30 382 315,37	5 021 928,88
Ratio coût Auto / coût Non Auto	36,21%	15,09%	5,08%	20,95%	5,09%	19,87%

FIGURE 2.36 – Comparaison des coûts Auto et Non Auto

A partir de ces données, il est alors possible de calculer le ratio suivant :

$$r = \frac{\text{Montant des dommages Auto}}{\text{Montant des dommages Non Auto}}.$$

En effectuant une moyenne pour chaque type de crue, on obtient alors les résultats suivants :

- $r_{Crue\ clair} : 0,2039$
- $r_{Crue\ lente} : 0,1302$
- $r_{Autre} : 0,1509$

Bien que cette méthodologie implique une trop grande simplification, nous l'adoptons, faute de mieux. Au fil des années, ces informations pourront être affinées en demandant systématiquement des informations plus détaillées aux cédantes.

Tout comme dans le modèle physique, les 86 événements utilisés dans le cadre de cette modélisation ont été classifiés selon le type d'inondation dont il s'agit. On obtient ainsi

sur l'historique, la proportion que représente chaque type d'inondation. On obtient alors les probabilités relatives aux types de crues suivantes :

- $r_{Crue\ clair}$  : 0,7674
- $r_{Crue\ lente}$  : 0,1860
- $r_{Autre}$  : 0,0465

Cela nous permet ainsi de définir une variable aléatoire  $R$  prenant les modalités  $r_i$  avec les probabilités  $p_i$ ,  $i \in 1, 2, 3$ . La charge annuelle inondations pour les dommages Auto  $S^A$  est alors :

$$S^A = \sum_{i=1}^N X_i * R_i.$$

### b. Résultats du modèle Non Auto

Les résultats de l'étude de la sinistralité annuelle Non Auto du modèle fréquence x sévérité comparés aux résultats sur l'historique, sont les suivants :

SIMULE		HISTORIQUE	
	Caractéristiques		Caractéristiques
Moyenne	485 782 708	Moyenne	339 966 781
Ecart type	448 570 484	Ecart type	287 272 762
Coeff de variation	92,34%	Coeff de variation	84,50%
Médiane	372 190 000	Médiane	269 900 712
Min	0	Min	17 665 694
Max	2 217 600 000	Max	1 211 674 567

FIGURE 2.37 – Caractéristiques de la loi de la sinistralité annuelle Non Auto simulée et historique

SIMULE		HISTORIQUE	
Probabilité cumulée	Valeur associée au quantile	Probabilité cumulée	Valeur associée au quantile
0%	0	0%	17 665 694
5%	37 495 000	5%	87 009 049
10%	58 016 000	10%	116 396 239
15%	76 026 000	15%	127 016 658
20%	99 557 000	20%	136 199 651
25%	125 160 000	25%	148 078 543
30%	157 450 000	30%	152 787 221
35%	171 927 000	35%	161 583 313
40%	235 390 000	40%	186 355 326
45%	298 099 500	45%	215 047 047
50%	372 190 000	50%	269 900 712
55%	412 870 000	55%	278 253 538
60%	488 310 000	60%	293 212 288
65%	560 190 000	65%	320 432 866
70%	645 390 000	70%	359 943 787
75%	696 720 000	75%	424 981 222
80%	780 190 000	80%	528 324 085
85%	890 640 000	85%	611 498 497
90%	1 123 200 000	90%	717 577 711
95%	1 489 910 000	95%	823 298 443
100%	2 217 600 000	100%	1 211 674 567

FIGURE 2.38 – Quantiles de la charge Non Auto annuelle simulée et historique

On remarque alors que la moyenne de la sinistralité annuelle Non Auto est surestimée de 42,89% par rapport à la sinistralité historique.

### c. Simulation de la charge totale Auto

A présent que nous disposons de loi pour la fréquence et la sévérité des sinistres, nous pouvons également étudier le coût total  $S^A$ . Le problème qui se pose est qu'il n'existe pas de formules exactes pour exprimer la loi de  $S^A$ . L'une des approches possibles est donc de recourir à une méthode de type Monte Carlo qui consistera à générer aléatoirement 50 000 trajectoires de sinistres (c'est-à-dire 50 000 années fictives) pour estimer le comportement de la charge totale.

Après implémentation de cette méthode, on obtient les résultats suivants :

	Caractéristiques
Moyenne	<b>88 762 747</b>
Ecart type	<b>82 395 265</b>
Coeff de variation	<b>92,83%</b>
Médiane	<b>61 194 468</b>
Min	<b>0</b>
Max	<b>452 168 640</b>

FIGURE 2.39 – Caractéristiques de la loi de la sinistralité annuelle Auto

Probabilité cumulée	Valeur associée au quantile
0%	<b>0</b>
5%	<b>5 786 348</b>
10%	<b>10 854 617</b>
15%	<b>13 259 413</b>
20%	<b>19 541 164</b>
25%	<b>22 953 533</b>
30%	<b>29 895 818</b>
35%	<b>34 051 300</b>
40%	<b>40 941 081</b>
45%	<b>53 755 674</b>
50%	<b>61 194 468</b>
55%	<b>80 391 653</b>
60%	<b>91 154 322</b>
65%	<b>104 185 238</b>
70%	<b>122 036 460</b>
75%	<b>131 595 021</b>
80%	<b>152 014 790</b>
85%	<b>160 815 930</b>
90%	<b>214 910 600</b>
95%	<b>276 001 079</b>
100%	<b>452 168 640</b>

FIGURE 2.40 – Quantiles de la charge Auto annuelle

Pour étudier ces résultats, on peut à nouveau utiliser les données comptables de la sinistralité inondation Auto annuelle de 2000 à 2012 ayant les caractéristiques suivantes :

	Caractéristiques
Moyenne	<b>29 094 348</b>
Ecart type	<b>34 912 578</b>
Coeff de variation	<b>120,00%</b>
Médiane	<b>15 472 690</b>
Min	<b>2 396 266</b>
Max	<b>128 994 720</b>

FIGURE 2.41 – Informations sur les données comptables de sinistralité annuelle Auto

On remarque de nouveau que le modèle surestime largement les résultats réels - la moyenne étant surestimée de 205,09%.

Ainsi, on peut supposer que 79,09% de la surestimation du modèle provient de la variable aléatoire  $R$  et plus particulièrement des modalités  $r_i$  qui ont été définies sur trop peu d'informations car le passage de la sévérité Non Auto à la sévérité Auto passe par cette variable. Il paraît alors intéressant de « jouer » avec ces modalités pour se rapprocher des coûts historiques.

#### d. Résultats du modèle Auto ajusté

Ainsi, en utilisant les modalités réduites de 67%, soient :

- $r_{Crue\ clair}$  : 0,0673
- $r_{Crue\ lente}$  : 0,0430
- $r_{Autre}$  : 0,0498

On obtient alors un modèle ne surestimant les coûts historiques que de 3,94% :

<b>SIMULE</b>		<b>HISTORIQUE</b>	
	<b>Caractéristiques</b>		<b>Caractéristiques</b>
Moyenne	<b>30 241 901</b>	Moyenne	<b>29 094 348</b>
Ecart type	<b>29 476 377</b>	Ecart type	<b>34 912 578</b>
Coeff de variation	<b>97,47%</b>	Coeff de variation	<b>120,00%</b>
Médiane	<b>23 684 889</b>	Médiane	<b>15 472 690</b>
Min	<b>0</b>	Min	<b>2 396 266</b>
Max	<b>133 994 300</b>	Max	<b>128 994 720</b>

FIGURE 2.42 – Caractéristiques de la loi de la sinistralité annuelle Auto simulée modifiée et historique

<b>SIMULE</b>		<b>HISTORIQUE</b>	
<b>Probabilité cumulée</b>	<b>Valeur associée au quantile</b>	<b>Probabilité cumulée</b>	<b>Valeur associée au quantile</b>
0%	<b>0</b>	0%	<b>2 396 266</b>
5%	<b>2 109 494</b>	5%	<b>4 198 678</b>
10%	<b>3 097 146</b>	10%	<b>5 673 152</b>
15%	<b>4 675 820</b>	15%	<b>6 491 752</b>
20%	<b>5 743 449</b>	20%	<b>7 872 674</b>
25%	<b>7 302 045</b>	25%	<b>9 534 757</b>
30%	<b>8 755 730</b>	30%	<b>11 689 630</b>
35%	<b>10 977 303</b>	35%	<b>13 218 546</b>
40%	<b>13 460 673</b>	40%	<b>13 495 551</b>
45%	<b>17 069 972</b>	45%	<b>14 341 807</b>
50%	<b>23 684 889</b>	50%	<b>15 472 690</b>
55%	<b>26 534 371</b>	55%	<b>18 201 531</b>
60%	<b>29 876 400</b>	60%	<b>20 230 561</b>
65%	<b>33 605 898</b>	65%	<b>20 859 970</b>
70%	<b>37 910 359</b>	70%	<b>23 450 322</b>
75%	<b>43 842 585</b>	75%	<b>27 021 147</b>
80%	<b>49 400 219</b>	80%	<b>42 123 547</b>
85%	<b>55 175 232</b>	85%	<b>54 282 569</b>
90%	<b>71 711 515</b>	90%	<b>60 554 839</b>
95%	<b>95 458 320</b>	95%	<b>89 185 245</b>
100%	<b>133 994 300</b>	100%	<b>128 994 720</b>

FIGURE 2.43 – Quantiles de la charge Non Auto annuelle simulée modifiée et historique

### 2.2.3.7 Avantages et limites de l'approche fréquence x sévérité

La modélisation fréquence x sévérité, en séparant l'étude de ces deux variables, présente l'avantage de représenter clairement la réalité des risques analysés, ici, la sinistralité Auto des inondations. L'utilisation de la théorie des valeurs extrêmes et plus particulièrement de la méthode à dépassement de seuil, permet d'avoir une bonne compréhension du comportement de la sévérité en effectuant une nouvelle séparation dans l'analyse entre les événements attritionnels et extrêmes.

Comme tout modèle, l'approche fréquence x sévérité présente certaines limites.

L'hypothèse d'indépendance entre le nombre de sinistres et leurs montants sur laquelle se base le modèle afin de pouvoir séparer l'étude de la fréquence de celle de la sévérité n'est pas toujours vérifiée dans la réalité.

Par ailleurs, le manque de masse statistique empêche de produire des distributions de fréquence et de sévérité crédibles. Un modèle construit avec peu de données comme celui développé ici peut devenir très sensible à l'incertitude autour du choix des distributions et des estimations des paramètres.

Enfin, l'incertitude du modèle est de plus accentuée par la définition d'un ratio permettant de passer d'un coût Non Auto à un coût Auto basé sur très peu de données.

Nous allons maintenant développer une modélisation physique sur l'exposition. Cette modélisation permettra d'estimer le montant du coût Auto pour un événement inondation spécifié. Combinée au générateur d'événements fictifs de CCR, on obtiendra une modélisation probabiliste de la charge sinistres annuelle Auto Inondations.

## 2.3 MODÉLISATION PHYSIQUE SUR L'EXPOSITION

### 2.3.1 Présentation

#### 2.3.1.1 Objectifs

Comme vu précédemment, les approches statistiques présentent plusieurs limites.

L'objectif de cette modélisation est de proposer un modèle propre au péril Inondation, décorrélé du risque Non Auto et de s'affranchir du problème du court historique et du peu d'informations disponibles sur l'Auto. De plus, cette démarche présente l'avantage de pouvoir étudier les dommages Auto à l'échelle d'un événement, voire d'une cédante. Enfin, cette méthodologie entre dans la logique de la modélisation actuelle de ce péril.

Pour ce faire, il s'agit d'intégrer une « brique » Automobile aux modules de vulnérabilité et de dommages du modèle Inondation de CCR.

#### 2.3.1.2 Module de vulnérabilité

De nombreux facteurs ont un impact sur les automobiles lors d'une inondation : la hauteur d'eau, le débit, la pente du terrain, le type de sol, la durée de la crue, le transport de matériaux solides par les eaux d'inondation ou encore les coulées de boue. Une bonne représentation des caractéristiques physiques d'un événement et de la zone d'aléa permet ensuite une modélisation fiable de l'exposition des véhicules. Le module d'aléa développé par CCR permet une représentation de la hauteur d'eau et du débit sur la zone touchée par l'inondation, ce sont donc les impacts de ces facteurs sur les automobiles qui seront étudiés.

Ensuite, le module de vulnérabilité recense et localise les véhicules situés dans la zone d'aléa et leurs caractéristiques et enfin, le module de dommages calcule l'impact des caractéristiques de l'inondation données par le module d'aléa sur les automobiles exposées grâce à une courbe d'endommagement. Ainsi, en fonction de ses caractéristiques, un véhicule ne sera pas impacté de la même façon par la hauteur d'eau et le débit.

Il a donc fallu définir une classification des voitures par type. La classification retenue est la classification INSEE suivante : berline, break, cabriolet, coupé, minibus, monospace ou tout-terrain. Pour chaque catégorie de voiture, un modèle représentatif du parc automobile français a été retenu sur la base des meilleures ventes de l'année 2013 et les caractéristiques qui devront être connues pour procéder à l'étude ont été collectées. Le calcul de la valeur actuelle de l'automobile a été réalisé à partir de sa valeur d'achat, de l'âge moyen du parc automobile français et d'une formule simplifiée de l'Argus.

Ainsi, une méthode de dépréciation simplifiée et généralement acceptée est la suivante :

1ère année	2ème année	3ème année	4ème année	ensuite
<b>25%</b>	<b>15%</b>	<b>10%</b>	<b>8%</b>	<b>6%</b>

FIGURE 2.44 – méthode de dépréciation

L'âge moyen du parc automobile français étant de 8,3 ans, on obtient donc la formule de calcul de la valeur actuelle des automobiles étudiées suivante :

$$Valeur_{actuelle} = Valeur_{achat} * (1 - 25\%) * (1 - 15\%) * (1 - 10\%) * (1 - 8\%) * (1 - 6\%)^{4,3}$$

Soit :

$$Valeur_{actuelle} = Valeur_{achat} * 0,4045$$

Dans un troisième temps, il a fallu définir une méthodologie pour définir le nombre et la localisation des véhicules au moment de l'inondation. Tout d'abord, les données de l'INSEE sur le parc automobile français ont été utilisées pour connaître le nombre de voitures par foyer, par département, ainsi que leur répartition selon la classification retenue.

Pour le portefeuille marché, CCR disposant de données habitations géolocalisées à la commune, les automobiles ont été géolocalisées de la même façon et en tenant compte du département pour le nombre et le type de véhicule.

### 2.3.1.3 Principes généraux du module de dommages Auto

Comme expliqué précédemment, il s'agit de développer une modélisation physique des dommages Auto lors d'une inondation à travers plusieurs étapes.

Tout d'abord, en fonction du type d'inondation, c'est-à-dire si la crue est lente ou éclair, la probabilité de présence d'un véhicule à l'adresse de l'habitation varie : les habitants ont-ils été avertis de la crue ? Ont-ils eu le temps de déplacer leurs véhicules ? (USACE, 2009). Une fois cette probabilité définie, on pourra assigner un nombre de véhicules et leur type (berline, break...) pour chaque foyer de la zone d'aléa.

Puis, en fonction de la hauteur d'eau et du débit à la localisation de l'habitation, les dommages dus à l'eau pourront être causés par plusieurs phénomènes :

- le véhicule peut se mettre à flotter ;
- il peut être emporté par le courant ;
- s'il ne subit aucun des deux premiers phénomènes, alors les dommages causés au véhicule sont dus aux dommages directs de l'eau sur le véhicule.

La méthodologie adoptée est résumée dans la figure suivante.

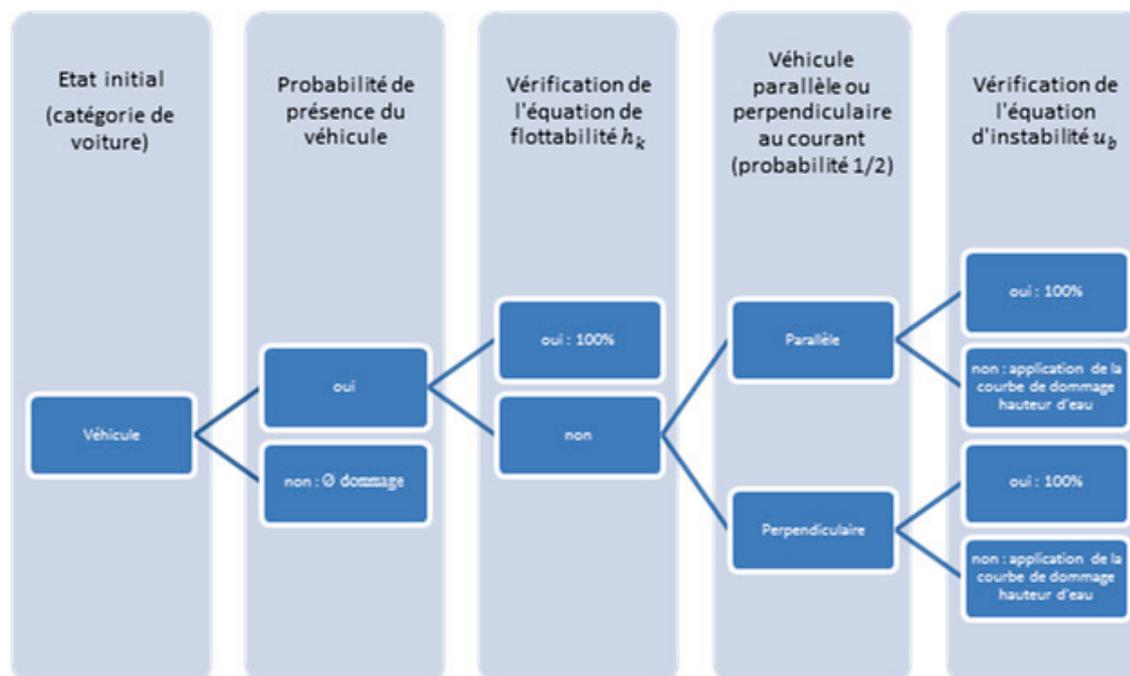


FIGURE 2.45 – Méthodologie de la modélisation des dommages Auto via le modèle physique sur exposition

Ainsi, pour chaque habitation, un montant de dommage automobile moyen est calculé. Par sommation des dommages auto subis par tous les foyers situés dans la zone inondée, on obtient les dommages auto totaux de l'événement.

### 2.3.2 Probabilité de présence du véhicule

A l'inverse des habitations, les automobiles peuvent être déplacées par leur propriétaire en cas de risque d'inondation. Lors de la modélisation des dommages Auto, il faut donc prendre en compte la probabilité que les propriétaires n'aient pas déplacé leur véhicule.

Les paramètres qui seraient idéalement à prendre en compte, sont les suivants :

- le type d'inondation qui décrit le temps de montée de la crue et est lié à la taille du bassin versant concerné, à savoir :
  - crue-éclair : événement court qui se produit sur un petit bassin versant, souvent assez pentu. Le torrent, le ruisseau, ou la rivière sort subitement de son lit à la suite de pluies torrentielles, généralement de durée assez limitée, souvent des orages. Ce phénomène est fréquent dans les régions montagneuses où le ruissellement des pentes vers les vallées est très rapide ;
  - crue lente : a un temps de montée long et se produit sur un grand bassin versant en plaine sur les fleuves et les grandes rivières. Les pluies continues sur de larges zones vont ruisseler vers les cours d'eau. Dans ces cas, même si la pente est faible, la quantité importante de pluie peut les faire déborder ;
  - autre : remontées de nappes, submersion marine, tempête.
- l'heure de survenance de la crue. En effet, si la crue a lieu en pleine nuit, la probabilité que les propriétaires n'aient pas déplacé leur véhicule est plus forte que si elle a lieu en pleine journée ;
- la présence d'alertes et de mesures de sauvegarde.

Aujourd'hui, on ne dispose que de très peu d'informations pour déterminer une probabilité de présence justifiable. Néanmoins, pour quelques événements inondations et pour quelques cédantes, nous disposons d'informations sur le nombre de sinistres Auto et Non Auto (cf tableau ci-dessous).

	Var 2010	Xynthia 2010	Sud Ouest 2013	Sud 2011	Rhône 2003	Gard 2002	Aude 1999
Type de crue	éclair	submersion marine	éclair	lente	lente	éclair	éclair
Nombre de risques Non Auto	335 062	2 897 696	269 005	2 122 207	3 211 322	404 307	331 281
Nombre de sinistres Non Auto	19 500	12 807	3 640	14 298	40 723	581	2 188
Nombre de risques Auto	437 005	3 393 773	329 125	2 639 780	3 825 516	502 674	386 385
Nombre de sinistres Auto	15 400	10 556	855	2 901	5 949	263	1 070
Ratio Auto Sinistres/Risques	3,52%	0,31%	0,26%	0,11%	0,16%	0,05%	0,28%
Ratio Non Auto Sinistres/Risques	5,82%	0,44%	1,35%	0,67%	1,27%	0,14%	0,66%
Ratio Auto / Ratio Non Auto	60,55%	70,37%	19,20%	16,31%	12,26%	36,41%	41,93%

FIGURE 2.46 – Ratios de sinistralité

Dans ce tableau, le nombre de risques Non Auto et Auto correspond au nombre d'habitations et de véhicules sur la zone d'aléa et le nombre de sinistres correspond donc au nombre de ces habitations et de ces véhicules qui ont été endommagés par l'inondation.

A partir de ces données, il est alors possible de calculer le ratio suivant :

$$r = \frac{\frac{\text{NombreSinistresAuto}}{\text{NombreRisquesAuto}}}{\frac{\text{NombreSinistresNonAuto}}{\text{NombreRisquesNonAuto}}}$$

En effectuant une moyenne pour chaque type de crue, on obtient ce qu'on considèrera comme nos probabilités de présence du véhicule au moment de l'inondation. On obtient alors les résultats suivants :

- Crue éclair : 0,3952
- Crue lente : 0,1429
- Autre : 0,7037

Ces ratios sont calculés sur un très petit échantillon de données ce qui implique que cette méthode n'est pas suffisamment robuste. Elle sera néanmoins adoptée car il n'est pas possible de faire mieux à ce jour. Au fil des années, ces informations pourront être affinées en demandant systématiquement des informations plus détaillées aux cédantes.

Pour la mise en pratique dans le cadre probabiliste, nous utilisons les données par événement des inondations Cat Nat de 1990 à 2013. Sur les 86 événements exploitables (cf point V-2.1.1), nous les avons classifiés selon chaque type d'inondation (éclair, lente, autre). On obtient alors sur l'historique, la proportion que représente chacun de ces types. Ainsi, lors de la génération d'événements fictifs, cette probabilité sera appliquée et associée à la probabilité de présence du véhicule correspondant au type d'inondation. Sur l'historique étudié, on obtient les probabilités relatives aux types de crues suivantes :

- Crue éclair : 0,7674
- Crue lente : 0,1860
- Autre : 0,0465

### 2.3.3 Prise en compte du seuil d'instabilité

Il convient avant tout de préciser qu'un modèle est une version simplifiée de la réalité. Ce modèle considère que la voiture est étanche, qu'elle est garée dans la rue et qu'il n'y a aucun obstacle autour d'elle. Cependant, beaucoup de situations pourraient faire sortir un véhicule de ce cadre : le véhicule n'est peut-être pas totalement étanche, de l'eau peut alors entrer par les portes, l'alourdir et alors, il reste au fond au lieu de flotter. Le véhicule est peut être garé entre deux autres voitures et il se peut alors que le courant n'ait pas le même effet. De même, les véhicules peuvent être à l'abri du courant, voire de l'eau, dans un garage, ce qui est souvent le cas en banlieue. Enfin, on trouve souvent dans les grandes villes des garages de sous-sol non étanches ou à l'inverse en hauteur.

On pose l'hypothèse que lorsque le véhicule flotte ou est emporté par le courant, il est détruit à 100%, c'est-à-dire que le montant des dommages est égal à la totalité de la valeur de la voiture (vétusté déduite comme décrit dans le **paragraphe 1.2. Module de Vulnérabilité**).

Il faut donc déterminer tout d'abord la hauteur d'eau critique  $h_k$  à partir de laquelle le véhicule commence à flotter et ensuite définir le seuil de courant  $u_b$  à partir duquel la voiture perd sa stabilité (Kreibich et al., 2009).

#### 2.3.3.1 Définition de la hauteur de flottaison

On cherche dans cette partie à définir  $h_k$  qui est la hauteur d'eau critique à partir de laquelle le véhicule commence à flotter.

Soit un véhicule de volume  $V$  et de masse volumique  $\rho$ . Soient  $V_i$  le volume immergé,  $\rho_f$  la masse volumique du fluide et  $h$  la hauteur d'eau.

Comme illustré dans le schéma ci-dessous, lors d'une inondation, lorsqu'un véhicule se retrouve partiellement immergé, deux forces agissent sur le solide : son poids  $F_p$  (vers le bas) et la poussée d'Archimède  $F_A$  (vers le haut).

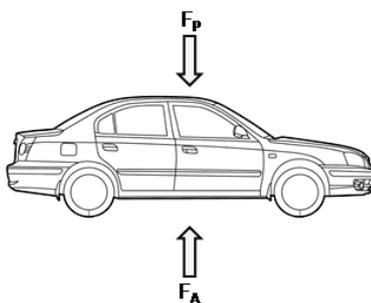


FIGURE 2.47 – Forces impliquées dans le phénomène de flottaison

Par définition la poussée d'Archimède est une force dirigée vers le haut exercée par un liquide sur un objet plongé dans ce liquide. Selon le principe d'Archimède, la poussée est égale au poids du volume de liquide déplacé. Si la poussée est supérieure ou égale au poids de l'objet, celui-ci flotte. Au contraire, si la poussée est inférieure au poids de l'objet, celui-ci coule.

Les dimensions d'un véhicule sont caractérisées par :

- sa longueur  $l_c$
- sa largeur  $b_c$
- l'empattement (la distance entre les essieux du véhicule)  $e_c$
- sa hauteur du toit  $h_c$
- la garde au sol  $g_c$
- hauteur des circuits électriques  $f_c$
- son poids  $m_c$

On a donc :

$$F_P = \rho * V = m_c$$

$$F_A = \rho_f * V_i$$

Ainsi :

- si  $F_P < F_A$  alors, et le véhicule flotte
- sinon, il n'y a pas flottabilité

On considère la voiture comme une superposition de deux pavés droits. Le volume immergé  $V_i$  dépend donc de la hauteur d'eau. On distinguera plusieurs seuils, tels que décrits dans la figure ci-dessous :

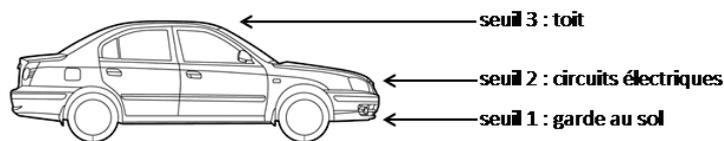


FIGURE 2.48 – Seuils Auto

Donc :

- si la hauteur d'eau est inférieure à la garde au sol (seuil 1),  $V_i$  est alors égal à 0

$$V_i = 0 \Rightarrow F_A = 0$$

Or,

$$m_c \neq 0 \Rightarrow F_P > 0$$

Donc

$$F_P > F_A$$

Et la voiture ne flotte donc pas

- si la hauteur d'eau est supérieure à la garde au sol (seuil 1) et inférieure à la hauteur des circuits électriques (seuil 2), alors :

$$V_i = (h - g_c) * l_c * b_c \Rightarrow F_A = 1000 * (h - g_c) * l_c * b_c$$

Donc la voiture se met à flotter lorsque :

$$h > \frac{m}{1000 * l_c * b_c} + g_c$$

- si la hauteur d'eau est supérieure à la hauteur des circuits électriques (seuil 2) et inférieure au toit (seuil 3), alors :

$$V_i = (h - f_c) * e_c * b_c + (f_c - g_c) * l_c * b_c \Rightarrow F_A = 1000 * [(h - f_c) * e_c * b_c + (f_c - g_c) * l_c * b_c]$$

Donc la voiture se met à flotter lorsque :

$$h > \frac{1}{e_c * b_c} * \left[ \frac{m}{1000} - (f_c - g_c) * l_c * b_c \right] + f_c$$

- si la hauteur d'eau est supérieure au toit (seuil 3) alors il faut comparer le poids de la voiture ou poids du volume d'eau correspondant au volume de la voiture. Cela revient donc à comparer les densités. La voiture se met donc à flotter lorsque :

$$\frac{m}{V} < 1000$$

### 2.3.3.2 Définition du seuil d'instabilité

Pour déterminer le seuil d'instabilité  $u_b$ , plusieurs facteurs sont à prendre en compte, à savoir : les caractéristiques du véhicule (hauteur, longueur, largeur, hauteur du châssis,...), la vitesse du courant, l'orientation du courant par rapport à la voiture et la hauteur de crue. D'autres paramètres interviennent également mais seront négligés dans cette étude par soucis de simplification tels que les caractéristiques de la route (rugosité et pente) ou la force de traction due aux roues du véhicule.

#### a. Étude des forces s'exerçant sur un véhicule

Nous étudions ici les forces s'exerçant sur une automobile garée dans une rue.

Telles que décrites par Xia et al. (2011 et 2014) et Shu et al. (2011) celles-ci sont au nombre de quatre :

- la force de traction du courant ( $F_D$ );
- le poids réel du véhicule  $F_G$  qui est composé de la force de réaction proportionnelle au poids du volume de fluide déplacé et de la force gravitationnelle;
- la force de réaction normale du sol ( $F_N$ );
- la force de frottement produite par la résistance du véhicule contre le glissement à la surface de la route ( $F_R$ ).

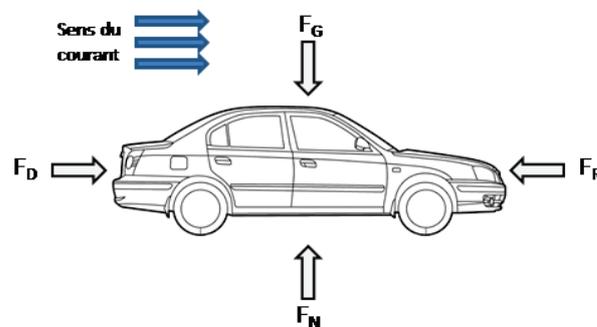


FIGURE 2.49 – Forces impliquées dans le phénomène d'instabilité

Afin de mener l'étude, nous allons poser deux hypothèses :

1. le véhicule est garé et les roues sont bloquées contre tout mouvement (c'est-à-dire que les freins sont enclenchés), ainsi  $F_R$  est une force de résistance contre le glissement du véhicule sur la surface.
2. Le véhicule est régulièrement entretenu si bien que son étanchéité est suffisante pour qu'il ne se remplisse pas immédiatement par les eaux d'inondation, même si le niveau de l'eau est supérieur à la hauteur de la garde au sol.

Soient  $\gamma_f$  et  $\gamma_c$  les poids spécifiques de l'eau et du véhicule et  $g$  l'accélération de la gravité.

En situation de submersion partielle, le poids réel ( $F_G$ ) peut être exprimé :

$$F_G = F_g - F_b$$

Où  $F_g$  est le poids du véhicule et  $F_b$  est la force de flottabilité qui est égal au poids de l'eau déplacée par le véhicule.

$$F_g = \gamma_c * V_c = \rho_c * g * V_c = \frac{m}{V_c} * g * V_c = m * g$$

$$F_b = \gamma_f * V_i = \rho_f * g * V_i = F_A * g$$

Ainsi,

$$F_G = g * (m - F_A) \quad (2.14)$$

La force de traction ( $F_D$ ) est donnée par Chien et Wan (1999) :

$$F_D = \frac{C_d * A_d * \gamma_f * u_b^2}{2 * g} \quad (2.15)$$

Où :

- $C_d$  est le coefficient de traction, qui dépend de la configuration du courant et de la forme du véhicule. Pour une catégorie de véhicule spécifique, la valeur du coefficient de traction est une fonction du nombre de Reynolds. Lorsque la hauteur d'eau est inférieure à la hauteur du châssis, seules les roues contribuent à la force de traction. Gerhard et al. (1992) estiment alors le coefficient de traction à 1,1. Lorsque la hauteur d'eau dépasse la hauteur du châssis, la carrosserie vient augmenter la force de traction. Gerhard et al. (1992) estiment alors le coefficient de traction à 1,15. Dans notre étude, on suppose que de l'instabilité ne peut subvenir que si le niveau de l'eau atteint au moins la base des portes. On a donc  $F_D = 0$  si  $h < seuil_1$  et lorsque  $h > seuil_1$ , on pose  $C_d = 1,15$
- $u_b$  est la vitesse du courant
- $g$  est l'accélération gravitationnelle
- $A_d$  est la surface submergée projetée en fonction de l'orientation de la voiture face à la direction du courant. Ainsi,  $A_d = a_d * h_f * b_c$  dans le cas où la direction du courant est parallèle à la longueur du véhicule (cas 1) et  $A_d = a_d * h_f * l_c$  dans le cas où la direction du courant est perpendiculaire à la longueur du véhicule (cas 2) ( $a_d$  est le coefficient spécifiant que le calcul évolue en fonction des paliers atteints, comme vu précédemment)

La force de frottement  $F_R$  est supposée égale à la résistance totale exercée par les quatre roues du véhicule sur la surface du sol. Comme défini dans les hypothèses, les roues sont supposées être bloquées contre le glissement. Cette force peut être exprimée par  $F_R = \mu * F_N$ , où  $\mu$  est le coefficient de frottement entre les roues et la surface mouillée du sol. Si le véhicule est en situation d'équilibre (il ne glisse ni ne flotte), alors  $F_N = F_G$  (équation de stationnarité). Ainsi,  $F_R$  peut être exprimé dans la forme :

$$F_R = \mu * F_N = \mu * F_G$$

Ainsi,

$$F_R = \mu * g * (m - F_A) \quad (2.16)$$

Cox et Ball (2001) ont mis en avant que de nombreux facteurs influencent le coefficient de frottement  $\mu$ , allant de la condition des pneus aux caractéristiques de la route. Puisque l'on ne dispose pas de données aussi détaillées, par simplification dans notre étude, nous allons adopter le coefficient de frottement fixé à 0,3 par Bohhman et Hatterslay (1967).

### b. Établissement de la formule du seuil de glissement

Les véhicules garés dans les rues peuvent commencer à bouger sous l'action des eaux d'inondation, soit en glissant soit en flottant, en fonction du courant et de la hauteur d'eau. Au tout début de l'inondation, les véhicules sont principalement déplacés par l'action de glissement, spécialement durant les inondations urbaines avec peu de profondeur mais avec une vitesse de courant très élevée.

Alors que le véhicule commence à glisser à la surface du sol, la force de frottement stationnaire qui empêche la voiture de glisser est juste équilibrée par la force de traction induite par le courant. Ainsi, le critère de définition du seuil d'instabilité peut être défini par  $F_D = F_R$ .

Par substitution des équations (2) et (3), on obtient :

$$u_b = \sqrt{\frac{2 * g * F_R}{C_d * A_d * \gamma_f}} = \sqrt{\frac{2 * g^2 * \mu * (m - F_A)}{C_d * A_d * \gamma_f}} \quad (2.17)$$

#### 2.3.4 La hauteur d'eau

Si la voiture n'a pas été déplacée en zone non-inondable et si elle n'a pas été emportée par le courant, alors, les dommages subis par la voiture sont dus aux eaux d'inondation.

Les études menées par un laboratoire de test en Allemagne (Pflügner, 2001) et développées par le National Institute of Water & Atmospheric Research (Reese S. et Ramsay D., 2010) ont montré que les premiers dommages surviennent lorsque le niveau de l'eau atteint la base des portes et que l'eau peut donc s'infiltrer dans l'habitacle. Les dommages, qui correspondent aux sièges, le revêtement de sol et les aménagements intérieurs, représentent alors 25% de la valeur de la voiture.

Le saut suivant de la courbe de dommages survient lorsque les circuits électroniques sont touchés. Au-delà de cette hauteur d'eau, les dommages augmentent de façon continue jusqu'à ce que la voiture soit entièrement remplie d'eau.

Afin d'adapter cette méthodologie à notre situation, pour chaque catégorie de voiture, il faut donc déterminer trois caractéristiques, à savoir : la hauteur de la base des portes, la hauteur des premiers circuits électroniques et la hauteur du toit.

On obtient alors une courbe d'endommagement par catégorie de voiture. Pour une voiture moyenne on obtient la courbe suivante :

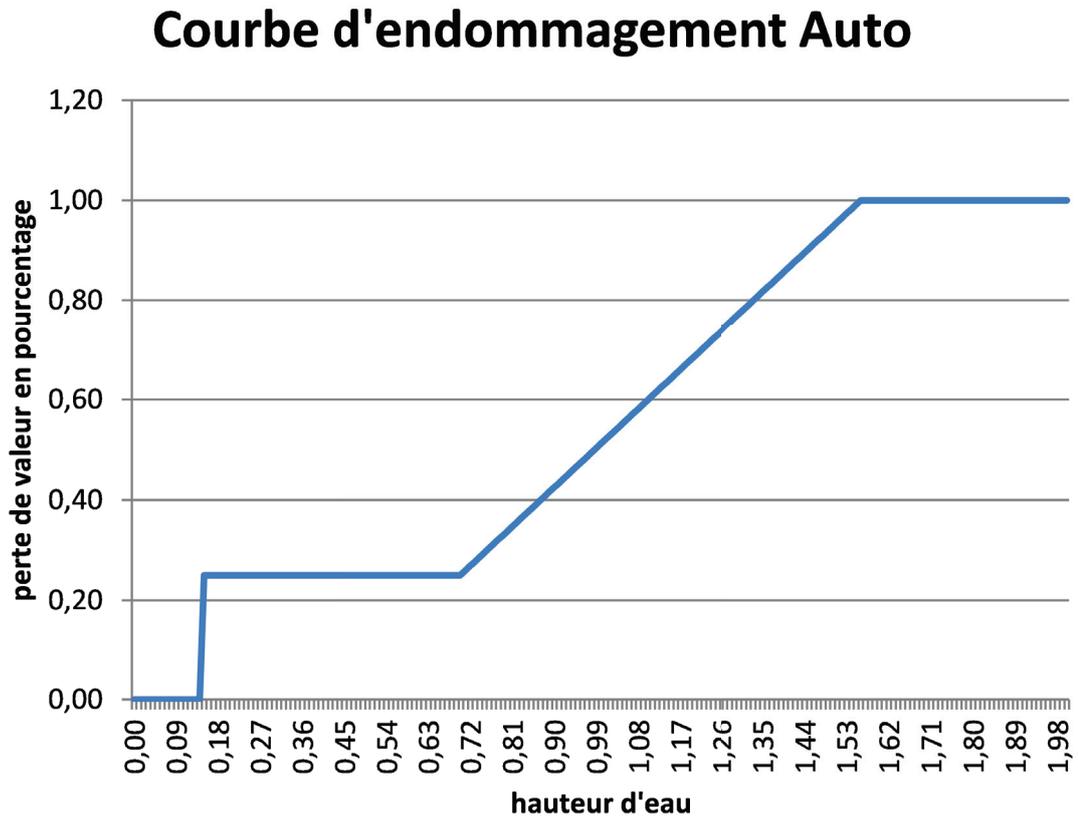


FIGURE 2.50 – Courbe d'endommagement Auto

## 2.3.5 Les résultats du modèle physique

### 2.3.5.1 Les résultats du modèle déterministe

Nous avons donc tout d'abord utilisé ce modèle sur les événements qui ont servi au calibrage du modèle Non Auto CCR.

Afin de pouvoir commenter ces résultats, nous allons le comparer au ratio utilisé jusqu'alors par CCR pour le calcul de la sinistralité Auto. Cela nous permettra de disposer d'un élément de comparaison. Dans le tableau suivant nous avons donc colonne par colonne : l'événement étudié, le type de crue (1 correspondant à une crue lente et 2 correspondant à une crue éclair), le coût Non Auto de l'événement, le coût Auto simulé par le modèle physique, le coût Auto calculé en appliquant le ratio décrit ci-dessus et enfin, l'écart entre le coût Auto simulé et le coût Auto obtenu par ratio.

Événement	Type de crue	Coût Non Auto	Coût Auto simulé	Coût Auto obtenu par le ratio de 5,7%	Ecart simulé - ratio	Ecart (%)
G_199909_ICB_DROME	2	19 676 656	1 371 000	1 121 569	249 431	22%
G_199911_ICB_AUDE	2	565 002 122	17 454 000	32 205 121	-14 751 121	-46%
G_200006_ICB_HAUTE_GARONNE	2	45 245 551	39 557 000	2 578 996	36 978 004	1434%
G_200011_ICB_NICE	2	41 458 156	1 987 500	2 363 115	-375 615	-16%
G_200012_ICB_BRETAGNE	1	146 759 164	366 270	8 365 272	-7 999 002	-96%
<b>G_200101_ICB_BRETAGNE</b>	<b>1</b>	<b>60 724 604</b>	<b>12 023 000</b>	<b>3 461 302</b>	<b>8 561 698</b>	<b>247%</b>
G_200107_ICB_CORREZE	2	63 112 161	3 852 400	3 597 393	255 007	7%
<b>G_200202_ICB_PAS_DE_CALAIS</b>	<b>1</b>	<b>17 078 502</b>	<b>2 609 400</b>	<b>973 475</b>	<b>1 635 925</b>	<b>168%</b>
G_200209_ICB_GARD	2	936 965 338	46 525 000	53 407 024	-6 882 024	-13%
G_200211_ICB_DROME	2	48 764 292	25 628 000	2 779 565	22 848 435	822%
G_200306_ICB_CALVADOS	2	58 314 320	2 071 100	3 323 916	-1 252 816	-38%
G_200309_ICB_HEREAULT	2	88 499 425	1 179 800	5 044 467	-3 864 667	-77%
G_200312_ICB_ARLES	2	1 009 338 048	133 010 000	57 532 269	75 477 731	131%
G_200509_ICB_GARD_HEREAULT	2	99 729 388	2 617 900	5 684 575	-3 066 675	-54%
G_200511_ICB_PERPIGNAN	2	17 762 382	814 100	1 012 456	-198 356	-20%
<b>G_200610_ICB_MEURTHE_MOSELLE</b>	<b>1</b>	<b>71 966 748</b>	<b>69 151 000</b>	<b>4 102 105</b>	<b>65 048 895</b>	<b>1586%</b>
G_200704_ICB_ORAGES_NORD_EST	2	16 329 206	44 504 000	930 765	43 573 235	4681%
G_200705_ICB_ORAGE_SUDOUEST	2	21 347 655	4 336 600	1 216 816	3 119 784	256%
G_200809_ICB_ORAGES_RHONE_ALPES	2	44 270 239	952 580 000	2 523 404	950 056 596	37650%
<b>G_200811_ICB_CENTRE_EST_COMPLET</b>	<b>1</b>	<b>162 974 988</b>	<b>14 656 000</b>	<b>9 289 574</b>	<b>5 366 426</b>	<b>58%</b>
G_200909_ICB_BAYONNE	2	27 343 200	834 040	1 558 562	-724 522	-46%
<b>G_200910_ICB_SAIN_TROPEZ</b>	<b>2</b>	<b>17 912 086</b>	<b>476 560</b>	<b>1 020 989</b>	<b>-544 429</b>	<b>-53%</b>
G_201006_ICB_VAR	2	517 027 064	6 307 400	29 470 543	-23 163 143	-79%
<b>G_201009_ICB_SUDEST</b>	<b>2</b>	<b>28 423 475</b>	<b>1 668 700</b>	<b>1 620 138</b>	<b>48 562</b>	<b>3%</b>
G_201111_ICB_SUD	1	281 376 723	7 553 500	16 038 473	-8 484 973	-53%
<b>G_201306_ICB_SUD_OUEST</b>	<b>2</b>	<b>318 942 265</b>	<b>13 693</b>	<b>18 179 709</b>	<b>-18 166 016</b>	<b>-100%</b>
<b>TOTAUX</b>		<b>4 726 343 755</b>	<b>1 393 147 963</b>	<b>269 401 594</b>	<b>1 123 746 369</b>	<b>417%</b>

FIGURE 2.51 – Résultats sur les événements de calibrage

De façon générale, le modèle semble donc surestimer largement les dommages Auto. Cependant, cette tendance ne semble pas se confirmer lorsque l'on étudie les résultats dans le détail. Ainsi, cette surestimation globale semble être due à certaines incohérences sur certains événements. En effet, sept événements ont des résultats qui sont excessivement élevés et incohérents : Haute Garonne 2000, Bretagne 2001, Drôme 2002, Meurthe et Moselle 2006, les orages de 2007 dans le Nord Est et dans le Sud Ouest, et surtout les orages de 2008 en Rhône-Alpes.

Si on supprime ces sept événements incohérents, on obtient alors les résultats suivants :

Événement	Type de crue	Coût Non Auto	Coût Auto simulé	Coût Auto obtenu par le ratio de 5,7%	Ecart simulé - ratio	Ecart (%)
G_199909_ICB_DROME	2	19 676 656	1 371 000	1 121 569	249 431	22%
<b>G_199911_ICB_AUDE</b>	<b>2</b>	<b>565 002 122</b>	<b>17 454 000</b>	<b>32 205 121</b>	<b>-14 751 121</b>	<b>-46%</b>
G_200011_ICB_NICE	2	41 458 156	1 987 500	2 363 115	-375 615	-16%
<b>G_200012_ICB_BRETAGNE</b>	<b>1</b>	<b>146 759 164</b>	<b>366 270</b>	<b>8 365 272</b>	<b>-7 999 002</b>	<b>-96%</b>
<b>G_200107_ICB_CORREZE</b>	<b>2</b>	<b>63 112 161</b>	<b>3 852 400</b>	<b>3 597 393</b>	<b>255 007</b>	<b>7%</b>
G_200202_ICB_PAS_DE_CALAIS	1	17 078 502	2 609 400	973 475	1 635 925	168%
<b>G_200209_ICB_GARD</b>	<b>2</b>	<b>936 965 338</b>	<b>46 525 000</b>	<b>53 407 024</b>	<b>-6 882 024</b>	<b>-13%</b>
<b>G_200306_ICB_CALVADOS</b>	<b>2</b>	<b>58 314 320</b>	<b>2 071 100</b>	<b>3 323 916</b>	<b>-1 252 816</b>	<b>-38%</b>
G_200309_ICB_HEREAULT	2	88 499 425	1 179 800	5 044 467	-3 864 667	-77%
<b>G_200312_ICB_ARLES</b>	<b>2</b>	<b>1 009 338 048</b>	<b>133 010 000</b>	<b>57 532 269</b>	<b>75 477 731</b>	<b>131%</b>
G_200509_ICB_GARD_HEREAULT	2	99 729 388	2 617 900	5 684 575	-3 066 675	-54%
<b>G_200511_ICB_PERPIGNAN</b>	<b>2</b>	<b>17 762 382</b>	<b>814 100</b>	<b>1 012 456</b>	<b>-198 356</b>	<b>-20%</b>
<b>G_200811_ICB_CENTRE_EST_COMPLET</b>	<b>1</b>	<b>162 974 988</b>	<b>14 656 000</b>	<b>9 289 574</b>	<b>5 366 426</b>	<b>58%</b>
G_200909_ICB_BAYONNE	2	27 343 200	834 040	1 558 562	-724 522	-46%
<b>G_200910_ICB_SAIN_TROPEZ</b>	<b>2</b>	<b>17 912 086</b>	<b>476 560</b>	<b>1 020 989</b>	<b>-544 429</b>	<b>-53%</b>
G_201006_ICB_VAR	2	517 027 064	6 307 400	29 470 543	-23 163 143	-79%
<b>G_201009_ICB_SUDEST</b>	<b>2</b>	<b>28 423 475</b>	<b>1 668 700</b>	<b>1 620 138</b>	<b>48 562</b>	<b>3%</b>
G_201111_ICB_SUD	1	281 376 723	7 553 500	16 038 473	-8 484 973	-53%
<b>G_201306_ICB_SUD_OUEST</b>	<b>2</b>	<b>318 942 265</b>	<b>13 693</b>	<b>18 179 709</b>	<b>-18 166 016</b>	<b>-100%</b>
<b>TOTAUX</b>		<b>4 417 695 461</b>	<b>245 368 363</b>	<b>251 808 641</b>	<b>-6 440 278</b>	<b>-3%</b>

FIGURE 2.52 – Résultats sur les événements de calibrage 2

Le modèle apparaît donc ici nettement plus fiable.

Une explication peut justifier ces incohérences : comme expliqué en partie II de ce mémoire, le modèle inondation est séparé en deux filières, la filière débordement et la filière ruissellement. Or, il y a un important travail de calibrage pour mettre en lien les résultats modélisés par l'aléa et les courbes d'endommagement qui sont construites selon des approches très différentes. En effet, selon le paramétrage du modèle d'aléa, les données d'entrées pour le modèle de dommages peuvent varier fortement et donc impacter de façon importante les résultats du modèle de dommages. Un travail équivalent à celui qui a été fait pour le modèle Non Auto devra être mené pour le calibrage de la sinistralité Auto.

### 2.3.5.2 Les résultats du modèle probabiliste

Pour utiliser le modèle physique sous forme probabiliste, il faut le faire tourner avec le générateur d'événements fictifs développé par CCR. En simulant des événements à partir de chroniques continues de débit et de précipitations spatialisées, ce générateur permet de générer 50 000 années fictives.

Sur chaque événement, on applique le modèle inondation Auto et, par sommation, on peut ainsi obtenir la charge Auto annuelle. On obtient ainsi les résultats suivants :

taille échant	<b>50 000</b>
moyenne	<b>76 777 528</b>
STD	<b>83 084 941</b>
médiane	<b>46 700 744</b>
min	-
max	<b>1 030 102 227</b>

FIGURE 2.53 – Résultats modèle physique en mode probabiliste

ordre du quantile	Période de retour	Quantile (VaR)	TVaR
<b>0,01</b>	<b>1,0101</b>	<b>708 341</b>	<b>77 551 055</b>
<b>0,1</b>	<b>1,11111</b>	<b>7 002 020</b>	<b>84 895 275</b>
<b>0,2</b>	<b>1,25</b>	<b>13 329 820</b>	<b>94 219 152</b>
<b>0,3</b>	<b>1,42857</b>	<b>21 132 557</b>	<b>105 244 990</b>
<b>0,4</b>	<b>1,66667</b>	<b>32 428 014</b>	<b>118 314 708</b>
<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>46 700 744</b>	<b>134 230 389</b>
<b>0,6</b>	<b>2,5</b>	<b>74 521 927</b>	<b>152 991 149</b>
<b>0,7</b>	<b>3,33333</b>	<b>97 202 608</b>	<b>175 601 892</b>
<b>0,8</b>	<b>5</b>	<b>125 638 532</b>	<b>207 850 343</b>
<b>0,9</b>	<b>10</b>	<b>182 965 970</b>	<b>264 018 070</b>
<b>0,933333</b>	<b>15</b>	<b>212 826 136</b>	<b>297 009 934</b>
<b>0,95</b>	<b>20</b>	<b>235 145 077</b>	<b>321 474 846</b>
<b>0,966667</b>	<b>30</b>	<b>271 586 139</b>	<b>357 245 898</b>
<b>0,975</b>	<b>40</b>	<b>293 126 195</b>	<b>381 842 104</b>
<b>0,98</b>	<b>50</b>	<b>308 087 315</b>	<b>402 993 104</b>
<b>0,99</b>	<b>100</b>	<b>359 606 531</b>	<b>476 896 454</b>
<b>0,995</b>	<b>200</b>	<b>423 160 239</b>	<b>565 442 769</b>
<b>0,996</b>	<b>250</b>	<b>431 578 244</b>	<b>605 776 246</b>
<b>0,998</b>	<b>500</b>	<b>544 577 030</b>	<b>735 323 265</b>
<b>0,999</b>	<b>1000</b>	<b>709 032 664</b>	<b>872 328 311</b>

FIGURE 2.54 – *Quantiles de la charge Auto annuelle*

Pour étudier ces résultats, on peut utiliser les données déjà exploitées dans la régression sur les données inondation à savoir les données comptables de la sinistralité inondation Auto annuelle de 2000 à 2012. On obtient alors les résultats suivant :

<b>moyenne</b>	<b>29 094 348</b>
<b>STD</b>	<b>34 912 578</b>
<b>médiane</b>	<b>15 472 690</b>
<b>min</b>	<b>2 396 266</b>
<b>max</b>	<b>128 994 720</b>

FIGURE 2.55 – *Informations sur les données comptables de sinistralité annuelle Auto*

On remarque de nouveau que le modèle surestime largement les résultats et présente une forte variabilité.

### 2.3.6 Conclusions, limites et améliorations

En plus du problème de recalibrage nécessaire du modèle, ces mauvais résultats sont également dus au fait qu'on ne s'appuie pas sur un portefeuille Auto mais sur une estimation de celui-ci. C'est dans le modèle de vulnérabilité que l'incertitude est trop grande :

- on a estimé le nombre de voitures ainsi que leur type par foyer et par département ;
- à chaque type de voiture, on a associé une voiture représentative du marché français dont on a actualisé la valeur en fonction de l'âge moyen du parc automobile français et d'une formule simplifiée de l'argus ;
- On n'a pas la connaissance du portefeuille Auto réassuré. De fait, pour obtenir l'exposition, on associe à chaque habitation individuelle du modèle inondation, une caractéristique auto (nombre de voitures, type,...).

C'est ce dernier point qui est le plus problématique. Les cédantes ne communiquant pas leurs portefeuilles Auto, on ne peut ni avoir d'approche par cédante ni avoir une vue du portefeuille global réassuré par CCR. Or, la répartition géographique du marché Auto n'est pas uniforme sur tout le territoire ni ne correspond à la répartition des habitations individuelles. Le modèle de vulnérabilité présente donc une forte incertitude.

On ne dispose que de l'événement de 2010 dans le Var pour calibrer le modèle. On possède également des informations pour quelques cédantes et pour quelques événements (**figure 3**) mais, la modélisation par cédante n'étant pas disponible, cela ne peut être utilisé pour recalibrer le modèle.

Enfin, il est à noter qu'en plus de la localisation et du type de crue, l'heure de survenance de la crue a également un impact important. Une crue survenant en pleine nuit fera plus de dommages qu'une crue survenant en pleine journée car alors, les habitants pourront être témoins de la montée des eaux et réagir à temps. La prise en compte de ce paramètre constitue une des améliorations futures de ce modèle.

## 2.4 CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre était de proposer une modélisation de la sinistralité Auto pour le péril Inondation afin de compléter la modélisation Inondation actuelle de CCR qui estime les dommages matériels directs au bâti. De plus, cette modélisation devait répondre aux attentes de CCR à savoir Or, la modélisation actuelle, qui consistait en une régression linéaire sur le ratio S/P annuel Non Auto tous périls afin d'obtenir le ratio S/P annuel Auto tous périls, ne répondait qu'au dernier critère et n'était pas spécifique au péril Inondation. Le travail a donc consisté à proposer et développer des méthodes alternatives de modélisation de ce risque à la modélisation actuelle utilisée par CCR tout en respectant le cahier des charges défini par l'entreprise.

La première étape a été d'adapter le modèle actuel au péril inondation seul afin d'obtenir une première approche. Bien que ne correspondant pas aux attentes de CCR, ces deux modélisations présentaient l'avantage de raisonner en S/P qui est une mesure stable des données dans le temps. Cependant, l'historique sur lequel se base les modèles est trop court pour en assurer une bonne fiabilité et la prise en compte d'événements extrêmes non encore survenus.

Pour apporter une approche complémentaire, une modélisation de type fréquence x sévérité a été réalisée. Si cette méthode de modélisation ne permet pas d'obtenir une modélisation pour un événement particulier, elle est néanmoins intéressante car elle permet d'obtenir une bonne visibilité du risque en étudiant séparément ses différentes composantes : la fréquence des inondations et leurs coûts. La sévérité est analysée au travers de la méthode de dépassement de seuil (théorie des valeurs extrêmes) afin de bien prendre en compte la nature potentiellement extrême du risque étudié. Cependant, du fait du manque d'informations sur la sinistralité Auto, il a fallu modéliser les coûts Non Auto ensuite ramenés aux montants Auto et malgré cela, le manque de masse statistique empêche de produire des lois fiables. De nouveau, la mise en place d'une collecte automatique de données Auto suite à chaque événement permettrait à terme d'appliquer directement cette méthodologie aux données de sinistralité Auto par événement et d'obtenir un modèle plus précis.

Afin de respecter le cahier des charges de CCR et de s'intégrer à la logique actuelle de modélisation du risque inondation, il a paru naturel de développer une modélisation physique sur l'exposition en créant un module de vulnérabilité et un module de dommages propres à l'Auto. L'utilisation du module d'aléa déjà développé par CCR permet alors de simuler un événement spécifique et l'utilisation du générateur d'événements fictifs permet de passer le modèle en mode probabiliste et de simuler la distribution de la charge totale annuelle. Ce modèle présente cependant aujourd'hui plusieurs limites : CCR ne disposant pas des portefeuilles Auto détaillés de ses cédantes, le module de vulnérabilité est trop imprécis pour retourner des résultats fiables. De plus, le modèle présenterait l'avantage de descendre la modélisation à l'échelle des cédantes si leurs portefeuilles étaient connus. Le modèle se heurte également aux particularités de modélisation de l'aléa qui peut amener à gonfler les dommages Auto. Cependant, un travail de collecte de données auprès des cédantes pourrait fiabiliser de façon conséquente ce modèle et le rendre performant.

Ce travail a ainsi permis d'entamer le travail de modélisation sur un risque n'ayant pas encore été étudié : le coût Auto Cat Nat pour le péril inondation. Si les différents

---

modèles développés ne permettent pas aujourd'hui d'obtenir des résultats concluants, des méthodologies ont été décrites et implémentées, leurs limites actuelles ont été identifiées et la marche à suivre pour y faire face a été déterminée.



## 3.1 INTRODUCTION

Les prévisions du GIEC indiquent que l'Europe sera probablement soumise à davantage d'événements climatiques intenses à l'avenir. Cette hausse de la fréquence et de l'ampleur des épisodes climatiques exceptionnels risque d'impacter les filières agricoles et agroalimentaires de manière significative. Les impacts des aléas sont (CSO, 2017) :

- diversifiés : les aléas sont nombreux (gel, grêle, sécheresse, inondation, excès d'eau, pluies violentes, tempêtes, neige) (figure 3.1) ;
- non homogènes sur le territoire, en raison des spécificités de chaque type d'aléa (ampleur, fréquence, caractère systémique ou non), conjuguées à la spécialisation géographique de la production agricole au sein du pays ;
- très variables selon les années : le montant des indemnités annuelles des calamités agricoles, présenté dans la figure 3.2, donne une indication de la variabilité des aléas climatiques.

Répartition des indemnités au titre des calamités agricoles de 1980 à 2016

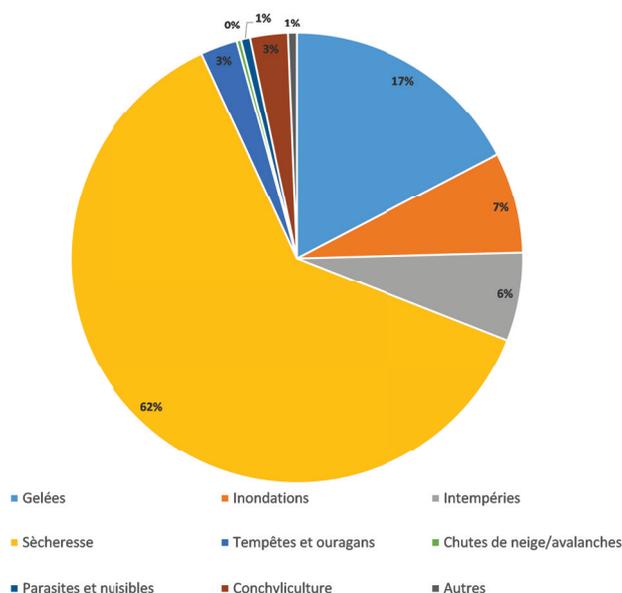


FIGURE 3.1 – Répartition des indemnités au titre des calamités agricoles de 1980 à 2016

Source : Caisse Centrale de Réassurance

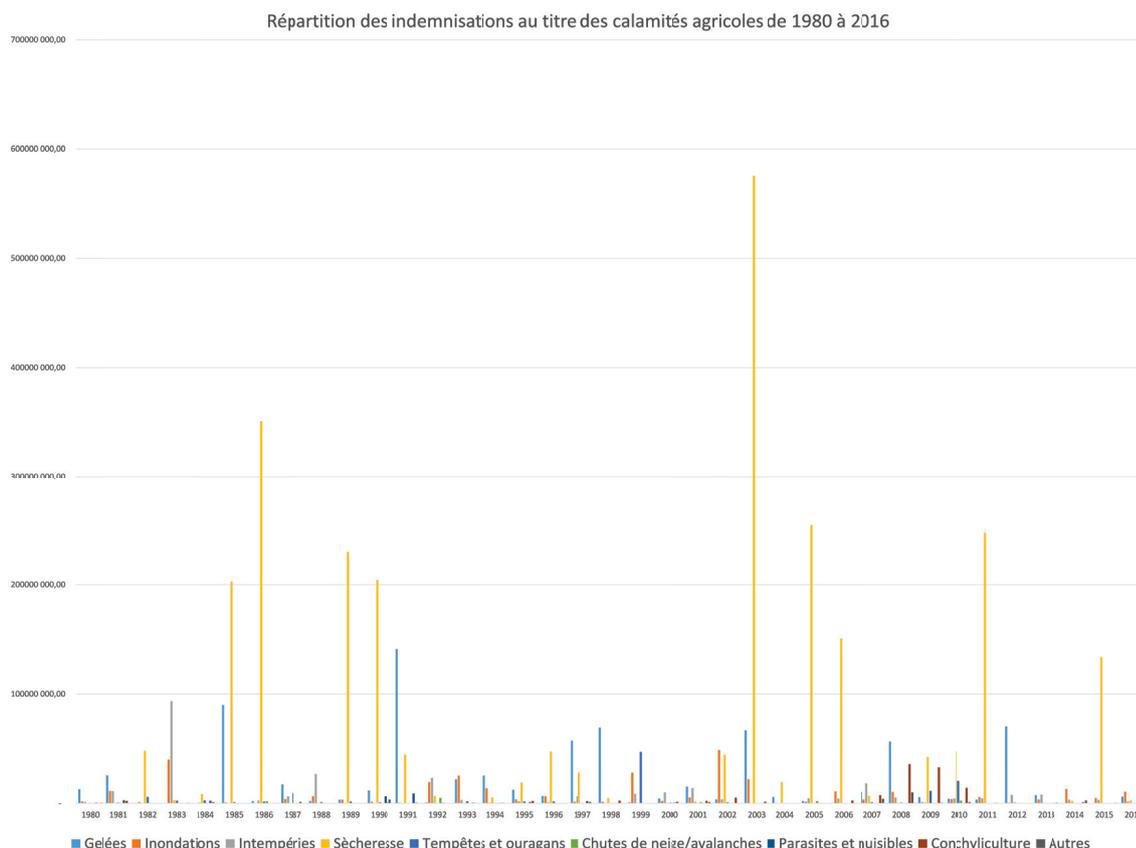


FIGURE 3.2 – Historique des indemnités au titre des calamités agricoles de 1980 à 2016

Source : Caisse Centrale de Réassurance

A partir de la comparaison des indemnités versées au titre du régime des calamités agricoles et de l'assurance récolte, le groupe de travail du Conseil supérieur d'orientation et de coordination de l'économie agricole et alimentaire (CSO) sur la gestion des risques en agriculture (CSO, 2017) a estimé que le coût des aléas climatiques (pertes de récoltes et pertes de fonds), s'élève au moins à 1,5 Mds d'euros en moyenne par an. Ce montant représente entre 2% et 3% de la valeur annuelle de la production agricole. Cependant, au vu des prévisions du GIEC, le coût des aléas climatiques sur le secteur agricole pourrait empirer.

La multiplication des aléas et des crises agricoles des dernières années, et notamment la crue de la Seine de mai et juin 2016, a poussé la gestion des risques au premier plan des préoccupations. Lors du Congrès des Jeunes Agriculteurs qui s'est déroulé le 8 juin 2017 à Dunkerque, Mme Lambert, présidente de la FNSEA, a déclaré que "La nouvelle donne de notre métier, c'est l'imprévisibilité". Cette observation conduit donc à la question de l'adaptation des politiques agricoles pour faire face aux aléas climatiques. Car si les aides sont importantes et multiples, elles ne répondent plus aux défis que représente le changement climatique. Ce constat a amené le CSO à promouvoir l'assurance récolte comme outil d'incitation à la prévention et la responsabilisation des exploitants agricoles face aux aléas climatiques (CSO, 2017). Une des solutions un temps envisagée par les pouvoirs publics, avant que le Sénat ne rejette le projet de loi en octobre 2017, était de généraliser l'assurance récolte obligatoire, dans le double objectif de responsabiliser et de maximiser la mutualisation pour baisser le montant des primes. Afin de pouvoir arbitrer

entre les différentes solutions dont disposent les pouvoirs publics, il est important de disposer d'une évaluation de l'exposition aux risques. C'est d'ailleurs le point ajouté par Jannes Maes, vice-président du Ceja, lors du Congrès des Jeunes Agriculteurs le 8 juin 2017 à Dunkerque, qui a mis en avant l'importance d'avoir « la bonne information » (Aries R., 2017). Vincent Lidsky, inspecteur général des Finances, et Georges-Pierre Malpel, Inspecteur général de l'agriculture ont également souligné l'importance d'une bonne appréciation du risque, lors de la journée CCR Cat de juin 2017.

Cette connaissance du risque est également nécessaire pour la mise en place d'une politique de gestion de l'aléa inondation adéquate. En Europe, une nouvelle orientation pour la gestion du risque d'inondation consiste à laisser plus de place à l'eau, en restaurant les zones d'expansion des crues ou les zones de rétention (Citeau, 2003). Ces méthodes de gestion du risque d'inondation se basent sur la volonté de protéger des zones vulnérables, généralement les zones urbaines, ce qui implique de rendre plus exposées au risque d'inondation des zones moins vulnérables, souvent agricoles (Posthumus et al., 2009; Erdlenbruch et al., 2009). Afin d'arbitrer au mieux ce choix, il devient nécessaire d'évaluer les dommages financiers des agriculteurs pour permettre d'estimer l'efficacité économique des différentes politiques de réduction du risque d'inondation, via la réalisation d'analyses coûts-bénéfices par exemple (Citeau, 2003; CEPRI, 2008; Posthumus et al., 2009; Morris et Brewin, 2013). Cela permettrait aussi de déterminer le montant adéquat des compensations à verser en cas de restauration des zones d'expansion des crues (Erdlenbruch et al., 2009; Beedell et al., 2012).

Un modèle d'estimation des conséquences des inondations sur le secteur agricole s'avère donc nécessaire. D'une part, cela permet d'appuyer les politiques de gestion des risques. D'autre part, ces estimations informent le secteur agricole sur son exposition aux risques et sur les conséquences potentielles des politiques de gestion des risques sur leurs exploitations. Ils pourraient ainsi s'y adapter au mieux, par exemple, en accordant les pratiques agricoles à la fréquence des inondations (Penning-Rowsell et al., 2013). Ainsi, Roca et al. (2011) ont montré qu'en Angleterre et au Pays de Galles, les cultures à haute valeur ajoutée (horticulture) sont comparativement moins présentes dans les zones fréquemment inondées que d'autres cultures, telles que les grandes cultures pour lesquelles certains sols alluviaux sont privilégiés alors que l'horticulture est souvent pratiquée hors sol et ne nécessite pas de se trouver près d'un cours d'eau. Les évolutions sur le long terme des cultures pratiquées doivent donc être prises en compte dans l'évaluation économique.

Depuis 2003, CCR développe un modèle permettant d'estimer le coût assurantiel des inondations afin de mieux maîtriser les risques qu'elle couvre et d'analyser l'exposition financière des différentes parties prenantes du régime français d'indemnisation des Catastrophes Naturelles (assureurs, CCR, Etat). Le périmètre actuel du modèle couvre les dommages aux bâtiments et au contenu et les pertes d'exploitations consécutives à un dommage direct dû à l'inondation. Dans le cadre de ses travaux de recherche et développement et de sa mission d'appui technique auprès de l'État, CCR souhaite aujourd'hui élargir son périmètre aux dommages directs non assurés et aux pertes indirectes, notamment les conséquences sur l'agriculture. D'autre part, CCR est gestionnaire du Fonds National de Gestion des Risques en Agriculture (FNGRA), qui est notamment destiné à indemniser les pertes de récoltes non engrangées, subies par les exploitations agricoles suite à des calamités agricoles (<https://www.ccr.fr/>).

Dans ce contexte, CCR souhaite donc développer un modèle permettant une estima-

tion ex-post des pertes au secteur agricole du fait d'une inondation spécifique, en offrant une perspective sur les dommages couverts par les différents systèmes de transfert de risques (FNGRA et assurances récoltes), et les pertes restant à la charge des exploitants agricoles. L'objectif de ce modèle est également de pouvoir fonctionner avec le modèle d'aléa probabiliste de CCR afin de pouvoir contribuer au pilotage des différents outils de gestion des risques en agriculture en France. Pour atteindre ces objectifs, il est essentiel de connaître l'occupation des sols actuels et comment un événement inondation ou un projet de gestion du risque inondation va l'affecter. nous avons donc fait le choix de continuer dans la logique de la modélisation physique sur exposition des modèles développés à CCR. Ce chapitre présente les impacts des inondations sur le secteur agricole, l'état de l'art des approches et modèles existants aujourd'hui et le modèle développé au sein de CCR dans le cadre de cette thèse.

## 3.2 ÉTAT DE L'ART

Dans l'industrie de l'assurance, plusieurs approches dominent pour modéliser le risque de catastrophes naturelles (Cohignac et Ecoto, 2013). L'objectif initial des assureurs et réassureurs n'est pas tant de comprendre les caractéristiques des événements, mais de connaître le montant des pertes rapidement après leur survenance ainsi que d'estimer les pertes annuelles afin de constituer les provisions nécessaires pour faire face aux risques couverts.

Ainsi, les premières modélisations développées dans l'industrie de l'assurance ne prenaient pas en compte les caractéristiques physiques des événements et les particularités de l'exposition. Elles consistaient soit à adopter une modélisation basée sur la sinistralité historique (de type fréquence x sévérité) ou sur les ratios Sinistres/Primes historiques ou soit à appliquer une formule sur les valeurs assurées, comme le fait la Formule Standard Cat Nat de Solvabilité II. Ces méthodes ont pour avantage d'être simples à mettre en œuvre : elles nécessitent assez peu de données et de compétences techniques. De plus, d'une année à l'autre, il s'agit simplement "d'ajouter un point" au modèle pour la nouvelle année d'historique. Cependant, dans l'étude des événements extrêmes, ces méthodes sont limitées. Tout d'abord, l'historique de données n'est souvent pas suffisant pour permettre un ajustement de loi satisfaisant. Ensuite, elles ne permettent pas de prendre en compte l'ensemble des années de sinistralités possibles car elles se basent sur des années survenues et ne prennent donc pas en compte tout l'éventail des possibles - notamment extrêmes. Une année extrême peut être due à un événement, tel qu'une crue de la Seine de type 1910, ou à un cumul significatif d'événements de moindre ampleur, ou une conjugaison de ces deux éléments. De plus, cette méthodologie n'est pas sensible à un changement d'exposition. Si les indicateurs du portefeuille restent les mêmes (nombre de contrats, valeurs assurées), les estimations du modèle resteront les mêmes, même si les biens assurés sont géographiquement plus exposés au risque d'inondation.

L'objectif des travaux de modélisation des impacts des catastrophes a évolué ces dernières années car les assureurs deviennent plus soucieux de comprendre les phénomènes assurés pour pouvoir informer et conseiller leurs assurés et ainsi diminuer les dommages qui devront être indemnisés. On peut en effet observer que les assureurs développent de plus en plus une activité de prévention auprès de leurs assurés. Cela nécessite donc de comprendre les dommages causés par un événement pour bien les modéliser. C'est pour cela que les modélisateurs se tournent progressivement vers des méthodologies prenant en compte les caractéristiques physiques des événements et les particularités de l'exposition. Ces méthodologies permettent une bonne modélisation de la sinistralité et une prise en compte de l'évolution du portefeuille assuré. Cependant, le développement de ces modèles est complexe à mettre en œuvre et nécessite un fort investissement de la part des entreprises.

Le développement des modèles physiques sur exposition a commencé en faisant appel à des modèles physiques externes (RMS, AIR, EQECAT). Cependant, ces modèles fonctionnent comme des boîtes noires, c'est à dire que l'utilisateur fournit les données d'exposition d'entrées et le modèle lui renvoie ses résultats sans qu'il n'ait ni la main mise ni la visibilité sur le fonctionnement du modèle. L'utilisateur ne peut donc qu'étudier les sorties de ces modèles, sans pouvoir entrer dans le détail de la modélisation et ainsi comprendre les causes des limites observées. Cela met en avant l'intérêt pour les assureurs de

développer des modèles physiques en interne.

Les modèles physiques sont articulés autour de trois modules :

- **Le module d'aléa** génère un événement survenu ou fictif, caractérisé par une probabilité de survenance et/ou des données d'aléa, souvent spatialisées, relatives à l'intensité du phénomène physique étudié (hauteur d'eau, débit, durée de l'événement, type de crue ou heure de survenance) ;
- **Le module de vulnérabilité** recense l'ensemble des risques du périmètre étudié, avec leurs localisations, leurs caractéristiques et leurs valeurs assurées. Les données d'aléa sont ensuite croisées avec les données de vulnérabilité ;
- **Le module de dommages** applique alors des courbes d'endommagement sur les risques touchés pour estimer le montant des dommages. Les courbes d'endommagement décrivent la relation entre une ou plusieurs caractéristiques physiques de l'événement et le niveau de dommages directs associés pour un type de risque ou son utilisation ( Penning-Rowse et al., 2013 ; FEMA, 2011 ; Kok et al., 2004). Il est également possible de prendre en compte les conditions contractuelles de potentiels systèmes de transfert de risques pour estimer les pertes indemnisées.

CCR a décidé en 2003 de mettre en place une équipe de recherche et développement en modélisation des catastrophes naturelles. Le péril inondation est le premier péril en termes de dommages assurés en France et les travaux ont donc débuté par l'étude de ce péril (Moncoulon et Quantin, 2013 ; Moncoulon et al., 2014). L'approche physique par exposition a été adoptée et les trois modules ont été développés en interne. Le périmètre des risques étudiés comprend les dommages assurés aux bâtiments privés et professionnels, leurs contenus ainsi que les pertes d'exploitation consécutives à des dommages directs. Le tableau 3.1 récapitule la modélisation du risque catastrophe à CCR selon ces trois modules : aléa, vulnérabilité et dommages.

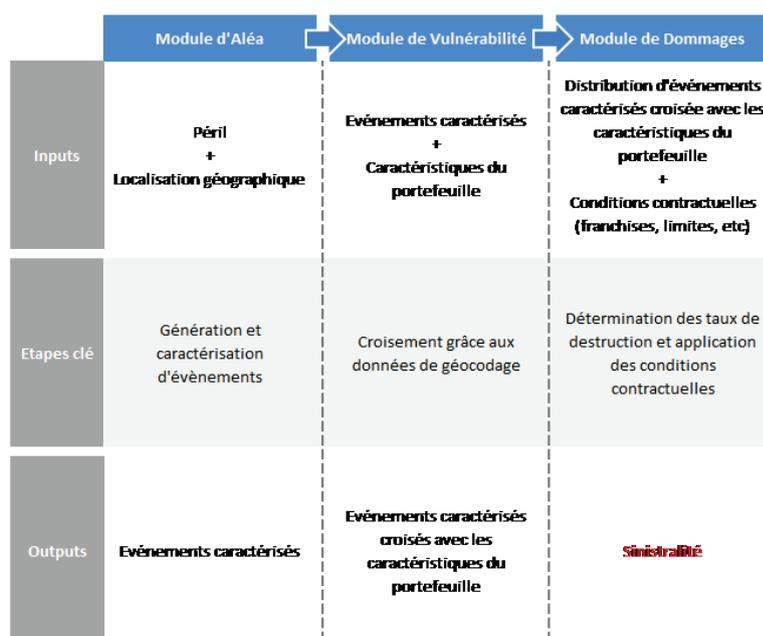


TABLE 3.1 – Modélisation physique sur exposition des biens assurés par la Caisse Centrale de Réassurance

Dans le domaine de la recherche sur la modélisation des dommages causés par les

inondations, le périmètre géographique se concentre souvent sur les zones urbaines où les risques présentent des valeurs économiques élevées et le périmètre des risques étudiés, sur le bâti résidentiel et les entreprises. Ainsi, les zones rurales et les risques s'y trouvant, notamment l'agriculture, n'ont pendant longtemps pas été une priorité d'étude.

Cependant, les politiques de gestion du risque d'inondation se sont peu à peu tournées vers la préservation ou le développement de zones d'expansion des crues (Pivot et al. 2002; Citeau, 2003). Ces zones d'expansion des crues permettent de contrôler le stockage de l'eau pendant les grands événements d'inondation afin de réduire le risque d'inondation en aval de la rivière. Ces zones sont souvent utilisées pour l'exploitation agricole. Les politiques publiques de gestion des risques sont évaluées via des analyses coûts-bénéfices et de plus en plus, des analyses multi-critères. Ces études nécessitent de prendre en compte tous les risques exposés à l'aléa inondation et d'estimer l'impact des inondations sur ces risques.

Cela a donc rendu nécessaire l'étude du risque d'inondation sur le secteur agricole et ce sujet de recherche s'est ainsi développé ces dernières années. En effet, au début des années 2000, si les probabilités d'être inondé commençaient à être bien connues, les dommages et les pertes induites par l'inondation l'étaient beaucoup moins. Ainsi, il n'était pas possible d'étudier comment les exploitants choisissent leur niveau de risque en fonction de leur exposition et des risques encourus (Pivot et al., 2002).

Des modèles se développent donc aujourd'hui dans cette optique mais également suite à une inondation, pour pouvoir donner une estimation rapide des conséquences économiques sur les différents secteurs agricoles et appuyer les prises de décision relatives aux aides et indemnisation à apporter à ce secteur (Elliott et al., 2014).

Cette revue de littérature s'intéresse aux modèles de dommages et plus particulièrement aux courbes de dommages spécifiques à l'agriculture qui ont été développées pour estimer les conséquences des inondations sur le secteur agricole. Il est important de bien définir certaines caractéristiques des courbes existantes pour pouvoir les comparer et déterminer la méthodologie la plus adaptée aux besoins de notre étude. Les caractéristiques étudiées dans cette revue sont :

- l'**échelle d'analyse** qui dépend souvent de l'objectif dans lequel les fonctions ont été développées, c'est-à-dire dans le cadre d'un modèle à une échelle géographique macro (territoire national) ou micro (pour l'étude d'une zone géographique ou un projet particulier);
- le **périmètre** des pertes agricoles estimées par le modèle de dommages et le degré de détail dans l'analyse des dommages (désagrégation par type de culture par exemple);
- les **paramètres d'aléa** en entrée des courbes de dommages;
- les **caractéristiques de vulnérabilité** : les mesures d'adaptation ou de prévention pouvant être prises par les exploitants agricoles par exemple;
- le type d'**indicateur de dommages** utilisé;
- la **méthode de construction des courbes** : sur avis d'expert ou empirique.

### 3.2.1 L'échelle d'analyse

On peut distinguer deux grandes familles de modèles : les modèles qui se basent sur une échelle d'analyse macro et ceux qui se basent sur une échelle micro. Ce choix dépend souvent de l'objectif pour lequel le modèle a été développé.

La première famille correspond aux modèles globaux. L'objectif est de traiter l'ensemble des risques exposés à l'aléa inondation et de proposer une méthodologie et des courbes de dommages génériques applicables ou généralisables sur tout un territoire, souvent national (Penning-Rowsell et al., 2013; Kok et al., 2004; ICPR, 2001; FEMA, 2015; Thielen et al., 2008; Dutta et al., 2003; Du Plessis et Viljoen, 1998; Du Plessis et Viljoen, 1999; Gayler et al., 2001; Torterotot, 1993; Ledoux, 2010). Les approches développées dans le monde de l'assurance font généralement parties de cette famille car leurs besoins couvrent un territoire au moins national (AIR Worldwide, 2017). Par exemple, en parallèle de ce travail de thèse, CCR développe un modèle top-down sur les pertes de rendements agricoles, toutes cultures, afin de bénéficier d'une vision holistique des risques en agriculture.

Le risque agricole peut alors constituer alors souvent un module de dommage spécifique au sein d'un modèle plus large d'estimation des dommages des inondations traitant également d'autres risques tels que le bâti résidentiel, les entreprises ou les réseaux par exemple. Ces modèles se basent parfois sur l'adaptation, la mise en application et l'amélioration de fonctions d'endommagement pour l'agriculture déjà existantes (Hoes et Schuurmans, 2006; Jonkman et al., 2008).

Cependant, plusieurs instituts de recherche ont développé des méthodologies et des modèles de dommages spécifiques à l'agriculture à une échelle macro et ayant comme objectif de pouvoir les généraliser à un large territoire et dans plusieurs contextes (Deleuze et al., 1991; Blanc et al., 2010; Brémond, 2011). Ainsi, Agenais et al. (2013) ont développé des courbes de dommages génériques aux cultures intégrées dans un modèle appelé FLOODAM. Elles fournissent des estimations de dommages pour les pertes au matériel végétal, cultures et sol en fonction des caractéristiques agro-économiques de la zone géographique étudiée (données détaillées des charges, prix de vente, surfaces cultivées et rendement ainsi que le calendrier cultural). Via cette méthodologie, des fonctions de dommages nationales (périmètre France métropolitaine) de dommages ont été construites.

La deuxième famille correspond aux études spécifiques prenant la forme d'un modèle de dommage développé exclusivement pour le risque agricole, souvent pour une région ou pour des analyses coûts-bénéfices de projets ou de mesures de protection spécifiques.

C'est le cas des études menées par les instituts techniques d'agriculture dont l'objectif est de représenter les intérêts des agriculteurs, par exemple, dans l'implémentation de projets de gestion du risque d'inondation (Pivot et al., 2002; Brémond et al., 2013). L'objectif est alors le développement de courbes d'endommagement locales (comme Citeau, 2003; CEPRI, 2008). Le département de la Saône-et-Loire a implémenté et complété une méthode basée sur la compilation et l'adaptation d'études faite en 1994 par l'institut régional d'agriculture de Bourgogne (Dury et Didier, 2006). L'institut en charge de l'implémentation du plan de management des eaux de la Loire a développé une autre méthode (Devaux-Ros, 2000) qui a ensuite été adaptée pour le Rhône (Guillaumin et al., 2000). Une autre méthode a été proposée par des experts agricoles dans le Gard (Chambre

d'Agriculture du Gard, 2009) dont le but est d'inclure des catégories de dommages supplémentaires et de décrire les dommages en détails. Les études menées dans la Loire, le Rhône et la Saône-et-Loire sont proches d'un point de vue méthodologique, mais les courbes d'endommagement développées sont très spécifiques au contexte et à la région et elles ne peuvent donc pas faire l'objet d'une adaptation plus générale.

### 3.2.2 Les pertes prises en compte dans les modèles de dommages

Comme vu précédemment, les pertes au secteur agricole sont très variées (tableau 1.2) et les différentes études n'en incluent qu'une partie dans leur périmètre.

#### 3.2.2.1 Dommages directs

La plupart des études intègrent les pertes de récolte dans leur périmètre. La distinction entre les modèles se trouve dans le niveau de désagrégation des courbes d'endommagement par type de culture. Certaines études n'étudient qu'un seul type de culture. Ainsi, Morris et Hess (1988) se concentrent sur le pâturage et Duthion (1982) sur le maïs. Les modèles généraux (Kok et al., 2004; ICPR, 2001; FEMA, 2015; Hoes et Schuurmans, 2006 et Jonkman et al., 2008) n'utilisent souvent qu'une courbe générique de dommages pour estimer les pertes de récoltes pour tous types de cultures. Les modèles de LfUG (2005) et Hoes and Schuurmans (2006) font la distinction entre dommages aux terres arables (cultures) et prairies. Dans les études d'Erdlenbruch et al. (2007) et McDonald (1970), la question est simplifiée en deux types de cultures. Certains modèles, souvent les modèles de dommages développés spécifiquement pour le risque inondation, font la distinction entre un plus grand nombre de culture (Citeau, 2003; Dutta et al., 2003; Förster et al., 2008; AIR Worldwide, 2017). Le modèle HAZUS-MH (FEMA, 2015), qui se base sur le Agriculture Damage Assessment Model (AGDAM) développé par l'USACE (USACE, 1985) fait la distinction entre 40 types de cultures. Agenais et al. (2013) ont quant à eux, développé des courbes de dommages pour 14 types de cultures.

Les autres catégories de dommages directs sont traitées de façon beaucoup plus hétérogène. Ainsi, seules quelques études s'intéressent aux pertes de bétail (Devaux-Ros, 2000; Morris et Hess, 1988; Agenais et al. 2013). Devaux-Ros (2000) proposent une méthode pour évaluer le coût des pertes directes et des pertes de production du bétail du fait de l'inondation. Agenais et al. (2013) ont développé une méthodologie mais les courbes associées n'ont pas encore été développées.

Les dommages aux bâtiments agricoles, hangars ou serres et leurs contenus (outils de production, intrants de production et stocks) peuvent représenter une part importante des dommages au secteur agricole. Parmi les études qui incluent les dommages aux bâtiments agricoles, certaines n'utilisent pas de fonctions de dommages spécifiques pour les bâtiments agricoles mais utilisent des courbes d'endommagement développées pour les bâtiments résidentiels (Blanc et al., 2008, Erdlenbruch et al., 2007). Le modèle développé à CCR adopte deux méthodologies différentes pour l'estimation des dommages aux bâtiments résidentiels et professionnels qui sont les catégories dans lesquelles se trouvent les bâtiments des exploitations agricoles. Une fonction de dommages aux bâtiments professionnels a été construite à partir de la base sinistres dont dispose CCR. Dutta et al. (2003), Guillaumin et al. (2000), Devaux-Ros (2000), Brémond (2011) et à sa suite Agenais et al. (2013), proposent des courbes d'endommagement pour les bâtiments agricoles. De plus, dans les études de Guillaumin et al. (2000) et Devaux-Ros (2000), les

dommages aux bâtiments incluent les dommages aux machines. Plusieurs fonctions d'endommagement pour les bâtiments agricoles sont définies en fonction de la spécialisation de culture. La Chambre d'Agriculture du Gard, (2009), Brémond (2011) et Agenais et al. (2013) définissent les dommages au matériel et aux stocks entreposés dans les bâtiments séparément des dommages aux bâtiments.

Quelques études (Chambre d'Agriculture du Gard, 2009; Brémond, 2011 et Agenais et al., 2013) proposent une méthode pour évaluer les dommages aux sols des pâturages concernés. Cela inclut principalement le coût de restauration en cas d'érosion du sol et le coût induit par le nettoyage des dépôts sur le sol.

En fonction des cultures étudiées, les dommages au matériel végétal peuvent être importants (Brémond et al., 2013). Ce type de dommages concerne les arbres ou les plantes permanentes tels que les vignes, les vergers ou les cultures maraîchères pluri-annuelles par exemple. Certaines fonctions de dommages ont été développées pour la côte méditerranéenne française (Guillaumin et al., 2000, Chambre d'Agriculture du Gard, 2009; Agenais, 2010 et Brémond, 2011) ou sur la Loire (Devaux-Ros, 2000). Les dommages directs aux matériaux végétaux peuvent être évalués séparément mais ils sont généralement combinés avec l'évaluation des dommages induits, i.e. la perte de revenu sur plusieurs années jusqu'à ce que les vergers ou les vignes atteignent le niveau de productivité d'avant l'inondation (Agenais et al., 2013).

Certaines de ces catégories de dommages sont propres à chaque site et difficiles à estimer. Förster (2008) ont étudié les données collectées par les autorités dans les communes touchées par les inondations de 2002 en Allemagne afin de disposer d'un ordre de grandeur des pertes totales au secteur agricole et de la répartition des ces pertes entre les différents postes. Ils ont observé la répartition suivante :

- 66% pour les pertes de récolte;
- 11% pour les dommages aux bâtiments;
- 3% pour les dommages aux outils de production / machines;
- 7% pour les dommages aux stocks;
- 13% pour les coûts de nettoyage.

### 3.2.2.2 Dommages induits

La plupart des dommages induits ne peuvent être définis que si l'étude est conduite à l'échelle de l'exploitation. Les dommages aux exploitations agricoles prises comme un tout peuvent différer considérablement des dommages aux cultures car ces derniers peuvent être amplifiés ou compensés lorsqu'ils sont étudiés au niveau de l'exploitation. Elle peut être sujette à des perturbations ou des défaillances de son activité due à l'inondation via des effets dominos sur les opérations de l'exploitation. Ces effets dépendent de son organisation interne, de la disponibilité des ressources de production, des objectifs de l'exploitant pour l'exploitation et l'activité entrepreneuriale qui en découle. Cette échelle est rarement prise en compte dans les études sauf dans les études ex-post et conduites à une échelle micro (Bauduceau, 2001; Pivot et al., 2002; Posthumus et al., 2009) et dans les travaux de Brémond (2011). La difficulté de cet exercice réside dans le fait qu'il faille d'une part formaliser le système de management d'une exploitation et d'autre part, disposer des données permettant de connecter les différentes entités de l'exploitation - rattacher des parcelles agricoles à la bonne exploitation par exemple.

Morris et Hess (1988) ont développé une méthode pour estimer les dommages induits spécifiquement pour l'exploitation des herbages, qui est utilisée par le « Multi-Coloured Manual » (Penning-Rowsell et al., 2013). Cette méthode propose un modèle global de la relation entre les pâturages inondés et les conséquences sur la croissance du bétail. Les dommages aux produits de l'agriculture sont estimés à travers les coûts additionnels nécessaires pour continuer de nourrir et loger le bétail suite aux dommages aux pâturages et aux bâtiments. Pierson et al. (1994) mentionnent également les dommages induits mais ne proposent pas de méthode pour les estimer. Certains des dommages induits considérés dans ces études sont :

- la nourriture additionnelle pour le bétail ;
- le relèvement du bétail ;
- le coût de sécurisation d'eau potable pour le bétail si le réseau d'approvisionnement en eau potable est défaillant ;
- la réduction des ventes due à l'impossibilité de déplacer le bétail ;
- des ventes prématurées ou la diminution du nombre de bétail et des produits de l'élevage.

Les dommages induits sont les surcoûts de production nécessaires pour continuer ou reprendre l'activité. Concernant les cultures, Lacewell et al. (2006) prend en compte l'augmentation des coûts de production du fait de l'inondation tels que les traitements phytosanitaires supplémentaires. Agenais et al. (2013) adoptent une vision plus généraliste et l'objectif de la méthodologie est de prendre en compte les variations de charges auxquelles les exploitants agricoles doivent faire face suite à une inondation, notamment, pour ne citer que les principales :

- récolte ;
- semis ;
- traitements et produits phytosanitaires ;
- re-semis.

Brémond (2011) a développé une méthode, à l'échelle de l'exploitation, pour évaluer les dommages induits aux activités des exploitations du fait de l'augmentation de la main d'œuvre nécessaire pour la reprise de l'activité (nettoyage, réparations, etc) ainsi que les dommages aux machines. Cette méthode considère l'organisation initiale (sans l'inondation) et la réorganisation ultérieure après l'événement. La possibilité d'avoir recours à des ressources extérieures a ensuite été prise en compte dans une étude ultérieure (Brémond et Grelot, 2012). Si ces pertes sont des charges à l'échelle de l'exploitation, ces efforts de reconstruction peuvent avoir des effets positifs à l'échelle régionale : le besoin de main d'œuvre stimule l'emploi, l'achat de ressources extérieures stimule la consommation. Ces effets participent à la reprise économique que l'on peut parfois observer après une catastrophe.

### 3.2.2.3 Impacts Indirects

Les inondations peuvent impacter la rentabilité des exploitations agricoles. Cela peut être temporaire, lors d'inondations ponctuelles, ou de façon permanente, s'il y a une augmentation de la fréquence des crues. Cependant, une inondation ponctuelle mais de magnitude exceptionnelle peut menacer la viabilité financière d'exploitations agricoles vulnérables et de petites tailles. En même temps, en fonction de l'ampleur de l'événement, les inondations peuvent impacter l'économie locale voire régionale, avec

des conséquences sur l'emploi, le revenu et la valeur ajoutée (Penning-Rowsell et al., 2013).

Cette dernière approche macroéconomique peut être abordée à l'aide d'un modèle Input-Output. Ainsi, l'étude de Plessis et Viljoen (1999) estime les impacts indirects des inondations du cours inférieur de la rivière Orange en Afrique du Sud à des échelles régionales et nationales. Ils posent l'hypothèse que les dommages directs aux biens (bâtiments, sol, machines) qui nécessitent d'être reconstruits ou rachetés, ainsi que les dommages aux flux (récoltes), ont des conséquences sur les transactions et l'emploi dans les secteurs agricole et commercial. C'est également via un modèle Input-Output que le modèle HAZUS-MH estime les pertes économiques indirectes sur l'économie agricole (FEMA, 2015).

Le Multi-Coloured Manual distingue les deux échelles d'analyse (Penning-Rowsell et al., 2013) et de là, deux méthodologies, pour étudier les effets indirects des inondations. L'échelle de l'exploitation est étudiée via une analyse financière qui considère les impacts sur les revenus et les dépenses, exprimés aux prix du marché, en incluant certains coûts implicites tels que l'embauche de main d'œuvre familiale supplémentaire et bénévole nécessaire pour réduire les impacts de l'inondation mais comptabilisée aux prix du marché dans l'étude. Pour les cultures, l'indicateur comptable utilisé est la marge brute par hectare (mesure de la valeur de sortie) moins les coûts variables. L'échelle macroéconomique prend en compte les impacts sur les entreprises en dehors de la zone impactée par l'aléa, les biens non marchands ou l'environnement naturel. Une approche économétrique est alors adoptée. Les prix sont ajustés pour annuler les effets des taxes, aides de l'Etat ou les mesures interventionnistes sur le marché.

### 3.2.3 Les paramètres d'aléa

De nombreux paramètres d'aléa ont des impacts sur les pertes au secteur agricole : la date de survenance de l'événement, la hauteur d'eau, la durée de l'inondation, la vitesse du courant, les dépôts de polluants, l'érosion, les transports solides, les remontées souterraines, l'humidité du sol ou la salinité de l'eau en cas de submersion marine... Pour faire face aux besoins de modélisation, plusieurs études (Citeau, 2003 ; Brémond, 2011 ; Förster et al., 2008) ont essayé de déterminer les principaux paramètres d'aléa qui déterminent les dommages causés par les inondations sur les terres agricoles. Les paramètres retenus sont la date de survenance de l'événement, la hauteur d'eau, la durée de l'inondation, la vitesse du courant et les dépôts de polluants.

La particularité de l'agriculture par rapport aux autres catégories de dommages, par exemple les dommages au bâti, est l'importance de la date d'occurrence de l'inondation par rapport au cycle végétatif des plantes et des opérations critiques dans les champs (Penning-Rowsell et al., 2013, Brémond, 2011). Les inondations entre 4 et 6 semaines avant la récolte peuvent se traduire par une perte totale de la récolte, en particulier si les cultures sont totalement inondées. Par exemple, une inondation en juin/juillet génère plus de dommages pour les cultures d'été car elle survient juste avant la récolte alors qu'une inondation survenant fin août, soit juste après la récolte, génère beaucoup moins de dommages.

La durée de l'inondation a également une grande influence sur les impacts, bien que, comme vu précédemment, cela va dépendre de la date de survenance de l'inondation. La plupart des cultures peuvent récupérer d'une inondation d'une semaine ou moins

survenant durant la période de croissance de la plante, bien que les rendements risquent d'être réduits. Par contre, une inondation de plus d'une semaine se traduira par des dommages plus élevés, jusqu'au point où la récolte ne serait plus rentable si le produit de la récolte ne permet pas à l'agriculteur de couvrir les frais de récolte voire totalement détruite. Enfin, pour les cultures où le critère de qualité est crucial, comme les cultures maraîchères ou fruitières, une inondation, quelle que soit sa durée, y compris très courte, peut mener à une perte totale de production vendable. Au contraire, les prairies sont plus résistantes aux inondations d'hiver et peuvent tolérer des durées jusqu'à 1 mois voire plus en fonction de la variété. Cette durée est cependant de moins de 2 semaines au printemps et en été. Les inondations de longue durée peuvent avoir des conséquences sur le long terme si les récoltes sont retardées ou si les cultures sont replanifiées (Penning-Rowse et al., 2013).

#### 3.2.4 La prise en compte des caractéristiques de vulnérabilité

La vulnérabilité est ici entendue au sens large du terme. D'une part, la vulnérabilité comprend les caractéristiques agro-économiques de la région étudiée et d'autre part, les mesures d'adaptation pouvant être mises en place par les exploitants agricoles pour minimiser les pertes subies.

Cette notion de vulnérabilité des exploitations agricoles commence à émerger dans ce domaine de recherche. Ainsi, Barbut et al. (2010) ont cherché à identifier les critères de vulnérabilité des activités agricoles aux inondations. Ils ont ainsi identifié 47 critères, classés en 8 classes :

- macroéconomie ;
- environnement de l'exploitation ;
- structure du système de production ;
- degré d'exposition au risque ;
- trajectoire économique de l'exploitation ;
- psychologie - sociologie des exploitants ;
- paramètres hydrologiques influençant l'endommagement ;
- impact d'une inondation.

Dans les études menées pour des projets ou des régions spécifiques, les caractéristiques agro-économiques sont implicitement prises en compte, puisque les modèles de dommages développés le sont pour une zone géographique précise où les caractéristiques agro-économiques fluctuent peu. Cependant, les études dont l'objectif est de développer des courbes génériques pouvant être utilisées dans plusieurs contextes prennent rarement en compte les caractéristiques agro-économiques, bien qu'elles aient une influence importante sur les pertes lors d'une inondation. Air Worldwide (2017) a développé un facteur de vulnérabilité géographique à appliquer à la courbe d'endommagement pour prendre en compte les caractéristiques agro-économiques des territoires. Les courbes de dommages développées par Agenais et al. (2013) ont la particularité d'être générées via le modèle FLOODAM qui adapte les courbes de dommages aux caractéristiques agro-économiques décrites en entrée du modèle par l'utilisateur. Les caractéristiques agro-économiques considérées sont les données détaillées des charges, prix de vente, surfaces cultivées, rendements ainsi que le calendrier cultural.

La particularité des dommages à l'agriculture est également qu'il est possible pour l'exploitant agricole de prendre des mesures d'adaptation lui permettant de réduire ses

pertes totales. Cela nécessite de formaliser la façon dont l'exploitation est managée quand une inondation survient. Or, comprendre les décisions prises par un exploitant confronté à une inondation génère beaucoup de difficultés puisque que l'on a à faire à une décision humaine et non à un événement physique. La prise de décision d'un exploitant évolue à travers un processus complexe d'adaptation à son environnement sur lequel il manque d'information et donc où l'efficacité d'une décision logique peut être limitée. Les facteurs de décisions de l'exploitant dépendent de son apprentissage permanent sur ses ressources, ses objectifs son expérience - si l'exploitation a déjà été inondée et le cas échéant les pertes encourues - et des possibilités et contraintes de la situation telles qu'il les perçoit. On suppose donc également que l'exploitant prend des décisions rationnelles (Pivot, 2002).

USDA (1978) a listé certaines de ces mesures selon la période de l'année, par période bimensuelle, pour les pâturages et plusieurs types de cultures. Par exemple, il peut être possible de ressemer du blé d'hiver en octobre avec pas ou peu de réduction de rendement alors que cela peut être trop tard en novembre et la seule option est alors de semer une culture de printemps en substitut. Avec une vocation de généraliser leurs conclusions, Agenais et al. (2013) ont déterminé un ensemble de règles de décisions prises par les exploitants agricoles pour la poursuite de l'itinéraire cultural en fonction du type de culture et des caractéristiques d'aléa. En fonction des variations de rendements des cultures subies et de la période à laquelle survient l'inondation, l'exploitant agricole a deux options : la poursuite ou l'abandon de l'itinéraire cultural si le produit de la récolte ne lui permet pas de couvrir les frais de récolte. Pour chaque culture, des règles de décision simplifiées ont été construites. Lorsque l'itinéraire est abandonné et que la récolte n'est pas réalisée, la production est perdue en totalité, et les charges de récolte ne sont pas dépensées. Dans le cas des cultures annuelles, l'exploitant a alors la possibilité de procéder à un réensemencement de la même culture ou de semer une autre culture selon les possibilités à la date de prise de décision. De nouvelles charges sont alors engagées et une nouvelle production peut être valorisée, modifiant ainsi les dommages initialement prévus. Il est tenu compte du fait que les rendements des cultures semées ou plantées tardivement sont généralement moindres par rapport à un rendement normal. L'hypothèse est alors faite que les agriculteurs ne modifient leur assolement que l'année de survenue de l'inondation et qu'il n'y a pas de répercussion sur les années suivantes. Lorsqu'une nouvelle culture est semée, les possibilités envisageables sont données dans la méthodologie, ainsi que les règles permettant de faire des hypothèses pour le choix de l'une d'entre elles. Trois stratégies de replantation ont été définies dans le cas des cultures pérennes en fonction du pourcentage de matériel végétal perdu par unité de surface : les plants perdus ne sont pas remplacés, l'exploitant replante uniquement les plants perdus ou il choisit d'arracher l'ensemble des plants et de tout replanter. Pour chaque type de culture et stratégie, l'étude a estimé les coûts de replantation et les pertes de rendement sur le long terme.

### 3.2.5 Le type d'indicateur de dommage utilisé

En fonction de l'objectif de l'étude et du périmètre des dommages, l'indicateur utilisé pour quantifier les dommages peut varier. Les indicateurs que l'on retrouve le plus souvent dans les études sont (Brémond, 2011) :

- La **perte de rendement** est l'indicateur le plus utilisé. Il s'agit de l'estimation de la baisse du rapport entre les récoltes obtenues et les moyens mis en œuvre du fait de

- l'aléa (Poirée et Ollier, 1973; Duthion, 1982; Pierson et al., 1994; AIR Worldwilde, 2017);
- La **variation du produit brut** peut ensuite être directement estimée en appliquant le prix de vente à la variation de rendement due à l'inondation. Certains auteurs utilisent directement cette variation de produit brut comme une estimation des dommages aux cultures (Blanc et al., 2008; Chambre d'Agriculture du Gard, 2009; Consuegra Zammit, 1992; Deleuze et al., 1991; Dutta et al., 2003; Devaux-Ros, 2000; Erdlenbruch et al., 2007; Förster et al., 2008; Goulter et Morgan, 1983; Hoes et Schuurmans, 2006; McDonald, 1970). Cependant, ces deux premiers indicateurs ont comme limite principale qu'ils ne prennent pas en compte la variation des coûts de production dus à l'inondation (Brémond et al., 2013);
  - Les **marges brutes ou nettes** sont utilisées dans les études qui prennent également en compte la variation des charges (variables ou fixes) dans l'estimation des conséquences des inondations (Lacewell et Eidman, 1972; Lacewell et al., 2006);
  - La **perte de valeur ajoutée** est la perte de produit moins la variation dans les coûts de production induits par l'inondation. Lorsqu'une partie des cultures est détruite, une partie des coûts de production peut être économisée (récolte) alors que de nouvelles charges apparaissent (traitement, nettoyage ou labourage par exemple). La perte de valeur ajoutée est l'indicateur utilisé par Agenais et al. (2013).

L'indicateur le plus complet et préconisé par Brémond et al. (2013) pour estimer les conséquences des inondations sur l'agriculture est la perte de valeur ajoutée. Cela nécessite de collecter beaucoup d'information sur l'évolution normale des coûts de production sur l'année pour chaque type de culture prise en compte dans le modèle de dommage ainsi que les actions devant ou pouvant être entreprises par les exploitants agricoles pour faire face à une inondation et d'estimer leur coût. Plusieurs études ont donc essayé de s'approcher de la perte de valeur ajoutée en développant des indicateurs hybrides. Guillaumin et al. (2000) proposent donc deux estimateurs pour se rapprocher de la perte de valeur ajoutée sans avoir à collecter toute l'information nécessaire. Il est proposé d'utiliser le produit brut si l'inondation survient à la fin du processus de production et la marge brute si l'inondation survient au début. Cette solution serait adéquate sur la plupart des inondations survenant soit au début soit à la fin du cycle de production de la plante. C'est rarement le cas en réalité et cela pose donc problème sur le choix de l'indicateur à utiliser pour les inondations survenant au cours du cycle de production. En se basant sur les travaux de Morris et Hess (1988), le MultiCouloured Manual (Penning-Rowsell et al., 2013) recommande d'estimer les dommages aux cultures en utilisant la marge brute ajustée des coûts variables ayant été engagés et ne pouvant être évités en cas d'inondation. Si un changement permanent dans l'utilisation des sols agricoles est induit par un projet de gestion du risque d'inondation, il est alors conseillé de prendre en compte la variation des coûts fixes et les changements induits sur les marges nettes à l'échelle de l'exploitation agricole.

Sur la base des travaux de Brémond (2011), les courbes d'endommagement proposées par Agenais et al. (2013) essaient de s'approcher au plus près de la perte de valeur ajoutée. En effet, elles prennent en compte les charges variables évitées et le coût de certaines mesures d'adaptation en fonction de la date d'occurrence de l'inondation.

Enfin, certaines études essaient également d'estimer les pertes financières. C'est le cas notamment des modèles développés dans le secteur de l'assurance (AIR Worldwide, 2017) qui appliquent les caractéristiques des contrats d'assurance aux dommages estimés

pour obtenir une estimation des pertes assurées. Le modèle top-down sur les pertes de rendements agricoles développé à CCR adopte également cette démarche.

### 3.2.6 Méthode de construction de la (des) courbe(s) : sur avis d'expert ou empirique

La dernière caractéristique prise en compte dans cette étude est la méthodologie de construction et de calibrage des courbes d'endommagement. Les courbes peuvent en effet se baser sur des bases de données d'historique de sinistralité, on parle alors de courbes d'endommagement empiriques, ou sur des avis d'experts.

La première méthodologie consiste à construire les courbes d'endommagement à partir de données d'expérience. Ainsi, Poiree et Ollier (1973) et Duthion (1982) ont construit leurs courbes à partir d'expériences mises en place pour étudier les pertes de culture dues aux inondations. Förster et al., 2008 ont construit leur fonction de dommage empirique à partir de données de dommages fournies par des compagnies d'assurance (HOWAS). AIR Worldwide (2017) s'est basé sur des retours d'expérience détaillant les dommages observés lors d'événements historiques pour calibrer leurs courbes.

L'approche par avis d'experts est une approche ex ante qui implique d'auditer de nombreux experts sur leur estimation des conséquences de différentes caractéristiques d'aléa et de vulnérabilité sur les enjeux étudiés. Il s'agit donc ici de mener une étude as if permettant d'identifier les facteurs critiques affectant la sensibilité des dommages. Il est ensuite possible de valider la démarche en comparant les résultats obtenus avec les données d'expérience. C'est la démarche adoptée par Agenais et al. (2013). Des enquêtes auprès d'experts ont été réalisées pour collecter les informations permettant de construire les fonctions d'endommagement.

### 3.2.7 Conclusion

Les courbes de dommages à l'agriculture se prêtent moins à des généralisations que d'autres catégories de dommages du fait notamment de la complexité des systèmes agricoles existants, de la spécificité de chaque exploitation agricole, des pratiques agricoles régionales ou de la variabilité géographique et temporelle des conditions agro-économiques.

Les courbes de dommages à l'agriculture doivent donc être développées pour chaque culture et période de l'année pour prendre en compte l'ensemencement retardé, les coûts de replantation, les coûts de nettoyage et de remise en état des parcelles, les économies dues aux frais non encourus.

### 3.3 LA MODÉLISATION DES PERTES AGRICOLES DÉVELOPPÉE POUR CCR

#### 3.3.1 Démarche de modélisation et périmètre étudié

##### 3.3.1.1 Démarche de modélisation adoptée

Le modèle développé dans cette étude s'intègre dans la démarche de modélisation physique sur exposition développée à CCR. L'objectif est de développer un modèle simple d'utilisation pour CCR où toutes les étapes de modélisations sont automatisées et peuvent donner des résultats rapidement pour n'importe quel événement inondation survenant sur le territoire métropolitain.

Le travail effectué pour ajouter l'agriculture aux enjeux modélisés à CCR porte sur le développement de modèles de vulnérabilité et de dommages spécifiques à l'agriculture. Ces modèles sont décrits dans les paragraphes suivants. Le modèle de vulnérabilité a été développé à partir du registre parcellaire graphique et le module de dommages a été développé à partir des courbes de dommages à l'agriculture développées par le groupe de travail national Analyse Coûts-Bénéfices inondations à travers les travaux de l'IRSTEA (Agenais et al., 2013). Le modèle d'aléa utilisé est le modèle développé par CCR depuis 2003 et décrit dans le chapitre 1.

##### 3.3.1.2 Périmètre étudié

Sur la base de la précédente bibliographique, il a été décidé de construire le modèle en se basant sur le modèle FLOODAM développé par Agenais et al. (2013). Le tableau 3.2 reprend l'inventaire des pertes pouvant être subies par une exploitation agricole lors d'une inondation. Les pertes indiquées en italiques sont les pertes déjà modélisées dans le module de dommages aux bâtiments non-résidentiels de CCR et les pertes indiquées en gras sont les pertes qui sont modélisées dans ce module.

TABLE 3.2 – Classification des dommages agricoles lors d'inondations

	Instantané (juste après l'inondation)	Induit (plus tard après l'inondation)
<b>Direct</b> (du à l'exposition à l'inondation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>— <b>les pertes de récoltes et les baisses de rendement,</b></li> <li>— <b>dommages ou destruction de plantes permanentes (vignoble, verger),</b></li> <li>— mort et blessures au bétail,</li> <li>— perte de produits de bétail (ex. lait, œufs),</li> <li>— <b>dommages au sol,</b></li> <li>— <i>dommages aux bâtiments,</i></li> <li>— dommages aux machines et aux équipements,</li> <li>— <i>dommages aux matériaux stockés (inputs, nourriture pour animaux et fourrage),</i></li> <li>— dommages aux infrastructures internes à l'exploitation agricole (ex. routes).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— <b>perte de valeur ajoutée due à la perte de rendement dans la première année après de replantation du matériel végétal permanent (verger, vignoble) ou le réensemencement des pâturages,</b></li> <li>— perte de valeur ajoutée due à l'indisponibilité de facteurs de production (outils de production, inputs),</li> <li>— coût du déménagement ou de la vente prématurée du bétail,</li> <li>— coût de la nourriture additionnelle pour le bétail,</li> <li>— réduction de la taille du troupeau.</li> </ul>
<b>Indirect</b> (non directement du aux eaux d'inondation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>— augmentation du temps de transport du fait des infrastructures endommagées,</li> <li>— retard ou annulation des approvisionnements provenant des zones inondées (inputs, outils de production, etc).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— perte de valeur ajoutée en dehors de la zone inondée due aux pertes d'exploitation des assets dans la zone inondée,</li> <li>— perte de valeur ajoutée en dehors de la zone inondée due aux dommages aux infrastructures.</li> </ul>

Source : Brémond et al. (2013)

L'objectif du modèle de pertes agricoles est d'estimer, dans la lignée des travaux d'Agenais et al. (2013), la perte de valeur ajoutée pour le secteur agricole lors de la survenance d'un événement inondation en se concentrant aujourd'hui sur les cultures. Le bétail est aujourd'hui exclu du périmètre du modèle.

Comme présenté dans le tableau précédent, cinq postes sont modélisés dans ce module de dommages :

- les dommages au sol ;
- les pertes de fonds en matériel végétal ;
- les frais de replantation du matériel végétal ;
- les pertes de récoltes et les baisses de rendement sur l'année de l'événement ;
- les pertes de rendement différé.

Premièrement, il s'agit d'estimer la perte de valeur ajoutée due aux pertes de récoltes et aux baisses de rendement. Si la récolte est détruite, les charges auxquelles va devoir faire face l'exploitant va changer : la remise en état des parcelles va se substituer à la récolte par exemple. De plus, en fonction de la situation, l'exploitant peut décider d'actions qui engendreront de nouvelles charges mais également de nouveaux revenus. Par exemple, si l'exploitant a été prévenu suffisamment en avance, il peut décider d'une récolte anticipée. Après l'événement, il peut décider de réensemencer ses parcelles avec la même culture ou une nouvelle, en fonction du calendrier agricole. Ces variations des charges et des stratégies d'adaptation doivent être prises en compte dans le modèle développé pour estimer des pertes de valeur ajoutée.

Le sol des parcelles peut subir des dégâts du fait d'une inondation. La remise en état peut consister en des opérations mécaniques (nettoyage, labour, nivellement, apport de terre en cas d'érosion) ou en des apports d'amendement (matière organique, gypse) selon les dégâts causés par l'aléa. Le sol peut également être pollué si l'eau d'inondation transporte des polluants. Seules les opérations mécaniques sont traitées ici. Le montant des dommages au sol est estimé par le coût des travaux à effectuer lui-même estimé par les coûts de main d'œuvre, carburant et location d'équipement. Les caractéristiques d'aléa utilisées pour estimer les dommages au sol sont :

- la vitesse du courant à l'origine d'érosion forte ou du dépôt de grandes quantités de débris par exemple ;
- la hauteur d'eau qui détermine également la quantité de débris transportés par l'inondation.

Les inondations peuvent abîmer voire détruire les plantes pérennes par arrachage ou asphyxie. L'exploitant perd alors la valeur de fonds de son matériel végétal. Les cultures concernées sont : les vignes, les vergers, les cultures maraîchères pluriannuelles (asperges, rhubarbe, etc.), les cultures horticoles, les plantes aromatiques pluriannuelles, les cultures de petits fruits pluriannuelles, les prairies. D'une part, cela engendre des coûts supplémentaires pour l'exploitant qui peut avoir à arracher et replanter tout ou partie de son matériel végétal. D'autre part, il peut avoir à faire face à une baisse de rendement de son matériel végétal sur une voire plusieurs années.

La perte de valeur ajoutée due à l'indisponibilité des facteurs de production n'est pas incluse dans ce modèle car cela nécessiterait de l'information détaillée sur les exploita-

tions agricoles telle que leur organisation et les parcelles associées à une exploitation or nous ne disposons pas de cette donnée aujourd'hui.

Les inondations peuvent avoir des impacts indirects sur des activités agricoles qui ne sont pas situées dans la zone impactée. Il peut en effet y avoir des impacts en amont et en aval de la chaîne de production. En amont, les exploitants peuvent subir la défaillance de l'un de leur fournisseur ce qui a ensuite un impact sur leur activité. En aval, les secteurs économiques très dépendants du secteur agricole peuvent également être impactés : si les récoltes sont détruites, les industries agro-alimentaires dépendantes de ces exploitations devront trouver des moyens alternatifs de se fournir sur les marchés. Ces pertes indirectes ne sont pas traitées dans ce modèle mais le seront dans un modèle plus général de pertes indirectes.

### 3.3.2 Modèle de vulnérabilité

Comme présenté dans le paragraphe précédent, l'objectif de ce modèle est de recenser l'ensemble des risques agricoles du périmètre, leur localisation géographique précise ainsi que les caractéristiques nécessaires à l'estimation des dommages. Dans notre cas, il s'agit du type de culture pratiquée sur les zones agricoles exposées à l'événement inondation.

#### 3.3.2.1 Données géographiques d'occupation agricole

Compte tenu du périmètre des pertes étudiées dans le modèle, à savoir les conséquences sur les récoltes, l'information sur l'exposition devant être collectée concerne principalement les parcelles agricoles et les cultures qui y sont pratiquées. L'objectif ici est de faire l'inventaire des bases de données existantes et de choisir la base la plus adaptée à nos besoins. Les trois principales bases de données sur l'utilisation des sols agricoles sur le territoire métropolitain que nous avons recensées sont la base Corine Land Cover, celle du Registre Parcellaire Graphique et celle de l'Agreste, l'agence du ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt chargée de la statistique, l'évaluation et la prospective agricole.

##### a. Corine Land Cover

Corine Land Cover (CLC) est une base de donnée européenne d'occupation biophysique des sols. Ce projet est piloté par l'Agence européenne de l'environnement et la commission européenne et fait partie du champ de la directive européenne INSPIRE établissant une infrastructure d'information géographique dans l'Union Européenne. La partie française de cette base de données (production, maintenance et diffusion) est réalisée par le Service de l'observation et des statistiques du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) du Ministère de l'Écologie (MEDDE). Quatre versions ont été produites : 1990, 2000 puis tous les 6 ans, à savoir 2006 et 2012.

L'objectif est de développer une base de données homogène sur tous les pays de l'Union Européenne (UE) permettant la cartographie de l'ensemble du territoire de l'UE, et pouvant être mise à jour régulièrement afin de mener des études de suivi et de gestion de l'environnement ou d'aménagement de l'espace aux niveaux national et européen. L'élaboration de cette nomenclature d'occupation du sol ne pouvait donc pas comporter de postes ambigus et a par conséquent été orientée sur l'occupation biophysique du sol

et non sur son utilisation. Elle privilégie donc la nature des objets (forêts, cultures, surfaces en eau, roches affleurantes...) plutôt que leur fonction socio-économique. Ce qui représente une limite dans le cadre de notre étude. CLC repose sur une nomenclature hiérarchisée en 3 niveaux. Elle comprend 44 postes répartis selon 5 grands types d'occupation du territoire (<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>) :

- territoires artificialisés ;
- territoires agricoles ;
- forêts et milieux semi-naturels ;
- zones humides ;
- surfaces en eau.

Dans le détail, pour les territoires agricoles, la nomenclature est la suivante :

- Terres arables :
  - Terres arables hors périmètres d'irrigation : cultures annuelles pluviales, y compris les jachères, incluses dans un système de rotation. Y compris les cultures irriguées occasionnellement par aspersion, sans équipement permanent ;
  - Périmètres irrigués en permanence : cultures irriguées en permanence ou périodiquement, grâce à une infrastructure permanente (canal d'irrigation, réseau de drainage et autres installations). Une grande partie de ces cultures ne pourrait pas être cultivée sans l'apport artificiel d'eau. Non compris les surfaces irriguées occasionnellement ;
  - Rizières : Surfaces aménagées pour la culture du riz. Terrains plats avec canaux d'irrigation. Surfaces régulièrement recouvertes d'eau.
- Cultures permanentes :
  - Vignobles : Surfaces plantées de vignes ;
  - Vergers et petits fruits : Parcelles plantées d'arbres fruitiers ou d'arbustes fruitiers : cultures pures ou mélanges d'espèces fruitières, arbres fruitiers en association avec des surfaces toujours en herbe. Y compris les châtaigneraies et les noiseraies ;
  - Oliveraies : Surfaces plantées d'oliviers, y compris oliviers et vignes sur la même parcelle.
- Prairies :
  - Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole : Surfaces enherbées denses de composition floristique constituée principalement de graminées, non incluses dans un assolement. Principalement pâturées, mais dont le fourrage peut être récolté mécaniquement. Y compris des zones avec haies (boisements).
- Zones agricoles hétérogènes :
  - Cultures annuelles associées à des cultures permanentes : Cultures temporaires en association avec des cultures permanentes sur les mêmes parcelles ;
  - Systèmes culturels et parcellaires complexes : Mosaique de petites parcelles de cultures annuelles diversifiées, de prairies et/ou de cultures permanentes complexes, avec éventuellement des maisons et jardins épars ;
  - Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants : Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des zones naturelles ou semi-naturelles (y compris des zones humides, des plans d'eau ou des affleurements rocheux) ;
  - Territoires agroforestiers : Cultures annuelles ou pâturages sous couvert arboré composé d'espèces forestières.

CLC fournit deux types de bases produits :

- Les bases complètes, elles découpent le territoire en polygones de plus de 25 hectares ayant chacun un code de la nomenclature ;
- Les bases de changements qui cartographient les changements de plus de 5 hectares intervenus entre deux dates. Chaque polygone de changement contient le code d'occupation du sol initial et final.

Dans le cadre de notre étude, seule le premier produit nous intéresse.

CLC est obtenue par photo-interprétation humaine d'images satellites de précision 20 mètres MEDDE (2009). La création de la base de données s'appuie également sur plusieurs sources exogènes : les bases de données ORTHO et CARTO de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) et diverses images et bases de données complémentaires. Le travail consiste à transformer une donnée « raster » (ensemble de pixels de même taille) en une donnée vectorielle, c'est-à-dire une partition du territoire en polygones ayant une taille supérieure à 25 hectares et un code d'occupation du sol. La figure 11 décrit le principe de la photo-interprétation :

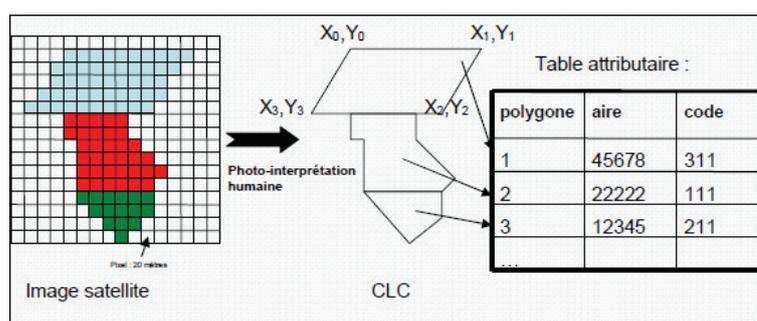


FIGURE 3.3 – Schéma du principe de la photo-interprétation

Source : MEDDE (2009)

La base est à une échelle d'utilisation au 1/100 000. Ce choix d'échelle est un compromis permettant un bon suivi de l'occupation du sol au niveau national ou européen avec des coûts et des délais de productions acceptables. Des limites d'usage découlent de ce choix : la gestion locale d'espaces sensibles ou la surveillance de territoires précis relèvent d'échelles plus précises comme le 1/50 000 ou le 1/25 000 et nécessitent la description d'unités de moins de 25 hectares. Cette donnée n'est donc pas adaptée à une utilisation à un niveau géographique fin, par exemple à la parcelle agricole comme le nécessite notre étude.

## b. Base de donnée de l'Agreste

Dans le cadre de la réglementation statistique de l'UE et selon les recommandations des Nations Unies, tous les pays de l'UE doivent mener un recensement agricole tous les 10 ans. L'objectif est de permettre une mise en perspective des agricultures européennes. Le dernier recensement agricole français s'est déroulé d'octobre 2010 à avril 2011 (les précédents en 2000, 1988, 1979, 1970) et a été piloté par l'Agreste (Agreste, 2011). Il s'agissait de relever l'orientation technico-économique de chaque exploitation, c'est à dire la production dominante de l'exploitation, déterminée selon la contribution de chaque

surface ou cheptel à la production brute totale.

La réalisation du recensement s'est effectuée à l'échelon régional par les services statistiques des directions régionales de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (Draaf). Les informations d'origine administrative se sont substituées aux questions posées aux exploitants à chaque fois que cela était possible puis des enquêteurs ont rendu visite aux exploitants agricoles et ont rempli, avec eux, un questionnaire. Les données recueillies relèvent de 8 grandes thématiques :

- les cultures et superficies cultivées ;
- l'élevage et le cheptel ;
- les modes de protection des cultures ;
- l'équipement des exploitations ;
- la diversification des activités (tourisme vert...) ;
- la commercialisation des produits (AOC, vente directe aux consommateurs...) ;
- l'emploi (salarial, emploi familial...) et le niveau de formation de l'exploitant ;
- la gestion de l'exploitation.

La publication des résultats est faite selon la nomenclature agrégée suivante :

- céréales et oléoprotéagineux (COP) ;
- cultures générales (autres grandes cultures) ;
- maraîchage ;
- fleurs et horticulture diverse ;
- viticulture (appellations et autres) ;
- fruits et autres cultures permanentes ;
- bovins lait ;
- bovins viande ;
- bovins mixte ;
- ovins et caprins ;
- autres herbivores ;
- porcins ;
- volailles ;
- granivores mixtes ;
- polyculture et polyélevage.

Cependant, les règles du secret statistique ne permettent pas de diffuser les informations individuelles recueillies telles quelles. Elles sont utilisées uniquement par les services de la statistique agricole et ne sont transmises à aucun autre service de l'État. Elles ne sont diffusées que sous forme agrégée et localisées à la commune du siège de l'exploitation. Cela implique deux limites. D'une part, les chiffres d'une commune doivent être interprétés avec prudence, une exploitation pouvant exercer son activité sur plusieurs communes - d'autant plus que des méthodes de brouillage ont été utilisées pour garantir l'anonymat des informations individuelles. D'autre part, notre étude nécessite des données à une échelle beaucoup plus fine que la commune. En effet, l'objectif est de travailler à une échelle de précision homogène avec les autres modèles d'exposition développés à CCR et de disposer de données permettant une plus grande flexibilité du modèle en termes de sorties possibles et d'évolutions futures (possibilité d'intégrer les données de portefeuille de cédantes par exemple).

### **c. Le Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA)**

Le RICA est un instrument permettant d'évaluer le revenu des exploitations agricoles et l'impact de la politique agricole commune mis en place à l'échelle de l'Union européenne et géré en France par l'Agreste. Les données RICA fournissent par région administrative (pour conserver l'anonymat des agriculteurs) et par culture, un échantillon d'agriculteurs représentatif de la région. La taille de l'échantillon est fonction de la taille de la région et de la surface occupée par la culture sur la région. Par exemple, si la culture n'est que très peu représentée dans la région en termes de surface occupée, le nombre d'agriculteur cultivant cette culture est très faible sur l'échantillon (il peut être inférieur à dix, c'est, par exemple, le cas des pommes dans la région Lorraine où seulement deux agriculteurs sont présents dans l'échantillon. Pour chaque exploitation agricole, nous avons la surface et la production de la culture en question sur la région concernée. On note que pour les surfaces, celles-ci sont en classes et non en nombre : c'est-à-dire que par exemple la classe notée numéro 1 correspond à une surface de 0 à 5 hectares.

#### **d. Le Registre Parcellaire Graphique**

Le Règlement communautaire (CE) n.1593/2000 a institué l'obligation, dans tous les États Membres, de localiser et d'identifier les parcelles agricoles. Pour répondre à cette exigence, la France a mis en place le Registre Parcellaire Graphique (RPG) qui est un système d'information géographique permettant l'identification des parcelles agricoles. Il est produit par l'Agence de service et de paiement (ASP), principal organisme payeur de la Politique Agricole Commune (PAC) pour la France. En effet, ces informations sont notamment utilisées pour instruire et enregistrer les dossiers de déclaration pour les aides dans le cadre de la PAC et, la validation de ces déclarations individuelles ouvre le droit au versement des aides de la PAC.

Ainsi, chaque année, les agriculteurs adressent à l'administration un dossier de déclaration de surfaces qui comprend notamment le dessin des îlots de culture qu'ils exploitent et les cultures qui y sont pratiquées. La localisation des îlots se fait à l'échelle du 1 :5000 sur le fond photographique de la BD ortho de l'IGN et leur mise à jour est annuelle. Ces îlots sont des regroupements de parcelles contiguës d'une même exploitation, portant une ou plusieurs cultures, généralement délimités par des éléments facilement repérables et permanents : chemins, haies, ruisseaux, etc. ; ce sont donc des unités de terrain exploitées par un même agriculteur mais pouvant contenir plusieurs cultures. Ces exploitants précisent les cultures qui sont pratiquées sur ces îlots, ainsi que les surfaces associées. Le RPG est donc le dessin des îlots cultureux des exploitants agricoles qui déposent des dossiers de demandes d'aides liées aux surfaces et non des parcelles.

Cependant, le RPG ne décrit pas la couverture de la totalité de l'espace agricole, compte tenu de la procédure déclarative à laquelle il répond. Le RPG ayant été développé pour permettre d'attribuer les aides de la PAC, seules les exploitations qui possèdent au moins une parcelle faisant l'objet d'une aide du 1<sup>er</sup> pilier de la PAC (soutien des marchés et des prix agricoles) ou du 2<sup>nd</sup> pilier de la PAC (développement rural) doivent déclarer leurs parcelles. Ceci exclut du RPG les exploitations spécialisées dans des cultures non aidées, notamment les vignes ou les cultures fruitières. Mais, lorsqu'un exploitant dépose un dossier, il est obligé de déclarer l'ensemble de ses surfaces, et non uniquement les surfaces aidées. S'il existe des « trous » dans le RPG correspondant aux exploitations qui ne déposent pas de dossier, il y a tout de même une bonne représentation de l'usage des sols agricoles pour l'ensemble des agriculteurs qui déposent un dossier (tableau 10).

Le RPG est une œuvre collective dont la propriété intellectuelle est partagée entre l'ASP et le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF). Dans le cadre de l'application de la directive européenne INSPIRE, la diffusion par l'ASP des données du RPG peut être réalisée suivant six niveaux d'information et d'anonymisation, décrits dans le tableau 9 (Cantelaube, 2011).

TABLE 3.3 – Niveau d'anonymisation des données attributaires associées aux îlots RPG

<b>niveau 1</b>	Données graphiques avec un identifiant numérique et non significatif (anonyme) par îlot
<b>niveau 2</b>	Données du niveau 1 avec la commune de localisation de l'îlot, les cultures déclarées et leurs surfaces décrites en 28 groupes de cultures (occupation du sol)
<b>niveau 3</b>	Données du niveau 2 avec pour chaque îlot, sa surface de référence, s'il y a au moins une parcelle irriguée ou non, et les caractéristiques de l'exploitation (anonymisées) : forme juridique, classe d'âge pour les exploitants individuels, surface déclarée, département de rattachement administratif
<b>niveau 4</b>	Données du niveau 3 avec par exploitation un identifiant numérique et non significatif
<b>niveau 5</b>	Données du niveau 4 avec nom ou raison sociale de l'exploitant
<b>niveau 6</b>	Données du niveau 5 avec régime et montant des aides

Source : [www.data.gouv.fr](http://www.data.gouv.fr)

Nous avons accès aux données de niveau 2. Les données disponibles, pour un département métropolitain donné, sont les contours des îlots « anonymisés » du RPG et leur occupation culturelle représentée par le groupe de cultures majoritaire de l'îlot. Le RPG est mis à jour chaque année. Le dernier disponible au moment de notre étude correspond aux données 2012. Aujourd'hui, les RPG 2013 et 2014 sont disponibles.

En pratique les îlots sont représentés par des polygones SIG (vecteur), au format *shapefile*, identifiés de manière unique chaque année. Le système de projection pour la France métropolitaine est Lambert 2 étendu (2007-2008) puis Lambert 93 (depuis 2009). L'échelle de saisie est 1 :5000, et les échelles minimale et maximale d'utilisation sont le 1 :2500 - 1 :10000. Le contenu attributaire fourni est la valeur du code du groupe de cultures majoritaire dans l'îlot (selon une nomenclature en 28 classes, tableau 10) et sa surface. Or, nous l'avons vu, un îlot peut contenir plusieurs parcelles avec des cultures différentes. Cela représente donc une des limites du RPG : il ne descend donc pas au niveau de la parcelle culturelle agricole or, sur un îlot, il peut y avoir plusieurs types cultures.

TABLE 3.4 – Nomenclature RPG

Valeur	Libelle
0	Pas d'information
1	Blé tendre
2	Mais grain et ensilage
3	Orge
4	Autres céréales
5	Colza
6	Tournesol
7	Autres oléagineux
8	Protéagineux
9	Plantes à fibres
10	Semences
11	Gel (surfaces gelées sans production)
12	Gel industriel
13	Autres gels
14	Riz
15	Légumineuses à grains
16	Fourrage
17	Estives landes
18	Prairies permanentes
19	Prairies temporaires
20	Vergers
21	Vignes
22	Fruits à coque
23	Oliviers
24	Autres cultures industrielles
25	Légumes-fleurs
26	Canne à sucre
27	Arboriculture
28	Divers

Source : [www.data.gouv.fr](http://www.data.gouv.fr)

#### e. Comparaison des bases de données et choix

Avant toute chose, les données RICA étant des données comptables non géographiques et basées sur un échantillon, elles ne conviennent pas à nos besoins. Le choix doit donc se faire entre les données de CLC, du RPG et du recensement de l'Agreste.

Le tableau suivant compare et synthétise les informations à prendre en compte dans le choix de la base de données d'exposition la plus adaptée à nos besoins : la résolution, la nomenclature et l'exhaustivité. Pour ce dernier indice, les surfaces agricoles des trois bases de données sont comparées à la surface agricole utile (SAU) de l'Insee qui comprend les terres arables (y compris pâturages temporaires, jachères, cultures sous abri, jardins familiaux...), les surfaces toujours en herbe et les cultures permanentes (vignes, vergers...) ([www.insee.fr](http://www.insee.fr)).

TABLE 3.5 – Comparaison des bases de données géographiques sur l'agriculture

Donnée	Résolution	Nomenclature	Exhaustivité comparé à la SAU
<b>Corine Land Cover 2012</b>	Résolution : échelle 1/100000 (mailles de 250*250m)	11 catégories de cultures	100%
<b>Agreste 2010</b>	Échelle communale	15 catégories et cultures et d'élevage	100%
<b>Registre Parcellaire Graphique 2012</b>	Résolution : échelle 1/5000 (format vecteur)	28 catégories de cultures	98%

Bien que les bases de données CLC et Agreste fournissent la meilleure exhaustivité, elles présentent des particularités qui les rendent inadaptées à notre étude.

La nomenclature d'occupation du sol de CLC est orientée sur l'occupation biophysique du sol et non sur son utilisation ce qui rend très difficile de lui adapter des courbes d'endommagement contrairement aux nomenclatures Agreste et RPG, qui fournissent des classifications par type de culture. Le RPG fournit la nomenclature la plus détaillée des cultures.

De plus, la base de données du recensement 2010 de l'Agreste fournit les données agrégées à la commune ce qui est une échelle trop large pour notre étude. Si le RPG ne fournit pas les données à la parcelle, les îlots représentent une entité géographique assez fine pour nos besoins.

Cette base de données constitue donc une description à grande échelle et mise à jour annuellement de la majorité des terres agricoles. L'exhaustivité du RPG restant satisfaisante, il s'agit donc de la représentation géo-localisée disponible de l'espace agricole français la plus adaptée à nos besoins. La figure ci-dessous donne un exemple de la donnée fournie par le RPG :

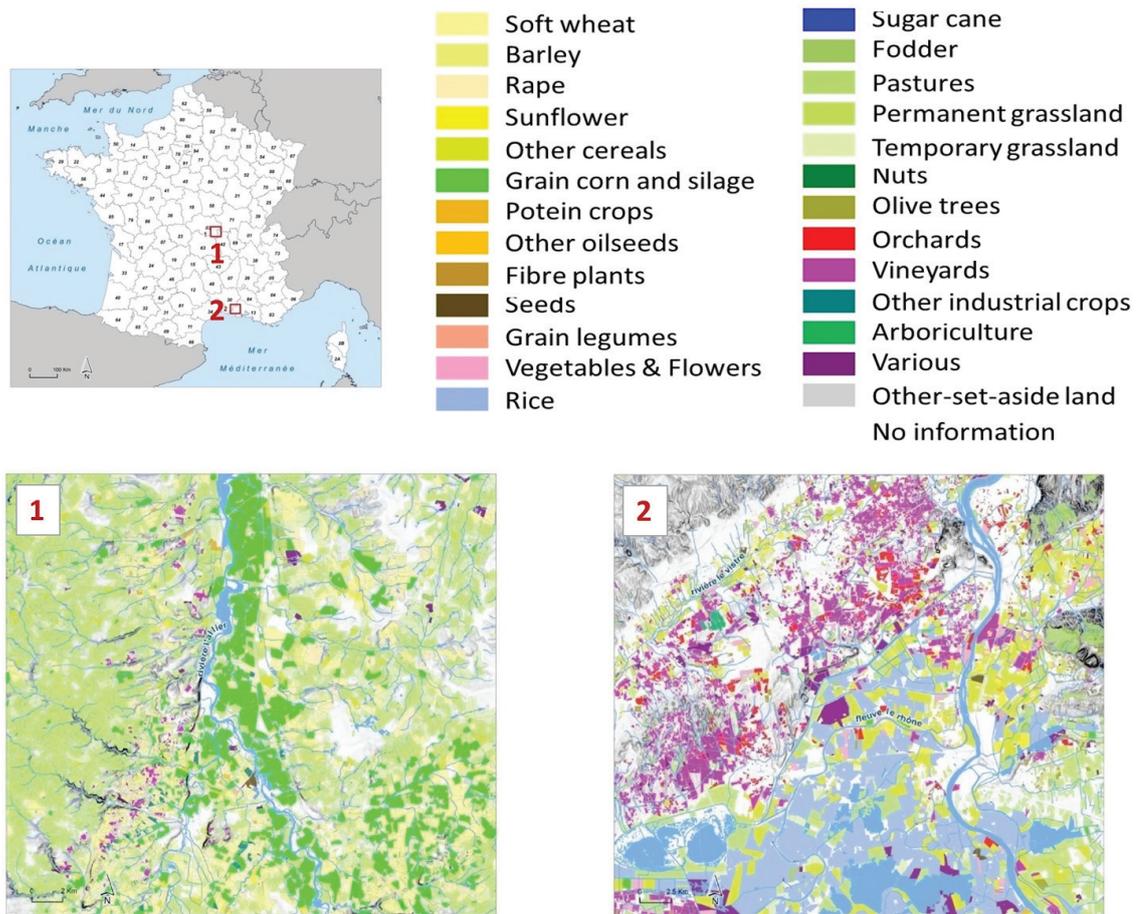


FIGURE 3.4 – Exemple des données fournies par le RPG

### 3.3.2.2 Développement du modèle d'exposition

Le modèle souhaité par CCR impose plusieurs contraintes. Premièrement, le modèle doit pouvoir être utilisé pour toute inondation survenant en France métropolitaine. Deuxièmement, une estimation doit pouvoir être donnée quelques jours après l'événement. Or, ce délai inclut tout le processus de modélisation : la modélisation de l'aléa, de la vulnérabilité et des dommages. Le périmètre géographique large et l'efficacité requise rendent nécessaire de réduire la donnée vectorisée du RPG.

Ainsi, à l'aide des outils ArcGIS, la donnée vectorisée du RPG a été transformée en une grille de mailles 500m\*500m. Pour chaque maille, nous avons l'information de la surface occupée par chacune des 26 catégories de cultures du RPG (les gels ayant été regroupés en une seule catégorie, ainsi que les catégories "Divers" et "Pas d'information"), exprimée en pourcentage de la superficie de la maille occupée par chaque catégorie de culture. Cette méthode, développée par JBA consulting pour l'exposition de l'île de la Réunion (Millinship, 2015), est décrite dans la figure suivante :

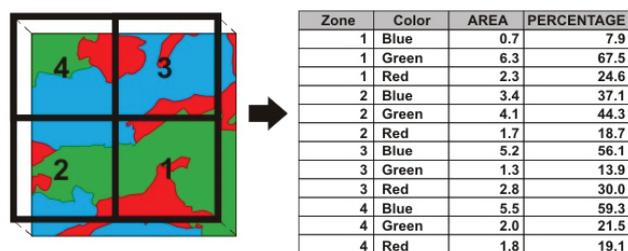


FIGURE 3.5 – Traitement SIG des données du RPG

Le choix de la taille de la maille a un impact sur les résultats du modèle. Plus la taille de la maille choisie sera grande, plus le modèle d’exposition perdra de la précision, comme décrit dans la figure suivante :

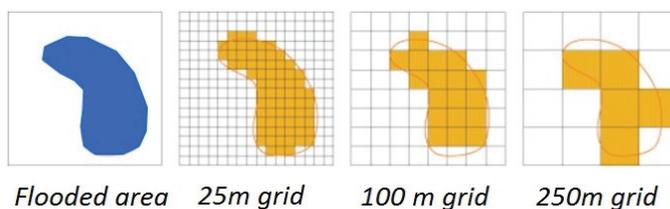


FIGURE 3.6 – Représentation schématique de l’impact de la taille de la maille d’exposition sur le lien avec l’aléa

Cependant, une taille de maille trop fine peut être contre-productive en termes de temps de traitement et même de précision globale du modèle. En effet, le modèle d’aléa présente des incertitudes sur les zones inondées et les caractéristiques de l’aléa. L’utilisation d’une taille de maille assez large permet de lisser une partie des incertitudes du modèle d’aléa même si cela implique de perdre de la précision sur le modèle d’exposition.

Une étude de sensibilité du modèle à la taille de maille choisie devra être menée, et la taille de maille permettant de réduire le plus l’incertitude globale du modèle sera choisie.

### 3.3.2.3 Croisement avec les données d’aléa

La dernière étape du modèle de vulnérabilité est de combiner des données d’aléa avec les données d’exposition. La figure 15 illustre ce procédé de superposition des informations d’aléa et d’exposition effectué dans cette étape du modèle avec l’exemple de l’inondation de 1999 dans les Pyrénées-Orientales appliqué aux vignes.

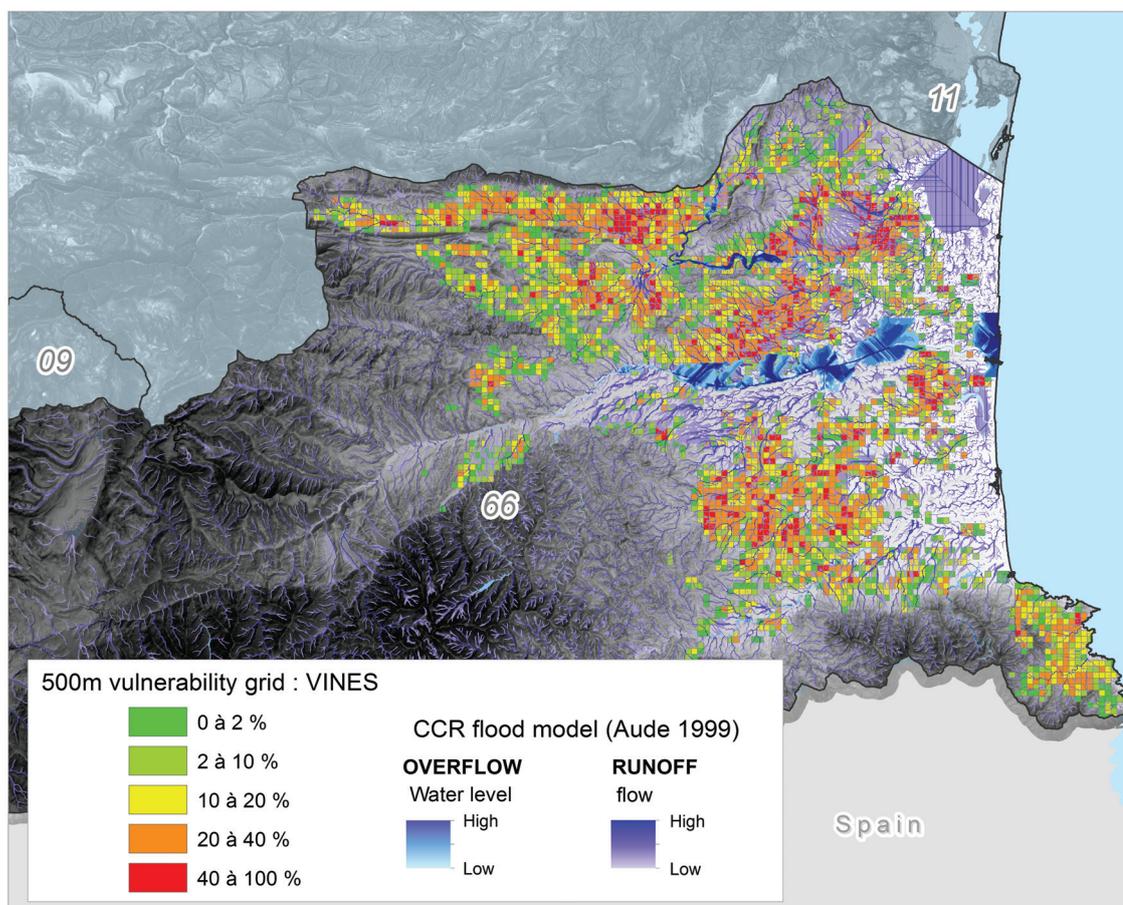


FIGURE 3.7 – Croisement des modèles d'aléa et d'exposition

Le modèle d'aléa est constitué de deux filières : la filière de débordement et la filière de ruissellement. Une fois combinées, on obtient une grille d'aléa de la zone impactée de mailles de taille 25m\*25m. Le contenu attributaire fourni est :

- La plus haute hauteur d'eau de débordement simulée sur la maille sur la durée de l'événement ;
- La plus haute hauteur d'eau de ruissellement simulée sur la maille sur la durée de l'événement ;
- Le débit de ruissellement le plus important simulé sur la maille sur la durée de l'événement, pour les mailles touchées par du ruissellement. Cette information n'est pas disponible pour les mailles de débordement.

Tout d'abord, les données de ruissellement ont été utilisées pour obtenir également, pour chaque maille où du ruissellement a été observé, l'information relative à la vitesse de courant via la démarche suivante :

- $Q$  : débit instantané (en  $m^3/s$ ), le volume d'eau passant à travers la section d'un cours d'eau pendant une unité de temps
- $V$  : volume de la section d'un cours d'eau (en  $m^3$ )
- $S$  : surface mouillée (en m), la section du cours d'eau prise perpendiculairement à l'écoulement
- $t$  : temps (en s)
- $h$  : hauteur d'eau (en m)
- $l = L = 25$  : taille de la maille d'aléa (en m)

- $v$  : vitesse moyenne du courant dans la section (en m/s)

$$\begin{aligned} S &= h * l \\ V &= h * l * L = S * L \\ v &= L / t \end{aligned}$$

La formule du débit est :

$$Q = V / t = (S * L) / t = (L / t) * S = v * S$$

La vitesse du courant est donc donnée par la relation :

$$v = Q / S = Q / (h * l) = Q / (h * 25)$$

Cette démarche présente la limite que nous utilisons la plus haute hauteur d'eau de ruissellement et le débit de ruissellement le plus important simulés sur la maille sur la durée de l'événement or ils peuvent ne pas survenir au même pas de temps. Cependant, nous ne disposons pas en sortie du modèle d'aléa la hauteur d'eau et le débit de ruissellement pour chaque pas de temps sur chaque maille. Un travail est actuellement mené à CCR pour que l'information de la vitesse de ruissellement la plus importante simulée sur la maille sur la durée de l'événement soit également conservée et fournie en sortie du modèle d'aléa.

Ensuite, les filières ruissellement et débordement doivent être fusionnées pour n'obtenir qu'une seule grille d'aléa. Pour l'information relative à la hauteur d'eau, le procédé est le suivant sur chaque maille :

- Si la maille se trouve dans une zone de débordement, l'information sur la hauteur d'eau retenue sera la hauteur d'eau de débordement ;
- Si la maille ne se trouve pas dans une zone de débordement, l'information sur la hauteur d'eau retenue sera la hauteur d'eau de ruissellement. S'il n'y a pas de ruissellement, alors la maille ne se trouve pas dans la zone d'aléa.

Pour les informations relatives au débit et à la vitesse de courant, le procédé est le suivant :

- Si la maille se trouve dans une zone de débordement, un indicateur de zone de débordement est associé à la maille ;
- Si la maille ne se trouve pas dans une zone de débordement, les informations de débit et de vitesse de ruissellement sont retenues.

En conclusion, pour chaque maille d'aléa de 25m\*25m, le modèle d'aléa retourne :

- une hauteur d'eau ;
- un débit ou indicateur de zone de débordement ;
- un courant ou indicateur de zone de débordement.

Parallèlement, pour chaque maille d'exposition de 500m\*500m, nous avons l'information de la superficie de la maille couverte par chaque type de culture suivant la nomenclature RPG. Notre approche consiste à conserver la grille d'aléa et à ajouter pour chacune des mailles, le contenu attributaire de la maille d'exposition dans laquelle elle se trouve. On obtient ainsi une grille de vulnérabilité, de taille de mailles 25m\*25m, ayant la table attributaire suivante :

- la plus haute hauteur d'eau simulée sur la maille sur la durée de l'événement ;
- le débit le plus important simulé sur la maille sur la durée de l'événement ;

- l'estimation de la vitesse de courant sur la maille sur la durée de l'événement ;
- la proportion de la maille couverte par chaque catégorie de culture suivant la nomenclature RPG.

Ce traitement a été choisi pour deux raisons. D'une part, la taille de la maille la plus fine qui pourra être adoptée pour la grille d'exposition sera la taille de mailles 25m\*25m pour des raisons de rapidité du modèle. D'autre part, l'étude de sensibilité qui pourra être effectuée à l'avenir sur le modèle consistera à faire changer la taille de la maille d'exposition. Cette structure de modèle sera plus stable et flexible vis à vis d'un changement de taille de la maille d'exposition.

### 3.3.3 Modèle de dommages

A partir des informations issues du modèle de vulnérabilité, il s'agit maintenant de développer un modèle de dommage. L'objectif de ce modèle est d'associer un niveau de dommages aux caractéristiques d'aléa des enjeux exposés (parcelles agricoles) via l'utilisation de courbes d'endommagement.

#### 3.3.3.1 Méthodologie d'évaluation des dommages des inondations aux activités agricoles du groupe de travail national AMC inondation

Le groupe de travail national « Analyse Multi-Critères (AMC) inondation », dans la continuité des travaux du groupe « Analyse Coûts-Bénéfices (ACB) inondation », a été créé en octobre 2010 en co-pilotage entre le Commissariat général au développement durable (CGDD) et la Direction générale de la prévention des risques (DGPR). C'est dans ce cadre et sous le pilotage de l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) qu'ont été réalisés le guide méthodologique et les fonctions nationales de dommages des inondations au secteur agricole présentés et utilisés ici (Agenais et al., 2013). L'intérêt de ces travaux est qu'ils ont vocation à être mis à jour régulièrement et ces fonctions devraient s'améliorer au fur et à mesure de l'avancée des travaux.

Les événements d'inondation pris en charge par ces courbes sont les inondations par ruissellement et débordement. Les autres types d'inondations - submersion marine, excès d'eau de pluie, remontée de nappes - présentent des caractéristiques spécifiques quant aux dommages engendrés et ne sont pas aujourd'hui traités par ces courbes.

Ce paragraphe décrit la méthodologie d'évaluation et les informations nécessaires pour le développement du modèle à CCR.

#### a. Construction des courbes

Des enquêtes auprès d'experts ont été réalisées pour collecter les informations permettant de construire les fonctions d'endommagement. Les experts qui ont été rencontrés sont des spécialistes agricoles qui ont été témoins d'inondations dans leur région. L'objectif des entretiens qui ont été menés a été de formaliser autant que possible leurs retours d'expérience afin d'analyser les dégâts causés aux activités agricoles.

Les travaux se placent à l'échelle de l'exploitation agricole qu'ils divisent en quatre composantes principales associés aux dommages subis :

- les bâtiments agricoles : les dommages directs supportés par les bâtiments agricoles et leur contenu. Pour le contenu, il s'agit de la réparation ou du remplacement des outils de production et des stocks (intrants, approvisionnements, production intermédiaire, production finale). Il existe également un impact indirect lié à l'impossibilité d'utiliser ces biens pendant la durée de leur remise en état ;
- les parcelles agricoles :
  - les cultures en cours : les pertes de valeur ajoutée sur la saison d'occurrence de la crue et éventuellement les suivantes ;
  - Le fond : sol, matériel végétal, équipements sur la parcelle (clôtures, systèmes d'irrigation, serres). La perte est considérée comme la somme de l'effort requis pour une remise en état et de la perte de valeur ajoutée sur la durée de remise en état.
- Les animaux d'élevage : pertes de valeur ajoutée et de capital du fait des blessures ou morts d'animaux l'année d'occurrence de l'inondation et éventuellement les suivantes. Il existe également des impacts indirects liés par exemple au stress ou aux maladies pouvant survenir plus tardivement ;
- Les personnes travaillant sur l'exploitation, composante qui n'est pas traitée dans ce guide.

Les fonctions développées aujourd'hui concernent les parcelles agricoles et le matériel agricole.

Du fait de la grande variabilité des enjeux agricoles d'un territoire à l'autre en France, le travail effectué par le groupe de travail n'a pas été de construire des fonctions d'endommagement prêtes à l'emploi mais de produire des fonctions de bases ensuite adaptées aux conditions agro-économiques de la zone étudiée. Ce processus de construction des fonctions, automatisé dans le modèle dit FLOODAM, se fait en plusieurs étapes, décrites dans la figure suivante :



niveau 0	niveau 1	niveau 2	
prairies	prairie	prairie	
	prairie nouvellement semée	prairie nouvellement semée	
	luzerne	luzerne	
	luzerne nouvellement semée	luzerne nouvellement semée	
céréales et oléagineux	maïs	maïs grain	
		maïs non alimentaire	
		sorgho	
		autres céréales de printemps type maïs	
		maïs ensilage	
	blé d'hiver	blé tendre	
		orge	
		blé non alimentaire	
		céréales fourragères d'hiver	
		triticale	
		blé dur	
		seigle	
		avoine	
	blé de printemps	autres céréales d'hiver	
blé tendre de printemps			
orge de printemps			
blé dur de printemps			
avoine de printemps			
colza	autres céréales d'hiver type blé		
	colza		
	colza non alimentaire		
tournesol	autres oléagineux		
	autres oléagineux		
arboriculture	tournesol		
	tournesol non alimentaire		
	oléagineux fourragers de printemps		
	pommier	pommier	
	poirier	poirier	
	cerisier	cerisier	
vignoble	pêcheur	pêcheur	
	abricotier	abricotier	
	prunier	prunier	
cultures légumières	vigne de cuve	vigne de cuve	
	asperge	asperge	
	salade	salade	
	tomate plein champ	tomate plein champ	
	légumes	tomate sous serre	tomate sous serre
		potatoes	potatoes
		potatoes primeur	potatoes primeur
		melon	melon
		carotte	carotte
		oignon	oignon
		petit pois	petit pois
		haricot vert	haricot vert
		chou fleur	chou fleur
		endive	endive
légumes palissés	concombre	concombre	
	aubergine	aubergine	
légumes palissés sous serre	poivron	poivron	
	concombre sous serre	concombre sous serre	

FIGURE 3.9 – Typologie du modèle FLOODAM

Source : Agenais et al. (2013)

Dans l'étape 1, à partir des résultats des entretiens auprès des experts et des réunions en groupe, des informations ont été collectées permettant la construction des "fonctions d'endommagement élémentaires de niveau 1". Ces fonctions décrivent l'endommagement des activités agricoles en termes relativement universels à l'échelle de la France métropolitaine.

Au début de la deuxième étape, la nomenclature des cultures suit le niveau 1 de la typologie du modèle FLOODAM. Certaines cultures absentes du premier niveau de la typologie FLOODAM sont toutefois proches en termes de sensibilité aux inondations avec des cultures du premier niveau, malgré des calendriers culturels et/ou des rendements et prix de vente différents. Ces cultures ont donc été ajoutées à la typologie FLOODAM pour constituer un deuxième niveau plus fin. Au final, pour chaque culture

du niveau 2 de la typologie, ce sont les fonctions d'endommagement du type de niveau 1 correspondant qui sont associées. On obtient donc à la fin de cette étape les "fonctions d'endommagement élémentaires de niveau 2".

L'étape 3 permet d'adapter ces fonctions élémentaires à une zone d'étude et à ses caractéristiques agro-économiques, à partir d'un certain nombre de données d'entrée. Les données d'entrée devant être fournies par l'utilisateur sont les suivantes :

- les données agro-économiques de la région observée (rendements, prix de vente, charges, calendriers culturels, superficies) ;
- la nomenclature des cultures utilisée par la base de données de géolocalisation des surfaces agricoles sur le territoire étudié.

La quatrième étape permet le passage de la typologie FLOODAM de niveau 2 à la typologie du RPG, la typologie de sortie du modèle FLOODAM. Des tables de correspondance entre les différentes nomenclatures exploitées dans le modèle FLOODAM sont alors utilisées.

Enfin, la dernière étape intègre la description des classes de paramètres fournies par le modèle hydraulique utilisé pour la modélisation de l'aléa (hauteur d'eau, durée de submersion, date de survenance de l'événement, vitesse de courant).

C'est par cette démarche que les fonctions nationales de dommages au secteur agricole, utilisées dans une première version de ce modèle, ont été construites.

Les fonctions de dommages proposées sont surfaciques. Les outputs sont les pertes en euros 2013 par hectare. Ces montants de pertes sont à interpréter non pas en tant que dommages aux cultures mais en termes de perte de revenu. La sortie de la fonction est le résultat agrégé des pertes estimées sur plusieurs postes :

- les pertes de récolte sur l'année et différées : revenu si l'inondation n'avait pas eu lieu moins le revenu avec inondation ;
- dommages aux sols : coût de remise en état ;
- dommages au matériel végétal :
  - frais de replantation ;
  - effets différés (perte de rendement sur plusieurs années le temps de la plante replantée produise autant que la plante remplacée).

Nous allons décrire plus en détail le périmètre des pertes prises en compte et les indicateurs choisis.

#### **b. Pertes de récolte**

Les inondations peuvent occasionner des pertes de récoltes lorsque la culture est déjà en place au moment de l'inondation ou bien même sur les récoltes à venir du fait d'effets sur le sol ou sur le matériel végétal. Les inondations peuvent également causer une dégradation de la qualité des produits récoltés et donc une baisse de leur prix de vente.

Selon les caractéristiques de l'aléa et la date de survenance de l'événement, les itinéraires techniques habituels peuvent également être perturbés, engendrant des variations dans les charges dépensées. Ce peut notamment être le cas si la culture inondée n'est pas

poursuivie et qu'une nouvelle culture est mise en place en remplacement. Des règles de décisions sur la poursuite ou l'abandon des itinéraires culturaux et leurs impacts sont donc intégrées dans les fonctions d'endommagement.

La poursuite ou l'abandon d'une culture dépendent des pertes de rendement prévues et de la période à laquelle survient l'inondation. Au-delà d'un certain seuil de perte de rendement, l'agriculteur peut en effet décider d'abandonner la culture. Ceci peut notamment être le cas si le produit de la récolte réalisée ne lui permet pas de couvrir les frais de récolte. La décision d'abandonner une culture impactée dépend donc de la date à laquelle survient l'inondation, c'est-à-dire des charges déjà engagées au moment de l'inondation et des possibilités de la remplacer par une autre culture dans le cas des cultures annuelles. Pour chaque culture, des règles de décision simplifiées, basées sur les pertes de rendement et la date de l'inondation ont été définies. Lorsque l'itinéraire est abandonné et que la récolte n'est pas réalisée, la production est perdue en totalité, et les charges de récolte ne sont pas dépensées.

La perte de récolte ( $D_C$ ) est définie comme étant la variation de la valeur ajoutée liée aux conséquences d'une inondation sur les cultures. La valeur ajoutée est définie comme la différence entre les produits bruts élémentaires et les consommations intermédiaires pouvant être affectées à une production pendant la saison d'occurrence de l'inondation et les saisons suivantes. Les produits bruts élémentaires sont la valorisation des productions agricoles (animaux, produits animaux, végétaux et produits végétaux) vendues, stockées ou consommées, hors subventions. Les consommations intermédiaires, sont entendues comme les dépenses pouvant être attribuées à l'acte de production. Elles comprennent les semences, engrais, produits phytosanitaires, aliments, coûts de motorisation (carburant, huile) et d'entretien du matériel, la main d'œuvre saisonnière (Agreste, 2010).

La perte de récolte est donc calculée de la façon suivante :

$$D_C = \Delta VA = VA_{stand} - VA_{inond} = \Delta \text{Produit} - \Delta CI = \Delta \text{Produit}_R + \Delta \text{Produit}_{P_V} - \Delta CI$$

Où :

$\Delta VA$  est la variation de valeur ajoutée pour un hectare de culture ;  
 $VA_{stand}$  est la valeur ajoutée pour un hectare de culture pour une saison moyenne ;  
 $VA_{inond}$  est la valeur ajoutée pour un hectare de culture pour le cycle de l'inondation ;  
 $\Delta \text{Produit}$  est la variation de produit brut pour cet hectare ;  
 $\Delta CI$  est la variation de consommations intermédiaires sur cet hectare ;  
 $\Delta \text{Produit}_R$  est la variation de produit liée à la variation de rendement ;  
 $\Delta \text{Produit}_{P_V}$  est la variation de produit liée à la variation du prix de vente suite à une potentielle baisse de qualité de la production du fait de l'inondation.

Avec :

$$\Delta CI = \Delta \text{Intrants} + \Delta \text{Matériel} + \Delta \text{TempsDeTravail}$$

Où :

$\Delta \text{Intrants}$  est la variation de consommation d'intrants répercutée en termes de coût ;  
 $\Delta \text{Matériel}$  est la variation de frais de fonctionnement et d'entretien du matériel ;  
 $\Delta \text{TempsDeTravail}$  est la variation de main d'œuvre occasionnelle en termes de coût.

### c. Pertes suite aux dommages au matériel végétal

Les cultures concernées ici sont les plantes pluriannuelles à savoir : les vignes, les vergers, les cultures maraîchères pluriannuelles (asperges, rhubarbe, etc.), les cultures horticoles, les plantes aromatiques pluriannuelles, les cultures de petits fruits pluriannuelles, les prairies.

Certaines conditions d'aléa (vitesse importante, durée de submersion longue), peuvent, en plus des pertes de récolte, causer des destruction des plantes pluriannuelles (par arrachage ou mortalité par asphyxie racinaire). Dans ce cas, l'exploitant perd la valeur de fonds de son matériel végétal : il devra acheter les plantes et les replanter, ce qui représente des frais supplémentaires. D'autre part, ce nouveau matériel végétal ne sera pas aussi productif l'année suivante voire pendant plusieurs années après la replantation.

Sur la base des entretiens réalisés, trois scénarios de comportement des agriculteurs dépendant du pourcentage du matériel végétal perdu par unité de surface ont été définis :

- Stratégie 1 : en dessous d'un certain pourcentage de perte, les plants perdus ne sont pas remplacés ;
- Stratégie 2 : au-dessus de ce premier seuil d'endommagement et avant un deuxième seuil, l'exploitant replante uniquement les plants perdus ;
- Stratégie 3 : au-dessus du deuxième seuil d'endommagement, l'exploitant choisi d'arracher l'ensemble des plants et de tout replanter.

Pour chaque type de culture, les deux valeurs seuils sont fournies.

Ensuite, suivant la stratégie adoptée par l'agriculteur, les pertes qui en résultent ont été précisées :

TABLE 3.6 – Pertes suite aux dommages au matériel végétal suivant la stratégie suivie

Stratégie 1	Stratégie 2	Stratégie 3
<ul style="list-style-type: none"> <li>— une variation de produit comprenant une baisse de récolte l'année de l'inondation</li> <li>— une baisse de production sur le reste de la durée de vie de la culture</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— une variation de produit comprenant une baisse de récolte l'année de l'inondation</li> <li>— une perte de produit temporaire le temps de l'entrée en production des nouveaux plants</li> <li>— des dépenses supplémentaires exceptionnelles comprenant le coût d'arrachage des plants morts, de replantation puis d'entretien des nouveaux plants pendant plusieurs années</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— une variation de produit comprenant une baisse de récolte l'année de l'inondation</li> <li>— une perte de produit temporaire le temps de l'entrée en production des nouveaux plants</li> <li>— une variation de consommations intermédiaires du fait des opérations de récolte qui n'ont pas besoin d'être réalisées pendant le délai d'entrée en production lorsque la parcelle entière est replantée. Lorsque les pertes sont partielles, avec ou sans replantation, les charges de récolte ne varient pas car la zone entière doit tout de même être parcourue. Les autres opérations sont soit liées à la surface exploitée et ne varient donc pas même s'il y a eu des pertes partielles de matériel végétal, soit sont réalisées de la même manière sur les plants replantés (la taille par exemple);</li> <li>— des dépenses supplémentaires exceptionnelles comprenant le coût d'arrachage des plants morts, de replantation puis d'entretien des nouveaux plants pendant plusieurs années</li> </ul>

Source : Agenais et al. (2013)

Les coûts de plantation dépendent fortement des espèces ou cépages choisis et de la densité de plantation, qu'il est possible de calibrer dans le modèle FLOODAM. Lorsqu'il y a des pertes partielles de matériel végétal mais qu'aucune replantation n'est effectuée, les pertes de rendement s'étalent alors jusqu'à la fin de vie des végétaux. L'âge moyen du matériel végétal doit donc être connu. En l'absence d'information sur l'âge moyen du matériel végétal, l'hypothèse de cultures pérennes ayant en moyenne atteint la moitié de leur durée d'amortissement est faite.

Les dommages au matériel végétal dépendent principalement de :

- la date de submersion car la sensibilité des cultures pérennes varie en période de repos végétatif ou de végétation;
- la vitesse du courant pouvant causer des arrachages;
- la durée de submersion pouvant entraîner des asphyxies racinaires;
- la hauteur d'eau qui participe à l'asphyxie des végétaux lorsque leurs feuilles ou leurs rameaux sont sous l'eau.

#### d. Dommages au sol

Les dommages aux sols étudiés ici sont l'érosion et la quantité de débris pouvant se déposer sur les parcelles. Les principaux facteurs d'aléa sont la vitesse de courant et la

hauteur d'eau. La durée d'inondation et la date de survenance ne sont pas pris en compte. Le sol peut également être pollué si l'eau d'inondation transporte des polluants mais ce risque n'est pas étudié ici car il ne dépend pas uniquement de facteurs d'aléa.

Pour chaque type de culture, les opérations à réaliser, les temps d'intervention et les coûts horaires en fonction des paramètres de l'aléa ont été recensés. Les dommages au sol sont donc estimés par le coût de réalisation des opérations suivantes : main d'œuvre, carburant, location d'équipement le cas échéant et achat d'amendements.

### 3.3.3.2 Caractéristiques des courbes

Après un travail de collecte de données agro-économiques à l'échelle nationale, l'IRSTEAT a généré via le modèle FLOODAM les fonctions nationales des dommages au secteur agricole. Ce sont ces courbes auxquelles nous avons eu accès dans un premier temps de nos travaux.

Ces courbes s'appliquent pour chacun des risques exposé. Elles nécessitent deux catégories de données d'entrée. D'une part, les caractéristiques de l'aléa à la localisation de ce risque et d'autre part, les caractéristiques de l'exposition.

Les paramètres d'aléas pris en compte sont :

- le hauteur d'eau par pas de 10cm ;
- la durée de submersion selon le tableau ci-dessous :

Classe de durée	Min (jour)	Max (jour)
courte	0	1
moyenne	2	4
longue	5	10
très longue	11	20

FIGURE 3.10 – Paramètre durée de submersion

Source : Agenais et al. (2013)

- la vitesse de courant de façon qualitatif selon le tableau ci-dessous :

Niveau de courant	Description	Vitesse
Faible	Pas d'érosion du sol. Pas d'arrachage de cultures lorsqu'elles sont déjà enracinées. Pas d'endommagement des équipements dans les parcelles. Eau peu chargée en débris.	0 à 0,5 m.s <sup>1</sup>
Moyen	Erosion superficielle du sol. Arrachage des cultures annuelles. Endommagement des équipements fragiles dans les parcelles. Eau chargée en petits et moyens débris.	0,5 à 1 m.s <sup>2</sup>
Fort	Erosion localement importante (ravines). Arrachage des cultures pérennes. Endommagements des équipements dans les parcelles. Eau chargée en moyens et gros débris.	1 à 2 m.s <sup>3</sup>
Très fort	Erosion complète des parcelles et arrachage de tout ce qu'elle supporte (cultures, équipements). Eau transportant de gros débris et encombrants.	> 2 m.s <sup>4</sup>

FIGURE 3.11 – Classification Vitesse courant

Source : Agenais et al. (2013)

- la saison d'occurrence de l'inondation selon le tableau ci-dessous :

Classe de durée	Début (semaine)	Fin (semaine)
Printemps	14	26
Été	27	39
Automne	40	52
Hiver	1	13

FIGURE 3.12 – Paramètre Saison

Source : Agenais et al. (2013)

Le paramètre d'exposition est la culture exposée en 14 classes du RPG :

- blé tendre ;
- maïs, grain et ensilage ;
- orge ;
- autres céréales ;
- colza ;
- tournesol ;
- autres oléagineux ;
- autres cultures industrielles ;
- arboriculture et vergers ;
- vignes ;
- légumes et fleurs ;
- fourrage ;
- prairies permanentes ;
- prairies temporaires.

Ces 14 fonctions de dommages ne couvrent pas toutes les catégories du RPG. Pour les catégories non couvertes, les recommandations de l'IRSTEA sont les suivantes :

Autres catégories du RPG	Recommandations
Autres gels	Ces surfaces sont a priori très peu sensibles aux inondations, des dommages nuls peuvent donc leur être associés.
Estives-Landes	
Pas d'information	Sans autre précision sur l'occupation de ces surfaces, les dommages peuvent être estimés en appliquant une fonction de dommage correspondant à la moyenne pondérée par les surfaces des fonctions des autres catégories du RPG disposant d'une courbe dédiée.
Divers	
Riz	Il est recommandé d'utiliser les fonctions d'endommagement du blé avec des données agro-économiques appropriées (calendrier, rendement, prix de vente et charges pour la culture du riz et pour les cultures de semences à rechercher par l'utilisateur).
Semences	
Fruits à coque	Il est recommandé d'utiliser les fonctions d'endommagement du prunier avec des données agro-économiques appropriées (calendrier, rendement, prix de vente et charges pour ces cultures à rechercher par l'utilisateur).
Oliviers	
Protéagineuses	Il est recommandé d'utiliser les fonctions d'endommagement du colza avec des données agro-économiques appropriées (calendrier, rendement, prix de vente et charges pour ces cultures à rechercher par l'utilisateur).
Légumineuses à grain	
Plantes à fibres	

FIGURE 3.13 – Recommandations pour les catégories du RPG non couvertes par une fonction de dommages

Source : Christin (2014)

Ces fonctions fournissent des moyennes nationales, dans la mesure où la répartition des types de cultures dans chaque catégorie est basée sur des données nationales (par exemple, la catégorie "arboriculture" repose sur un certain pourcentage de pommiers, de cerisiers, etc., apprécié à l'échelle nationale). Ce pourcentage n'est pas forcément pertinent localement. Par ailleurs, les données agro-économiques qui ont permis la construction de

ces fonctions (prix de vente, charges, calendriers cultureux, rendement...) correspondent aussi à des valeurs moyennes pour la France.

### 3.3.3.3 Limite des courbes d'endommagement nationales

Les experts qui ont été rencontrés se répartissent géographiquement suivant le tableau ci-dessous :

TABLE 3.7 – Experts rencontrés par type de culture

Production agricole	Départements des experts rencontrés
Arboriculture	30, 11, 05
Horticulture	83
Grandes cultures	30, 11, 85, 17(*2), 71
Prairies	30, 17, 13, 71
Viticulture	11, 34, 83, 17
Maraîchage	13(*2), 30, 11, 01

Tout d'abord, des experts n'ont pas été rencontrés dans toute la France. Par exemple, faute d'experts acceptant de participer aux entretiens, aucun département du nord de la France n'est représenté parmi les experts. On peut alors se demander si les courbes d'endommagement élémentaires sont réellement représentatives pour la France entière car elles ne prennent peut être pas en compte la variabilité des pratiques agricoles en France métropolitaine. Il s'agit donc ici d'un problème provenant de la construction même des courbes élémentaires.

Deux limites apparaissent rapidement lors de la description des courbes nationales : la généralisation France entière et sur le temps des conditions agro-économiques. En effet, le territoire français est très varié en termes de climats et de pratiques agricoles ce qui rend difficile une généralisation géographique de certains indicateurs agro-économiques tels que le rendement, les charges ou le calendrier agricole. La généralisation dans le temps des courbes d'endommagement nationales fait face à deux difficultés. D'une part, les caractéristiques météorologiques particulières à chaque année ont des conséquences sur les cycles cultureux est il est donc délicat de généraliser le calendrier agricole, les conditions climatiques pouvant fortement varier d'une année sur l'autre pour une même région. D'autre part, les courbes d'endommagement fournies par l'IRSTEA expriment les pertes en euros par hectare. Or, les prix agricoles peuvent enregistrer de très fortes variations d'une année sur l'autre ce qui rend nécessaire la création de courbes par année.

De plus, les courbes d'endommagement nationales fournies par l'IRSTEA ne prennent pas en paramètre d'entrée la date d'occurrence de l'inondation mais la saison d'occurrence de l'inondation. Si cela permet de lisser les variabilités climatiques annuelles, cela crée également un gros effet de seuil aux dates de changement de saison. De plus, cela ne permet pas une bonne description des cycles cultureux puisque cela crée donc seulement 4 états dans les cycles.

Enfin, les courbes d'endommagement nationales fournies par l'IRSTEA donnent un montant agrégé des pertes de revenus des agriculteurs, sans que l'on ait la possibilité de connaître la répartition des pertes entre les différentes classes de pertes : les dommages au matériel, au sol et aux plantes pérennes (pertes de fonds et frais de replantation) ainsi que les pertes de rendement de l'année et différées. L'objectif du modèle est de pouvoir également fournir une estimation de la répartition des pertes entre les différents systèmes

de transfert de risques existants. Or, les indemnisations de ces systèmes dépendent du type de perte. Sans cette distinction des pertes entre les différentes classes, ce modèle ne pourra pas être utilisé pour faire une estimation du coût d'un événement pour le FNGRA, les contrats d'assurance agricole et le reste à charge pour l'agriculteur, c'est à dire, le gap entre pertes indemnisées et celles non indemnisées.

Le modèle développé grâce aux courbes d'endommagement nationales de l'IRSTEA représentent donc une première étape mais n'était pas suffisant vis à vis de nos besoins et un travail a été effectué en collaboration à l'IRSTEA pour développer des courbes plus adaptées aux objectifs du modèle.

### **3.3.4 Le développement de nouvelles courbes d'endommagement pour le secteur agricole : Collaboration CCR - IRSTEA**

Ce partenariat a pour objectif de construire de nouvelles courbes de dommages à l'agriculture pour résoudre certaines limites évoquées dans le paragraphe précédent ainsi que de les adapter aux besoins propres du modèle développé pour CCR.

#### **3.3.4.1 Régionalisation et annualisation des courbes d'endommagement**

Une limite relevée lors de l'utilisation directe des courbes d'endommagement nationales aux cultures est la variabilité des données agro-économiques dans l'espace et le temps. L'échelle nationale des courbes d'endommagement ne permet pas de prendre en compte les spécificités régionales et les conditions climatiques ne peuvent pas être généralisées dans l'espace et dans le temps.

Le premier travail a consisté à développer des courbes par région et par année en collectant des données afin de disposer d'un historique des données agro-économiques par région et donc de générer grâce au modèle FLOODAM des fonctions d'endommagement par année et par région. Les données agro-économiques ont été collectées pour la période 2000-2016, permettant ainsi d'avoir des courbes pour la période 2005-2016, une moyenne olympique sur les 5 années précédant l'année de l'événement étant appliquée afin de se rapprocher des méthodes d'estimation des pertes et des montants d'indemnisation.

Si l'échelle régionale peut paraître encore trop large du fait de la multitude des espaces agricoles français, ce choix s'est avéré nécessaire pour deux raisons : d'une part pour garantir l'efficacité du modèle en termes de temps de calculs et d'autre part, cela a permis de simplifier le travail de collecte de données - déjà très compliqué à réaliser à l'échelle régionale. Une suite à donner à ce modèle serait de développer des courbes par Région Agricole, voire par Petite Région Agricole (<http://agreste.agriculture.gouv.fr/definitions/zonages/>), c'est-à-dire, régionaliser par zones d'agriculture homogène plutôt que par région administrative.

En fonction de l'étape à laquelle interviennent les données d'input dans le modèle FLOODAM, la classification par culture peut différer. Le travail mené avec Frédéric Grelot de l'IRSTEA a permis de formaliser les besoins en données du modèle FLOODAM ainsi que leur format et la classification à adopter.

Les courbes d'endommagement sont construites en trois étapes :

- **les fonctions de niveau 1** sont les fonctions de dommages "brutes" générées à partir des informations données par les experts. Les cultures y sont classifiées d'une fonction particulière qu'on appellera classification FLOODAM (34 catégories de cultures);
- **les fonctions de niveau 2** sont ensuite générées en intégrant les données agro-économiques. Ici les cultures sont classifiées selon la classification de l'Agreste, en charge de la Statistique Agricole (138 catégories de cultures);
- **les fonctions de niveau 3** sont enfin générées : il s'agit de faire des fonctions par classe du RPG, soit 24 catégories après regroupements (en plus de classifier, il faut prendre en compte les surfaces par type de culture car il s'agit ici de combiner les courbes d'endommagement de plusieurs cultures).

Il y a donc 2 tables de correspondance :

- la table de correspondance de la classification FLOODAM à la classification de l'Agreste ;
- la table de correspondance de la classification de l'Agreste à la classification du Registre Parcellaire Graphique.

Les fichiers d'input du modèle FLOODAM sont les suivants :

- les quatre fichiers traitant du prix de vente des productions et des charges des différentes actions prises en fonction des scénarios (harvest sowing treatment replanting oversowing chemical.harvest late.yield.loss late.yield.loss1 late.yield.loss2 treatment.dose.fruitset treatment.dose.veraison cut1.rate cut2.rate cut3.rate half.rate) :
  - `action.value` : Pour chaque production, les différentes actions possibles et leur valeur ;
  - `action.value.source` : provenance des données du prix des actions (charges) et des prix de vente des productions ;
  - `action.value.table` : données du prix des actions (charges) et des prix de vente des productions ;
  - `action.value.unit` : unités des données des actions (charges) et des prix de vente des productions.
- `calendar` : pour chaque culture, les étapes du calendrier cultural (dormancy, growth1 start, growth1 middle, growth1 end, cut1, growth2 start, growth2 middle, growth2 end, cut2, sowing, post sowing, budbreak, flowering, maturity, second vegetation, dormancy end, emergence, two leaves, nude parcel...) et les semaines de l'année correspondantes ;
- `SAA` : fournit un historique sur cinq ans des données de surface et de rendement des cultures. Ces données sont importantes à 2 niveau, d'une part pour la variation du prix et des productions et d'autre part pour la combinaison des fonctions de dommages entre le niveau 1 et le niveau 2 puis entre le niveau 2 et le niveau 3, lorsque plusieurs cultures sont regroupées en une seule courbe.

Les fichiers `action.value`, `action.value.source`, `action.value.table`, `action.value.unit` et `calendar` sont entrés selon la classification FLOODAM et le fichier `SAA` est entré selon la classification Agreste. Pour le développement de nouvelles courbes, le travail a consisté à collecter les données régionales et annuelles des fichiers "SAA" et "action.value.table".

### 3.3.4.2 Nouveau format des courbes d'endommagement

#### a. Pas de temps à la semaine

Une limite de la première version du modèle provenait du paramètre temporel des courbes d'endommagement. En plus de se confronter à un problème de généralisation et de ne pas être assez précise vis à vis des cycles culturaux, cette temporalité crée des effets de seuil importants aux dates de changement de saison. Cette limite peut être traitée de deux façons :

- Fournir un travail sur le fichier "calendar" et créant un fichier spécifique à chaque région ;
- sortie intermédiaire des dommages à la semaine : cette solution est plus intéressante car elle permet d'effectuer un travail sur la saisonnalité en aval et de traiter deux problématiques temporelles à la fois :
  - les changements de climats liés aux saisons n'interviennent pas au même moment selon la région : il sera alors possible de faire varier l'association date de début de l'événement - semaine en fonction de la région, par exemple en reculant l'arrivée du printemps et de l'été dans les régions du Nord de la France ;
  - traiter l'incertitude climatique et éviter les effets de seuil via une moyenne glissante sur plusieurs semaines.

Les courbes FLOODAM sont des sorties agrégées par saison mais il est possible d'obtenir certaines sorties intermédiaires où les résultats ne sont pas agrégés à savoir ici une sortie pour chaque semaine de l'année et non par saison. Les nouvelles courbes d'endommagement fournies par l'IRSTEA utilisent donc un pas de temps hebdomadaire. Ainsi, dans le modèle développé pour CCR, la date de début d'un événement est utilisée pour localiser la semaine de l'année à laquelle l'événement se produit. Le calcul des pertes agricoles sera effectué pour les 2 semaines précédents jusqu'aux 2 semaines suivant l'événement et la moyenne sera utilisée comme estimation des pertes agricoles. Cette méthode permet ainsi de lisser les effets de seuil ainsi que les incertitudes relatives à la variation du cycle cultural.

#### b. Distinction entre les différents postes de pertes

Les courbes nationales d'endommagement à l'agriculture fournissent un montant agrégé des pertes de revenu des agriculteurs. Cependant, l'objectif du modèle n'est pas uniquement d'estimer les pertes de revenu des agriculteurs mais également de fournir une estimation de la répartition des pertes entre les différents systèmes de transfert de risques. Il est pour cela nécessaire de pouvoir faire la distinction entre les différents postes de pertes modélisés via les courbes d'endommagement de l'IRSTEA à savoir :

- pertes de rendement de l'année ;
- pertes de rendement différées ;
- dommages au sol ;
- pertes de fonds en matériel végétal ;
- frais de replantation du matériel végétal.

Ce besoin correspond à une sortie intermédiaire du modèle FLOODAM qui fournit alors une courbe par poste de perte. Ainsi, il a été décidé de générer une courbe pour chaque poste.

### 3.3.4.3 Conclusion

- Le cahier des charges des besoins pour les nouvelles courbes est donc le suivant :
- utiliser le modèle FLOODAM sur des inputs à la région et à l'année pour obtenir une courbe par région et par année ;
  - avoir un pas de temps à la semaine et non à la saison ;
  - pouvoir faire la distinction entre les différents postes de pertes.

A partir de cette rencontre, le travail fourni par CCR a été de collecter les informations agro-économiques nécessaires pour générer les courbes et de les mettre dans le format d'inputs du modèle FLOODAM. L'IRSTEA a lui adapté le format des courbes d'endommagement fournies en output du modèle. Après le travail de collecte de données et leur mise en forme, celles-ci ont été fournies à l'IRSTEA.

Ainsi, pour chaque région métropolitaine, chaque année entre 2005 et 2016 et pour chaque poste de perte, une courbe d'endommagement à la semaine a été générée, soit 780 courbes (figure suivante).

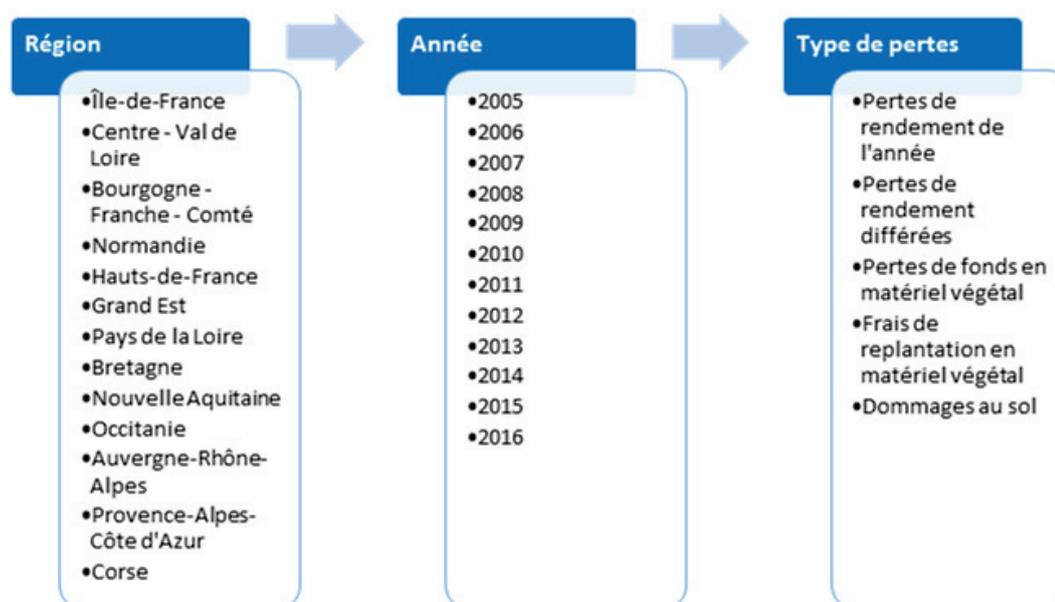


FIGURE 3.14 – Courbes de dommages à l'agriculture

### 3.3.5 La répartition des pertes entre les différents canaux de transfert de risques

Enfin, la dernière étape de ce modèle est de fournir une estimation de la part des pertes couvertes par un système de transfert de risques. Le modèle de dommages estime sur chaque maille, pour chaque département, culture et type de pertes, un montant de perte. A partir de cette donnée d'input, un modèle d'estimation des indemnisations a été développé.

### 3.3.5.1 Estimation des indemnisations d'assurance

Pour effectuer l'estimation des indemnisations d'assurance, les informations relatives au caractère assuré de la parcelle et au type de contrat souscrit sont nécessaires.

Comme nous ne disposons pas de l'information sur le caractère assuré ou non de chaque îlot de culture du RPG, le choix a été fait d'utiliser l'information de l'évolution du taux de diffusion de l'assurance agricole en France (tableau ci-dessous) :

TABLE 3.8 – Évolution du taux de diffusion de l'assurance agricole en France

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>Grandes cultures</b>	25%	25,8%	27,1%	28,9%	26%	27,9%	30,7%	30,8%	32%	31%	26,8%	26%
<b>Viticulture</b>	0,6%	10,2%	11,5%	12,9%	13,7%	14,6%	15,5%	18,8%	19,2%	23,5%	23,2%	23%
<b>Arboriculture</b>	0,8%	1,7%	1,9%	2,1%	2,2%	2,1%	2,3%	2,6%	2,3%	2,5%	2,2%	2,6%
<b>Légumes</b>	1,4%	3,5%	7,6%	12%	10,7%	13,1%	15,5%	15,5%	15,2%	16,8%	15,4%	12,2%

Une table de correspondance entre la classification des cultures du RPG et la classification en grandes familles disponible ci-dessus a été mise en place. Pour chaque culture du RPG et chaque année, nous disposons donc d'un taux de diffusion de l'assurance récolte France entière. Ainsi, sur chaque maille, en fonction de l'année de survenance de l'événement et de la culture, ces taux de diffusion de l'assurance récolte sont appliqués pour estimer la part des pertes de récolte couverte par l'assurance récolte.

Il faut ensuite appliquer les caractéristiques des contrats d'assurance au risque assuré.

Pour ce qui est du périmètre assuré, les fonctions de dommages utilisées dans le modèle CCR prennent en compte les pertes de récoltes et de qualité, les frais additionnels de récolte, de ressemis et de sauvetage. Ainsi, ce périmètre correspond au contrat de base de l'assurance Multi-Risques Climatiques et au niveau 2 du schéma de l'assurance récolte mis en place depuis 2015. Ce contrat ne couvre que les pertes de récoltes sur l'année de l'événement et pas les autres catégories de pertes.

Dans les contrats de base des assurances Multi-Risques Climatiques, la franchise était de 25% des capitaux assurés. Dans le contrat socle, une franchise différente est appliquée s'il s'agit d'un contrat à la parcelle (30% de franchise) ou à l'exploitation (20% de franchise). N'ayant pas l'information relative au type de contrat souscrit, une franchise de 25% est également appliquée pour les contrats d'assurance sur les événements survenant après 2015. Enfin, le seuil de déclenchement de l'assurance est de 30% du rendement assuré pour une production donnée dans les deux cas.

Ainsi, les caractéristiques utilisées pour définir le contrat d'assurance sont les suivantes :

- franchise : 25% ;
- seuil de déclenchement : 30%.

Pour définir le montant de pertes de récoltes auquel le seuil de déclenchement de l'assurance est atteint, la démarche adoptée consiste à importer la fonction de pertes de récoltes sur l'année correspondant à la culture étudiée, l'année de l'événement et la région touchée. On fait l'hypothèse que la perte maximum de la fonction d'endommagement représente une perte de 100%. Le seuil de déclenchement de l'assurance est alors estimé

à 30% de ce montant de perte.

Pour chaque culture et sur chaque maille, ce montant de pertes de récoltes auquel le seuil de déclenchement de l'assurance est atteint est ensuite estimé et s'il est dépassé, le contrat d'assurance est déclenché. Ce montant est calculé de la façon suivante :

$$D_C = \text{Seuil} * \max(CD_{C,A,R}) * \text{Surface}_C$$

où :

- $D_C$  est le montant de pertes de récoltes pour la culture étudiée auquel le seuil de déclenchement de l'assurance est atteint ;
- *Seuil* est le seuil de déclenchement de l'assurance, ici fixé à 30% ;
- $CD_{C,A,R}$  est la fonction de dommages correspondant à la culture étudiée et l'année et la région de l'événement exprimé en € par hectare ;
- $\text{Surface}_C$  est la surface (en hectares) de la maille occupée par la culture étudiée.

Ainsi, si ce montant est dépassé, le montant indemnisé par l'assurance sur la maille est estimé de la façon suivante :

$$I_C = TD_{C,A} * (1 - F) * P_C$$

où :

- $I_C$  est le montant de l'indemnisation via l'assurance sur la maille de la culture étudiée ;
- $TD_{C,A}$  est le taux de diffusion de l'assurance pour la récolte étudiée l'année de survenance de l'événement ;
- $F$  est la franchise du contrat d'assurance, ici fixée à 25% ;
- $P_C$  est le montant de la perte de récoltes sur l'année de l'événement de la culture étudiée.

Cette approche présente de nombreuses incertitudes du fait des nombreuses informations non disponibles. Cependant, on est amené un jour à disposer d'un portefeuille d'assurance récolte, ce modèle peut être facilement adapté pour croiser le modèle d'exposition avec le portefeuille assuré et ainsi prendre en compte les particularités de chaque contrat.

### 3.3.5.2 Estimation des compensations versées par le FNGRA au titre des calamités agricoles

Le deuxième vecteur d'indemnisation des pertes au secteur agricole est le FNGRA. Pour rappel, il indemnise au titre des calamités agricoles, les pertes de récoltes non engrangées et les cultures non assurables ou non exclues du Fonds ainsi que les pertes de fonds, sans exclusion de culture. Dans le cadre de ce modèle, ce sont donc ces grilles d'indemnisation qui vont être appliquées sur chaque maille.

Contrairement au fonctionnement du contrat d'assurance récolte implémenté, l'indemnisation ne traite plus uniquement les pertes de récolte sur l'année de l'événement mais également des pertes de fonds (dommages au matériel agricole, dommages au sol

et dommages au matériel végétal) .

La première étape du modèle est de choisir la grille d'indemnisation qui s'applique en fonction de l'année de survenance de l'événement, c'est à dire si l'événement survient avant 2010, la première grille d'indemnisation va s'appliquer, sinon ce sera la deuxième.

#### a. Pertes de récolte

Premièrement, une table de correspondance entre la classification des cultures du RPG et de la classification FNGRA a été mise en place. Ensuite, pour chaque culture du RPG, on peut alors associer une culture de la grille FNGRA.

Il faut ensuite associer un taux d'indemnisation à la culture impactée. Pour deux catégories de cultures, "Arbres fruitiers, petits fruits, raisin de table" et "Raisins de cuve", le taux d'indemnisation dépend du taux de perte de récolte subi par la culture. L'estimation du montant de pertes de récoltes à partir duquel le taux de perte est atteint s'effectue de la même manière que pour l'estimation du montant de pertes de récoltes auquel le seuil de déclenchement de l'assurance est atteint. Ainsi, pour ces deux cultures et sur chaque maille, le montant de pertes de récoltes à partir duquel le taux de perte est atteint est calculé de la façon suivante :

$$D_C = Taux * \max(CD_{C,A,R}) * Surface_C$$

Où :

$D_C$  est le montant de pertes de récoltes pour la culture étudiée à partir duquel le taux de perte est atteint;

$Taux$  est le seuil de déclenchement de l'assurance, ici pouvant être 27%, 30%, 50% ou 70%;

$CD_{C,A,R}$  est la fonction de dommages correspondant à la culture étudiée et l'année et la région de l'événement exprimé en € par hectare;

$Surface_C$  est la surface (en hectares) de la maille occupée par la culture étudiée;

La grille d'indemnisation antérieure à 2010 fait également une distinction entre des taux de base et des taux majorés. Ne pouvant pas savoir dans quelle circonstance l'un ou l'autre taux s'applique, il a été décidé d'utiliser la moyenne entre ces deux taux.

Ensuite, il convient de ne pas effectuer de double comptage avec l'assurance récolte. En effet, pour les cultures entrant dans le périmètre des cultures indemnisées par le FNGRA, certaines peuvent avoir le choix de s'assurer et ne peuvent alors plus bénéficier de l'indemnisation du FNGRA lors de la survenance d'une calamité agricole. C'est le cas de l'arboriculture, de la viticulture, du maraîchage et des grandes cultures avant 2010. Pour ces cultures, le taux de diffusion de l'assurance agricole est utilisé pour estimer un pourcentage de la culture assurée. Donc, le facteur (1 - taux de diffusion de l'assurance agricole) peut être utilisé pour estimer la part de la culture indemnisée via le FNGRA. On obtient alors les coefficients suivants :

Enfin, l'exploitant agricole ne peut prétendre à une indemnisation que s'il a subi une perte de récoltes supérieur à 30% de la production annuelle et des pertes de produit brut d'exploitation supérieures à 13%. Dans notre cas, comme nous simulons uniquement la

TABLE 3.9 – Évolution du taux de culture indemnisée via le FNGRA

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>Grandes cultures</b>	75%	74,2%	72,9%	71,1%	74%	0	0	0	0	0	0	0
<b>Viticulture</b>	99,4%	89,8%	88,5%	87,1%	86,3%	85,4%	84,5%	81,2%	80,8%	76,5%	76,8%	77%
<b>Arboriculture</b>	99,2%	98,3%	98,1%	97,9%	97,8%	97,9%	97,7%	97,4%	97,7%	97,5%	97,8%	97,4%
<b>Légumes</b>	98,6%	96,5%	92,4%	88%	89,3%	86,9%	84,5%	84,5%	84,8%	83,2%	84,6%	87,8%

perte de récoltes, c'est la première condition que nous appliquons dans le modèle pour déterminer le seuil de déclenchement de l'indemnisation au titre des calamités agricoles.

Ainsi, si le seuil de déclenchement est dépassé, pour chaque culture et sur chaque maille, un taux d'indemnisation du FNGRA est estimé et appliqué au montant des pertes de récoltes sur l'année pour estimer un montant d'indemnisation :

$$I_C = TD_{C,A} * TI_{C,A} * P_C$$

Où :

$I_C$  est le montant de l'indemnisation via le FNGRA sur la maille de la culture étudiée ;  
 $TD_{C,A}$  est le "taux de diffusion" du FNGRA pour la récolte étudiée l'année de survenance de l'événement ;

$TI_{C,A}$  est le taux d'indemnisation du FNGRA estimé précédemment ;

$P_C$  est le montant de la perte de récoltes sur l'année de l'événement de la culture étudiée ;

#### b. Pertes de fonds

Le FNGRA indemnise également les pertes de fonds. Ainsi, les pertes de fonds estimées via les fonctions de dommages ont été associées à des catégories de pertes de fonds de la classification FNGRA de la façon suivante :

- les dommages au matériel végétal ont été associés à la catégorie "Vigne, arbres fruitiers, plantiers, cultures pérennes" ;
- les dommages au sol ont été associés "Sols, ouvrages, palissages".

Le taux d'indemnisation associé à la catégorie FNGRA est ensuite appliqué au montant de pertes de ce poste. Ici encore, la grille d'indemnisation antérieure à 2010 faisant une distinction entre des taux de base et des taux majorés, la moyenne entre ces deux taux est appliquée.

La description de ce modèle sous Matlab est disponible en annexe.

### 3.4 RÉSULTAT ET ÉTUDE DES INCERTITUDES

#### 3.4.1 Résultats globaux

##### 3.4.1.1 Résultats sur les événements de référence

Les événements simulés sont des événements pour lesquels il existe des Retours d'Expérience (RETEX) disposant d'éléments relatifs aux pertes au secteur agricole. Ces événements de référence sont :

- Aude 1999;
- Bretagne 2000 et 2001;
- Gard 2002;
- Arles 2003;
- Seine 2016.

Les modèles d'aléa, d'exposition et de dommages ont donc été lancés sur ces événements. Les résultats globaux, comparés aux RETEX, sont présentés dans le tableau et le graphique suivants :

TABLE 3.10 – Résultats globaux sur les événements de référence

Événement	Coût RETEX	Coût Simulé	Erreur relative
Aude 1999	58 306 512	46 576 012	-20%
Bretagne 2000	5 702 242	2 865 929	-50%
Gard 2002	258 941 902	17 020 756	-93%
Arles 2003	78 953 964	91 189 850	15%
Seine 2016	550 000 000	10 737 339	-98%

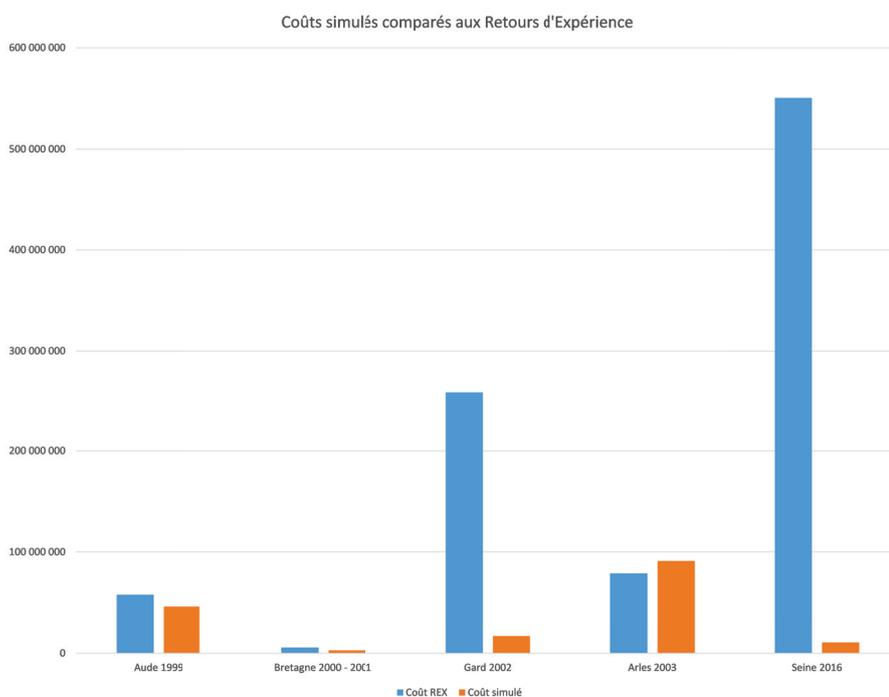


FIGURE 3.15 – Coûts simulés par le modèle comparés par les données issues des Retours d'Expérience

Si les ordres de grandeurs sont cohérents pour les événements Aude 1999, Bretagne 2000-2001 et Arles 2003, le modèle sous-estime drastiquement les pertes pour les évé-

ments Gard 2002 et Seine 2016. Des explications pour ces incohérences seront données dans les paragraphes dédiés à chaque événement de référence. Les sorties complètes du modèle de dommage au secteur agricole sont données, pour chaque événement, en annexe de ce chapitre.

### 3.4.1.2 Principales sources d'incertitudes du modèle

#### a. Particularités de chaque événement

Avant toute chose, chaque événement présente des caractéristiques propres qui ne peuvent pas être capturées par le modèle. Les caractéristiques de chaque événement de référence seront présentées dans les paragraphes dédiés.

#### b. Transmission des incertitudes d'un modèle à l'autre

La modélisation physique sur exposition est construite à partir d'un enchaînement de plusieurs modèles : les modèles d'aléa, d'exposition et de dommages. Les sorties d'un modèle servent de données d'entrée au modèle suivant. Or, chaque modèle présente des sources d'incertitudes qui se transmettent d'un modèle à l'autre, amplifiant alors son impact.

#### c. Incertitudes dues au modèle d'aléa

La méthode de modélisation de l'aléa inondation vise à reproduire 2 aléas :

- le débordement des cours d'eau par dépassement d'un seuil de hauteur ;
- le ruissellement par simulation des écoulements de surface sur les mailles du MNT.

Les données d'entrée utilisées par le modèle sont :

- les précipitations mesurées par Météo France sur ses stations ponctuelles extrapolées à la maille du MNT par krigeage. Cette méthode d'interpolation numérique présente des limites, notamment liées à la non prise en compte du relief, mais également directement liées au faible nombre de stations météo disponibles pour chaque événement ;
- l'évapotranspiration potentielle, qui est une estimation de l'évapotranspiration réelle, pour un sol d'une profondeur constante et un couvert végétal de type herbacé homogène ;
- une estimation de la teneur en eau du sol basée sur un réservoir de 200mm unique pour tous les sols de France sans prendre en compte leur typologie ;
- une sélection réduite des cours d'eau référencés dans la BD Carthage : seuls les principaux cours d'eau (les fleuves et leurs affluents jusqu'à l'ordre 4) sont modélisés et non les canaux, étendues d'eau et les cours d'eau intermittents ;
- les débits réels disponibles sur le site de la banque Hydro pour certains cours d'eau dits « jaugés » qui représentent seulement une proportion du réseau hydrographique métropolitain ;
- un modèle numérique de terrain à une maille de 25m qui sert d'unité spatiale de modélisation. Ce modèle numérique présente des incertitudes liées à la valeur d'altitude des points (moyenne d'une maille de 625 m<sup>2</sup>). Ces incertitudes se reflètent directement dans les directions d'écoulements de surface.

La spécificité de ce modèle d'aléa est d'être utilisé pour prédire les dommages consécutifs aux inondations. Il est donc validé par confrontation avec les données de sinistralité disponibles à CCR. La connaissance de ses performances s'appuie sur l'étude des incertitudes liées au modèle dans sa capacité prédictive des dommages. Dans ces conditions, son incertitude est évaluée directement vis-à-vis de sa capacité à prédire l'aléa. Particulièrement adapté aux zones bâties (principaux sinistres du régime CatNat), il n'a pas été validé sur les territoires agricoles sur lesquels il va être utilisé pour cette thèse.

Le modèle calcule en sortie des débits de ruissellement ainsi qu'une estimation des hauteurs d'eau sur chacune des mailles du MNT à 25m. Les paramètres de durée d'inondation, d'excès de pluie, de vitesse d'écoulement ne sont pas calculés par le modèle lui-même et n'ont pas fait l'objet d'une validation avec des données de référence. Ces résultats sont donc susceptibles d'être irréalistes et ne peuvent être interprétés qu'en relatif.

#### d. Modèle d'exposition : Périmètre des dommages étudiés

La démarche de modélisation ne permet pas d'étudier les conséquences des inondations à l'échelle des exploitations agricoles. De plus, il n'existe pas aujourd'hui de données géographiques permettant de descendre à cette échelle. De fait, des interactions plus fines, qui ne peuvent être détectées qu'à l'échelle de l'exploitation agricole et pouvant avoir des effets à moyen et long termes sur l'activité ne sont pas considérés. Ces interactions sont notamment les suivantes :

- effets induits de l'endommagement des outils de production ou des stocks d'intrants sur la poursuite de l'itinéraire technique ;
- effets induits de la disponibilité en capital humain et matériels mobilisables par l'exploitation agricole (insertion dans les filières amont et aval, possibilité d'entraide entre plusieurs exploitations) sur la poursuite de l'itinéraire technique ;
- effets induits par la disponibilité en capital financier de l'exploitation sur la capacité à se remettre en route et poursuivre l'itinéraire technique (trésorerie, endettement etc.).

#### e. Modèle d'exposition : Taille de la maille

La taille choisie pour la maille a un impact sur les résultats du modèle : plus la maille sera large, plus le modèle d'exposition va perdre en précision, comme illustré dans la figure suivante.

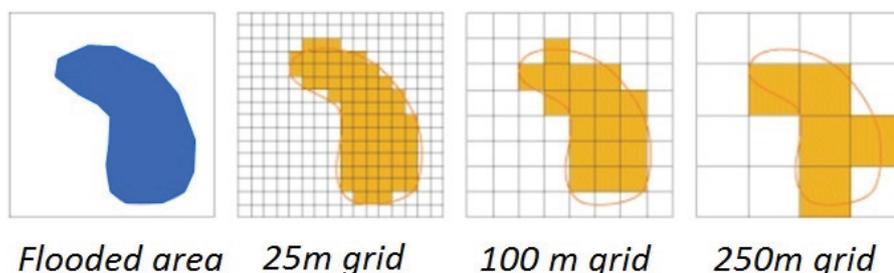


FIGURE 3.16 – Illustration schématique du lien entre l'aléa et les mailles d'exposition pour différentes tailles de maille

Cependant, une taille de maille trop fine peut être contre-productive en termes de temps de traitement par le modèle et de précision du modèle global. En effet, comme dé-

crit précédemment, le modèle d'aléa présente des incertitudes sur les zones inondées et les caractéristiques d'aléa. L'utilisation de mailles plus larges peut lisser les incertitudes du modèle d'aléa même si cela implique de perdre de la précision sur le modèle d'exposition.

Une étude de l'impact de la taille de la maille sur l'incertitude des modèles d'aléa, d'exposition et du modèle global devra être menée. La taille de maille qui permettra de réduire au maximum les incertitudes du modèle global sera retenue.

#### **f. Modèle d'exposition : Une seule année d'exposition, l'année 2012**

Seule une année d'exposition a été construite dans le cadre de ce modèle, l'exposition de l'année 2012. Cette année a été choisie car il s'agit des données du Registre Parcellaire Graphique les plus récentes au moment de notre étude. Les années antérieures n'ont pas été construites car le travail de transformation des données du RPG en une grille nécessite un très long travail en amont. Les incertitudes induites par l'utilisation d'une seule année d'exposition sont dues à la variation de l'exposition dans le temps. Cette variation peut être de deux types :

- l'utilisation des sols : les zones qui sortent de ou entrent dans l'agriculture, changement dans la pratique agricole ou de l'orientation technico-économique ;
- la rotation des cultures d'une année sur l'autre (Tapia-Silva et al., 2011). Une étude statistique sur les pratiques de rotation des cultures pourrait être intéressante à mener et à intégrer au modèle pour y pallier.

Une étude de la stabilité des surfaces agricoles dans le temps serait intéressante à mener afin de quantifier l'incertitude générée par la généralisation d'une année d'exposition (2012) pour toutes les années d'exposition et de déterminer si la construction de l'exposition pour chaque année apporterait une valeur ajoutée non négligeable sur la précision du modèle d'exposition. Aujourd'hui, pour chaque événement de référence, les surfaces agricoles utiles de l'année 2012 et l'année de l'événement ont été comparées pour les régions touchées.

#### **g. Modèle de dommages : les courbes de dommages**

Comme présenté dans la section précédente, les courbes d'endommagement nationales sont également sources d'incertitude. Si les nouvelles courbes développées en collaboration avec l'IRSTEA ont permis de pallier à un certain nombre de limites, il reste des incertitudes sur le développement des courbes de dommages élémentaires. En effet, aucun expert du nord de la France n'a été rencontré, ce qui ne permet pas de prendre en compte l'ensemble des pratiques agricoles.

De plus, à conditions d'aléa identiques, deux cultures similaires peuvent ne pas subir les mêmes dommages à cause de beaucoup de micro-paramètres ne pouvant pas être pris en compte dans les courbes.

Enfin, différentes courbes de dommages fourniront des estimations de dommages différentes. Ainsi, en élargissant cette réflexion à d'autres types de pertes, plusieurs études ont étudié l'influence de l'utilisation de différentes courbes d'endommagement sur les dommages estimés par les modèles et ont observé une très large variation des résultats (Apel et al., 2009; Freni et al., 2010; Jongman et al. 2012). La construction des courbes d'endommagement, les données utilisées, les choix de modélisation et les hypothèses

induisent des incertitudes.

Par exemple, Apel et al. (2009) ont comparé les résultats de plusieurs approches de modélisation avec les dommages constatés sur les bâtiments et ont observé que la différence entre les courbes d'endommagement peuvent mener à des erreurs relatives allant de 87% à 34%. Bubeck et al (2011) ont mené une comparaison des résultats de deux modèles de dommages :

- le modèle Rhine Atlas (RAM) (ICPR, 2001) qui utilise des courbes de dommages empiriques développées à partir de la base de données de sinistres HOWAS. Ces courbes estiment des dommages directs tangibles causés par un contact physique direct avec les eaux d'inondation ;
- le modèle Damage Scanner (DSM) (Klijn et al., 2007) qui utilise les courbes développées principalement sur avis d'expert du modèle HIS-SSM (Kok et al., 2004). En plus des dommages directs tangibles, ces courbes incluent 5% de pertes indirects dans leurs estimations.

Ces deux modèles associent, à plusieurs classes d'occupation des sols, une valeur maximum de dommages et une courbe de dommages. Pour le secteur agricole, le RAM associe une valeur maximum de  $7 \text{ €/m}^2$  associé à un niveau de dommages linéaire et faible alors que le DSM associe une valeur maximum de  $20 \text{ €/m}^2$  et  $10 \text{ €/m}^2$  pour les pâturages associés à des courbes de dommages abruptes (figure ci-dessous).

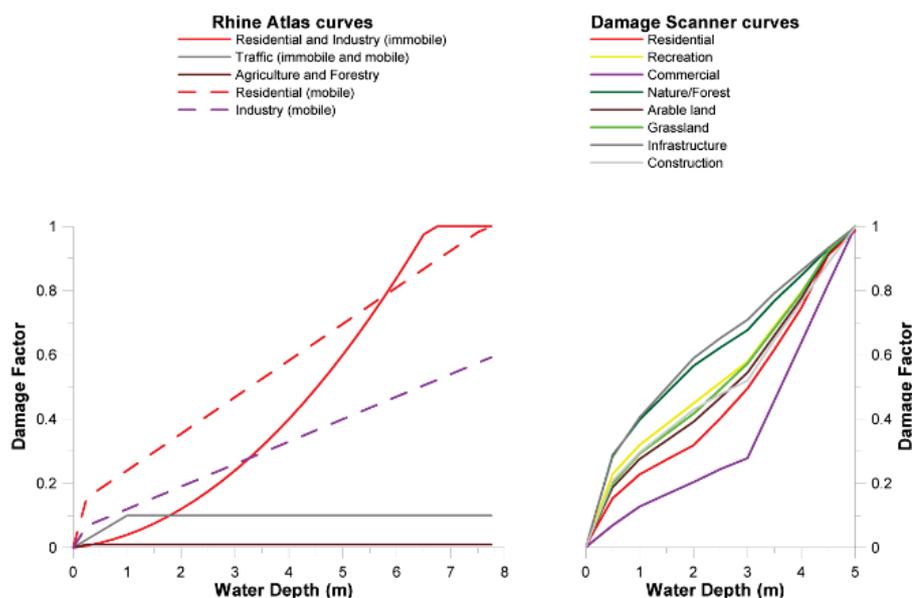


FIGURE 3.17 – Courbes de dommages des modèles Rhine Atlas et Damage Scanner (Bubeck et al., 2011)

Pour l'inondation du Rhin en 2000, Bubeck et al. (2011) comparent la part de chaque classe d'occupation des sols dans les dommages totaux estimés par chaque modèle et ils observent de fait une très grande différence de résultats entre les deux modèles. Dans le RAM, les classes d'occupation des sols urbains (résidentielles et commerciales) représentent environ 98% des dommages totaux contre seulement 0,4% pour l'agriculture. Dans le DSM, les premières ne représentent plus que 79% des dommages et l'agriculture représente alors 14,8% des dommages.

Dans le cadre de ces travaux, il est également intéressant de regarder comment le modèle se comporte en utilisant d'autres courbes d'endommagement que celles utilisées

dans ce modèle. La courbe des pertes agricoles du modèle Damage Scanner (HIS-SSM) étant disponibles (Kok et al., 2004), elle a été implémentée dans le modèle.

La formule pour estimer les dommages à l'agriculture utilisée dans ce modèle est la suivante :

$$S = \sum \alpha_i n_i S_i \quad (3.1)$$

où :

- $\alpha_i$  est le facteur de dommage pour la catégorie de dommages  $i$
- $n_i$  est le nombre d'unités de la catégorie de dommages  $i$
- $S_i$  est la valeur maximum de dommages pour la catégorie de dommages  $i$

Les valeurs maximum de dommages du secteur agricole sont :

$$S_{agriculture} = 20 \quad (3.2)$$

$$S_{paturages} = 10 \quad (3.3)$$

Le facteur de dommage s'estime de la façon suivante (figure ci dessous) :

$$\alpha_{agriculture} = \min(d; 0,24 * d + 0,4; 0,07 * d + 0,75; 1) \quad (3.4)$$

**damage factor for agriculture and recreation**

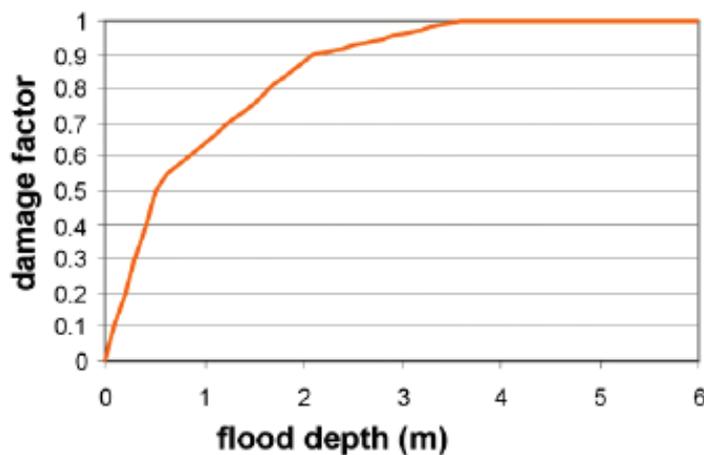


FIGURE 3.18 – Courbes de dommages à l'agriculture et aux pâturages du modèle Damage Scanner (Kok et al., 2004)

Ainsi, en appliquant cette estimation des dommages, on obtient les résultats suivant :

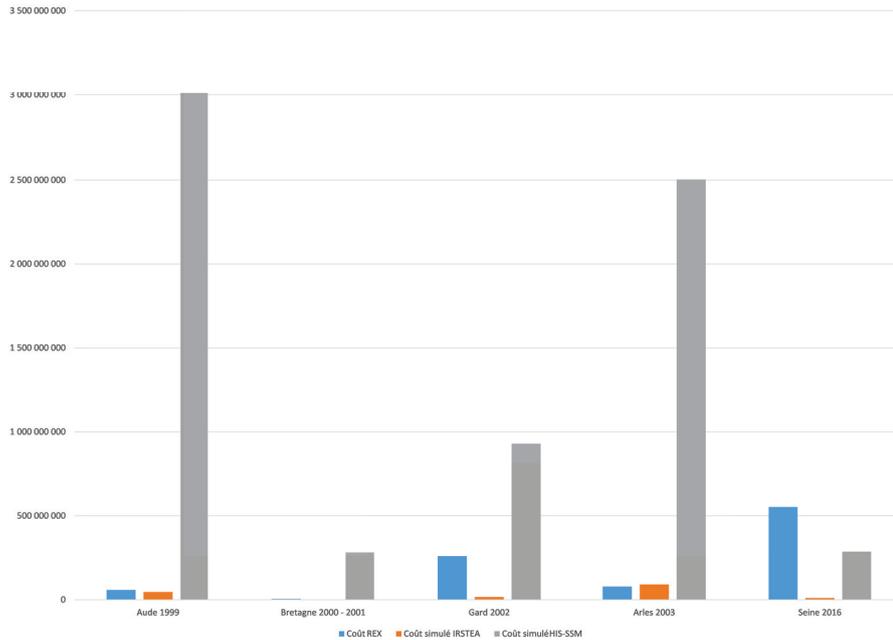


FIGURE 3.19 – Comparaison des RETEX avec les résultats obtenus avec les modèles CCR, HIS-SSM

Le modèle Damage Scanner surestime largement les pertes agricoles sur tous les événements, sauf l'événement Seine 2016. Cette dernière observation est très intéressante car elle permet de remettre en question les données RETEX utilisées pour challenger le modèle pour l'événement Seine 2016.

Les paragraphes suivants étudient plus en détails les résultats du modèle développé pour CCR pour chaque événement de référence.

## 3.4.2 Aude 1999

## 3.4.2.1 Résultats

Les inondations des 12 et 13 novembre 1999 dans l'Aude, les Pyrénées-Orientales, l'Hérault et le Tarn ont fait suite à un épisode orageux. Le RETEX sur cet événement (Lefrou, 2000) donne des informations sur les pertes au secteur agricole par culture ou par type de pertes (tableaux suivants) :

TABLE 3.11 – RETEX Aude 1999, pertes agricoles par culture

Département	Aude	Pyrénées-Orientales	Tarn	Hérault	Total
Vignoble	30 261 421	8 524 344	0	3 784 809	42 570 573
Maraîchage	1 875 356	11 081 647	17 049	0	12 974 051
Arboriculture	0	511 461	0	0	511 461
Autres	0	340 974	1 261 603	647 850	2 250 427
<b>Total</b>	<b>32 136 777</b>	<b>20 458 425</b>	<b>1 278 652</b>	<b>4 432 659</b>	<b>58 306 512</b>

TABLE 3.12 – RETEX Aude 1999, pertes agricoles par type de pertes

Département	Aude	Pyrénées-Orientales	Tarn	Hérault	Total
Foncier	11 252 134	6 819 475	1 022 921	3 375 640	22 470 171
Végétal	9 291 535	852 434	17 049	988 824	11 149 842
Récoltes	340 974	11 081 647	0	0	11 422 621
Autres	11 252 134	1 704 869	238 682	68 195	13 263 879
<b>Total</b>	<b>32 136 777</b>	<b>20 458 425</b>	<b>1 278 652</b>	<b>4 432 659</b>	<b>58 306 512</b>

En adoptant la même répartition dans les sorties du modèle de dommages, on obtient les résultats suivants :

TABLE 3.13 – Coûts simulés Aude 1999, pertes agricoles par culture

Département	Aude	Pyrénées-Orientales	Tarn	Hérault	Aveyron	Total
Vignoble	34 260 538	1 724 168	362 904	1 868 927	34 414	38 250 951
Maraîchage	917 428	6 638	13 962	20 309	2 751	961 089
Arboriculture	419 427	190 355	29 241	136 796	39 740	815 558
Autres	4 645 513	25 549	652 163	91 127	1 134 062	6 548 414
<b>Total</b>	<b>40 242 906</b>	<b>1 946 710</b>	<b>1 058 271</b>	<b>2 117 159</b>	<b>1 210 967</b>	<b>46 576 012</b>

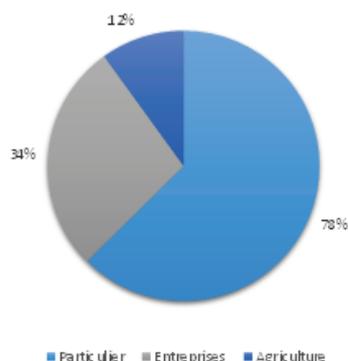
TABLE 3.14 – Coûts simulés Aude 1999, pertes agricoles par type de pertes

Département	Aude	Pyrénées-Orientales	Tarn	Hérault	Aveyron	Total
Foncier	27 847 998	424 634	689 803	484 853	742 025	30 189 314
Végétal	10 773 587	857 458	289 080	940 692	422 014	13 282 830
Récoltes	691 656	148 116	37 954	156 006	17 107	1 050 839
Autres	929 664	516 502	41 434	535 608	29 821	2 053 029
<b>Total</b>	<b>40 242 906</b>	<b>1 946 710</b>	<b>1 058 271</b>	<b>2 117 159</b>	<b>1 210 967</b>	<b>46 576 012</b>

On observe une erreur relative de -20% entre le RETEX et l'estimation issue du modèle.

De plus, il est intéressant d'étudier la répartition des pertes par catégories de dommages entre ce qui est estimé via les modèles CCR et les informations des pertes fournies par les RETEX. A périmètre et classification homogènes (Particuliers, Entreprises et Agriculture), les deux graphiques suivants permettent de comparer la répartition des pertes fournies par le RETEX et estimées par les modèles développés à CCR :

Répartition des pertes estimées - Aude 1999



Répartition des pertes RETEX - Aude 1999

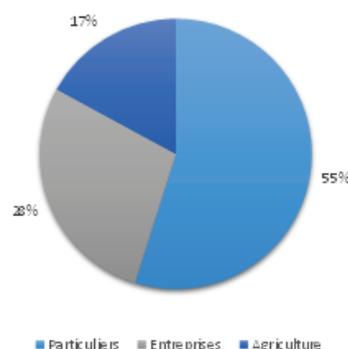


FIGURE 3.20 – Répartition des pertes estimées et RETEX - Aude 1999

On peut remarquer qu'en termes de répartition des dommages par type de pertes, les modèles CCR Particuliers, Entreprises et Agriculture fournissent une répartition proche de celle observée via les RETEX.

### 3.4.2.2 Incertitudes

La source principale d'erreur pour cet événement provient de l'estimation des pertes de récoltes en maraîchage et vignes dans les Pyrénées-Orientales, largement sous-estimées par le modèle.

Tout d'abord, il est possible que la sous-estimation provienne en partie de la courbe de dommages "légumes et fleurs" qui est peut-être trop généraliste. Elle regroupe en effet une grande diversité de cultures et de pratiques (en serres, plein champs, hors sol...) alors que ce département présente une agriculture très peu diversifiée et à très haute valeur ajoutée.

D'autre part, il est possible que le modèle d'aléa n'ait pas simulé d'aléa sur cette certaines zones cultivées. Concernant les zones inondées pour le maraîchage, le modèle simule les aires inondées suivantes :

TABLE 3.15 – Surfaces inondées en maraîchage (en m<sup>2</sup>), Aude 1999

Département	Surface inondée en débordement	Surface inondée en ruissellement	Surface inondée totale
Aude	3 502 614	1 626 840	5 129 455
Aveyron	5 266	52 685	57 951
Hérault	10	1 790 460	1 790 469
Pyrénées-Orientales	3 525	517 001	520 526
Tarn	303	582 335	582 638

Or le maraîchage couvre 23 456 ha de la région Occitanie. Le modèle estime donc que 3,4% de la surface en maraîchage a été inondée par l'inondation.

Enfin, il est possible qu'une partie de la sous-estimation du modèle provienne des incertitudes du modèle d'exposition, notamment de l'utilisation du RPG de l'année 2012 pour un événement de 1999. Le graphique ci-dessous compare les SAU par culture de la région Occitanie entre 1999 et 2012.

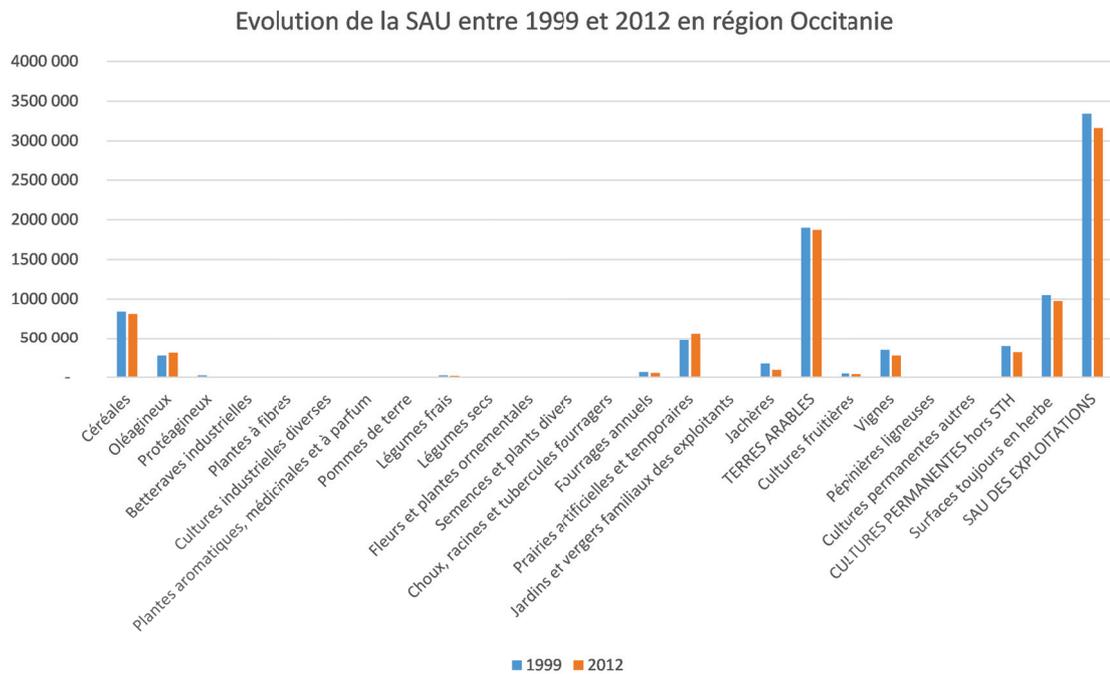


FIGURE 3.21 – Évolution de la SAU entre 1999 et 2012 en Occitanie

Si la surface agricole utile a peu évolué entre 1999 et 2013 (-5%), on peut observer une baisse sur certaines productions à forte valeur ajoutée, à savoir les cultures permanentes (-20%) et notamment la vigne (-20%) et les cultures fruitières (-20%). Or, selon le RETEX, la vigne représente 73% du montant des dégâts sur cet événement.

### 3.4.3 Bretagne 2000 et 2001

#### 3.4.3.1 Résultats

La particularité de cet événement est qu'il s'agit en fait de deux événements consécutifs : les inondations par débordement de décembre 2000 et de janvier 2001. Le RETEX disponible correspond à un RETEX pour ces deux événements combinés. Les informations relatives au secteur agricole dans ce RETEX sont les suivantes :

TABLE 3.16 – RETEX Bretagne 2000 et 2001, pertes agricoles par type de pertes

Département	Pertes au secteur agricole
Côtes d'Armor	670 852
Finistère	1 006 278
Ille-et-Vilaine	1 844 843
Loire-Atlantique	670 852
Morbihan	1 509 417
<b>TOTAL</b>	<b>5 702 242</b>

Pour l'événement de décembre 2000, le modèle développé à CCR estime les pertes suivantes :

TABLE 3.17 – Coûts simulés Bretagne 2000, pertes agricoles par type de pertes

Département	Pertes au secteur agricole
Côtes d'Armor	618 755
Finistère	909 304
Ille-et-Vilaine	324 016
Loire-Atlantique	186 096
Morbihan	397 869
<b>TOTAL</b>	<b>2 436 040</b>

Les pertes de récolte par culture se répartissent de la façon suivante :

Répartition des pertes de récolte par type de culture - Bretagne 2000

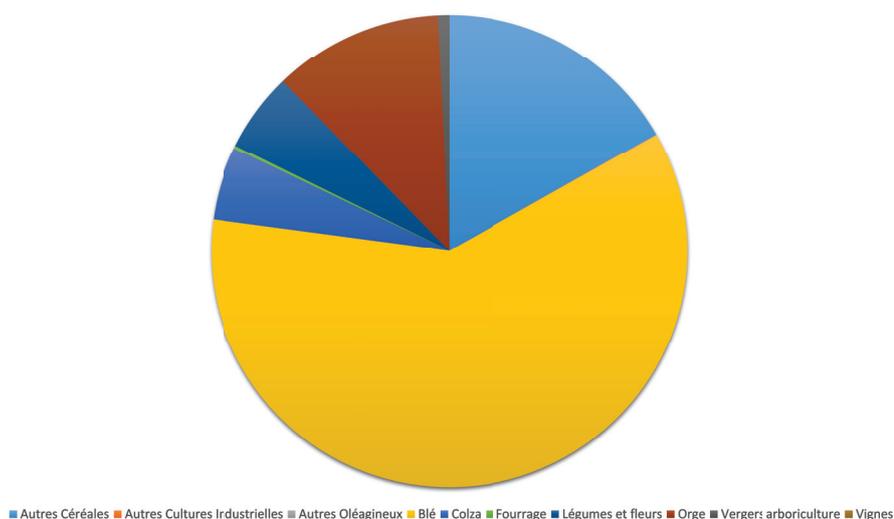


FIGURE 3.22 – Répartition des pertes de récolte par type de culture - Bretagne 2000

Le RETEX de cet événement précise qu'au global (c'est à dire tous postes de pertes confondus : particuliers, entreprises, agriculture et équipements publics), les événements

de décembre représentent 85% des dégâts. Si on applique ce ratio aux sorties du modèle de pertes agricoles de CCR, on obtient pour l'événement décembre 2000 - janvier 2001, le résultat suivant :

TABLE 3.18 – Coûts simulés ajustés Bretagne 2000 et 2001, pertes agricoles par type de pertes

Département	Pertes au secteur agricole
Côtes d'Armor	727 947
Finistère	1 069 769
Ille-et-Vilaine	381 195
Loire-Atlantique	218 937
Morbihan	468 081
<b>TOTAL</b>	<b>2 865 929</b>

On obtient donc une erreur relative de -50% pour ces deux événements confondus.

Les deux graphiques suivants permettent de comparer la répartition des pertes fournie par le RETEX et estimées par les modèles développés à CCR :

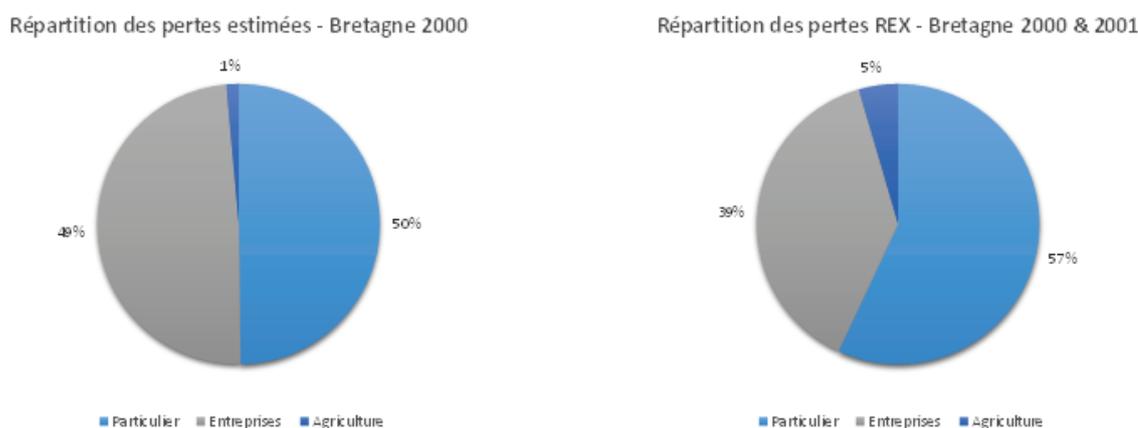


FIGURE 3.23 – Répartition des pertes estimées et RETEX - Bretagne 2000

La répartition des dommages des modèles CCR est proche de la répartition observée via les RETEX.

### 3.4.3.2 Incertitudes

#### Particularités l'événement :

La particularité de cet événement est qu'il s'agit en fait de deux événements consécutifs : l'inondation de décembre 2000 et celle de janvier 2001. Comme le montre les cartes suivantes du coût Cat Nat par commune, l'événement de décembre 2000 a principalement touché l'ouest de la Bretagne (Finistère et Morbihan ouest) alors que celui de janvier 2001 a touché l'est breton en débordant, principalement, sur l'Ille-et-Vilaine et la Loire-Atlantique.

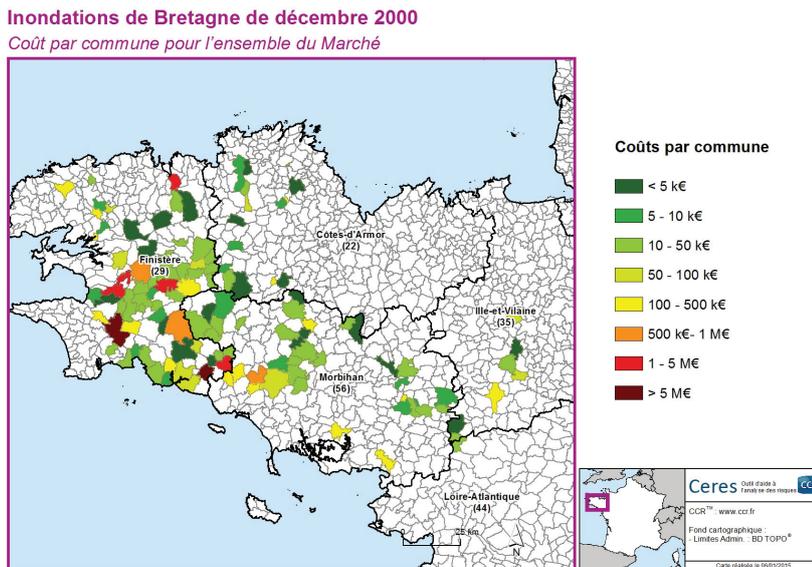


FIGURE 3.24 – Répartition géographique des coûts Cat Nat - Bretagne Décembre 2000

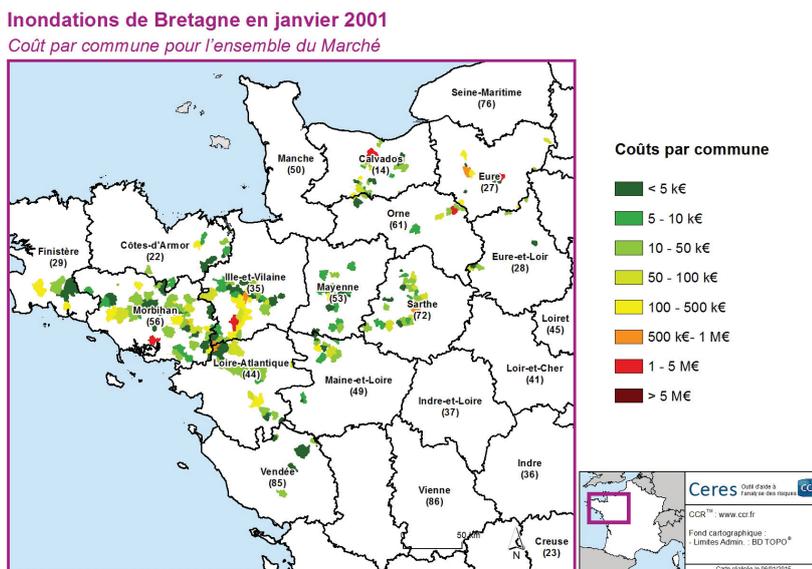


FIGURE 3.25 – Répartition géographique des coûts Cat Nat - Bretagne Janvier 2001

Cela explique que l'on sous-estime le coût de l'événement lorsqu'on simule uniquement l'événement Bretagne 2000. Cependant, on fait face à une problématique de double comptage si l'on simule de supplément l'événement de janvier 2001.

Ainsi, on peut tenter de scinder grossièrement les informations du RETEX en deux événements, on peut alors considérer que l'événement de décembre 2000 correspond aux coûts pour les départements des Côtes d'Armor, Finistère et la moitié des coûts du Morbihan. Si on compare le RETEX aux estimations sur un périmètre géographique constant, on obtient alors les résultats suivants :

TABLE 3.19 – Comparaison coûts RETEX et simulés - Bretagne 2000, pertes agricoles par département

Département	Pertes RETEX	Pertes simulées	Erreur relative
Côtes d'Armor	670 852	618 755	-8%
Finistère	1 006 278	909 304	-10%
Morbihan	754 708	397 869	-47%
<b>TOTAL</b>	<b>2 431 838</b>	<b>1 925 928</b>	<b>-21%</b>

L'erreur relative sur l'événement Bretagne 2000 est alors réduite à -21%.

### Incertitudes dues à l'exposition

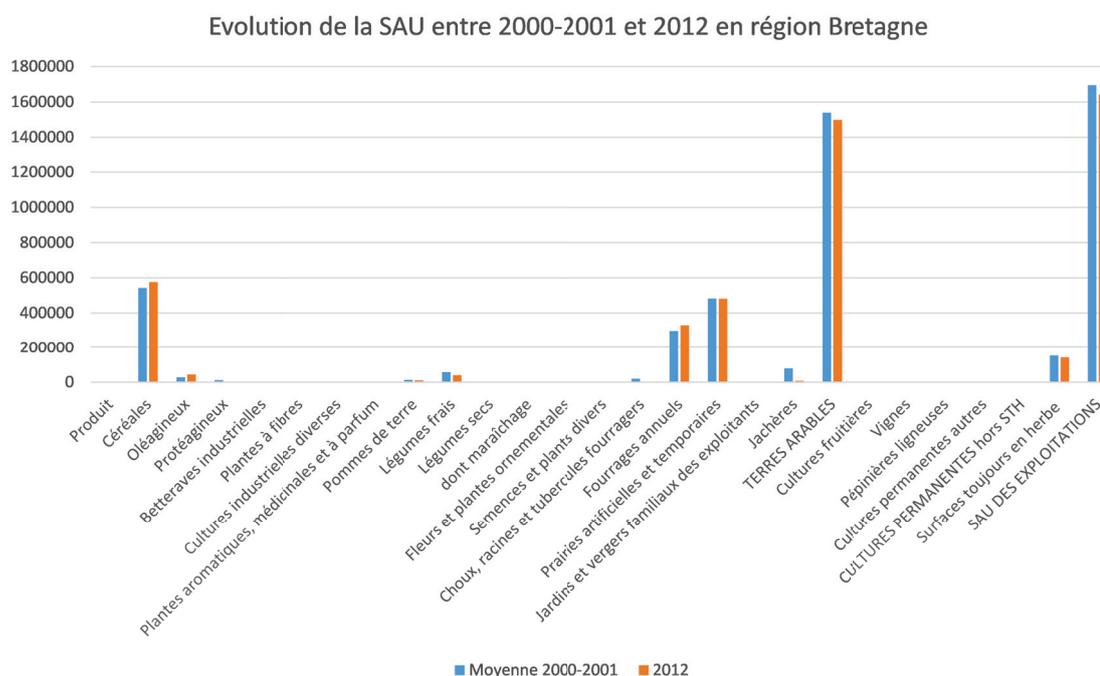


FIGURE 3.26 – Évolution de la SAU entre la moyenne 2000-2001 et 2013 en Bretagne

Les évolutions de la SAU en Bretagne entre 2000-2001 et 2013 ne sont pas assez significatives pour expliquer la différence entre le coût estimé et le RETEX.

### 3.4.4 Gard 2002

#### 3.4.4.1 Résultats

Pour les inondations des 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard, l'Hérault, le Vaucluse, l'Ardèche, les Bouches-du-Rhône et la Drôme, conséquences d'un épisode pluvio-orageux, le RETEX fournit les informations suivantes :

TABLE 3.20 – RETEX Gard 2002, pertes par secteur (en M€)

Dept	Voirie	Bâti public	Agri	Cours d'eau	Pros	Réseaux	Part	Déchets	Total
<b>Gard</b>	97,3	64,2	150,1	52,3	311,4	58,9	95,3	4,7	834,2
<b>Hérault</b>	3,3	0,2	11,3	3,4	12,2	3,2	1,8	1,4	36,8
<b>Vaucluse</b>	17,1	3,9	57,9	8,4	5,6	3	5,8	0	101,7
<b>Non réparti</b>				0,7		35			35,7
<b>Total</b>	117,7	68,3	219,3	64,8	329,2	100,1	102,9	6,1	1008,4
<b>Ardèche, Bouches-du-Rhône, Drôme</b>	Répartition indisponible								113,2
<b>Total Général</b>	Répartition indisponible								1121,6

En faisant l'hypothèse que pour les départements Ardèche, Bouches-du-Rhône et Drome, la répartition par poste de pertes est la même que dans le Gard, l'Hérault et le Vaucluse, on obtient la répartition suivante :

TABLE 3.21 – RETEX Gard 2002, répartition des pertes par secteur pour les départements Ardèche, Bouches-du-Rhône, Drome (en M€)

Dept	Voirie	Bâti public	Agri	Cours d'eau	Pros	Réseaux	Part	Déchets	Total
<b>Ardèche, Bouches-du-Rhône, Drôme</b>	13	8	25	7	37	11	12	1	113

Les pertes agricoles par département et actualisées en €2005 (courbes d'endommagement utilisées pour les événements antérieurs à 2005) pour cette événement sont donc les suivantes :

TABLE 3.22 – RETEX Gard 2002, pertes pour le secteur agricole par département (en M€)

Département	RETEX Gard 2002
<b>Gard</b>	159
<b>Hérault</b>	12
<b>Vaucluse</b>	61
<b>Ardèche, Bouches-du-Rhône, Drôme</b>	26
<b>Total</b>	259

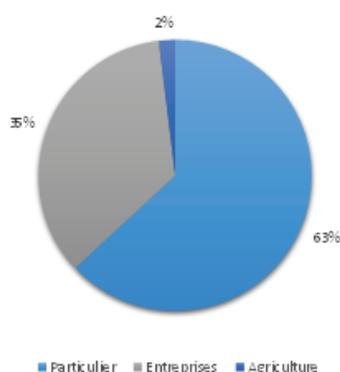
En adoptant la répartition par département dans les sorties du modèle de dommages, on obtient les résultats suivants :

TABLE 3.23 – Coûts simulés Gard 2002, pertes pour le secteur agricole par département

Dept	Pertes de récoltes sur l'année	Pertes de récoltes différées	Dommages au sol	Dommages au matériel végétal	Total
<b>Ardèche</b>	106 331	179 300	187 900	396 187	869 717
<b>Bouches-du-Rhône</b>	752 086	78 575	936 330	288 451	2 055 442
<b>Drôme</b>	124 542	164 470	317 089	272 725	878 826
<b>Gard</b>	1 461 008	1 796 102	2 464 407	3 168 965	8 890 481
<b>Hérault</b>	336 398	584 939	335 002	891 847	2 148 186
<b>Lozère</b>	1 728	2 235	43 076	27 091	74 131
<b>Vaucluse</b>	355 781	403 573	446 233	898 387	2 103 974
<b>Total</b>	3 137 873	3 209 193	4 730 037	5 943 653	17 020 75

Les répartitions des pertes fournies par le RETEX et estimées par les modèles CCR sont les suivantes :

Répartition des pertes estimées - Gard 2002



Répartition des pertes RETEX - Gard 2002

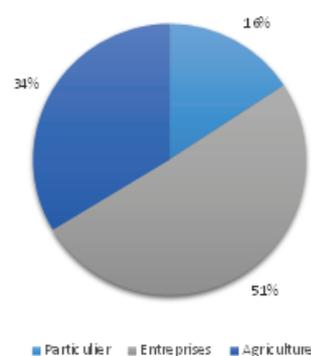


FIGURE 3.27 – Répartition des pertes estimées - Gard 2002

Cette fois-ci, on peut observer que les modèles développés à CCR ne permettent pas d'obtenir une bonne répartition des pertes : les dommages aux particuliers représentent de 63% des pertes alors qu'ils ne représentent que 16% des dommages totaux dans le RETEX.

### 3.4.4.2 Incertitudes

#### Particularités l'événement :

Les agriculteurs ont décidé de ne pas sauver ce qui aurait pu être sauvé (récoltes et plantes pérennes) afin de bénéficier au maximum du FNRA. Les efforts qui auraient pu être fait non donc pas été entrepris alors qu'ils sont pris en compte dans le modèle. Cela peut expliquer en partie la sous-estimation mais impossible de savoir dans quelle mesure.

#### Incertaines dues à l'exposition

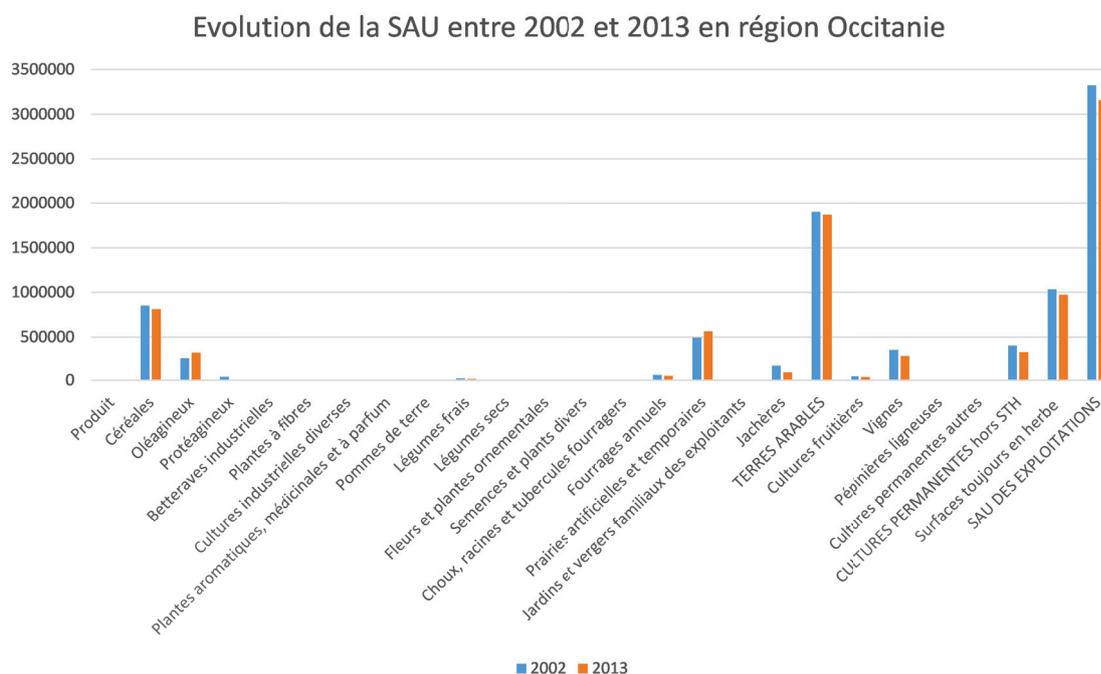


FIGURE 3.28 – Évolution de la SAU entre 2002 et 2012 en Occitanie

Légère diminution de la SAU utilisée des exploitations entre 2002 et 2013 (-5%) mais avec des baisses importantes sur certaines cultures à forte valeur ajoutée, à savoir les cultures permanentes (-19%) avec notamment une baisse de 20% sur les vignes.

#### Courbes d'endommagement :

Enfin, le calendrier cultural peut ne pas être adapté à cette zone géographique et pour cette période, induisant une erreur d'estimation.

## 3.4.5 Arles 2003

## 3.4.5.1 Résultats

Répartition par type de pertes sur plusieurs départements :

TABLE 3.24 – Coûts simulés Gard 2002, pertes pour le secteur agricole par département

Département	Pertes de fond	Pertes de récolte	Besoins en foin	Total
<b>Bouches-du-Rhône (13)</b>	3 482 209	4 282 427	1 170 204	8 934 840
<b>Vaucluse (84)</b>	2 999 998	1 222 274	0	4 222 272
<b>Gard (30)</b>	11 090 254	6 202 661	0	17 292 915
<b>Ardèche (07)</b>	Répartition non disponible			132 000
<b>Drôme (26)</b>	14 422	29 074	0	43 496
<b>Total hors Ardèche</b>	17 586 883	11 736 436	1 170 204	30 493 523

En appliquant la répartition par type de pertes agricoles du total hors Ardèche à ce département, on obtient les résultats suivants :

TABLE 3.25 – Coûts simulés Gard 2002, pertes pour le secteur agricole par département

Département	Pertes de fond	Pertes de récolte	Besoins en foin	Total
<b>Bouches-du-Rhône (13)</b>	3 482 209	4 282 427	1 170 204	8 934 840
<b>Vaucluse (84)</b>	2 999 998	1 222 274	0	4 222 272
<b>Gard (30)</b>	11 090 254	6 202 661	0	17 292 915
<b>Ardèche (07)</b>	76 130	50 805	5 066	132 000
<b>Drôme (26)</b>	14 422	29 074	0	43 496
<b>Total</b>	17 663 013	11 787 241	1 175 270	30 625 523

Pour les pertes de fond et de récolte, le modèle estime :

TABLE 3.26 – Coûts simulés Gard 2002, pertes pour le secteur agricole par département

Département	Pertes de fond	Pertes de récolte
3	357 829	48 015
4	136 397	213 131
5	115 610	95 710
7	947 899	273 108
11	5 606 891	1 010 469
12	1 168 388	213 003
13	1 073 882	620 056
15	699 150	6 454
18	70 194	42 039
26	1 581 741	509 863
30	4 021 998	1 402 058
31	99 490	136 406
34	6 950 833	1 296 690
37	13 970	13 279
38	264 455	129 546
42	594 042	83 239
43	600 636	40 122
45	14 714	33 632
46	648 109	299 282
47	170 972	210 390
48	325 994	19 813
58	336 507	44 404
63	552 747	61 544
66	1 663 018	335 794
69	757 700	112 490
71	1 000 838	72 729
81	735 729	271 295
82	265 623	393 234
84	3 213 015	1 504 135
<b>Total</b>	<b>33 988 372</b>	<b>9 491 929</b>

Si on compare :

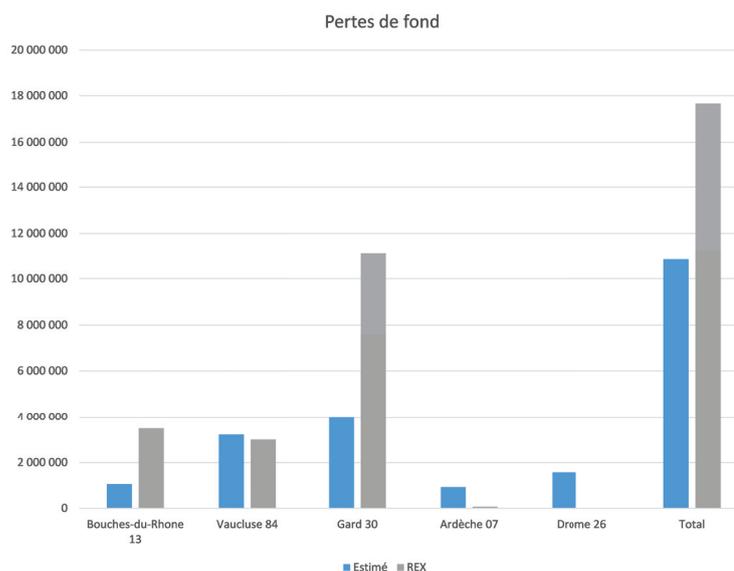


FIGURE 3.29 – Comparaison des estimations en pertes de fond

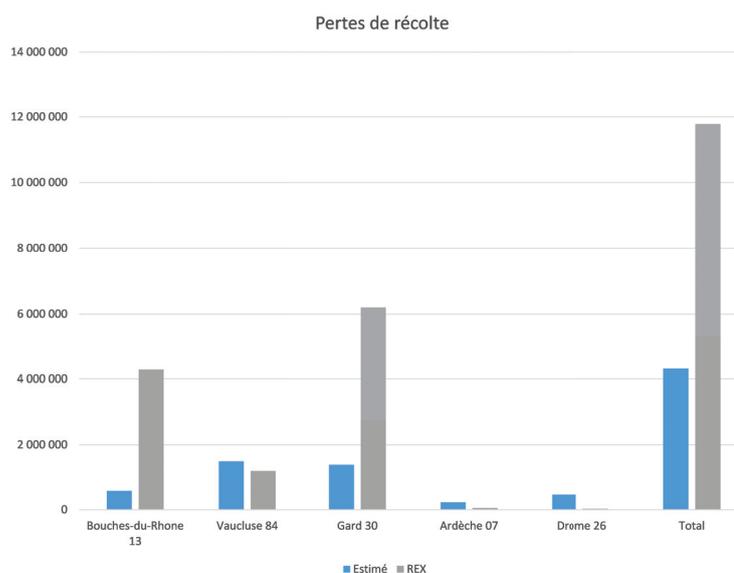


FIGURE 3.30 – Évolution de la SAU entre 2003 et 2013 en région PACA

En réaction aux inondations du Rhône de 2002 et 2003, les Chambres d'agriculture du Rhône aval dressent un constat alarmant sur la situation des exploitations agricoles riveraines du fleuve (article mai 2015) :

- les 2/3 des exploitations des bords du Rhône en aval de Valence sont en zones inondables ;
- près d'une exploitation sur trois a subi au moins cinq inondations depuis 1993 ;
- trois exploitations sur quatre subissent des hauteurs d'eau supérieures à 1 mètre ;
- les exploitations, hors viticulture, ont plus de 60% de leur surface inondée ;
- près de deux exploitations sur trois estiment subir des inondations d'intensité forte à très forte ;
- les pertes financières sont considérables.

Depuis 2011 un dispositif, animé par les Chambres d'agriculture de l'Ardèche, des Bouches-du-Rhône, de la Drôme, du Gard et de Vaucluse, permet aux agriculteurs volontaires de mettre en place des mesures grâce à des taux de subventions attractifs pouvant aller jusqu'à 80% du coût des travaux. Les réalisations sont les suivantes :

- dans les parcelles : haies brise-courant, surélévation de cultures sous serre, sécurisation de systèmes d'irrigation, forages et pompes immergées ;
- dans les bâtiments : batardeaux, mezzanines, planchers rehaussés, étagères, adaptations du système électrique, protections des produits phytosanitaires et du gasoil ;
- pour les bâtiments non adaptables au risque : délocalisations ;
- autres : zones refuge (matériel/cheptel), barques, matériels de nettoyage, etc.

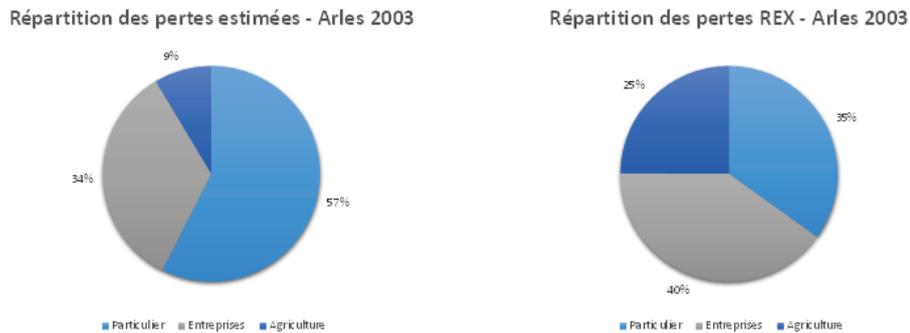


FIGURE 3.31 – Répartition des pertes estimées - Arles 2003

### 3.4.5.2 Incertitudes

#### Incertitudes dues à l'exposition

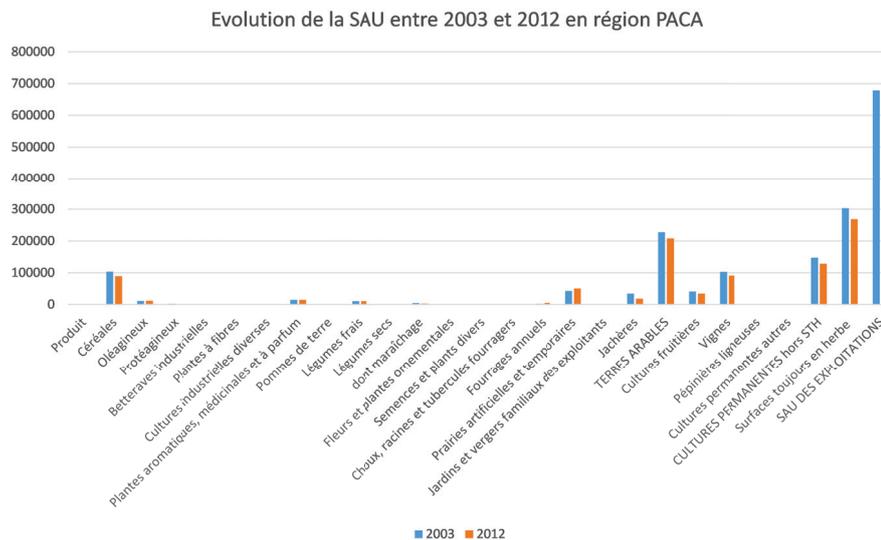


FIGURE 3.32 – Evolution de la SAU entre 2003 et 2012 en région PACA

L'absence d'évolution significative de la SAU ne permet pas d'expliquer la différence entre le coût simulé et le RETEX.

### 3.4.6 Seine 2016

#### 3.4.6.1 Résultats

Pour l'événement de juin 2016, les RETEX font référence à des pertes de récolte de l'ordre de 550 000 000 €. Or, les résultats issus du modèle sont les suivants :

TABLE 3.27 – Coûts simulés Seine 2016, pertes pour le secteur agricole par département (en M€)

Département	Pertes de récoltes de sur l'année	Pertes de récoltes différées	Dommages au sol	Dommages au matériel végétal	TOTAUX
18	364 832	13 286	545 134	155 337	1 078 589
28	1 227 845	8 634	884 109	62 691	2 183 280
36	400 936	3 332	590 375	157 264	1 151 908
37	648 125	24 710	698 092	115 088	1 486 015
41	439 639	34 858	428 041	95 923	998 462
45	682 458	17 928	624 435	48 865	1 373 686
75	0	0	0	0	0
77	397 840	2 294	315 856	17 407	733 398
78	171 581	809	140 394	12 001	324 784
89	400 010	7 818	490 550	90 886	989 264
91	125 399	122	101 675	3 442	230 638
92	0	0	0	0	0
93	100	0	68	0	169
94	2 360	51	973	325	3 710
95	90 718	2 341	80 910	9 468	183 438
<b>Total</b>	<b>4 951 844</b>	<b>116 184</b>	<b>4 900 612</b>	<b>768 698</b>	<b>10 737 339</b>

#### 3.4.6.2 Incertitudes

Comparer aléa CCR avec communes déclarées en Cat Nat

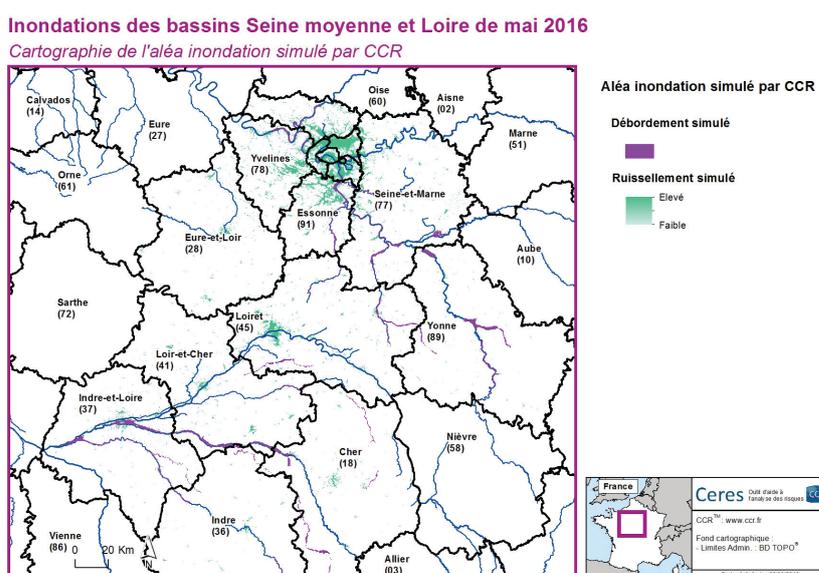


FIGURE 3.33 – Répartition géographique des coûts Cat Nat - Bretagne Décembre 2000

**Particularités l'événement :**

Une grande partie des pertes agricoles sont en fait dues au manque d'ensoleillement et à l'excédent d'eau dans les sols subi par les exploitants depuis le début de l'année 2016 et qui n'a fait qu'augmenter sur la première moitié de l'année 2016. Cette saturation des sols a déjà fait perdre une partie des récoltes. De plus, lors des pluies de mai juin, les sols étant déjà saturés, les inondations ont eu lieu directement.

Cette saturation des sols sur plusieurs mois n'est pas prise en compte dans les modèles (pas simulé par le modèle d'aléa et pas de courbes de dommages pour saturation - contrairement au MCM qui estime les pertes pour saturation des sols). Cependant cette saturation des sols est une cause majeure dans les pertes de récolte et dans l'aggravation de l'inondation. D'où une forte sous-estimation des dommages.

L'indicateur de l'état des ressources en eau du sol est l'indice d'humidité des sols (SWI) issu du modèle SIM du Centre national de recherches météorologiques (<http://www.eaufrance.fr>). La seconde carte présente l'écart à la moyenne interannuelle de l'indice, à la même date, sur la période de référence 1981-2010. Janvier 2016 : Les sols restent secs en Alsace alors que des régions bordant la Manche à la Champagne-Ardenne ainsi que sur le Centre-Est, l'indice d'humidité des sols est généralement proche de la saturation. Il est globalement proche de la normale sur la moitié nord du pays ainsi que sur le Sud-Est, mais toutefois déficitaire de 20 à 40 % de la Lorraine à l'Alsace, ainsi que localement sur le sud de la région PACA.

Février 2016 : L'indice d'humidité des sols est généralement proche de la saturation hormis localement dans la Loire, en Auvergne, du Tarn et du nord de la Haute-Garonne au département de l'Aude ainsi que sur le pourtour méditerranéen où le déficit perdure. Les sols se sont humidifiés par rapport au mois précédent sur la majeure partie du pays, notamment sur la moitié ouest de l'Hexagone. L'excédent dépasse parfois 10 % du nord de l'Aquitaine au sud de la Bretagne, des Pays de la Loire et du Centre à l'Île-de-France ainsi que sur le Cotentin et dans la région lilloise.

Mars 2016 : L'indice d'humidité des sols est proche de la saturation sur la quasi-totalité du pays. Le déficit perdure très localement dans la Loire, le Puy-de-Dôme, de l'Aude au sud de l'Hérault, ainsi que dans les Bouches-du-Rhône. L'indice d'humidité des sols est proche de la normale sur une grande partie du pays, légèrement supérieur sur la moitié ouest et un petit quart sud-est. Néanmoins, la sécheresse des sols persiste sur le Roussillon.

Avril 2016 : Le 30 mars 2016, l'indice d'humidité des sols est proche de la saturation sur la quasi-totalité du pays. Les sols sont plus secs localement dans la Loire, le Puy-de-Dôme, de l'Aude au sud de l'Hérault, ainsi que dans les Bouches-du-Rhône. L'indice d'humidité des sols est proche de la normale sur une grande partie du pays. Cependant, l'excédent observé le mois dernier s'accroît du nord de la Vienne et de l'est du Maine-et-Loire jusqu'à la région parisienne, compris entre 20 et 40 %, atteignant 50 % sur le sud du Loir-et-Cher. En revanche, l'indice d'humidité des sols est 10 à 30 % en dessous de la normale du Haut-Rhin et du massif des Vosges à l'Isère, dans le département de la Loire, et localement dans le Languedoc.

Mai 2016 : Le 1er mai 2016, l'indice d'humidité des sols est encore proche de la satura-

tion sur une grande partie du pays. Toutefois, les sols s'assèchent légèrement sur le quart nord-ouest de l'Hexagone, notamment le long de la côte atlantique, de la Vendée et du Poitou-Charentes à la Champagne ainsi que sur le Nord - Pas-de-Calais. L'assèchement s'accroît dans la Loire ainsi que sur le pourtour méditerranéen, notamment sur l'ouest de la Provence, et gagne le Tarn et le Midi toulousain. Les sols sont également plus secs en Corse, particulièrement sur la Balagne. L'indice d'humidité des sols est 10 à 20 % au-dessus de la normale sur une grande partie du pays. L'excédent dépasse 20 % sur le nord de l'Aquitaine et de Midi-Pyrénées ainsi que de l'est de la Bretagne au sud de la Bourgogne et plus localement en Normandie et Picardie. Déficitaire le mois dernier de la Lorraine et du sud de l'Alsace au nord de la région Rhône-Alpes, au 1er mai, l'indice d'humidité des sols dépasse la normale de 10 à 30 %, voire localement plus.

Juin 2016 : Les sols se sont généralement humidifiés au cours du mois de mai et sont saturés au 1er juin sur un large quart nord-est de la France, ainsi que du nord de l'Aquitaine et de Midi-Pyrénées au Massif central et localement dans les Pays-de-la-Loire. Au 1er juin, l'indice d'humidité des sols atteint des valeurs une fois et demie à deux fois la normale de Poitou-Charentes au Centre, à l'Île-de-France et aux frontières du Nord ainsi que de l'ouest de la Bourgogne au sud de la Champagne-Ardenne. Il est également 20 à 40 % au-dessus de la normale dans le Nord-Est et du nord de Midi-Pyrénées au nord de l'Aquitaine. Les pluies exceptionnelles de la fin du mois associées à la saturation des sols ont provoqué des crues et d'importantes inondations particulièrement dans les régions du Centre à la région parisienne et aux frontières du Nord.

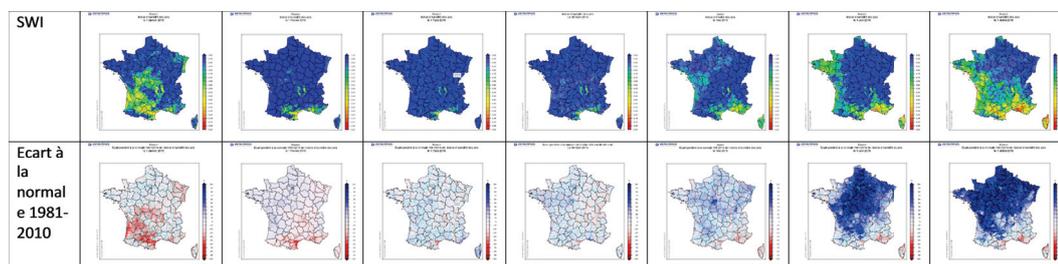


FIGURE 3.34 – Coûts simulés par le modèle comparés par les données issues des Retours d'Expérience

### Incertitudes dues à l'exposition

La surface agricole utile n'a pas connu d'évolution significative pour expliquer l'écart entre les données des RETEX et le résultat de simulation.

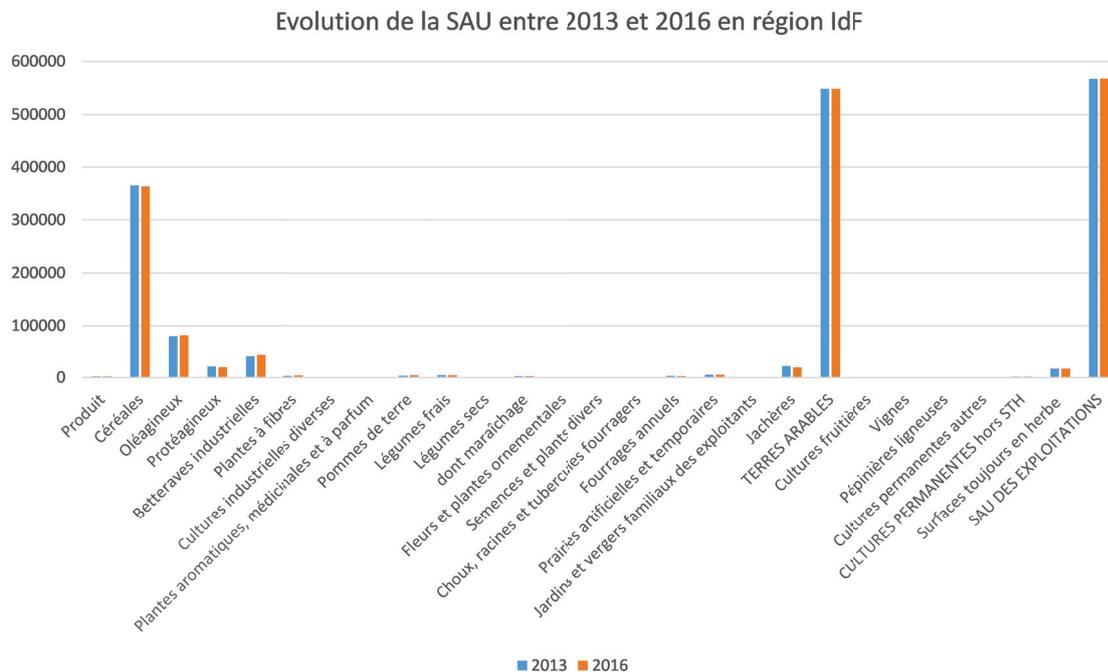


FIGURE 3.35 – Évolution de la SAU entre 2013 et 2016 en Ile-de-France

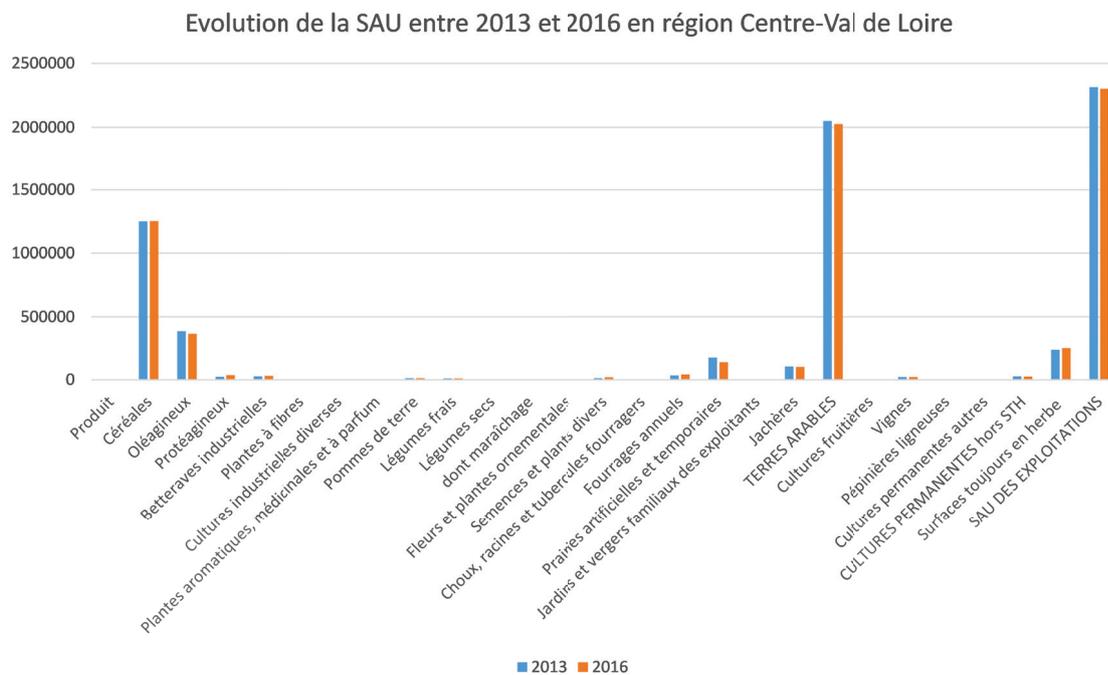


FIGURE 3.36 – Évolution de la SAU entre 2013 et 2016 en région Centre Val de Loire

# ÉTAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES DE MODÉLISATION DES PERTES D'EXPLOITATION

# 4

L'objectif de ce chapitre est de replacer les travaux de cette thèse dans son contexte, à savoir, la modélisation du risque inondation à la Caisse Centrale de Réassurance.

Pour cela, nous allons, dans une première section, rappeler les objectifs de CCR et la démarche de modélisation globale des impacts dus aux inondation proposée. Dans cette même section, nous allons faire un état des lieux de l'avancement actuel des travaux. Durant cette thèse, deux modèles ont été développés pour estimer les pertes automobiles et agricoles. Nous présentons ici les conclusions de ces travaux, leurs limites et les perspectives d'amélioration.

La section suivante se penche sur les travaux en cours sur la modélisation des pertes d'exploitations consécutives à un dommage direct. Un court état de l'art nous permettra de disposer des clés pour comprendre la modélisation actuelle et de justifier la nouvelle méthodologie en cours de développement.

Enfin, une dernière section nous permettra d'aborder les travaux futurs pour mener à bien la chaîne de modélisation globale pensée pour CCR. Cela concerne les pertes d'exploitation non consécutives à un dommage direct. Nous y ferons un résumé des problématiques de modélisation, de l'état de l'art sur ce sujet et nous en tirerons des conclusions en terme de modélisation. L'objectif est ici de proposer une marche à suivre afin de finaliser la chaîne de modélisation globale des impacts.

## 4.1 OBJECTIFS DE CCR ET ÉTAT DES LIEUX

### 4.1.1 Objectifs de CCR

Le développement du modèle inondation de CCR a suivi plusieurs objectifs scientifiques :

- développer un modèle pour estimer les dommages à l'échelle d'un événement inondation ;
- coupler ce modèle avec un générateur d'événements fictifs ;
- proposer une méthode d'estimation des dommages probables à l'échelle d'un portefeuille d'assurance.

Ce modèle répond également aux besoins de CCR, à savoir :

- provisionner le coût d'un événement ;
- tarifier les contrats de réassurance à l'exposition ;
- estimer une perte deux-centennale pour répondre aux exigences de Solvabilité 2.

Pour ce faire, CCR a fait le choix du développement d'un modèle physique sur exposition (Moncoulon, D. et Quantin, A. , 2013 ; Moncoulon, D., 2014 ; Moncoulon, D. et al., 2014). Un modèle déterministe, appelé ARTEMIS et une chaîne de modélisation probabiliste ont été développés. Le modèle ARTEMIS permet de simuler un événement spécifique et les dommages associés. La chaîne de modélisation probabiliste permet de générer un portefeuille d'événements probabilistes et de les coupler avec le modèle ARTEMIS pour obtenir une estimation probabiliste des dommages.

Les travaux de recherche de CCR sur la modélisation Inondation se concentrent aujourd'hui sur trois axes :

- l'amélioration du modèle actuel ;
- l'estimation des pertes futures dues aux catastrophes naturelles (Le Bihan et al., 2017 ; Moncoulon et al., 2016) ;
- l'élargissement du périmètre des dommages étudiés.

Les travaux de cette thèse se situent dans ce 3ème axe. En effet, tel que vu dans le chapitre 1, le périmètre des impacts estimés aujourd'hui par le modèle CCR se concentre sur les dommages directs au bâti. L'objectif de CCR est de disposer d'un modèle global d'estimation des impacts lui permettant d'obtenir une estimation des conséquences macro-économiques d'un événement.

Pour ce faire, les premiers travaux de cette thèse se sont consacrés à classifier les impacts puis à mener une revue de littérature globale sur leur estimation afin de conceptualiser et définir le modèle d'estimation des conséquences des inondations pour CCR.

Le modèle d'impact global ainsi construit suit le chaînage de modélisation suivant :

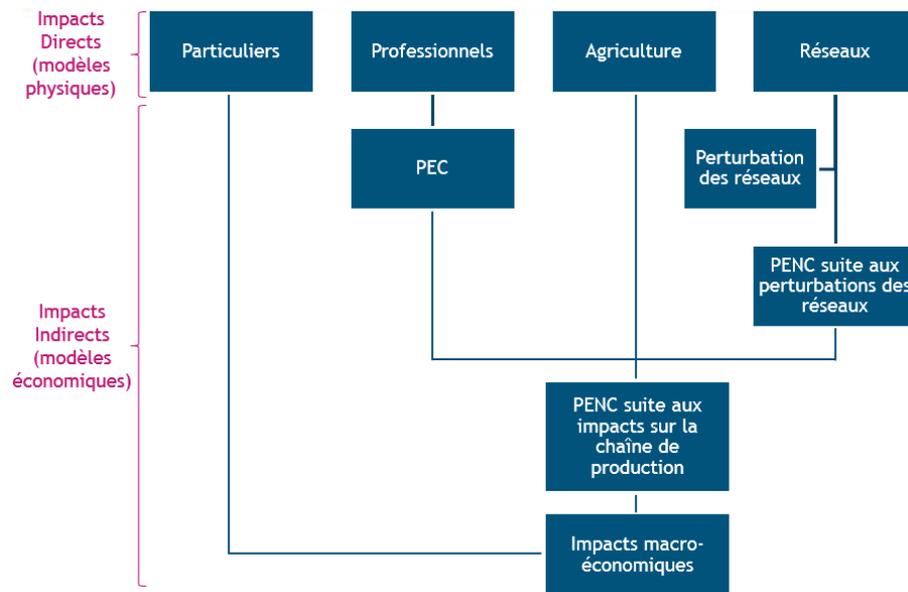


FIGURE 4.1 – Objectif global de modélisation macro-économique

Chaque famille d'impact fera donc l'objet d'un modèle et les outputs de ces différents modèles serviront d'inputs pour les modèles suivants.

L'intérêt de cette démarche sera à terme de fournir une répartition des impacts par poste et une compréhension des effets en cascade des dommages directs vers les effets macro-économiques.

#### 4.1.2 Le Risque Particulier

Grâce au régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, particuliers, entreprises et collectivités territoriales sont couverts pour les dommages matériels directs à travers leurs contrats d'assurance dommages.

CCR modélise aujourd'hui les dommages au bâti. Les dommages aux véhicules sont actuellement estimés via l'application d'un pourcentage sur les dommages au bâti. Ils ont donc été le premier poste de dommages étudié dans ces travaux (Chapitre 2).

Via l'étude de ce risque, nous avons exploré et comparé différentes approches de modélisation : une régression linéaire, une modélisation fréquence x sévérité et une modélisation physique sur exposition. Ces méthodologies ont été décrites et implémentées, leurs limites actuelles ont été identifiées et la marche à suivre pour y faire face a été déterminée.

La première étape a été de travailler sur une régression linéaire basée sur le ratio S/P annuel Non Auto tous périls, qui est une mesure stable des données dans le temps, pour obtenir le ratio S/P annuel Auto tous périls. Cependant, l'historique sur lequel se base ce modèle est trop court pour en assurer une bonne fiabilité et la prise en compte d'événements extrêmes non encore survenus. De plus, il ne répond pas aux attentes de CCR, à savoir :

- une modélisation indépendante de la modélisation Non Auto ;

- la modélisation des dommages Auto pour des événements spécifiques ;
- la modélisation de la charge sinistre annuelle, seule attente à laquelle ce modèle répond.

Une modélisation fréquence x sévérité, très utilisée dans le monde de l'assurance, a ensuite été implémentée. Il s'agit d'étudier séparément la fréquence des inondations et leur coût. La sévérité est analysée au travers de la méthode de dépassement de seuil (théorie des valeurs extrêmes) afin de bien prendre en compte la nature potentiellement extrême du risque étudié.

L'intérêt de ce modèle provient de l'étude séparée des deux composantes du risque d'inondation et donc d'une meilleure compréhension de celui-ci. Cependant, il ne permet pas de répondre au cahier des charges imposé par CCR :

- il ne permet pas d'obtenir une modélisation pour un événement particulier ;
- du fait du manque d'informations sur la sinistralité Auto, il a fallu modéliser les coûts Non Auto ensuite ramenés aux montants Auto.

De plus, les modèles statistiques font face à de nombreux défis :

- le manque de masse statistique empêche de produire des lois fiables ;
- des queues de distribution très lourdes : comment estimer les paramètres avec exactitude et robustesse ?
- gérer des dépendances :
  - dans l'espace et le temps ;
  - seulement pour les extrêmes ?
  - comment estimer la structure de dépendance (modèle statistique ou causal) ?
- la non stationnarité des risques :
  - évolution du risque (en nombre et/ou en valeur) ;
  - évolution des effets d'un même événement (matériaux, durée écoulée depuis le dernier événement...);
  - évolution de l'environnement (impact du changement climatique?).
- les incertitudes cumulées des modèles de fréquence et de sévérité.

Enfin, nous avons développé une modélisation physique sur exposition en s'appuyant sur le modèle d'aléa inondation CCR et en développant les modules de vulnérabilité et de dommages propres à ce risque. Ce modèle permet de simuler un événement spécifique et l'utilisation du générateur d'événements fictifs permet de passer le modèle en mode probabiliste et de simuler la distribution de la charge totale annuelle. Il permet donc de respecter le cahier des charges de CCR et de s'intégrer dans la logique actuelle de modélisation du risque inondation.

Cependant, CCR ne disposant pas des portefeuilles Auto détaillés de ses cédantes, le module de vulnérabilité est aujourd'hui trop imprécis pour fournir des résultats fiables. Le modèle se heurte également aux particularités de modélisation de l'aléa qui peut amener à gonfler les dommages Auto. Ainsi, la modélisation physique sur exposition fait face à la problématique des incertitudes cumulées des modèles de vulnérabilité, aléa et dommages.

De façon générale, pour tous les modèles développés, un travail de collecte de données Auto d'exposition et de sinistralité s'avère nécessaire pour les fiabiliser et les rendre performants. Un processus de collecte automatique de données Auto suite à chaque événement permettrait de pérenniser ces efforts. Enfin, un travail spécifique de collecte de

données de portefeuille des cédantes présenterait l'avantage de détailler la modélisation à leur échelle.

Enfin, la modélisation physique sur exposition ne s'affranchit pas de la problématique de non stationnarité des risques.

### 4.1.3 Le Risque Agricole

CCR étant chargée de la gestion comptable et financière du Fonds National de Gestion des Risques en Agriculture (FNGRA) pour le compte de l'Etat, les travaux se sont poursuivis par la modélisation du risque agricole, présentée dans le Chapitre 3.

Dans ce chapitre, à partir de l'état de l'art sur la modélisation des conséquences agricoles des inondations, une modélisation physique sur exposition a été développée. Le travail a porté sur le développement des modules de vulnérabilité et de dommages spécifiques - le modèle d'aléa utilisé étant le modèle CCR. Le modèle de vulnérabilité a été développé à partir du registre parcellaire graphique et le module de dommages a été développé à partir des courbes de dommages à l'agriculture développées par le groupe de travail national Analyse Coûts-Bénéfices inondations à travers les travaux de l'IRSTEA (Agenais et al., 2013).

Les travaux en cours pour ce modèle concernent l'intégration de la reconnaissance en calamité agricole avec l'application des barèmes associés ainsi que du taux de pénétration de l'assurance agricole afin de pouvoir fournir une estimation de la part des pertes totales prise en charge par une solution de transfert des risques.

Le modèle développé présente de nombreuses sources d'incertitudes qui pourront faire l'objet d'améliorations futures. Nous les rappelons ici.

Tout d'abord, chaque événement présente des caractéristiques qui peuvent difficilement être prises en compte dans le modèle de dommage. Par exemple :

- certaines régions agricoles peuvent présenter une agriculture très spécialisée et donc mal représentée par les catégories de cultures utilisées dans le modèle. Les courbes de dommages nécessiteraient alors d'être adaptées (Exemple : Aude 1999) ;
- la survenance de plusieurs événements successifs dans un court laps de temps : les pertes, pour le premier événement, seraient alors bien estimées alors que pour les événements suivants elles seraient surestimées, les dommages n'ayant pas pu être réparés entièrement (Exemple : Bretagne 2000 et 2001) ;
- les mesures mises en place par les agriculteurs pour limiter leurs pertes peuvent ne pas coïncider avec celles établies dans le modèle, faussant alors les estimations (Exemple : Gard 2002) ;
- le modèle de dommages se base sur une liste non exhaustive de paramètres. Or, pour certains événements, les dommages peuvent subvenir d'un paramètre non pris en compte (Exemple : Seine 2016).

Une limite de la modélisation physique sur exposition provient de la transmission en cascade des incertitudes du fait du chaînage des modèles d'aléa, d'exposition et de dommages. Les sorties d'un modèle servant de données d'entrée au modèle suivant, les incertitudes se transmettent d'un modèle à l'autre, amplifiant alors son impact.

Le modèle d'aléa présente deux limites :

- la spécificité du modèle d'aléa CCR est d'être utilisé pour prédire les dommages consécutifs aux inondations. Ses performances sont donc estimées via l'étude des incertitudes liées au modèle dans sa capacité prédictive des dommages, c'est-à-dire par confrontation avec les données historiques de sinistralité disponibles à CCR. Or, celles-ci concernent les zones bâties mais ce modèle n'a pas été validé sur les territoires agricoles pour lesquels il a été utilisé dans ce modèle ;
- le modèle d'aléa de CCR calcule en sortie des débits de ruissellement et des hauteurs d'eau sur chacune des mailles du MNT à 25m. Les paramètres de durée d'inondation, d'excès de pluie, de vitesse d'écoulement ne sont pas calculés par le modèle lui-même et n'ont pas fait l'objet d'une validation avec des données de référence. Ces résultats sont donc susceptibles d'être irréalistes et ne peuvent être interprétés qu'en relatif.

Le modèle d'exposition présente les limites suivantes :

- le périmètre des dommages étudiés : la démarche de modélisation et les données disponibles aujourd'hui ne permettent pas d'étudier les conséquences des inondations à l'échelle des exploitations agricoles. Or certaines interactions ont des effets à moyen et long termes sur l'activité et ne sont pas considérées ;
- la taille de la maille : plus la maille sera large, plus le modèle d'exposition perd en précision mais une maille trop fine peut amplifier les incertitudes du modèle d'aléa en plus d'entraîner des temps de traitement trop longs. Une piste d'amélioration du modèle d'exposition réside dans la recherche d'une taille de maille optimale ;
- l'utilisation d'une seule année d'exposition via les données du Registre Parcellaire Graphique 2012, le traitement des données pour une année étant chronophage. Or, l'utilisation des sols et les cultures pratiquées évoluent d'une année à l'autre. Une étude de la stabilité des surfaces agricoles dans le temps serait intéressante à mener afin de quantifier l'incertitude générée par la généralisation d'une année d'exposition (2012) pour toutes les années d'exposition.

La construction des courbes d'endommagement, les données utilisées, les choix de modélisation et les hypothèses induisent des incertitudes sur le modèle de dommage. En effet :

- les courbes développées par l'IRSTEA sont basées sur des entretiens avec des exploitants situés principalement dans le sud de la France, ce qui ne permet pas de prendre en compte les spécificités régionales et l'ensemble des pratiques agricoles ;
- les courbes se basent sur une liste non-exhaustive de paramètres de dommages or certains paramètres non inclus dans les courbes peuvent dans certains cas engendrer des dommages importants ou à l'inverse les limiter (Exemple : humidité des sols pour l'événement Seine 2016) ;
- l'utilisation des courbes du modèle HIS-SSM dans le cadre de notre modèle a permis de mettre en avant la très grande influence des courbes utilisées dans l'estimation des dommages.

## 4.2 RÉFLEXIONS SUR LA MODÉLISATION DES PERTES D'EXPLOITATIONS CONSÉCUTIVES (PEc) À UN DOMMAGE DIRECT

Suite à d'importantes catastrophes naturelles (Hallegatte, 2008) et études (OCDE 2014, Kreibich 2007, Thielen 2016), la magnitude potentielle des pertes d'exploitation a été mise en avant. Ils ont souligné l'importance de développer des modèles pouvant si non estimer précisément le montant des pertes d'exploitation, au moins, déterminer les mécanismes à l'œuvre et les ordres de grandeur. Le monde de la recherche s'intéresse donc de plus en plus à cette problématique.

Comme décrit dans le chapitre introductif, les pertes d'exploitation (PE) sont considérées comme une catégorie de pertes distinctes des dommages directs et des pertes indirectes. De plus, nous faisons la distinction entre plusieurs types de pertes d'exploitation, en fonction du fait générateur de l'arrêt ou du ralentissement de l'activité :

- les pertes d'exploitation consécutives à un dommage direct (PEc);
- les pertes d'exploitation non consécutives à un dommage direct (PEnc) dues aux défaillances des réseaux de services;
- les pertes d'exploitation non consécutives à un dommage direct dues aux impacts en amont et en aval de la chaîne de production.

Cette démarche nous permet de décomposer le processus de modélisation.

L'évaluation des pertes d'exploitation des entreprises et des autres effets indirects des catastrophes est plus difficile que l'estimation des dommages directs (Rose, 2009). La complexité de la modélisation des PE provient :

- des multiples causes possibles de la PE. Parfois, plusieurs de ces causes peuvent survenir pour une même entreprise et en même temps, ce qui entraîne une problématique de double comptage;
- pour modéliser les PE via un modèle physique sur exposition, il faut modéliser les causes génératrices de la PE, c'est-à-dire, les dommages directs des entreprises, à l'origine des PEc, et les défaillances des réseaux, à l'origine des PEnc. Il convient également d'appréhender son "exposition" et sa vulnérabilité via la description de la chaîne de production dans laquelle l'entreprise s'intègre;
- il ne s'agit plus d'une modélisation statique. Ici, les composantes géographiques et temporelles de la modélisation sont plus complexes, les PE pouvant survenir en dehors de la zone géographique impactée par l'inondation et en dehors du temps de l'inondation.

La composante temporelle est ici très importante puisque le montant de la perte d'exploitation dépendra de la durée d'incapacité de production normale qui dépend de :

- la durée de la crue;
- la durée de remise en état;
- la durée de la défaillance des réseaux;
- la résilience et l'adaptabilité des réseaux de la chaîne de production.

Compte tenu de ces différentes étapes et caractéristiques, les incertitudes de modélisation des PE sont généralement très importantes.

En prenant en compte ce niveau de complexité, l'objectif est de proposer une méthode de modélisation permettant l'estimation du coût économique global tout en proposant

une décomposition par type de PE. ici travaux en cours PEc

De plus, ce travail s'attache à comprendre la différence entre ce qui est assuré et ce qui ne l'est pas. Car, comme vu dans le Chapitre 1, contrairement à l'assurance des bâtiments, de leurs contenus et des véhicules, les PE ne sont pas totalement couvertes et il n'existe pas d'obligation d'assurance. Il est donc intéressant d'estimer la part des pertes à la charge de l'assurance et le reste à charge de l'entreprise pour l'intégrer à la modélisation par la suite.

#### 4.2.1 État de l'art

Dans le cadre du projet européen "Cost of Natural Hazards" (CONHAZ), un travail de synthèse sur les méthodes d'estimation des coûts pour plusieurs aléas et postes de pertes a été mené (Meyer et al., 2013). Pour les PEc, trois approches principales ont été identifiées pour estimer le coût des pertes d'exploitation, à savoir :

1. Comparer l'activité des années avec ou sans aléa
2. Estimer le montant des PEc en utilisant un ratio fixe sur le montant des dommages directs
3. Appliquer une valeur de référence spécifique pour chaque secteur d'activité

##### 4.2.1.1 Modélisation par comparaison de l'activité entre les années avec ou sans aléa

Une première méthode simple consiste à comparer un indicateur de l'activité de l'entreprise (la production ou le chiffre d'affaires par exemple) entre les années sans et les années avec des événements.

Cette méthode a néanmoins deux limites principales. D'une part, elle présente un problème de temporalité car la date de survenance de l'événement a un impact : plus un événement de l'année N a lieu en fin d'année, plus l'événement peut avoir des conséquences sur l'année N+1 car les PEc sont des conséquences qui s'étalent dans le temps. D'autre part, cette méthode implique de poser l'hypothèse qu'une année sans événement inondation, est une année de production "normale", ce qui est une hypothèse forte.

Ainsi, si cette méthode a l'avantage d'être très simple et facile à mettre en place elle présente néanmoins des limites qui en diminuent l'intérêt. De plus, cette méthodologie ne permet pas de prendre en compte les particularités de l'événement, d'un point de vue de son ampleur, de sa géographie ou de ses caractéristiques physiques.

##### 4.2.1.2 En utilisant un ratio fixe sur le montant des dommages directs

Cette méthodologie, également très simple à mettre en place, est de fait souvent utilisée pour effectuer une estimation rapide des PE (Meyer et al., 2013).

Elle est notamment utilisée par l'"Australian Anuflood model" (NRM, 2002) qui applique un ratio de 55% sur les dommages directs et par le "Rapid appraisal method" (NRE, 2000) qui propose un ratio pouvant varier de 20% pour les zones rurales à 45% pour les

zones densément peuplées (pour une moyenne à 33%) afin de souligner les différences dues au milieu de vie. Ces estimations incluent les coûts de la réponse d'urgence, de l'indisponibilité des services publics et de nettoyage.

Dans le cadre d'une étude réalisée pour les Grands Lacs de Seine (Hubert et Ledoux, 1999), un ratio dommages directs/dommages indirects a été établi à partir des résultats d'enquêtes réalisées auprès des 60 entreprises en 1997. Ces résultats ont été comparés et ajustés avec des données provenant du Flood Hazard Research Centre (FHRC).

Quelques résultats initiaux empiriques soutiennent cette approche simplifiée (Kreibich et al., 2010). Cependant, cette méthode, très simpliste, ne permet pas de prendre en compte les caractéristiques physiques de l'inondation et d'apporter une réelle compréhension du phénomène aux utilisateurs.

#### 4.2.1.3 Appliquer une valeur de référence spécifique pour chaque secteur d'activité

Une ou plusieurs références spécifiques peuvent être définies pour chaque secteur d'activité. La référence spécifique peut être la perte de chiffre d'affaires, la perte de marge brute, la perte de valeur ajoutée, la perte de revenu, les frais de déménagement par unité affectée... Une valeur monétaire est ensuite donnée pour une unité de la valeur de référence puis multipliée par le nombre d'unités affectées, ce qui permet d'obtenir une estimation du coût des PE par secteur.

Cette famille de méthode inclut des démarches simples. Par exemple, le MURL<sub>2000</sub> a estimé une perte de valeur ajoutée par employé et par jour, qui est ensuite appliquée au nombre de jours et de salariés affectés.

Les versions les plus évoluées de cette famille de méthodes consistent à modéliser l'activité de chaque secteur d'activité et de simuler l'impact d'une perturbation - dans notre cas, une inondation. Il existe quelques méthodes par secteur : Department For Transport (2009) pour le trafic routier ou Hess (1986) pour l'agriculture. S'il s'agit certainement de la méthode la plus complète (Bubeck et al., 2011 et Green et al., 2011), elle présente l'inconvénient d'être très lourde à mettre en place, surtout dans le cadre d'un modèle global où tous les secteurs d'activités doivent être pris en compte dans l'estimation.

Une méthode intermédiaire consiste à développer des fonctions de "dommages". Il s'agit de la démarche qui se développe le plus car elle présente l'intérêt de ne pas être trop simpliste sans pour autant être trop lourde à mettre en place (FEMA, 2011 ; Kok et al., 2005 ; Ledoux, 2009).

Le modèle HAZUS-MH (FEMA, 2011) estime le montant dû à la perturbation du processus de production sur la base de frais de réinstallation, les capitaux liés aux pertes de revenu, de salaire et de revenu locatif. Le coût par jour et par surface pour plusieurs secteurs économiques permet ensuite d'obtenir les pertes monétaires en le multipliant par le temps de rétablissement. Par exemple, le temps de rétablissement d'un bâtiment est calculé en additionnant le temps nécessaire à la restauration physique, au nettoyage, aux inspections, au processus d'obtention des permis et approbations ainsi que les retards dus à l'indisponibilité de l'entrepreneur en charge des travaux. Toutes ces composantes

de la PE sont estimés en fonction de la hauteur d'eau et de l'activité considérée.

Aux Pays-Bas, une des méthodes les plus utilisées pour déterminer le niveau de protection face aux inondations est l'analyse coûts bénéfiques. Le risque d'inondation est défini comme le produit des probabilités et des conséquences des inondations. Le territoire est transformé en une grille de mailles de taille 100m x 100m sur lesquels des caractéristiques d'aléas sont estimées et les conséquences sont estimées via le logiciel "*Hoogwater Informatie Systeem - Schade en Slachtoffer Module*" pour High Water Information System - Damage and Victim Module (HIS-SSM) (Kok et al., 2005 ; J. Vilier et al. 2014). Il utilise une approche par fonctions de dommages pour estimer les pertes d'exploitation consécutives et non consécutives. Sur chaque maille, la fonction prend la forme suivante :

$$D = \sum_{i=1}^N \alpha_i * n_i * S_i$$

où :

- $N$  : le nombre de secteurs d'activité, le modèle fait la distinction entre 24 secteurs d'activités, soit,  $N = 24$  ;
- $\alpha_i$  : le facteur de dommages ;
- $n_i$  : le nombre d'emplois dans le secteur  $i$  ;
- $S_i$  : le montant maximum de pertes par emploi dû aux pertes d'exploitation dans le secteur  $i$ .

La fonction utilisée pour estimer le facteur de dommages dépend de la hauteur d'eau et est la même que pour les dommages directs aux entreprises et pour tous les secteurs d'activités, ce facteur est donc constant sur chaque maille. Cette méthodologie est peu flexible puisque les dommages évoluent linéairement avec l'ampleur de l'inondation. Les pertes dues aux pertes d'exploitation ne peuvent augmenter que si le nombre d'entreprises inondées augmentent où que la hauteur d'eau à la localisation du risque augmente.

En France, dans le cadre de la mise en place du Plan Rhône (Ledoux, 2009), des fonctions de dommages aux entreprises ont été développées. A partir de l'étude réalisée pour les Grands Lacs de Seine (Hubert et Ledoux, 1999), une formule spécifique à chaque branche d'activités a été définie pour le calcul des pertes d'exploitation. Cette démarche est aujourd'hui reprise par l'IRSTEA dans le cadre du groupe de travail national sur l'analyse multi-critères appliquée aux projets de prévention des inondations (MEDDE / CGDD, 2014).

L'évaluation des dommages aux activités économiques distingue :

- les Dommages Directs : toute destruction matérielle ou corporelle due à un impact physique de la crue ;
- les Dommages Indirects : les coûts de remise en état, d'intervention et de pertes d'exploitation consécutives à une crue, subdivisés en :
  - Coûts de nettoyage ;
  - Coûts de relogement ;
  - Coûts des services d'intervention ;
  - Coûts additionnels de séchage ;
  - Pertes d'exploitation ;
  - Pertes de valeurs d'usage des terrains et équipements.

Pour chaque catégorie de la nomenclature NAP 15 (Nomenclature des Activités Professionnelles), les données suivantes ont été récoltées :

- une valeur du matériel par salarié ;
- une valeur du stock par salarié ;
- un chiffre d'affaires moyen par salarié.

La nomenclature NAP correspond à la classification des activités et des produits développée par l'INSEE qui a été en vigueur en France de 1973 à 1992. En 1993, la NAF (nomenclature d'activités française) et la CPF (classification des produits française) se sont respectivement substituées à la version « activités » et à la version « produits » de la NAP 73. Depuis le 1er janvier 2008, c'est la NAF Révision 2 qui est en vigueur. Elle remplace la première révision de la NAF (NAF révision 1) en vigueur du 1er janvier 2003 au 31 décembre 2007. La codification numérique correspond au niveau d'agrégation des secteurs utilisé. Ainsi, la NAF révision 2 a une structure arborescente à 5 niveaux emboîtés (21 sections, 88 divisions, 272 groupes, 615 classes, 732 sous-classes) ([www.insee.fr](http://www.insee.fr)).

Les fonctions, développées sur avis d'experts, fournissent une estimation des pertes d'exploitation par catégorie ou sous-catégorie NAP en fonction du taux d'endommagement du matériel :

$$\begin{aligned} \text{taux}_{\text{matériel}} < 40\% &\Rightarrow PE = \frac{CA_i}{12} * (D + 1) * tx_i \\ \text{taux}_{\text{matériel}} \geq 40\% &\Rightarrow PE = \frac{CA_i}{12} * (D + 3) * tx_i \end{aligned}$$

où :

- $\text{taux}_{\text{matériel}}$  : taux d'endommagement du matériel
- $CA_i$  : chiffre d'affaires annuel du secteur d'activité NAP  $i$  considéré
- $D$  : durée de submersion exprimée en mois
- $tx_i$  : un coefficient correcteur qui est fonction du taux de marge brute du secteur d'activité NAP  $i$  considéré

La perte d'exploitation dépend donc du chiffre d'affaires perdu durant la période d'interruption de l'activité. Comme le suggère les observations de l'étude de Kreibich et al. (2007), la fonction utilise la sévérité des dommages directs et non la sévérité de l'aléa pour estimer la durée d'interruption de l'activité. Plus le matériel est endommagé, plus il faudra de temps pour le réparer ou le remplacer. Cette durée est donc fonction du taux d'endommagement au matériel :

- si  $\text{taux}_{\text{matériel}} < 40\%$  alors la durée d'interruption de l'activité est égale à la durée de la submersion plus un mois ;
- si  $\text{taux}_{\text{matériel}} \geq 40\%$  alors la durée d'interruption de l'activité est égale à la durée de la submersion plus trois mois.

Un des éléments sensibles dans la construction de ces modèles est l'estimation des paramètres du modèle. Notamment la détermination du coefficient correcteur pour chaque secteur d'activité  $tx_i$  qui permet d'intégrer la vulnérabilité aux PE des différents secteurs d'exploitation.

En effet, peu de données fiables et exploitables existent ou sont disponibles sur ce sujet. Ce manque de données, déjà mis en avant en 1988 par Ramirez et al. (1988) est encore

vrai aujourd'hui. Les recherches sur les pertes dues aux inondations se sont longtemps concentrées sur les biens résidentiels (Kreibich et al., 2007).

Seules quelques études ont étudié quantitativement les mesures que pouvaient prendre les entreprises pour réduire leurs pertes (Smith 1981, ICPR 2002, Kreibich et al 2005). De plus, des résultats représentatifs sont difficiles à obtenir du fait de la grande diversité des entreprises et de leurs caractéristiques : secteurs d'activité, nombre de salariés, santé financière, méthode de management, etc. Après les inondations d'août 2002 (Kreibich et al. 2007) et de juin 2013 (Thieken et al., 2016) en Allemagne, les auteurs ont mené une grande campagne de récolte d'informations en appelant des entreprises touchées par les inondations. Ces deux études nous permettent d'avoir une meilleure compréhension des paramètres.

Ces deux études ont mis en avant les paramètres principaux à définir et utiliser dans le développement d'un modèle ainsi qu'une première estimation de ces paramètres. Ils sont de deux catégories : les paramètres d'aléa et les paramètres de vulnérabilité.

Les paramètres d'aléa sont les caractéristiques d'aléa (hauteur d'eau, courant, durée de l'inondation) sur les bâtiments et biens de l'entreprise. Ils vont notamment déterminer le niveau des dommages directs subis par l'entreprise sur les postes de dommages aux bâtiments, équipements, véhicules, biens, produits et stocks. Ces dommages vont conditionner en grande partie les pertes d'exploitation consécutives de l'entreprise.

Les paramètres de vulnérabilité sont caractéristiques de l'entreprise donc vont déterminer le montant potentiel des pertes en cas d'arrêt de l'activité mais également sa résilience et son adaptabilité, c'est à dire sa capacité à faire face à l'événement. Les principaux paramètres de vulnérabilité qui ressortent de ces études sont :

- secteur d'activité ;
- nombre de salariés ;
- niveau d'activité (chiffre d'affaires) ;
- mesures de précaution (PCA) ;
- mesures d'urgence (système d'alerte d'inondation) ;
- mesures d'adaptation et de rétablissement (assurance).

## Conclusion

Les deux premières approches impliquent plus d'incertitudes que la dernière et sont donc utiles pour des estimations rapides (budgétisation et planification d'urgence). La dernière approche est considérée comme plus complète mais ce type de pertes est souvent estimé en utilisant des méthodes plutôt simplistes (Meyer et al. 2013).

### 4.2.2 Modélisation actuelle à CCR et amélioration

Le premier travail a été de comprendre et de documenter la modélisation actuelle. Ensuite, un audit de la méthodologie et de son implémentation a été effectué afin de proposer une amélioration sur la base de la modélisation actuelle.

#### 4.2.2.1 Modélisation actuelle

La modélisation développée à CCR fait partie de la famille des méthodes appliquant une valeur de référence spécifique pour chaque secteur d'activité. L'estimation des PEc se fait à partir des dommages directs subis par l'entreprise et de la valeur assurée en pertes d'exploitation de l'entreprise. Nous commencerons donc par décrire brièvement le modèle de dommages aux entreprises développé à CCR. Puis nous décrirons le modèle d'estimation des PEc implémenté aujourd'hui.

##### a. Modélisation des dommages directs aux entreprises

Tout comme les autres modèles de dommages de CCR, le modèle développé pour estimer les dommages directs aux entreprises est un modèle physique sur exposition. Il est donc constitué de trois modèles : le modèle d'aléa, le modèle d'exposition et le modèle de dommages. Le modèle d'aléa utilisé est le modèle d'aléa inondation développé à CCR. Le module d'exposition a été construit à partir de la base de données Sirene.

Le modèle de dommages associe à chaque entreprise sa hauteur d'eau simulée par le modèle d'aléa à sa localisation géographique. Pour estimer le montant des dommages, CCR utilise les taux d'endommagement du Multi-Coloured Manual (FHRC 2005) en adaptant les secteurs d'activité aux codes NAF français. Le modèle CCR donne donc, pour chaque risque, un montant de dommage en faisant la distinction entre 6 postes de dommages, à savoir :

- bâtiment
- installation
- immobilisation
- matière
- produit
- marchand.

##### b. Modélisation des PEc

La démarche mise en place aujourd'hui est une version simplifiée et adaptée de la méthode développée dans le Plan Rhône 2009 (Ledoux, 2009). La fonction utilisée fournit une estimation des pertes d'exploitation en fonction du taux d'endommagement aux installations :

$$taux_{installation} < 40\% \Rightarrow PE = VA_i * tx_{i,1} * ProbaSin * Coeff_{actualisation}$$

$$taux_{installation} \geq 40\% \Rightarrow PE = VA_i * tx_{i,2} * ProbaSin * Coeff_{actualisation}$$

où :

- $taux_{installation}$  : taux d'endommagement aux installations ;
- $VA_i$  : la valeur assurée en pertes d'exploitation de la police  $i$  ;
- $tx_{i,j}$  : la durée de la PEc estimée, appelée dans le modèle "taux de destruction". Elle est  $tx_{i,1} = \frac{30}{365}$  et  $tx_{i,2} = \frac{90}{365}$  ;
- $ProbaSin$  : la probabilité de sinistres. Elle représente la proportion de biens sinistrés à l'intérieur d'une zone d'aléa. CCR a constaté que toutes les polices, même dans une zone inondée, ne sont pas sinistrées : cela peut être dû au non dépassement

de franchises, au micro-relief, à la présence d'un vide-sanitaire, à un talus que le MNT ne voit pas, à un système d'alerte ayant permis de mettre à l'abri les biens, etc. Pour traduire cette proportion en termes de modélisation, pour chaque risque, sa probabilité d'être sinistré en fonction de l'intensité de l'aléa a été calculé. Elle est estimée à partir de la confrontation entre les résultats obtenus par simulation et les résultats réels sur des événements de référence ;

- $Coeff_{actualisation}$  : coefficient d'actualisation en fonction de l'année de survenance de l'événement.

La durée d'interruption de l'activité est donc fonction du taux d'endommagement aux installations :

- si  $taux_{installation} < 40\%$  alors la durée d'interruption de l'activité est égale à un mois ;
- si  $taux_{installation} \geq 40\%$  alors la durée d'interruption de l'activité est égale à trois mois.

### c. Démarche de modélisation sous Matlab

Dans le modèle développé sous Matlab, la modélisation des dommages directs et des PEc se fait via plusieurs fonctions imbriquées, décrites dans la figure suivante :

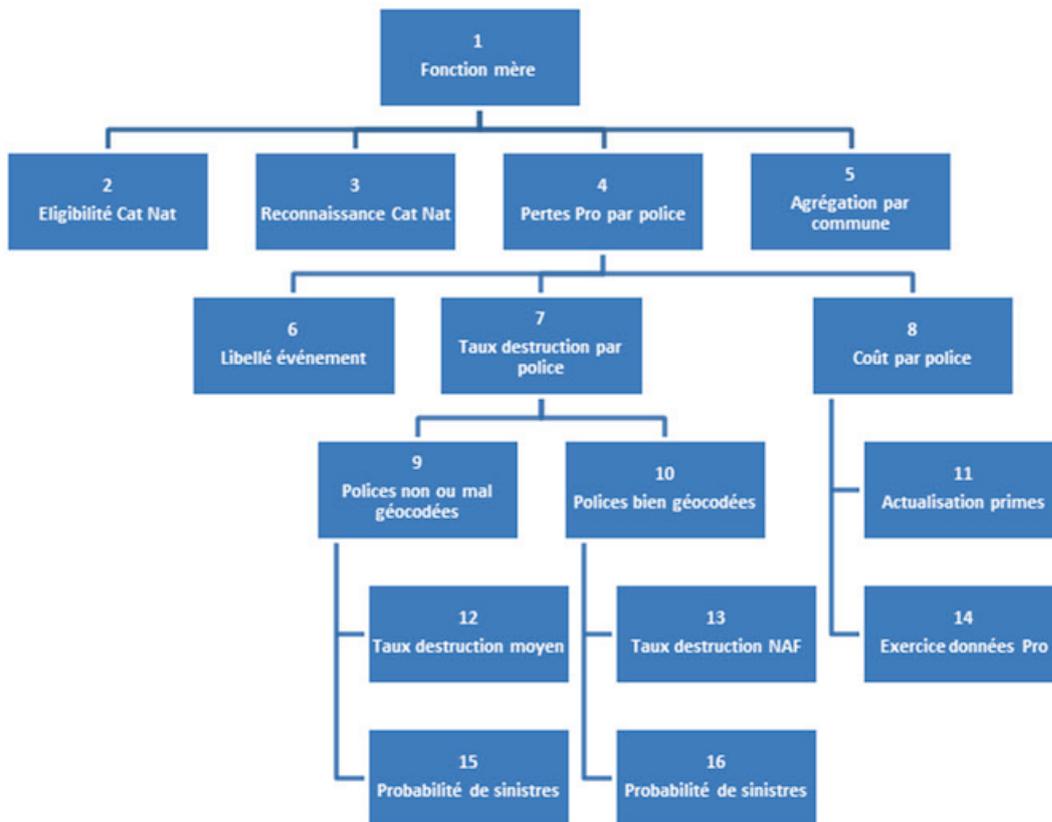


FIGURE 4.2 – Démarche de modélisation sous Matlab

La modélisation des dommages directs aux entreprises et les PEc se fait au sein de la *Fonction mère*. La fonction *Pertes Pro par police* fait appel à la fonction *Libellé événement* qui permet de reconnaître l'événement à partir du nom renseigné dans la fonction afin de récupérer les informations d'aléa et d'exposition des entreprises. Puis, elle fait la jonction entre la branche *Taux destruction par police* qui estime les taux de destruction et la branche *Coût par police* qui associe ces taux aux valeurs assurées pour estimer le coût par police.

Dans la branche *Taux destruction par police*, deux méthodes sont appliquées pour chaque risque en fonction des informations de géolocalisation du risque :

- *polices bien géocodées* : On connaît les coordonnées géographiques de la police et les caractéristiques d'aléa qui y sont estimées par le modèle d'aléa. On peut donc directement calculer le taux de destruction via la fonction *Taux destruction NAF* puis le corriger par la probabilité de sinistre par la fonction *Probabilité de sinistres* ;
- *polices non ou mal géocodées* : On connaît uniquement la commune dans laquelle se situe la police. Dans la fonction *Taux destruction moyen*, un ensemble de points sont alors répartis dans la commune pour lesquels un taux de destruction est estimé. On calcule alors un taux de destruction moyen que l'on applique à la police. Puis, ce taux est corrigé par la probabilité de sinistre via la fonction *Probabilité de sinistres*.

Le "taux de destruction" calculé pour la PEc, qui correspond en fait à la durée estimée de l'arrêt de l'activité de l'entreprise, dépend du taux de destruction estimé pour les installations, comme décrit dans le paragraphe précédent.

Ce taux de destruction est ensuite appliqué à la valeur assurée estimée en pertes d'exploitation de la police dans la fonction *Coût par police*. Les valeurs assurées sont extraites des informations par police puis actualisées via les fonctions *Exercice données Pro* qui extrait l'exercice du jeu de données et *Actualisation primes* qui convertit les euros d'un exercice en euros d'un autre exercice sur la base des prévisions de primes.

Enfin, *Agrégation par commune* agrège les résultats par commune. Puis, *Eligibilité Cat Nat* donne une liste de communes touchées par l'aléa associée à des niveaux d'aléa déterminant sa classe d'éligibilité en Cat Nat, une probabilité de demande de reconnaissance Cat Nat et une proba reconnaissance Cat Nat si la demande est faite. *Reconnaissance Cat Nat* estime ensuite si la commune est reconnue Cat Nat à partir de ces informations. Cette information est appliquée sur les coûts par commune afin de déterminer le coût Cat Nat professionnels.

#### 4.2.2.2 Améliorations du modèle actuel

Le premier travail effectué dans ce cadre a été de faire un audit de la démarche théorique et du modèle développé sous Matlab.

##### a. Estimation de la durée d'interruption de l'activité

Comme décrit précédemment, la fonction *Taux destruction par police* estime un taux de destruction qui correspond à la durée estimée de la PEc en fonction du taux d'endommagement aux installations.

Cependant, dans la fonction *Coût par police*, la formule du montant de la PEc effectivement utilisée est :

$$taux_{installation} < 40\% \Rightarrow PE = VA_i * tx_{i,1} * jours_{PE} * ProbaSin * Coeff_{actualisation}$$

$$taux_{installation} \geq 40\% \Rightarrow PE = VA_i * tx_{i,2} * jours_{PE} * ProbaSin * Coeff_{actualisation}$$

où  $jours_{PE}$  est également une estimation de la durée de l'arrêt d'activité, cette fois-ci égale à la durée de l'inondation.

Cet audit a donc permis de supprimer ce paramètre  $jours_{PE}$  du code.

### b. Indicateur d'activité utilisé

Dans la formule utilisée par CCR, l'indicateur d'activité utilisé n'est pas le chiffre d'affaires mais la valeur assurée en PEc. Plus exactement, il s'agit d'une estimation de la valeur assurée en PEc à partir de la durée assurée (durée maximum assurée \* marge brute).

Cette valeur représente un montant maximum d'indemnisation au titre des PEc. Donc, la formule devrait dépendre de la marge brute avec, comme maximum, la valeur assurée :

$$taux_{installation} < 40\% \Rightarrow PE = \min(VA_i; MB_i * tx_{i,1} * ProbaSin * Coeff_{actualisation})$$

$$taux_{installation} \geq 40\% \Rightarrow PE = \min(VA_i; MB_i * tx_{i,2} * ProbaSin * Coeff_{actualisation})$$

où  $MB_i$  est la marge brute annuelle de la police  $i$ .

De plus, les contrats d'assurance en PE sont généralement exprimés en durée d'indemnisation. Donc, au lieu d'estimer la valeur assurée en PEc, on pourrait utiliser plus directement la durée assurée, notée  $DA_i$ , comme la durée maximum d'indemnisation :

$$taux_{installation} < 40\% \Rightarrow PE = VA_i * \min\left(\frac{DA_i}{365}; tx_{i,1}\right) * ProbaSin * Coeff_{actualisation}$$

$$taux_{installation} \geq 40\% \Rightarrow PE = VA_i * \min\left(\frac{DA_i}{365}; tx_{i,2}\right) * ProbaSin * Coeff_{actualisation}$$

A partir des comptes de résultat de la base ESANE, les marges brutes annuelles, au sens assurantiel, par secteur NAF et de 2006 à 2013, ont été reconstruites. Le modèle a été appliqué sur les marges brutes et la valeur assurée a été utilisée comme maximum d'indemnisation.

### c. Implémentation de la méthodologie complète de B. Ledoux (2009)

Enfin, la méthodologie complète de B. Ledoux, telle que développée pour le Plan Rhône 2009, a été implémentée en l'appliquant sur la marge brute et non sur le chiffre d'affaires. Cela nous permet alors d'obtenir une estimation du coût total de la PEc. Les conditions d'assurance peuvent ensuite être appliquées pour estimer le montant assuré

en PEc et avoir une estimation de la différence entre montant total et assuré des PEc.

Le modèle fonctionne donc en deux temps. Premièrement, il estime le montant de la PEc sur chaque police, noté  $PE_{tot}$ , de la façon suivante :

$$taux_{installation} < 40\% \Rightarrow PE_{tot} = MB_i * (D + 1) * tx_i * ProbaSin * Coeff_{actualisation}$$

$$taux_{installation} \geq 40\% \Rightarrow PE_{tot} = MB_i * (D + 3) * tx_i * ProbaSin * Coeff_{actualisation}$$

où :

- $taux_{installation}$  : taux d'endommagement aux installations ;
- $MB_i$  est la marge brute mensuelle de la police  $i$  ;
- $tx_i$  : les codes NAP des fonctions initiales ont ici été adaptés aux codes NAF.

Le modèle estime ensuite le montant indemnisé en PEc sur chaque police, noté  $PE_{ass}$ , de la façon suivante :

$$PE_{ass} = \min(PE_{tot}; VA_i)$$

#### 4.2.2.3 Limites

Tout d'abord, concernant le modèle de dommages aux entreprises, les courbes d'endommagement développées dans le cadre du groupe de travail multi-critères seraient plus adaptées car les courbes ont été développées pour le marché français.

Ensuite, les fonctions de dommages du Plan Rhône 2009 ont été mises au point à partir d'une étude de 1997 en utilisant les données INSEE de 2006, actualisées en euros de l'année 2009. Ces fonctions pourraient donc certainement être mises à jour.

Enfin, les fonctions, telles que définies aujourd'hui présentent des effets de seuil :

- 1<sup>er</sup> effet de seuil sur la durée de la PE : 30 jours ou 90 jours. Ainsi, dès que l'entreprise est touchée par l'aléa, le modèle la considère en interruption d'activité de 30 jours. Ensuite, le seuil de 40% d'endommagement aux installations conditionne le passage de 30 à 90 jours en arrêt d'activité ;
- 2<sup>eme</sup> effet de seuil : le modèle ne considère que deux états, un état de PE totale lorsque l'activité de l'entreprise est totalement interrompue ou un état de fonctionnement normal de l'activité, sans aucune PE. Il ne prend pas en compte la période de PE partielle, lorsque la production s'effectue en mode dégradé. Également, le modèle considère que la production revient à terme à son niveau "normal", c'est à dire à son niveau d'avant le choc. Mais il ne prend donc pas en considération la possibilité que l'aléa puisse amener à un phénomène d'amélioration technologique, par exemple, avec le remplacement d'anciennes machines par de nouvelles, plus performantes.

### 4.2.3 Développement d'une nouvelle méthodologie

L'objectif est ici de proposer des pistes pour le développement d'un nouveau modèle d'estimation des PEc.

#### 4.2.3.1 Paramètres à prendre en compte dans le modèle

D'après ces travaux, il en ressort que les paramètres, qu'il serait idéal de prendre en compte dans le modèle de dommages, sont :

- le secteur d'activité (code NAF);
- le nombre de salariés;
- les indicateurs d'activité (marge brute);
- la date de l'événement (saisonnalité de l'activité);
- les dommages directs subis avec distinction entre bâtiments, installations, immobilisations, matière, produit, marchand - qui dépendent des caractéristiques de l'aléa pour l'entreprise.

#### 4.2.3.2 Durée de la PEc : distinction entre totale et partielle

Le premier objectif de cette nouvelle méthodologie est d'estimer une durée de PEc totale et une durée de PEc partielle. Pour la PEc partielle, il faut en plus estimer un pourcentage de réduction de l'activité sachant que, plus le temps passe, plus il baisse. La démarche serait donc de déterminer une durée de PEc partielle à partir de la durée de la PEc totale. Le pourcentage de réduction de l'activité sera défini par incrémentation.

L'étude de Kreibich et al. (2007) fournit quelques indications sur la répartition de la PEc entre PEc totale et partielle par secteur d'activité. En effet, le tableau 1 nous permet d'obtenir les ratios par secteur d'activité suivants :

TABLE 4.1 – Ratios entre PEc partielle et totale par secteur d'activité

Donnée	S. Manu- facturier	S. Com- mercial	S. Finan- cier	S. Service	S. Agricole	Tous sec- teurs
Durée de l'arrêt d'activité (jours)	36	52	48	30	18	43
Durée de la limitation d'activité (jours)	76	100	97	105	133	92
Ratio $\frac{PE_{partielle}}{PE_{totale}}$	211%	192%	202%	350%	739%	214%

#### 4.2.3.3 Indice de pertes : la marge brute

L'indice sur lequel se base l'industrie de l'assurance pour calculer le montant de l'indemnisation au titre des pertes d'exploitation est la marge brute. Dans l'industrie de l'as-

surance, ce montant est défini comme la différence entre le chiffre d'affaires et les charges variables.

#### 4.2.3.4 Estimation de la PE

##### a. Forme de la fonction de la $PEc_{totale}$

La fonction de dommages développée dépend de la marge brute, de la durée de la PEc totale et de la durée de la PEc partielle. Durant la période de PEc totale, 100% de la marge brute est perdue par jour en arrêt d'activité. Durant la période de PEc partielle, pour chaque jour, le taux de réduction de l'activité est calculé par incrémentation, en fonction de la durée de la PEc partielle. On obtient donc la formule suivante :

$$PEc_{totale} = f(X, Y, D, Z)$$

$$= margeBrute(X, Y, D) * [dureePE_{totale}(X, Z)$$

$$+ \frac{1}{dureePE_{partielle}(X, Z) + 1} \sum_{k=1}^{dureePE_{partielle}(X, Z)} k]$$

où :

- $X$  : secteur d'activité de l'entreprise (code NAF) ;
- $Y$  : nombre de salariés de l'entreprise ;
- $D$  : date de survenance de l'événement ;
- $Z$  : dommages directs subis par l'entreprise.

en développant, on obtient :

$$PEc_{totale} = margeBrute(X, Y, D) * [dureePE_{totale}(X, Z)$$

$$+ \frac{1}{dureePE_{partielle}(X, Z) + 1} * \frac{dureePE_{partielle}(X, Z) * (dureePE_{partielle}(X, Z) + 1)}{2}]$$

soit :

$$PEc_{totale} = margeBrute(X, Y, D) * [dureePE_{totale}(X, Z) + \frac{dureePE_{partielle}(X, Z)}{2}]$$

Cette formule est logique puisque le taux de réduction de l'activité est estimé par incrémentation en fonction du temps.

##### b. Fonction $margeBrute$

La marge brute de l'entreprise est estimée à partir de la marge brute moyenne de son secteur d'activité NAF, de sa taille en nombre de salariés et des variations saisonnières d'activités.

$$margeBrute(X, Y, D) = margeBrute_{NAF}(X) * variationMB_{effectif}(Y) * variationMB_{saisonnalite}(D)$$

où :

- $margeBrute_{NAF}(X)$  : la marge brute moyenne par secteur d'activité NAF;
- $variationMB_{effectif}(Y)$  : le coefficient d'ajustement de la marge brute en fonction du nombre de salariés de l'entreprise;
- $variationMB_{saisonnalite}(D)$  : le coefficient d'ajustement de la marge brute en fonction des variations saisonnières de l'activité.

#### c. Fonction $dureePE_{totale}$

La durée de la PEc totale dépend des dommages directs subis par l'entreprise qui eux-mêmes dépendent des caractéristiques de l'aléa. Les dommages directs étant calculés via le modèle de dommages aux biens professionnels, on utilisera la sortie de ce modèle comme input de la fonction  $dureePE_{totale}$ .

Comme mis en avant par les études de Kreibich et al. (2007) et de Thieken et al. (2016) et les courbes de B. Ledoux (2009), certains secteurs d'activité sont plus vulnérables aux pertes d'exploitation. La fonction conservera donc l'utilisation d'un coefficient correcteur pour chaque secteur d'activité, noté  $taux(X)$ .

$$dureePE_{totale}(X, Z) = dureePE(Z) * taux(X)$$

où :

- $dureePE(Z)$  : l'estimation initiale de la PEc totale en fonction des dommages directs;
- $taux(X)$  : le coefficient correcteur pour chaque secteur d'activité.

#### d. Fonction $dureePE_{partielle}$

La durée de la PEc partielle dépend de la durée de la PEc totale et du secteur d'activité, comme décrit dans le paragraphe 2. Ainsi, les codes NAF doivent être reclassés en fonction des cinq secteurs d'activité de l'étude de Kreibich et al. (2007) : manufacturier, commercial, financier et agricole. Les ratios  $\frac{PE_{partielle}}{PE_{totale}}$  calculés, via cette étude, par secteur et notés  $ratio_{PE}(X)$  doivent ensuite être appliqués à la durée de la PE totale estimée :

$$dureePE_{partielle}(X, Z) = dureePE_{totale}(X, Z) * ratio_{PE}(X)$$

#### e. Estimation de la PEc assurée : $dureePE_{assuree}$ et $PE_{assuree}$

Une fois le montant de la PEc totale estimée, on peut appliquer les conditions du contrat d'assurance sur chaque risque pour estimer le montant indemnisé au titre des PEc. En attendant de disposer de données détaillées à la police, plusieurs hypothèses doivent être faites :

1. toutes les entreprises s'assurent contre les PEc,
2. la franchise est déterminée de la façon suivante : trois jours d'activité avec un minimum de 1140 euros,

3. la durée d'indemnisation appliquée sera de 12 mois sauf pour les industries chimiques et pharmaceutiques pour lesquelles la durée d'indemnisation utilisée sera de 24 mois. Ces durées ont été choisies à partir des informations récoltées dans les cas d'études présentés dans la première section de ce chapitre.

La durée de la PEc assurée est estimée via la fonction  $dureePE_{assuree}$  :

$$dureePE_{assuree}(X, Z) = \begin{cases} 0 & \text{si } dureePE_{tot}(X, Z) < 3 \\ \min(dureePE_{tot}(X, Z) - 3, dureeAssuree(X)) & \text{sinon} \end{cases}$$

où :

—  $dureePE_{tot}(X, Z)$  : est la durée totale de la PEc, totale et partielle :

$$dureePE_{tot}(X, Z) = dureePE_{totale}(X, Z) + dureePE_{partielle}(X, Z)$$

—  $dureeAssuree$  : la durée d'indemnisation appliquée en fonction du secteur d'activité, 12 ou 24 mois.

Et le montant indemnisé au titre des PEc est estimé via la fonction  $PE_{assuree}$  :

$$PE_{assuree}(X, Y, Z, D) = \begin{cases} \max(0; margeBrute(X, Y, D) * dureePE_{assuree}(X, Z) - 1140) & \text{si } dureePE_{assuree}(X, Z) \leq dureePE_{totale}(X, Z) \\ \max(0; margeBrute(X, Y, D) * [dureePE_{totale}(X, Z) + \frac{dureePE_{assuree}(X, Z) - dureePE_{totale}(X, Z)}{2}] - 1140) & \text{sinon} \end{cases}$$

Cette section a présenté l'état d'avancement actuel de la modélisation des pertes d'exploitation consécutives à un dommage direct. Celle-ci nécessite aujourd'hui des travaux de calibrage importants et les résultats numériques ne sont pas aujourd'hui disponibles.

De plus, de nombreuses problématiques n'ont pas encore été abordées et incorporées au travail notamment les variations saisonnières de l'activité qui, selon le secteur d'activité comme le tourisme, peuvent avoir un impact important sur les PE. L'intégration de ce paramètre nécessiterait d'intégrer des séries chronologiques mensuelles de l'activité par secteur.

### 4.3 TRAVAUX FUTURS : LES PERTES D'EXPLOITATION NON CONSÉCUTIVES À UN DOMMAGE DIRECT

#### 4.3.1 PE consécutives à une défaillance des réseaux

L'étude des dommages aux réseaux, de leurs dysfonctionnements, des transferts de défaillances entre les réseaux et des PEnc dues à ces défaillances fait l'objet d'une revue de littérature distincte fournie à CCR en vue de travaux futurs.

Cette étude a permis de comprendre les enjeux et les problématiques, ce qui permettra dans l'avenir de déterminer une méthodologie pour la modélisation des zones et durées de défaillance des différents réseaux ainsi que des PE qui en résultent.

##### 4.3.1.1 Problématiques

###### a. L'importance des réseaux dans le fonctionnement des sociétés modernes :

La société moderne est de plus en plus dépendante des réseaux comme support des relations entre ses différents composants (entreprises, habitants, infrastructures essentielles, administrations...). La rupture de ces réseaux implique l'isolation de certains composants et par conséquent une perturbation du fonctionnement de la société tels que des effets dominos sur l'activité des entreprises. Ces réseaux jouent ainsi un rôle essentiel dans les mécanismes de diffusion du risque et inversement, dans les mécanismes de rétablissement du bon fonctionnement de la société (Gleyze, 2005).

Ainsi, selon Michel-Kerjan (2000), « chaque exemple le montre, les pertes sociales et financières sont de plus en plus importantes, sans doute parce que les réseaux en question regroupent un nombre croissant d'utilisateurs ». Cela s'explique par plusieurs paramètres :

- des niveaux de risques qui explosent ;
- un niveau de diffusion important ;
- une probabilité d'occurrence difficilement calculable ;
- des vulnérabilités inconnues.

En conclusion, la dépendance de plus en plus grande des personnes et de l'économie aux services fournis par les réseaux les place au centre du fonctionnement de la société moderne. Le fonctionnement efficace de ces réseaux durant une période de crise et leur capacité à revenir le plus rapidement possible à un fonctionnement normal est fondamental pour la société qui en dépend. Inversement, la défaillance de ces réseaux peut entraîner la paralysie de la société. Or, les impacts potentiels du dysfonctionnement des réseaux sur la société ne sont pas encore totalement compris aujourd'hui

Ainsi, les réseaux reçoivent de plus en plus d'attention dans le domaine de la gestion des risques d'inondation du fait de la problématique sécuritaire qu'ils représentent (Reghezza-Zitt, 2006 ; Petit, 2009 ; OCDE, 2014 ; exercice EU SEQUANA de mars 2016).

###### b. La multitude des réseaux et des acteurs :

On peut différencier 2 types de réseaux, ce qui pourra être intéressant en terme de modélisation : les réseaux techniques et les réseaux de transport. Les réseaux de transport

assurent le transport des personnes et des biens. Ce sont les routes, les voies ferrées, les transports aérien, fluvial et maritime (Eleutério, 2013). Les réseaux techniques assurent la production, le traitement et/ou la distribution et collecte de services et de ressources. On trouve ici l'électricité, les hydrocarbures, les télécommunications et l'eau. On relève donc ici une les premières difficultés à surmonter pour cette étape de modélisation :

- une grande variété de structures potentiellement affectées, chacune ayant une organisation complexe ;
- une multitude de composants techniques et donc de dommages potentiels, chaque composant d'un réseau a sa propre vulnérabilité aux inondations.

Une deuxième difficulté apparaît du fait de la multitude des opérateurs et gestionnaires des réseaux en France. Nous en faisons une présentation non exhaustive ici.

Le réseau électrique se découpe en trois parties :

- la production est assurée par EDF en majorité (mais également la Compagnie Nationale du Rhône et ENEL/Endesa France) par diverses sources d'énergie comme le nucléaire, l'énergie thermique et hydraulique. A cela s'ajoute un marché décentralisé de l'énergie avec des petits producteurs (éolienne, photovoltaïque) ;
- RTE (société anonymes filiales d'EDF), propriétaire de son réseau, est chargée du transport d'électricité entre les centres de production et les postes sources (points d'alimentation du réseau ERDF). Son réseau est constitué de lignes très haute, haute et moyenne tension ;
- la distribution est reléguée à ERDF (société anonymes filiales d'EDF) et ELD principalement qui dessert l'électricité jusqu'aux points de consommation. ERDF est concessionnaire de la plupart des réseaux haute, moyenne et basse tension de distribution d'électricité, qui appartiennent aux collectivités territoriales ou à leurs regroupements.

En ce qui concerne le réseau routier national, les Directions interdépartementales des routes ont un rôle technique et opérationnel, sous l'autorité des préfets. La direction des infrastructures de transport (DIT) et notamment la sous-direction gestion du réseau routier national (S/D GRN) jouent le rôle de tête de réseau. Avec l'aide des Cete et de l'IFSTTAR, le Cerema publie des référentiels techniques qui s'imposent aux différents gestionnaires d'infrastructures. Il est intéressant de noter que beaucoup de routes et d'ouvrages d'art ont été construits il y a plus de trente ans, à une époque où le dimensionnement vis-à-vis des aléas naturels était moins exigeant qu'aujourd'hui. Or, mis à part le cas des tunnels, il n'existe aucun programme de remise à niveau systématique des routes et ouvrages anciens aux nouvelles normes.

Le propriétaire et gestionnaire du réseau ferré national est SNCF Réseau. Il réalise l'essentiel de ses travaux d'investissements, de maintenance, et ses études d'ingénierie mais sous-traite une partie de ses missions sous son pilotage direct. Par exemple, TP Ferro est le gestionnaire d'infrastructure de la LGV Perpignan - Figueras et Eurotunnel est le gestionnaire d'infrastructure du tunnel sous la Manche.

Enfin, pour les réseaux de transports terrestres, il faut également étudier les réseaux de transport collectif. Ce sont les transports publics de voyageurs, utilisant une voie ou un espace affectés à sa seule exploitation (métro, tramway, bus). Si on prend l'exemple de l'agglomération parisienne, la RATP est l'opérateur du réseau en agglomération parisienne au même titre que la SNCF banlieue (le Transilien). La RATP est à la fois

gestionnaire de son réseau ferré et exploitant unique de ce réseau. Elle exploite également des lignes de tramway et un réseau d'autobus qui circulent sur la voie publique.

La France comporte plusieurs opérateurs de réseau de voies navigables, par exemple : la Compagnie française de navigation rhénane (CFNR) et la Compagnie nationale du Rhône (CNR), filiale de GDF Suez. Cependant, un seul opérateur est présent sur la majeure partie du territoire national : Voies Navigables de France, établissement public administratif de l'État.

Pour les réseaux de communication, d'eau et d'assainissement, on remarque un morcellement des activités du fait d'une forte concurrence entre opérateurs et gestionnaires de réseaux.

Les télécoms étaient à l'origine un service administratif de l'État. Les lois de 1990 et de 1998, respectivement la transformation de France Telecom en exploitant de droit public et l'ouverture du marché à la concurrence, ont amené France Telecom à devenir l'opérateur privé majoritaire dans les communications : offres mobiles (Orange), internet et la téléphonie fixe. France Telecom a mis ses infrastructures à la disposition de ses concurrents et on a vu l'émergence d'autres opérateurs : SFR, Bouygues Télécom, Free Mobile...

Le morcellement des activités est encore plus complexe dans le cas du réseau d'eau et assainissement. L'organisation des services de l'eau est de la responsabilité des communes qui peuvent se regrouper dans des structures intercommunales. La commune ou collectivité organisatrice décide du choix du mode de gestion du service : soit directement par la commune ou par une société privée via une délégation de service public, ce qui est la situation majoritaire. Même en cas de délégation, la collectivité conserve la responsabilité de l'organisation des services et détermine les orientations stratégiques (choix tarifaire, gestion du patrimoine, contrôle...). Le conseil d'orientation pour la prévention des risques naturels majeurs (COPRNM) dans une note de 2002 fait le constat suivant : le réseau d'eau potable est caractérisé par une multiplicité et disparité des réseaux de distribution tant sur un point de vue technique (différentes sources et de procédés de captage) que sur les organisations gestionnaires. Pour ce qui est des entreprises privées, Veolia Eau est le principal opérateur des services d'eau et d'assainissement présent en France. Le GEIDE (Groupement d'Experts et d'Intervention DÉchets post-catastrophe) joue un rôle important via sa mission d'expertise auprès des responsables de gestion de crise afin de mettre en place des règles de bonne gestion des déchets de catastrophes afin de limiter les impacts sanitaires et environnementaux.

### **c. L'interdépendance des réseaux :**

Dans le contexte des réseaux d'infrastructure, Eleutério (2013) élargit la classification des impacts en intégrant la notion d'impacts internes et externes. Les impacts internes comprennent les impacts de l'inondation sur le réseau lui-même. De tels impacts incluent les dommages directs aux infrastructures et les dysfonctionnements en cascade dans le périmètre de ce même réseau. Par exemple, les dommages à un poste de transformation électrique peut générer le dysfonctionnement de plusieurs composants du réseau d'approvisionnement en électricité. Les dommages externes comprennent les dysfonctionnements en cascade sur les réseaux qui dépendent de ressources et services offerts

par eux (Blancher, 1998 ; Robert et al., 2003 ; Røstum et al., 2008 ; Petit, 2009).

Le schéma suivant illustre les différentes catégories de dommages et de pertes, relations entre les composants des réseaux et comment les impacts des inondations se propagent à travers eux.

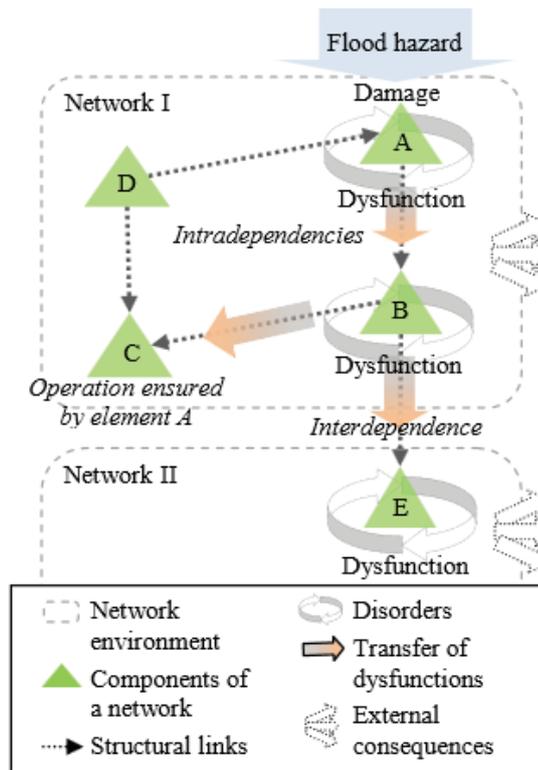


FIGURE 4.3 – Impacts des inondations sur les réseaux d'infrastructure

Source : Eleutério (2013)

Ce schéma représente les dysfonctionnements provoqués par l'impact d'une inondation sur le composant A. Il permet de mettre en avant plusieurs type de vulnérabilités :

- la vulnérabilité des composants du réseau détermine s'il va subir des dommages ou non : c'est l'impact de l'inondation sur le composant A ;
- la vulnérabilité fonctionnelle qui va déterminer son potentiel de dysfonctionnement de chaque composant : c'est ce qui va déterminer si le composant A arrêtera de fonctionner ;
- la vulnérabilité structurelle au sein d'un réseau : l'impact du dysfonctionnement du composant A sur les composants B, C et D ;
- la vulnérabilité structurelle entre les réseaux qui représente leurs interdépendances : l'impact du dysfonctionnement du composant B sur le composant E.

On observe donc que chaque composant d'un réseau a sa propre vulnérabilité aux dysfonctionnements des autres réseaux, augmentant de fait la complexité de ces analyses.

Pendant longtemps, les plans de gestion de crise de chaque opérateur sont fondés sur l'hypothèse que les autres réseaux fonctionnent bien alors que a réflexion sur la

défaillance d'un opérateur, en matière de catastrophe naturelle, devrait être fondée sur une hypothèse « zéro service extérieur » : plus d'Internet, plus d'électricité, plus de transports... Ces interactions en chaîne commencent à être pris en compte sous l'impulsion des les pouvoirs publics (OCDE, 2014; exercice EU SEQUANA de mars 2016).

Un rapport du Center for Infrastructure Protection and Homeland Security, de la George Madison University (CIPHS, 2001) analyse ainsi les interdépendances entre infrastructures critiques. L'étude n'a analysé que les interactions de premier rang : elle a relevé l'extrême complexité engendré par des interactions de second rang. Ces interdépendances de 1er rang sont représentées dans le graphique suivant :

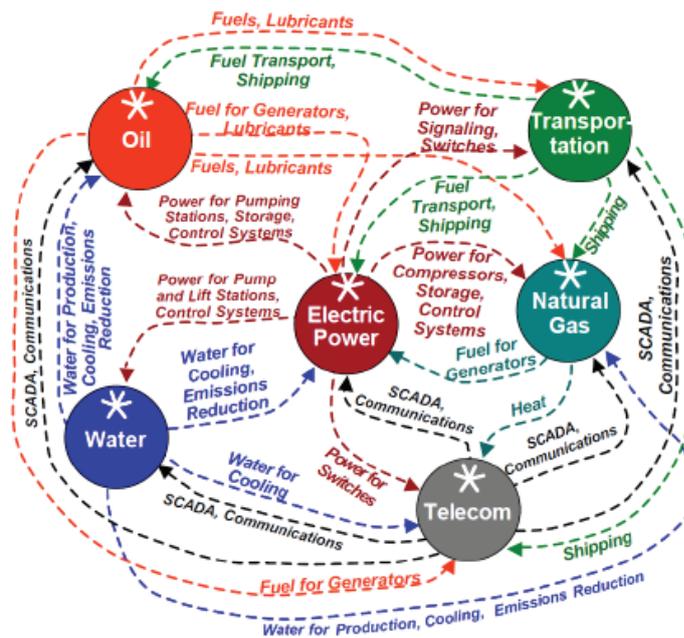


FIGURE 4.4 – Schématisation des interdépendances entre les réseaux

Source : CIPHS, 2001

A la lecture des retours d'expériences suite à des catastrophes passées, certains réseaux apparaissent donc particulièrement vulnérables :

- les réseaux d'électricité : transport (RTE), distribution (ERDF, ELD) ;
- les réseaux de gaz ;
- les réseaux de télécommunications (fixe, mobile, internet...) ;
- les réseaux de transports (réseau routier, réseau ferré, aéroports...) ;
- le réseau d'eau potable ;
- le réseau d'assainissement ;
- les réseaux de collecte et traitement des ordures ménagères.

Cette étude de l'AFPCN-IMdR a relevé le rôle majeur du réseau électrique dont dépendent tous les autres réseaux. En effet, si le réseau électrique venait à faillir, cette perturbation se répercuterait en chaîne sur d'autres réseaux. Sans électricité il n'y a, par exemple, plus de circulation des trains, de signalisation, d'ordinateurs de contrôle et cela entraîne une paralysie directe des banques, des magasins, des ascenseurs... Une perturbation de l'alimentation électrique peut également provoquer l'arrêt d'une pompe de relevage ce qui immobilise une station d'assainissement. Ce fut le cas à Neuville-sur-Saône lors des

inondations de 2001, la coupure électrique a entraîné l'arrêt de la station d'épuration de la ville ce qui a provoqué un rejet des eaux usées dans la rivière et donc une pollution du milieu naturel. Le tableau suivant synthétise de manière non exhaustive les liens qui existent entre le réseau électrique et les autres réseaux en cas de catastrophe naturelle :

TABLE 4.2 – Dépendances des réseaux au réseau électrique

	Dépendances et vulnérabilité au réseau électrique
<b>Télécommunications</b>	Dépendant pour le fonctionnement des centraux (auto-commutation, systèmes de surveillance...) Dépendant pour l'acheminement des signaux (fil de cuivre, fibre optique, ondes hertziennes). Dépendant pour le fonctionnement des relais de téléphonie mobile (3 heures d'autonomie). Vulnérable à la chute des câbles électriques (courts-circuits) et des poteaux communs aux deux réseaux électrique et de communication.
<b>Transport routier</b>	Dépendant sur les tronçons concernés par la signalisation et l'éclairage public. Dépendant pour le réseau autoroutier : péages, panneaux lumineux à messages, système de gestion du trafic.
<b>Transport ferroviaire</b>	Très forte dépendance.  Risque de chute de ligne ou de pylône sur voie.
<b>Eau potable</b>	Vulnérabilité forte mais variable selon la commune. Dépendance des pompages et des systèmes de potabilisation, système de distribution.
<b>Assainissement</b>	Vulnérabilité dépend du type d'installation : pompe de relevage, complexité de la station d'épuration.

Source : AFCPN-IMdR, 2014

Les réseaux entretiennent également une très forte dépendance aux télécommunications : l'ensemble des réseaux sont dépendants ou vulnérables dans le cas de la gestion de crise. En effet, l'alerte et la communication au sein d'un réseau donné sont totalement tributaires des télécommunications. Sans le réseau de communication, la gestion de crise devient très difficile. Par exemple, durant le séisme de Kobe, l'interdépendance des réseaux s'est faite cruellement sentir, les services d'urgence n'ont ainsi pu se coordonner (réseau de télécommunication hors d'usage), ni se déplacer (réseaux de transports hors d'usage) (Michel-Kerjan, 2000). Il est donc nécessaire d'anticiper et de trouver des moyens de substitution.

Ce dernier point met en avant que le bon fonctionnement des réseaux conditionne un retour rapide à la normale via une bonne gestion de la crise, la remise en service et la reconstruction sur le long terme des territoires touchés (Lhomme, 2012).

Les réseaux est donc une étape de modélisation complexe. A cela s'ajoute les facteurs locaux de management des réseaux et de leur gestion lors de crises (Dutta et al., 2003) et la pratique usuelle dans les projets de reconstruction des infrastructures de ne pas seulement réparer les dommages mais de renouveler et moderniser les infrastructures pour se conformer aux normes en vigueur (Kreibich et al., 2010) faisant évoluer en permanence la vulnérabilité des composants.

#### 4.3.1.2 Etude de cas : la Seine en Ile-de-France

Face à la prise de conscience sur le rôle fondamental des réseaux, des études et expériences ont été menées sur la région parisienne (Reghezza-Zitt, 2006 ; OCDE, 2014 ; exercice EU SEQUANA de mars 2016). En effet, le cas francilien montre à quel point les réseaux ont pris une place importante dans la vie quotidienne de leurs usagers (Reghezza-Zitt, 2006).

Les travaux du secrétariat général de la zone de défense et de sécurité de Paris (exercice EU SEQUANA de mars 2016) ont rassemblé de nombreux opérateurs réseaux autour de la problématique de leur défaillance. Des questionnaires rédigés par l'OCDE ont été envoyés aux gestionnaires et opérateurs des réseaux afin de rassembler les informations nécessaires sur les dommages subis, les dysfonctionnements, le temps de remise en état, la dépendance vis-à-vis des autres réseaux et leur plan de continuité d'activité. Ces travaux ont permis de mobiliser les opérateurs réseaux sur la thématique de la crue et d'évaluer un certain nombre d'impacts en cas d'une crue de la Seine du type de celle de 1910. L'estimation des impacts sur les réseaux est alors la suivante :

- la distribution d'électricité sera affectée de façon significative avec près d'un quart des infrastructures de transformation électrique qui seront inondées ou coupées préventivement (DRIEE, 2012). Selon ERDF, plus de 1,5 million de clients verront ainsi leur électricité coupée dans le cas extrême dont 377 000 à Paris, et cela parfois 3 jours avant l'arrivée de l'inondation. La surface de la zone touchée par l'interruption correspond environ au double de la zone inondée ;
- les transports publics seront affectés sur une large portion avec près de 140 km du réseau de métro sur 250 qui seront fermés préventivement. Seule la ligne 2 du métro sera fonctionnelle dans son intégralité. Le réseau RER sera aussi interrompu, la ligne C étant la première à s'arrêter dès que la Seine atteint le niveau de 6,30 m. Les gares de Lyon, Austerlitz et Saint-Lazare se trouvent aussi en zone inondable et verront leur fonctionnement perturbé (EPTB, 2013) ;
- le réseau routier sera bloqué en de nombreux points : les ponts traversant la Seine seront interdits à la circulation du fait de leur fragilisation, rendant impossible le passage de la rive droite à la rive gauche de la Seine. Cinq autoroutes et de nombreux axes majeurs, notamment le long de la Seine seront aussi inaccessibles (OCDE, 2014) ;
- l'alimentation en eau potable pourra être interrompue dans la périphérie de Paris où plus de 5 millions d'abonnés pourront subir des coupures d'eau prolongées et 1,3 million une dégradation de sa qualité dans le cas le plus extrême.

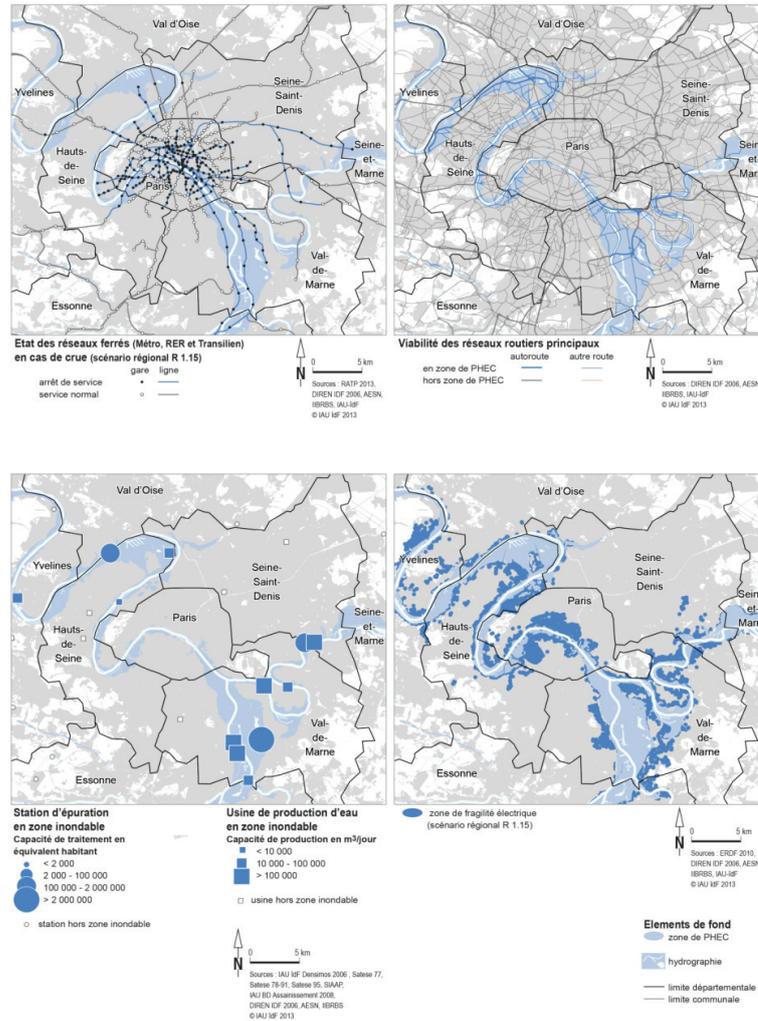


FIGURE 4.5 – Impact d'une crue majeure sur les réseaux critiques

Source : IAU IdF

On peut ajouter que les caves sont occupées par les câbles d'arrivée du raccordement des entreprises à Internet, que le RER transporte la majeure partie des travailleurs parisiens pour leurs déplacements domicile-travail et que les distributeurs automatiques fournissent l'essentiel de la monnaie de paiement. Les entreprises seraient donc arrêtées accroissant le blocage de la société.

#### 4.3.1.3 Etat de l'art

La recherche sur la vulnérabilité des réseaux aux catastrophes naturelles en France a mis du temps à susciter de l'intérêt. Le MEDD (2007) et le CEPRI (2008) ayant alors mis en avant que les réseaux sont rarement pris en compte des évaluations de dommages en France. Les études étaient généralement concentrées sur l'examen des dommages directs passés (CEPRI, 2008). L'intérêt porté à ces études a démarré par les dommages aux infrastructures routières avant de s'élargir aux autres réseaux sans pour autant aborder les dysfonctionnements internes des réseaux (Lefrou, 2000; Huet, 2003; MEDD, 2005b; Ecodecision, 2006; Vinet, 2003).

Cela est notamment dû à la forte incertitude de cet exercice de modélisation (Røstum

et al., 2008), expliquée par les problématiques de modélisation détaillées précédemment. Les premiers modèles ont donc adopté des analyses à larges échelles qui ignorent l'aspect fonctionnel des réseaux eux-mêmes (Dutta et al., 2001, 2003; Jonkman et al., 2008). Ils ont été conçus pour une utilisation générale et sont applicables à tous types de réseaux, sans prendre en compte un haut niveau de détail. Néanmoins, le coût potentiellement élevé que représentent les dommages aux infrastructures des réseaux et les dysfonctionnements qu'ils induisent implique que cet exercice de modélisation à plus fine échelle est nécessaire (Petit, 2009; Merz et al., 2010; CEPRI, 2008).

#### **a. Dommages directs**

Pour l'estimation des dommages directs aux réseaux, Penning-Rowsell et al. (2013) (le Multicoloured Manual, MCM) recommandent d'utiliser des approches par courbes d'endommagement. Des coûts standards par unité de longueur (c'est-à-dire par kilomètre de ligne ferroviaire, de route, ou d'infrastructure des réseaux de services) peuvent être utilisés comme une base d'évaluation. Cette démarche est également adoptée par le modèle HIS-SSM (citation).

Le modèle HAZUS-MH adopte une approche différente (HAZUS technical manual). Afin d'intégrer le plus de réseaux possible dans son périmètre d'étude (autoroutes, réseau ferroviaire, réseau ferroviaire léger (métro, tramway), bus, ports, transport ferroviaire, aéroports pour les réseaux de transport et distribution d'eau potable, gestion et traitement des eaux usées, distribution de pétrole, distribution de gaz naturel, distribution d'énergie électrique, systèmes de télécommunication pour les réseaux de service) tout en restant pertinent, le modèle HAZUS-MH n'étudie pas les réseaux dans leur globalité mais ses composants essentiels. Ceux-ci sont définis par deux critères : coût de remplacement (coût du composant et temps de remise en état après dommages) et importance au bon fonctionnement du réseau. Cependant, le modèle ne fournit pas d'estimation chiffrée du dommage direct subi, les pertes monétaires sont classifiées selon trois niveaux : faibles, moyennes, élevées à partir de courbes d'endommagement, également qualitatives, basées sur trois paramètres d'aléa : la hauteur d'eau, l'érosion et les impacts des débris.

#### **b. Dysfonctionnements internes**

Tout comme pour les dommages directs, dans le modèle HAZUS-MH, les dysfonctionnements sont estimés qualitativement (Low, Medium, High) en fonction de l'importance du composant dans le fonctionnement global du réseau.

Les travaux d'Eleutério (Eleutério et al., 2013) se placent également au niveau des composants élémentaires de chaque réseau. Le réseau est modélisé de façon systémique : un réseau est un groupe de composants ayant chacun une vulnérabilité fonctionnelle et liés dynamiquement les uns aux autres. Ces interactions peuvent donc entraîner des perturbations dans le fonctionnement du réseau par effet domino, lorsqu'un des composants est endommagé. Concrètement, ces interactions sont traduites par des matrices de dommages-dysfonctionnement basées sur des avis d'experts. Ces matrices ont été construites pour plusieurs réseaux : la gestion et l'évacuation des eaux usées, l'approvisionnement en eau potable, en gaz, en énergie et l'éclairage public.

S. Lhomme (S. Lhomme et al., 2013 et S. Lhomme et al., 2013 bis) s'est focalisé sur le développement d'une méthodologie permettant d'analyser la résilience des réseaux tech-

niques. La résilience, définie comme la capacité de ce système à absorber une perturbation et à récupérer ses fonctions à la suite de celle-ci, est décomposée en trois sous-notions, les capacités de résistance, d'absorption et de récupération (Lhomme et al., 2010). Des indicateurs ont été créés pour évaluer ces trois types de capacités et ainsi identifier les forces et les faiblesses des réseaux techniques. A partir de ces indicateurs, les zones de défaillances des réseaux peuvent être estimés.

#### c. Dysfonctionnements externes

De la même façon que pour les dysfonctionnements directs, les travaux d'Eleutério se sont intéressés aux transferts de dysfonctionnements entre les réseaux. L'analyse multi-réseaux est menée par l'étude des interactions et interdépendances entre les différents réseaux.

#### d. PEnc

De façon plus globale, les travaux de S. Lhomme s'intéressent à la notion de résilience urbaine. Pour cela, une modélisation systémique simplifiée de la ville a été retenue (Lhomme, 2012). Dans ce système, les réseaux techniques se révèlent être le support des relations entre les différents composants du système urbain, c'est-à-dire entre les différents sous-systèmes (entreprises, habitants, infrastructures, réseaux...). Ainsi, l'analyse de la résilience des réseaux techniques a permis de déterminer des zones plus ou moins résilientes (du point de vue de leurs réseaux). Et dans un deuxième temps, l'analyse de la répartition des enjeux majeurs (autres que les réseaux) au sein de ces zones donne des indications sur la résilience de la ville analysée. Sur la base de ce modèle, un outil *Web-SIG* a été développé et des implémentations ont été faites pour le réseau routier de la ville d'Orléans ainsi que pour les réseaux électrique et d'assainissement de l'eau de la ville de Dublin (Lhomme et al., 2013b).

Une autre approche, adoptée par le MCM (Penning-Rowsell et al., 2013) pour les réseaux de transport, ferroviaire et les services, consiste à estimer le coût induit par le dysfonctionnement à partir des coûts de temps et de ressources qu'il provoque.

Enfin, des modèles à grande échelle qui traitent les PEnc en intégrant les réseaux comme des acteurs de l'économie (Hallegatte, 2008 ; Rose et Liao 2004).

### 4.3.1.4 Données

#### a. Données d'aléa :

Le modèle d'aléa développé par la Caisse Centrale de Réassurance permettra d'avoir des informations sur les caractéristiques de l'événement, à savoir, la zone d'aléa, la hauteur d'eau, le débit et la durée d'inondation.

#### b. Données d'exposition :

Une première option serait de mener une **récolte de données auprès des gestionnaires des réseaux**. Mais nous nous retrouverions confrontés à plusieurs difficultés :

- la nature sensible de l'information géographique précise sur les réseaux fait que cette information ne peut pas toujours être transmise ;

- la diversité des acteurs : beaucoup de personnes à contacter (chronophage), information parcellaire, diversité des sources (donnée non uniforme).

L'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) fournit plusieurs bases de données : BD TOPO , BD ADRESSE, ROUTE ADRESSE, POINT ADRESSE, BD NYME, BD CARTO, GEOFLA, ROUTE 120, ROUTE 500. Aujourd'hui, CCR dispose des bases de données TOPO, ADRESSE et CARTO. La BD ADRESSE est une base d'informations d'adresse et n'est donc pas adaptée à notre cas. Nous allons détailler les données disponibles dans la BD TOPO et la BD CARTO.

La **BD TOPO** contient une description vectorielle 3D des éléments du territoire et de ses infrastructures, de précision métrique, exploitable à des échelles allant du 1 : 5 000 au 1 : 50 000. Elle est utilisée pour la localisation de l'information thématique relative aux problématiques d'aménagement, d'environnement ou d'urbanisme.

Les données sont regroupées en 10 thèmes, contenant chacun différentes classes d'objets. Quatre thèmes correspondent à nos besoins :

- RESEAU ROUTIER :
  - ROUTE
  - ROUTE NOMMEE
  - CHEMIN
  - ROUTE PRIMAIRE
  - ROUTE SECONDAIRE
  - SURFACE ROUTE
  - TOPONYME COMMUNICATION
- VOIES FERREES ET AUTRES :
  - AIRE TRIAGE
  - GARE
  - TRONCON VOIE FERREE
  - TRANSPORT CABLE
  - TOPONYME FERRE
- TRANSPORT ENERGIE :
  - CONDUITE
  - LIGNE ELECTRIQUE
  - POSTE TRANSFORMATION
  - PYLONE
- HYDROGRAPHIE :
  - POINT EAU
  - RESERVOIR EAU
  - SURFACE EAU
  - CANALISATION EAU
  - TRONCON COURS EAU
  - TRONCON LAISSE
  - HYDRONYME

Dans le choix d'une base de données, son exhaustivité est un critère important. L'exhaustivité de la BD TOPO varie suivant les thèmes :

- le réseau routier revêtu (98%);
- le réseau ferré (TGV et principal) (99%);

#### 4.3. Travaux futurs : Les pertes d'exploitation non consécutives à un dommage direct 251

- le réseau électrique (haute et très haute tension) (96%);
- l'hydrographie permanente (99%);
- le bâti (95% pour le bâti indifférencié et 98% pour les autres bâtiments);
- les pistes d'aérodrome (99%);
- les communes (100%);
- les arrondissements urbains (100%).

La **BD CARTO** offre une représentation vectorielle bidimensionnelle du territoire et de ses infrastructures. Utilisée de l'échelle départementale (1 : 50 000) à l'échelle régionale (1 : 250 000). Tous les éléments du paysage ne sont pas décrits dans la BD CARTO, mais seulement les plus importants, soit par leur taille soit par leur fonction, aux échelles considérées. Les éléments du terrain sont décrits géométriquement (forme et localisation de l'élément) et sémantiquement (nature et caractéristiques de l'élément).

Les données sont regroupées en 7 thèmes, contenant chacun différentes classes d'objets. Parmi ces 7 thèmes, 4 correspondent à des données sur les équipements :

- EQUIPEMENT
  - AERODROME
  - CIMETIERE
  - CONSTRUCTION ELEVEE
  - DIGUE
  - ENCEINTE MILITAIRE
  - LIGNE ELECTRIQUE
  - METRO AERIEN
  - PISTE AERODROME
  - TRANSPORT CABLE
- HABILLAGE
  - ZONE OCCUPATION SOL
- RESEAU FERRE
  - NOEUD FERRE
  - TRONCON VOIE FERREE
- RESEAU ROUTIER
  - ACCES EQUIPEMENT
  - COMMUNICATION RESTREINTE
  - DEBUT SECTION
  - EQUIPEMENT ROUTIER
  - FRANCHISSEMENT
  - ITINERAIRE
  - LIAISON MARITIME
  - NOEUD ROUTIER
  - TRONCON ROUTE

L'exhaustivité de la BD CARTO est la suivante :

- Routes classées : 98%;
- Voies ferrées (LGV et voies principales) : 99%;
- Hydrographie linéaire (réseau permanent) : 95%;
- Administratif : 100%;
- Réseau électrique : 99%.

Si la BD CARTO est la base de données de référence de l'IGN, la classification et les attribut sur les particularités physiques des infrastructures de la BD TOPO sont plus adaptés aux besoins de l'étude.

### c. Données de calibrage :

Les données sur des événements passés sont nécessaires afin d'ajuster au mieux les résultats du modèle. Ces données sont disponibles grâce à un travail de collecte de l'information post-événement ensuite consignées dans les RETEX.

Le rapport du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDDE) "Vulnérabilité des réseaux d'infrastructures aux risques naturels" (2013) fournit quelques RETEX sur les défaillances de réseaux suite à des catastrophes naturelles :

- tempêtes Lothar et Martin (26-28 décembre 1999);
- crue de la vallée de la Somme (mars-mai 2001);
- canicule d'août 2003;
- délestage de novembre 2006;
- cyclone Dean (2007);
- tempête Klaus (23-24 janvier 2009);
- tempête Xynthia (février 2010);
- tempête Sandy (octobre 2012);
- épisodes neigeux de 2010 et 2013.

Cependant aujourd'hui, seuls quelques RETEX fournissant une information détaillée sur les dommages aux réseaux sont disponibles. Les données ne sont pas récoltées de manière systématique et donc l'information disponible est parcellaire et non uniforme. Ces informations sont donc difficilement exploitables dans le cadre du calibrage d'un modèle.

De plus, la pratique usuelle dans les projets de reconstruction des infrastructures est de ne pas seulement réparer les dommages mais de renouveler et moderniser les infrastructures pour se conformer aux normes en vigueur (Kreibich et al., 2010). Ainsi, l'information sur les dommages lors d'événements passés devient vite obsolète puisque les nouvelles infrastructures ne sont pas identiques et réagiront donc différemment lors du prochain événement.

Enfin, ces informations sur les dommages et les dysfonctionnements ne sont pas uniquement liées à l'impact de l'aléa. Dans beaucoup de situations, la décision de l'arrêt de fonctionnement des installations est prise par décision managériale, basée sur des seuils de niveau d'eau (HAZUS).

#### 4.3.1.5 Modélisation envisagée pour CCR

Les comportements des réseaux lors d'inondations est un domaine de recherche dans lequel il reste beaucoup de travail à effectuer pour répertorier et comprendre l'ensemble des interactions internes, externes entre les composants et les réseaux ainsi que l'impact des dysfonctionnements sur la société. Pour cela, il n'existe pas dans la littérature de modèle bien établi d'estimation des dommages et dysfonctionnements des réseaux puis de l'impact de ces dysfonctionnements sur la société.

Les objectifs de modélisation de CCR sont de lier le plus possible l'estimation des impacts à une représentation spatiale des mécanismes à l'œuvre. Ainsi, l'esprit du modèle qui pourrait être développé serait de se baser, comme le modèle HAZUS, sur des composants élémentaires de chaque réseau. Cela nous permettra de continuer l'analyse sur les dysfonctionnements internes et externes en suivant les travaux d'Eleutério et du modèle HAZUS et ainsi définir des zones de dysfonctionnement pour estimer par la suite les PEnc dus aux dysfonctionnement des réseaux selon la démarche de S. Lhomme.

Chaîne de modélisation à mettre en place à CCR serait donc la suivante :

1. Dommages matériaux directs : développement d'un modèle physique sur exposition. Le module d'exposition pourra être basé sur la BD TOPO, le module d'aléa sur le modèle inondation CCR et il faudra développer des fonctions de dommages pour les composants spécifiques pour le module de dommage.
2. Dysfonctionnements directs : l'idée est de s'appuyer sur le modèle physique sur exposition précédemment développé en appliquant cette fois des seuils de dysfonctionnement au lieu des fonctions d'endommagement. Les dépendances entre les composants du réseaux pourront ensuite être identifiés et cartographiés pour identifier les dysfonctionnements.
3. Dysfonctionnements indirects : il s'agirait ici également d'identifier et de cartographier les interdépendances entre les réseaux pour estimer les effets dominos sur les autres réseaux.
4. Les PE induites : la démarche sera également similaire à un modèle physique sur exposition. Les points 2 et 3 permettront de modéliser des zones et durées de dysfonctionnement des réseaux, ce qui sera dans notre cas, l'aléa. Le module d'exposition pourra être basé du la base SIRENE, ce qui nous permettra d'identifier et géolocaliser les entreprises se situant dans ce zones de dysfonctionnement. Cela nous permettra donc d'estimer les pertes d'exploitation. Il faudra cependant prendre soin d'éviter tout double comptage entre les zones géographiques de perturbations des différents réseaux et avec les entreprises déjà touchées directement par les eaux d'inondation

#### 4.3.2 PE consécutives aux impacts sur la chaîne de production et conséquences macroéconomiques

Jusqu'à présent, les impacts étudiés (les dommages directs, les PEc et les PE dues aux défaillances des réseaux) pouvaient être traités de façon géographique, via un modèle physique sur exposition. Cette méthode de modélisation a été valorisée dans ces travaux pour sa capacité à expliquer les mécanismes à l'œuvre et à les représenter.

Cependant, les PE dues aux impacts sur la chaîne de production et les impacts macroéconomiques dépendent moins de relations géographiques - les entreprises étudiées ne sont pas directement impactées par l'aléa - que de la structure des relations entre les entreprises et entre les acteurs économiques. L'approche de modélisation devra donc s'y adapter.

Comme décrit dans le chapitre 1, les pertes aux entreprises induites par les effets systémiques en amont et en aval de la chaîne de production sont dues aux effets dominos sur l'économie produits par l'arrêt de l'activité d'une entreprise. Celle-ci ne peut plus fournir ses clients en inputs nécessaires à leur production et/ou elle annulera ses commandes auprès de ses fournisseurs. Les entreprises clientes et fournisseuses sont alors

elles-mêmes perturbées dans leur production, ce qui se répercutera sur les entreprises partenaires et ainsi de suite.

Un événement de grande ampleur va, en plus des entreprises, impacter tous les acteurs de l'économie : État et ménages. On peut alors élargir le périmètre des impacts étudiés afin d'estimer les effets macroéconomiques de la catastrophe.

Cette section essaye de mettre en avant les problématiques de modélisation de ce phénomène, les solutions proposées dans la littérature et les possibilités de modélisation pour CCR.

#### 4.3.2.1 Problématiques méthodologiques

Ce paragraphe met en avant certaines problématiques à prendre en compte lors du développement d'un modèle.

##### a. Temporalité

Nous faisons ici la distinction entre la durée de l'aléa et la durée de l'impact.

La durée de l'aléa correspond à la durée de l'événement inondation. Celle-ci peut varier de quelques jours à plusieurs mois en fonction de l'ampleur et du type d'inondation. Elle intervient comme input pour déterminer le choc de destruction et les PEc.

La durée de l'impact correspond à la durée de perturbation de l'économie avant son retour à l'équilibre ou à un nouvel équilibre. En effet, un événement majeur peut induire des transformations de la structure même de l'économie qui ne reviendra de fait pas à son état pré-catastrophe. Cette durée inclut la durée de l'événement plus la durée de la perturbation induite. Comme on a pu l'observer lors de l'ouragan Katrina, cet impact dans le temps peut s'étaler sur une période potentiellement très longue en fonction de multiples paramètres tels que l'ampleur de l'événement et les capacités de résilience et d'adaptation de la société (Hallegatte, 2008).

La façon dont l'**échelle temporelle** sera définie aura un impact sur le périmètre des effets estimés dans le modèle. Une fenêtre temporelle courte - relativement à l'ampleur de l'événement - permettra de prendre en compte les PEnc dues à des impacts en amont et en aval de la chaîne de production. Une fenêtre temporelle plus longue permettra de prendre en compte des effets de long terme tels que les effets positifs sur l'économie consécutifs à la reconstruction et à la reprise économique.

Ces différents phénomènes surviennent plus ou moins rapidement, amenant à une deuxième problématique : **le pas de temps** utilisé dans le modèle. L'utilisation de modèles statiques peut potentiellement annuler les impacts négatifs et positifs sur le long terme et mène alors à estimer des impacts totaux insignifiants (Albala, 1993). Également, utiliser une incrémentation temporelle constante dans le modèle fait supposer que les changements sont progressifs. Or, les premiers impacts surviennent très rapidement et peuvent être courts alors que les effets de long terme (reconstruction et plus encore reprise économique) sont plus lents.

Cependant, la plupart des modèles économiques supposent des changements progressifs et incrémentaux sur le temps et des effets uniformes et monotones sur l'espace. Il pourrait donc être intéressant de développer un modèle proportionnant l'échelle temporelle à l'ampleur de l'événement et dont l'incrémentation serait variable, d'abord de journalière à mensuelle voire annuelle.

### **b. Échelle géographique**

Comme nous l'avons à plusieurs reprises constaté, les catastrophes naturelles peuvent générer un large éventail d'impacts qui varient selon les localisations géographiques, dans ou hors de la zone impactée. Ainsi, un événement peut engendrer des impacts qui se propagent bien au delà des frontières de la zone affectée et certaines zones qui n'apparaissent à priori pas touchées peuvent subir des pertes importantes.

Au niveau économique, la zone d'étude aura un très gros impact sur les résultats. Lorsque la zone d'étude diminue de taille, son économie devient plus ouverte car une part de plus en plus grande des transactions inter-industrielles sont conduites avec des entités qui se situent en dehors de la région étudiée et les effets indirects deviennent significatifs. Inversement, plus l'échelle géographique considérée sera large, plus les impacts macroéconomiques seront faibles. D'une part, ils seront négligeables par rapport au volume du reste de l'économie. D'autre part, cela augmentera la possibilité de trouver des clients ou des fournisseurs alternatifs à ceux défaillants. En effet, selon Penning-Rowsell et al. (2013), on peut toujours prendre une échelle géographique suffisamment large pour que les impacts sur une entreprise soient compensés par une autre entreprise.

Cependant, si un événement de faible ampleur n'a pas d'intérêt à être étudié à l'échelle nationale, il peut être intéressant d'étudier les impacts à l'échelle départementale afin de cibler les secteurs impactés et de mieux orienter les potentielles aides financières.

L'échelle géographique considérée dépendra donc de l'ampleur et de l'objectif de l'étude.

### **c. Mécanismes d'action contraire**

Selon Albala (1993b), les effets indirects d'une catastrophe sont *"souvent sans importance pour l'économie et la société dans son ensemble et rapidement contrecarrés dans la zone de la catastrophe,"* puisque *"les mécanismes sociaux intégrés peuvent s'avérer suffisants pour éviter des effets indirects potentiels sur l'économie et la société"*. Il s'agit de la résilience et de la capacité d'adaptation de l'économie affectée *"qui permet aux entreprises et aux régions d'éviter les pertes maximum potentielles"* (Rose, 2005).

Des comportements d'entraide se mettent en effet souvent en place, que ce soit au niveau de la société civile qu'entre les entreprises. Dacy (1969) indiquent que ces comportements d'aide mutuelle lors d'une situation de chaos fait que *"les courbes d'approvisionnement et de demande peuvent varier de façon inattendue"* dans des circonstances extrêmes. Notamment dans le secteur agricole où des mécanismes d'entraide existent déjà en temps normal via le prêt de machines entre exploitations, lors de catastrophes, ces systèmes solidaires sont renforcés avec des dons de fourrage pour le bétail par exemple.

D'autre part, lors de très gros événements, l'État peut intervenir via le déblocage d'aides financières et/ou via l'intervention de l'armée, accélérant ainsi la reconstruction et le rétablissement économique. L'aide financière peut également venir de la société civile ou d'une aide humanitaire via des dons. Certains cadres institutionnels existent également. Par exemple, le Fonds de Solidarité Européen, créé après les inondations de l'été 2002 en Europe centrale, a été mis en place par les États membres de l'Union Européenne afin d'apporter une aide financière après les catastrophes naturelles. Via ce fonds, l'Allemagne bénéficia d'une aide financière de 31.5 M € pour les inondations de mai et juin 2016 Basse-Bavière ([http : //ec.europa.eu/regional\\_policy/en/newsroom/news/2017/03/03 – 08 – 2017 – eu – solidarity – fund – aid – for – germany – after – the – floods – in – bavaria – now – approved](http://ec.europa.eu/regional_policy/en/newsroom/news/2017/03/03-08-2017-eu-solidarity-fund-aid-for-germany-after-the-floods-in-bavaria-now-approved)).

Ces mécanismes d'action contraire et ces changements de comportements ont commencé à recevoir de plus en plus d'attention (Kunreuther, 2004). Plusieurs tentatives pour intégrer les changements de comportements en situation de catastrophe ont été faites. Tierney (1997) a étudié les stratégies de gestion de crise des entreprises et des communautés dans des situations de catastrophe, Bruneau (2003) a introduit la résilience d'une communauté comme le mécanismes d'action contraire de celle-ci, et Rose (2005) ont intégré des paramètres de résilience et d'adaptation dans le cadre d'un modèle EGC.

Ces mécanismes d'action contraire sont donc importants à prendre en compte afin de pouvoir produire une estimation plus exacte de l'impact économique d'une catastrophe.

#### **d. Comportement des acteurs économiques**

Tout d'abord, si l'État ou les collectivités locales allouent une partie de leur budget à une aide financière, cela se fera au détriment d'autres comptes et leurs comportements au niveau macroéconomique sera donc impacté.

Également, les dons faits par la société civile ont des effets sur la consommation des ménages. Ainsi, après le tremblement de terre de Kobe, la population japonaise a eu tendance à modifier sa demande finale en diminuant ses dépenses discrétionnaires pour les remplacer par des biens de 1<sup>ère</sup> nécessité destinés à des dons pour la région sinistrée. Okuyama (1999) ont inclus cette baisse et variation de la demande finale dans leur estimation des conséquences du tremblement de terre. Ces changements comportementaux qui induisent des changements des tendances de consommation n'ont pas encore été bien étudiés et modélisés, bien qu'ils aient des impacts importants sur les mécanismes macroéconomiques.

Les blessures et les traumatismes psychologiques subis par la population peuvent avoir des conséquences sur le très long terme. Outre les conséquences intangibles sur la population, ils peuvent également avoir des impacts sur l'économie. En effet, la population contient la population active de la société et celle-ci peut se retrouver réduite suite à une catastrophe : certaines personnes peuvent ne pas être en état de travailler et une partie de la population peut décider de ne pas revenir vivre dans la zone sinistrée. Les entreprises peuvent alors se retrouver en pénurie de main d'œuvre et ce, alors même que les nécessités de reconstruction induisent un besoin immédiat et important de main d'œuvre. La reconstruction de la Nouvelle-Orléans après l'ouragan Katrina de 2005 illustre bien ce phénomène et de nombreux états de lieux ont été menés 10 ans après la catastrophe. La

reconstruction de la ville a mis beaucoup de temps à se mettre en place, faute de main d'œuvre disponible.

La reconstruction de la Louisiane illustre également la résilience des populations face aux catastrophes naturelles, très influencée par la richesse. Dans un premier temps, le niveau de richesse a un impact sur le lieu de résidence : les quartiers les plus pauvres sont souvent ceux qui sont les plus exposés au risque de catastrophe. Le Lower Ninth Ward, le quartier le plus pauvre de la Nouvelle-Orléans et très touché par la catastrophe, est construit dans une cuvette. Le niveau de richesse a également un impact sur la capacité à rebondir après l'événement. Un sondage mené en 2015 par Louisiana State University (Algu P.R., 2015), montre que la grande majorité de la population blanche - principale détentrice de la richesse dans cet État - estime que la Louisiane s'est globalement remise alors que trois Noirs sur cinq estiment, eux, que ce n'est pas le cas. Encore, dans le quartier de Lower Ninth Ward, très touché par la catastrophe, le rétablissement des lignes haute tension et la rénovation des supermarchés et des hôpitaux n'étaient toujours pas achevés en 2015.

#### **e. Double comptage**

L'intérêt de la modélisation proposée est de décomposer les effets des inondations. Cette démarche présente cependant le risque de cumuler des effets pour une même entité.

En effet, une entreprise peut être impactée de plusieurs façons : elle pourra être directement inondée, se situer en zone de défaillance de réseaux et ses partenaires commerciaux pourront également être touchés. Or, il ne faudra comptabiliser qu'une seule fois la PE générée. Le modèle devra donc intégrer des règles à suivre pour éviter ce double comptage.

#### **4.3.2.2 État de l'art**

Contrairement aux impacts étudiés jusqu'ici, ces PEnc ne découlent pas de dommages et ne peuvent donc plus être traités via une modélisation physique sur exposition. Cependant l'objectif reste le même, à savoir de comprendre les phénomènes en action et de fournir une estimation chiffrée.

De nombreux modèles ont été développés pour estimer les PE issues des effets systémiques sur l'économie. Dans le cadre de nos travaux, trois cadres méthodologiques nous ont paru pertinents : la modélisation économétrique, input-output et d'équilibre général calculable. Nous allons décrire dans cette section les principales caractéristiques de ces modèles (fonctionnement, périmètre, hypothèses, avantages, limites, solutions possibles pour faire face aux limites).

Nous fourniront également quelques modèles de référence sur lesquels CCR pourra s'appuyer pour développer son futur modèle.

#### **a. Modèles économétriques**

**Fonctionnement :**

Les modèles économétriques se construisent sur des séries chronologiques d'événements passés basées sur un indicateur macroéconomique tels que le Produit Intérieur Brut (PIB) ou le Produit Régional Brut (PRB).

Ces données permettent de déduire les principaux facteurs explicatifs pour ensuite produire des estimations de l'indicateur étudié.

Ces différents modèles ont été utilisés pour des analyses ex-ante et ex-post. Les analyses ex-ante de catastrophes peuvent être effectuées avec une série de scénarios hypothétiques et/ou en intégrant une simulation Monte-Carlo ou un processus stochastique avec le modèle pour produire des estimations d'impacts probabilistes.

#### **Périmètre :**

Le périmètre d'un modèle économétrique dépendra donc de l'indicateur de la série chronologique sur lequel se base le modèle.

Au niveau géographique, par exemple, l'étude sera à l'échelle nationale si l'indicateur utilisé est le PIB et régionale avec le PRB. Il en est de même pour la fenêtre temporelle.

Comme évoqué dans la section précédente, le périmètre étudié et donc ici l'indice choisi aura un impact sur ce qui est étudié et le résultat du modèle. Les analyses économétriques à l'échelle nationale ont abouti à différentes conclusions concernant l'impact des catastrophes naturelles sur la croissance. Alabala (1993) et Skidmore (2002) concluent que les catastrophes naturelles ont une influence positive sur la croissance économique à long-terme, probablement grâce à l'effet de stimulus de la reconstruction et de l'effet de productivité (la "destruction créatrice" de Schumpeter"). D'autres, comme Noy (2007), Noy (2009), Hochrainer (2009), Jaramillo (2009) et Raddaz (2009) arrivent à des conclusions totalement opposées.

#### **Avantages :**

Les modèles économétriques présentent l'avantage d'être faciles à mettre en place, ils sont rigoureux statistiquement et peuvent être utilisés dans le cadre d'estimation d'impacts annuels futurs.

En fonction de l'indicateur sur lequel se base le modèle, ils peuvent représenter l'impact à court terme d'une catastrophe, ce qui est souvent utile à la réflexion sur la politique publique la plus adaptée pour faire face à la catastrophe, ou l'impact à long terme pour estimer l'effet de reconstruction et de rebond.

#### **Limites :**

Tout d'abord, ces modèles nécessitent une grande série de données (séries chronologiques et données transversales), élément souvent manquant dans le cadre de la modélisation de catastrophes. En se basant sur des données de séries chronologiques qui n'incluent pas spécialement des catastrophes majeures, il n'apparaissent a priori pas adaptés pour l'analyse des impacts des catastrophes.

De plus, elles n'étudient donc pas un seul événement mais le l'impact "moyen" de ces

événements, comme par exemple l'impact moyen sur la croissance économique à long terme. Or, cette démarche n'entre pas dans le cahier des charges de CCR qui souhaite avoir une bonne représentation des effets dominos et pouvoir étudié chaque événement séparément.

Enfin, Rose met en avant que ces modèles ne permettent pas toujours de faire facilement la distinction entre effets directs et indirects (Rose, 2004). Ils ne permettent pas non plus d'obtenir un détail sectoriel des impacts.

Ainsi, ces modèles semblent adaptés pour des estimations rapides mais manquent de flexibilité pour répondre aux besoins de notre étude.

## **b. Modèles Input-Output**

Ce paragraphe présente la méthode d'estimation des PE provenant des relations inter-industrielles permis par les modèles Input-Output (IO) basiques. Il s'agit du cadre conceptuel qui a été le plus étudié (Wilson, 1982; Boisvert, 1992; Gordon, 1996; Rose, 1997; Rose, 1998; Okuyama, 1999; FEMA, 2011; Hallegatte, 2008; Hallegatte, 2012).

### **Fonctionnement :**

L'analyse IO fut tout d'abord formulée par le lauréat du prix Nobel Wassily Leontief. A la base, c'est un modèle linéaire et statique de tous les achats et les ventes entre les secteurs de l'économie, basé sur les relations technologiques de production.

Cette modélisation se base sur une matrice IO qui résume de façon agrégée les besoins en input inter-industriel d'une région via des coefficients d'input-output fixes qui décrivent les relations entre ces différents secteurs. Ces flux commerciaux indiquent combien des outputs de chaque industrie est constitué de ses fournisseurs de produits régionaux ainsi que des inputs de travailleurs, capitaux et biens importés.

La matrice qui en résulte peut être manipulée de différentes façon pour révéler les interconnexions au sein de l'économie, que ce soit les relations directes entre chaque secteur mais aussi en terme de dépendance à plusieurs maillons d'écart. Ces modèles permettent donc d'estimer les effets dominos induits par un impact sur un ou plusieurs secteurs de l'économie.

Les techniques d'IO sont très largement utilisées pour estimer les gains et les pertes économiques causés par des changements brutaux de la demande des produits de la région étudiées. Une plus forte demande pour la reconstruction et une plus faible pour le tourisme sont des phénomènes assez traditionnellement étudiés par ces modèles en cas de catastrophes naturelles.

### **Périmètre :**

Les modèles IO étudient spécifiquement les PE dues aux relations inter-industriels via une modification de la demande. Plus précisément, ils estiment les pertes aux entreprises consécutives aux impacts sur la chaîne de production induites par les effets systémiques en amont de la chaîne de production, c'est à dire via une modification

de la demande.

L'échelle géographique dépend du niveau de décomposition de l'économie. La matrice peut représenter quelques grands secteurs ou pourrait théoriquement être désagrégée jusqu'au niveau de chaque entreprise.

Le périmètre dépend de la matrice d'IO utilisée dans le modèle. De nouveau, la matrice peut être nationale ou le périmètre peut être réduit à la région, département ou zone économique.

Fenêtre temporelle des modèles IO est généralement annuelle dû à la disponibilité des données et certains modèles réduisent l'étude sur des périodes trimestrielles ou mensuelles.

#### **Avantages :**

La popularité des modèles IO s'explique principalement par leur simplicité et leur capacité à représenter en détail les inter-dépendances au sein d'une économie régionale pour en dériver les impacts économiques.

La simplicité de modèles IO permet des approches intégrées dans lesquelles les modèles IO sont combinés à des modèles et/ou des données d'ingénierie, dans le but d'estimer les impacts qui sont plus sensibles aux changements dans les destructions physiques. Certains exemples de cette approche incluent des liens avec des modèles sur les réseaux de transports (par exemple, Gordon, 1998 et Sohn, 2004) ou les réseaux d'infrastructure (par exemple Rose, 1981 ; Rose, 1997 et Rose, 1998).

#### **Limites :**

Cependant, la modélisation IO présente plusieurs limites du fait de sa structure linéaire et de sa rigidité (les coefficients d'IO étant fixes). On notera :

1. les modèles IO ne sont pas sensibles aux améliorations technologiques,
2. les modèles IO ne permettent pas les substitutions d'inputs et des importations,
3. les modèles IO ne répondent pas aux changements de prix,
4. les modèles IO ne prennent pas en compte les contraintes d'approvisionnement. C'est-à-dire, ils n'estiment pas les pertes aux entreprises consécutives aux impacts sur la chaîne de production induites par les effets systémiques en aval de la chaîne de production, c'est à dire via une modification de l'offre,
5. les modèles IO répondent souvent mal à la problématique temporelle présentée dans la section a :
  - les modèles sont généralement statiques ;
  - l'incrémentation du pas de temps utilisé est généralement constante.
6. Pour l'échelle géographique :
  - les modèles IO utilisent souvent une échelle géographique fixe qui ne s'adapte donc pas aux événements de différentes ampleurs. Les matrices IO utilisées sont généralement nationale et ne s'adaptent donc pas aux événements de faible à moyenne ampleur ;

- cependant l'application d'un modèle IO à une petite région est délicate. En principe, il peut être appliqué à n'importe quel zone géographique. Cependant, la précision du modèle sera meilleure pour des zones d'étude plus grandes ou représentant une région économique cohésive (zone commerciale, par exemple une ville ou une région métropole) que pour des zones plus petites car un modèle IO représente la structure économique d'une région.

La conséquence principale de ces différentes limites est que les modèles IO ont tendance à surestimer les impacts.

### **Solutions :**

Afin de dépasser ces faiblesses dans le contexte des catastrophes, plusieurs tentatives de perfectionnement et d'extension des modèles IO ont été développées.

La pénurie d'intrants produits régionalement (Limite n.4) a été traitée en intégrant une méthodologie de traitement plus flexible des importations (Boisvert, 1992 ; Davis, 1984). Opérationnellement, les coefficients pour modéliser les conséquences du rationnement de l'approvisionnement sont obtenus en divisant chaque élément de chaque ligne de la matrice d'IO par la somme des éléments de la ligne. Si cela est mathématiquement symétrique, les deux versions du modèle ne sont pas interprétées de la même façon. Les coefficients du modèle de la demande sont "bons" car il n'y a pas d'ambiguïté sur le fait qu'il faut nécessairement des intrants supplémentaires pour la production. Cependant, les coefficients de l'approvisionnement ont une connotation différente à savoir que la disponibilité d'intrants stimule leur propre utilisation, c'est-à-dire que l'approvisionnement crée sa propre demande. Des propositions de solutions existent dans la littérature (Oosterhaven, 1988 ; Oosterhaven, 1989 ; Dietzenbacher, 1997 ; Steinback, 2004 ; Hallegatte, 2008 ; puis Hallegatte, 2012).

Des tentatives pour intégrer la nature dynamique des situations de catastrophe ont ainsi été menées (Limite n.5). Cole (1988) et Cole (1989) a proposé un modèle de dépenses retardées (prise en compte le temps nécessaire à la production de biens et le processus d'ajustement du marché du travail) à travers une extension du cadre standard de modélisation IO.

Le Modèle Séquentiel Interindustriel (MSI) poursuit un objectif similaire mais en mettant plus l'accent sur la chronologie de production et les modes de production (Romanoff, 1991 ; Okuyama, 2004). Le cadre du MSI fut introduit pour la première fois par Romanoff (1991) en réponse au besoin d'analyser la production interindustrielle dans un environnement économique dynamique, tel que des larges projets de construction lorsque les effets sur la production et l'emploi sont transitoires. Okuyama, 2006 a ensuite élargi le MSI avec l'inclusion d'une fonction d'inventaire (stock) et en intégrant la distribution temporelle des effets indirects du dysfonctionnement hypothétique des réseaux d'infrastructure. Bien que le cadre MSI permet de mieux gérer les périodes courtes que les modèles économiques conventionnels, il n'est toujours pas suffisamment flexible à cause de sa nature discrète pour fournir une meilleure représentation des relations interindustrielles dans le temps.

Donaghy (2007) propose un schéma de modélisation temporel plus flexible par la formulation en temps continu d'un Modèle Régional Économétrique Input Output (MREIO)

pour représenter les effets indirects d'événements inattendus et extrêmes et de processus de reprise continus et non linéaire. Ce modèle en temps continu démontre la capacité d'accommoder une gamme de phénomènes de court et de long terme dans des situations de catastrophe.

Une façon de le prendre en considération est le développement d'une analyse d'impact interrégional d'une catastrophe. Par exemple, Okuyama (1999) utilisent une table IO interrégionale à 2 régions pour estimer les effets indirects du tremblement de terre de Kobé en 1995 : la région dans laquelle le tremblement de terre est survenu et le reste du Japon. Comme on l'a également déjà abordé, plusieurs approches intégrées avec des modèles de transport ont été essayées pour analyser la distribution spatiale des effets indirects. Par exemple, Sohn (2004) a calculé l'impact multi-régional d'un hypothétique tremblement de terre New Madrid aux États-Unis, en utilisant un modèle des flux de produits interrégionaux basé sur le cadre de modélisation de type Leontief-Strout-Wilson. Cependant ces études sont basées sur le cadre des modèles IO et les changements de la structure des échanges commerciaux sont gérés soit d'une façon ad hoc soit selon une ingénierie des transports (en minimisant le temps total de transport).

Pour apporter une solution à l'aspect géographique (Limite n.6), l'objectif serait de pouvoir l'information économique à des aires géographiques plus petites. Van Der Veen (2003) a utilisé le concept de points économiques chauds (*economic hot spot*), à travers lesquels les multiplicateurs de la matrice IO sont visualisés comme une carte d'isolignes en utilisant SIG. Cette visualisation ne fournit pas directement l'information détaillée sur les effets indirects des catastrophes, mais elle permet de visualiser quels endroits sont plus vulnérables (ou importants) en terme d'interdépendance économique. En étendant le concept d'*economic hot spot*, Yamano (2007) a proposé une désagrégation d'un modèle IO multirégional au niveau du quartier (grille de 500 mètres) afin de montrer la distribution spatiale des activités économiques et des effets indirects potentiels. La force de leur modèle d'échelle géographique affinée est d'identifier clairement quel quartier est crucial en terme de pertes économiques. Il reste cependant à garder à l'esprit que réduire l'échelle géographique implique de perdre l'unité économique de la zone étudiée.

### **Modèles de référence :**

#### Le modèle Hazus

Hazus est un modèle développé par la Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2011). Il propose un modèle standardisé applicable à chaque État des États-Unis pour estimer les pertes potentielles des tremblements de terre, des ouragans et des inondations.

Le périmètre du modèle englobe les dommages directs, PEc et PE consécutives aux impacts sur la chaîne de production, en faisant la distinction entre ces deux types de PE. Nous nous intéressons donc ici au modèle PE consécutives aux impacts sur la chaîne de production.

Le périmètre géographique du modèle n'est pas a priori défini, celui-ci étant alimenté par une table IO pouvant être adaptée à des périmètres géographiques différents. Cependant, il a été développé pour s'appliquer aux tables IO étatiques.

Le modèle ayant été développé pour de très gros événements, la fenêtre temporelle choisie a été de 15 ans avec un pas de temps annuel (les tables IO étatiques utilisées généralement dans le modèle sont annuelles).

En plus du tableau IO, le modèle prend en entrée :

- les dommages directs estimés précédemment ;
- des caractéristiques de l'économie (taux de chômage, niveau de salaires, capacités de gestion des surplus d'approvisionnement et de demande) ;
- les gains économiques directs liés à la reconstruction via l'estimation d'un effet de stimulus.

A partir de ces informations, à chaque pas de temps, le modèle recalcule la matrice d'IO permettant le rééquilibrage de l'économie, en fonction :

- des contraintes d'approvisionnement : possibilités d'importation, capacité de surproduction des entreprises locales, stocks ;
- des contraintes de la demande : possibilités d'exportation, besoins accrus des entreprises locales et des foyers, création de stocks.

Enfin, le modèle intègre deux estimations :

- une estimation des effets distributifs des impacts à partir d'une matrice de répartition des revenus multi-secteurs et des données de revenus et de consommation des foyers pour 9 classes de revenus ;
- l'impact de l'emprunt sur l'économie. Pour ce faire, la demande future est réduite par la montant annuel de remboursement de l'emprunt fois le pourcentage que les foyers dépensent dans les outputs de chaque secteur. L'importance de l'origine du financement de la reconstruction et du remboursement se situe dans les effets à long-terme du remboursement. Si la région touchée ne reçoit pas d'aides, alors l'effet stimulant de la reconstruction est uniquement temporaire. La région va avoir à rembourser ses emprunts et les dépenses futures vont en souffrir. Ainsi, les résultats du modèle sont donnés selon 2 scénarios : avec ou sans des aides de reconstruction extérieures à la région.

#### Le modèle Adaptative Regional Input-Output model (ARIO)

Ce modèle est développé par Hallegatte depuis 2008 (Hallegatte, 2008 et Hallegatte, 2012). Ce modèle a été mis en application pour estimer le coût de l'ouragan Katrina en 2005 (Hallegatte, 2008), pour étudier le risque d'inondation côtières dans un contexte de changement climatique à Copenhague (Hallegatte, 2010) ainsi que, dans une version modifiée, pour étudier les risques d'inondation et les impacts du changement climatique à Bombay (Ranger 2011) et le coût du tremblement de terre au Wenchuan (Wu, 2011).

Ce modèle a pour périmètre les effets dominos en amont et en aval de la chaîne de production. Le modèle sur repose sur le cadre du modèle séquentiel inter-industriel afin de rendre dynamiques les modèles IO statiques classiques. Il offre un cadre de modélisation sur 10 ans avec un pas de temps d'un mois.

Ce modèle ARIO est basé sur une méthodologie de modélisation inspirée de Brookshire et al. (1997). Cette modélisation apporte des solutions à certaines limites des modèles IO classiques. Ces améliorations permettent de prendre en compte :

- les capacités de production de chaque secteur : sa capacité de production est réduite au même niveau que la destruction de son capital mais les entreprises ont également une capacité de surproduction ;

- les contraintes d'approvisionnement via la mise en place d'un système de rationnement ;
- les comportements d'adaptation via une plus grande flexibilité du modèle ce qui permet de simuler les améliorations technologiques et de substitutions d'inputs ;
- le temps et le coût de reconstruction pour rendre le modèle plus dynamique ;
- l'hétérogénéité des productions au sein de chaque secteur ;
- les substitutions d'inputs ;
- les dynamiques des prix ;
- les stocks.

Les données nécessaires au modèle sont :

- une table IO régionale modifiée : les importations sont retirées de la table afin de distinguer les inputs produits localement et donc potentiellement impactés par le choc et ceux importés ;
- Paramètres d'adaptation :
  - de la demande finale : pour chaque secteur, la vitesse d'adaptation de la demande locale finale et de la demande d'exportation ;
  - de la consommation intermédiaire : la vitesse à laquelle les industries se tournent vers d'autres producteurs quand leur approvisionnement ne peut pas satisfaire leur demande et inversement la vitesse à laquelle ces industries reviennent à leurs fournisseurs initiaux lorsque leur capacité de production est revenu à des niveaux acceptables ;
  - de la production : la capacité de production avant la catastrophe, la capacité de surproduction et le délai pour atteindre ce niveau de surproduction.
- paramètres comportementaux ;
- réponse du prix et de la demande ;
- données sur les catastrophes.

### c. Modèle d'Equilibre Général Calculable

#### Fonctionnement :

Les modèles d'Equilibre Général Calculable (EGC) représentent des cas particuliers du cadre théorique général, permettant une résolution numérique. Leur caractère calculable provient non seulement du fait que ce sont des modèles chiffrés, s'appuyant sur des données réelles des économies qu'ils modélisent, mais également de leur utilisation de fonctions ayant les "bonnes" propriétés mathématiques (continuité et dérivabilité) et suffisamment simples pour faciliter le calcul. Les modèles EGC constituent un cadre cohérent et complètement bouclé où prix et quantités sont déterminés de façon endogène. L'enjeu consiste donc à trouver les conditions de l'établissement d'un équilibre en fonction de la modification d'une variable particulière.

Concrètement, un modèle EGC est un système d'équation qui décrivent le comportement des agents économiques et les liens entre eux. Ces informations sont résumées par une matrice de comptabilité sociale (MCS). Une MCS est une description détaillée et compréhensible du système socio-économique, une photographie de l'ensemble des transactions ayant eu lieu entre les différents acteurs du système économique, durant une période de référence (généralement une année). Techniquement, il s'agit d'une matrice carrée répertoriant un ensemble de comptes relatifs aux secteurs d'activités, aux facteurs

de production qui sont échangeables dans l'économie, aux institutions domestiques (ménages, entreprises, Etat) et non domestiques (reste du monde).

La résolution des modèles EGC se fait par ajustement des prix sous contrainte d'approvisionnement (les inputs disponibles dans le marché sont fixés). Pour ce faire, le cadre de modélisation EGC suppose que nous nous trouvons dans un marché concurrentiel (pas d'influence d'un monopole sur les prix) et que la structure des échanges ont une structure walrassienne, c'est-à-dire :

- loi de Walras : sur l'ensemble des marchés, la somme des demandes nettes pondérées par les prix est égale à zéros ;
- conséquence : Dans une économie à N marchés, si N-1 marchés sont en équilibre, alors le N-ième marché est également en équilibre.

La paramétrisation du modèle s'effectue par une procédure de calibrage des fonctions CES (Constant Elasticity of Substitution ou Cobb-Douglas) et CET (constant Elasticity of Production). L'équilibre de l'offre et de la demande étant trouvé en ajustant les prix, cela implique qu'il n'y a pas de rationnement dans le système économique. Lors d'une catastrophe, la destruction d'une partie du capital de production d'un secteur se traduit par une diminution de la production et donc en une augmentation de son prix. Cette augmentation de son prix va ensuite se traduire en une diminution de sa consommation.

#### **Périmètre :**

D'un point de vue opérationnelle, les modèles EGC peut être interprété comme une généralisation des modèles IO. En effet, d'une part ils modélisent plus complètement l'économie en ne se limitant pas aux échanges interindustriels mais en intégrant explicitement les marchés des facteurs de production et la demande finale. Ils étudient donc les conséquences sur les différentes institutions impliquées (Etats, gouvernements régionaux, foyers...) et certaines variables macro-économiques (balance commerciale).

L'échelle géographique dépend du niveau de décomposition de l'économie. La matrice peut représenter quelques grands secteurs ou pourrait théoriquement être désagrégée jusqu'au niveau de chaque acteur.

Le périmètre dépend de la MCS utilisée dans le modèle. De nouveau, la matrice peut être nationale ou le périmètre peut être réduit à la région, département ou zone économique.

Fenêtre temporelle des modèles EGC est généralement annuelle dû a la disponibilité des données de construction des MCS et certains modèles réduisent l'étude sur des périodes trimestrielles ou mensuelles.

#### **Avantages :**

Les CES et CET n'étant pas linéaires, les modèles EGC peuvent répondre

- aux améliorations technologiques ;
- aux variations de prix ;
- aux substitutions d'inputs et d'importations ;
- aux contraintes d'approvisionnement.

**Inconvénients :**

Les modèles EGC présentent certaines limites communes avec les modèles IO à savoir les limites 5 et 6 relatives aux périmètres temporels et géographique.

Les flexibilités des modèles EGC peuvent en outre avoir comme effet de lisser tout choc exogène et donc de sous-estimer des impacts des catastrophes (Rose, 2004).

Une autre faiblesse des modèles EGC est sont les hypothèses de comportement d'optimisation des acteurs et l'équilibre du marché qui peuvent être remises en question en situation de catastrophe.

En pratique, l'ajustement par les prix apparaît peu probable à la suite d'une catastrophe car cela impliquerait de très fortes variations des prix que l'on observe pas en réalité, à cause de l'inertie socio-économique, des coûts de transaction, de la législation et les normes sociales. A l'exception notable cependant du secteur de la construction. En cas de gros événement, les réallocations de ressources peuvent être gérées par une administration centralisée et non à travers les signaux du marché. Cependant, les prix doivent être vus plus comme des représentations de la pénurie que comme les prix véritablement observables.

Enfin, le processus d'ajustement d'un modèle EGC est plus complexe à réalisé que celui d'un modèle IO.

**Solutions :**

Une direction possible pour faire face à la limite temporelle des modèles EGC peut être l'application de modèles EGC dynamiques.

Afin d'étudier la sensibilité de la distribution spatiale des dommages et des effets indirects, plusieurs extensions ont été faites en utilisant des modèles économiques désagrégés géographiquement. (Carrera et al 2014)

**Modèles de référence :**

Jusqu'à récemment, toutes les applications de modèles EGC aux catastrophes naturelles ont été des expériences et des modèles synthétiques (Boisvert, 1992; Brookshire, 1992). Des applications plus réalistes ont été entreprises par Rose (1999) et Rose (2002) sur les impacts des dysfonctionnements des réseaux à la suite de tremblements de terre. Les applications potentielles à d'autres aspects de l'estimation des pertes dues aux catastrophes sont illimitées étant donnée les capacités de cette approche. Actuellement, plusieurs améliorations doivent être apportées au modèles EGC standards pour estimer les pertes économiques des catastrophes naturelles, notamment incorporer des élasticités avec des valeurs numériques faibles reflétant le court voire le très court terme de la reprise économique suite à une catastrophe naturelle.

Carrera et al 2014 :

Ce modèle se veut un modèle global d'estimation des impacts. Il nous paraît intéressant de le mentionner car il suit la logique voulue dans notre étude : différencier les

différents types de pertes et maintenir une étude spatiale.

Dans une première étape, il estime les dommages physiques aux stocks via un modèle d'exposition basé sur les données CORINE land cover et un modèle de dommages basé sur des courbes d'endommagement à un paramètre, la hauteur d'eau, pour chaque classe d'occupation de sol (Huizinga, 2007). La main d'œuvre impactée est estimée à partir de données au niveau de la municipalité. Il est alors supposé que tous les travailleurs qui vivent dans une municipalité qui croise (même partiellement) la zone inondée, sont impactés.

Ces deux informations servent ensuite d'input à un modèle EGC national calibré régionalement à des macro-régions italiennes : Nord, Centre et Sud. Les changements des facteurs primaires de productivité (capital, surface géographique et force de travail) sont obtenus à partir de la relation entre l'occupation des sols et les activités économiques. Ainsi, le pourcentage de surface inondée par type d'occupation des sols est traduit en une diminution du capital et une réduction de la productivité de la zone inondée. Le pourcentage de salarié impactés par l'inondation est traduit en une réduction de la productivité de la force de travail. Ces données sont ensuite pondérées par la durée de l'impact. D'un point de vue temporel, il s'agit d'une analyse statique de comparaison des exercices sur 1 an, l'ajustement entre l'avant et l'après catastrophe est instantané. Le modèle fournit alors une estimation des impacts indirects (changements de la production et du PIB, pertes monétaires).

Cette démarche, certes simpliste nous permet de visualiser comment nous pouvons procéder pour l'implémentation de notre propre modèle.

#### 4.3.2.3 Modélisation envisagée pour CCR

Les analyses IO et EGC fournissent un cadre organisationnel de collecte et d'affichage des données et une vue transparente de la structure de l'économie. Ces modèles sont adaptés pour effectuer des analyses distributionnelles et fournissent un aperçu de la distributions des impacts entre les différents acteurs considérés.

Cependant, ils doivent être exercés en appliquant ces modèles à un contexte donné, en fonction des ressources disponibles, du temps de reprise, etc. Difficulté de calibrage

Green (2011) et Pfurtscheller (2011) concluent que l'utilité des modèle CGE et IO comme outil d'aide à la décision - et en particulier au niveau micro - n'est pas vraiment vérifiée puisqu'ils échouent à répondre aux besoins des parties prenantes car la plupart d'entre elles sont intéressées par estimer les impacts indirects pour plusieurs types d'événements, gros ou petits, à des échelles micro (villes) ou méso (bassin), avec ou sans mesures de réduction des risques alors que la plupart des méthodes IO et EGC ne peuvent qu'estimer les impacts d'un événement extrême au niveau national et seulement parfois régional.

De plus, Green (2011) sont sceptiques sur la possibilité de transférer ces méthodes aux parties prenantes car elles demandent un haut niveau de compétences techniques pour les faire fonctionner. De plus, elles utilisent des mécanismes complexes et leurs résultats présentent de fortes incertitudes, ce qui nécessite de pouvoir analyser les résultats et de pouvoir prendre du recul pour les prendre en compte dans le processus de management du risque d'inondation. Des approches alternatives pour estimer le coût indirect au ni-

veau local manquent (Green, 2011 et Pfurtscheller, 2011).

Malgré les faiblesses de ces différents modèles, ils permettent néanmoins d'évaluer la répartition des impacts parmi les différents secteurs et protagonistes et ainsi de répartir équitablement les aides publiques.

#### 4.4 CONCLUSION

Ce dernier chapitre avait pour but de rappeler les objectifs de CCR quant à la modélisation des impacts des inondations et l'architecture du modèle proposée pour y répondre.

Cette démarche consiste à décomposer les impacts et à créer des blocs de modélisation dédiés et liés les uns aux autres en fonction de leurs interdépendances. Cette méthodologie nous a permis de lier au maximum l'estimation des impacts à des études spatiales des impacts et de représenter les mécanismes à l'œuvre.

Nous avons fait un état des lieux des travaux réalisés (risques automobile et agricole) et en cours (pertes d'exploitations consécutives à un dommage direct), de leurs limites et des perspectives et moyens d'amélioration. Pour les impacts non modélisés aujourd'hui, un état de l'art succinct est présenté et les conclusions tirées pour leur modélisation présentés.

Ce chapitre est donc pensé comme une base technique pour CCR afin de pouvoir continuer les travaux d'élargissement du périmètre des impacts modélisés.

# CONCLUSION

DANS le cadre du régime français d'indemnisation des Catastrophes Naturelles (Cat Nat), la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) est un réassureur public qui propose aux cédantes opérant en France, des couvertures contre les catastrophes naturelles. CCR a également pour rôle d'étudier les risques de catastrophes et de conseiller l'État dans ses politiques de gestion du risque. Pour cela, il est important de pouvoir s'appuyer sur des modèles aussi pertinents et complets que possible de la sinistralité des différents périls Cat Nat. CCR développe donc depuis 2003 un modèle permettant d'estimer le coût assurantiel des inondations. L'objectif de ce travail de thèse a donc été de mener un état des lieux du modèle CCR actuel, de proposer, à partir d'un état de l'art de la modélisation des différents risques, une architecture de modèle permettant une estimation globale des conséquences des inondations et d'entamer le travail de modélisation.

Beaucoup de modèles se concentrent aujourd'hui sur les dommages directs, à savoir la valeur de ce qui a été endommagé ou détruit par la catastrophe. S'il s'agit d'une première étape dans l'estimation des conséquences de la catastrophe, le montant des dommages directs est un indicateur insuffisant de la gravité d'une catastrophe. Également, beaucoup de modèles développés jusqu'à présent se concentrent sur un périmètre d'impact spécifique. Si ces travaux sont nécessaires pour faire avancer la recherche dans chacun de ces domaines, il existe aujourd'hui le besoin de développer des modèles plus globaux (Tortorot J.P., 1993 ; Meyer et al., 2013 ; FEMA, 2011 ; Penning-Rowsell et al., 2013 ; Thielen et al., 2016) afin de disposer d'une image complète des impacts et d'effectuer un arbitrage entre les différentes politiques de gestion du risque basées sur des études quantitatives de type Analyse Coûts-Bénéfices ou Multi-Critères.

Le premier chapitre de cette thèse nous a permis de comprendre les impacts et les mécanismes à l'œuvre lors de la survenance d'une inondation. De là, nous avons pu en déduire une classification fine et claire des impacts. Cette étape a été particulièrement importante pour la suite des travaux. En effet, une classification détaillée nous a permis de bien définir les périmètres des modèles développés par la suite et une compréhension des phénomènes nous a permis de construire une architecture adaptée pour un modèle France entière le plus exhaustif possible quant aux conséquences économiques étudiées.

Nous nous sommes également intéressés aux Retours d'Expérience (RETEX). Ceux-ci représentent une source d'information importante sur les impacts d'une inondation. Ils permettent notamment d'obtenir des informations quantitatives sur le montant des pertes, informations nécessaires au calibrage des modèles. La comparaison de RETEX peut s'avérer très intéressante et nous avons donné deux exemples d'analyses pouvant être menées dans ce cadre. Premièrement, à partir des RETEX de plusieurs événements, nous nous sommes intéressés à la répartition des dommages par poste. Cette étude a permis de mettre en avant l'impact de l'occupation du sol et du type de crue sur la répartition des pertes. Deuxièmement, à partir de la comparaison dans le temps d'événements

touchant une même zone géographique? dans notre étude, l'Ile-de-France -, nous nous sommes intéressés à l'évolution dans le temps de l'impact des inondations. Cette étude a permis de mettre en avant que les vulnérabilités des sociétés évoluent, notamment vis-à-vis des réseaux d'énergie et de communication. Cependant, la France ne disposant aujourd'hui pas de méthodologie uniformisée et systématique d'élaboration des RETEX, leur utilisation est limitée (Bourguignon D., 2014). Face à ce constat, le Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable travaille aujourd'hui sur la mise en place d'un dispositif formalisée de recueil des informations post-événement (Dantec et al., 2018).

Ces RETEX ouvrent à un questionnement sur les politiques de management du risque de catastrophe. Les politiques menées aujourd'hui tendent vers une gestion du risque via une réduction de la vulnérabilité, contrairement aux politiques traditionnelles de contrôle de gestion via une réduction de l'aléa par la construction d'édifices de protection. Cette évolution a été illustrée par l'évolution de la politique de prévention et de gestion du bassin de la Seine de 1910 à aujourd'hui. La mise en place de politiques de management du risque nécessite de pouvoir se baser sur des études quantitatives afin de mener un arbitrage entre les différentes mesures considérées. Ces analyses prennent la forme d'Analyses Coûts-Bénéfices et peuvent être élargies en une Analyse Multi-Critères afin d'intégrer les impacts intangibles à l'étude. La mise en place de telles analyses nécessite le développement de modèles d'estimation des impacts fiables et couvrant un large périmètre d'impacts.

Une des politiques de gestion du risque de catastrophes consiste à améliorer la résilience de la société via la mise en place de mécanismes de transfert de risque. Ces mécanismes permettent de verser une compensation pour les pertes subies et de permettre un rétablissement plus rapide à la suite de l'événement. Nous avons fait le point sur les différents mécanismes existants en France.

Enfin, dans ce chapitre, nous avons présenté l'outil de modélisation des inondations développé à CCR afin de mettre ces travaux dans leur contexte opérationnel. CCR travaille sur la modélisation des dommages des inondations depuis 2003. Le modèle se base sur une approche physique sur exposition croisant l'aléa et l'exposition grâce à des courbes d'endommagement. Le périmètre des dommages modélisés comprend les dommages aux bâtiments particuliers et professionnels ainsi que leurs contenus. L'objectif de ces travaux de thèse a été d'élargir le périmètre des impacts estimés par le modèle CCR. Nous avons présenté ici l'architecture globale du macro-modèle d'estimation des impacts et les objectifs de développement de CCR.

Le premier risque étudié, dans le second chapitre, a été le risque automobile. En effet, s'il est couvert dans le cadre du régime Cat Nat et donc, a fortiori, par CCR, il n'était cependant pas intégré aux estimations du modèle de CCR.

À travers ce risque, nous avons mené une exploration des différentes approches de modélisation des dommages directs afin d'en comprendre les avantages et les inconvénients, les limites et les potentielles améliorations. Cette étude nous a permis de faire le choix de modélisation correspondant au mieux au cahier des charges de CCR, à savoir :

- une modélisation pour chaque péril et chaque événement;
- un modèle pouvant estimer les impacts d'un événement particulier;

— une estimation probabiliste de la charge « sinistres » annuelle.

La modélisation d'alors estimait le ratio sinistre sur prime du parc automobile français réassuré auprès de CCR, tous périls confondus (hors sécheresse) et pour un exercice donné via une régression linéaire sur la sinistralité Non-Auto.

Nous nous sommes ensuite intéressés à un second modèle statistique, la modélisation de type Fréquence x Sévérité. Cette démarche estime la sinistralité relative à un portefeuille assuré via l'analyse du comportement probabiliste des deux variables constitutives du risque, la fréquence, le nombre d'événements inondation annuel, et la sévérité, coût de chaque événement inondation pour les particuliers. Afin d'adapter cette méthodologie à la modélisation de la sévérité des événements catastrophiques, nous nous sommes intéressés à la théorie des valeurs extrêmes, et plus précisément, la méthode de dépassement de seuil. Cette méthodologie permet une bonne analyse de la sévérité via la distinction entre événements attritionnels et extrêmes.

Cependant, ces deux modélisations statistiques ne répondent pas entièrement au cahier des charges de CCR. Elles présentent toutes deux des limites notamment, le manque de masse statistique les empêche de produire des estimations fiables des dommages.

Ces observations nous ont amenés à conclure que la science actuarielle peut bénéficier de nouvelles approches pour les risques atypiques, les catastrophes naturelles notamment. Les méthodes purement statistiques peuvent avoir leurs limites et ne permettent pas toujours de comprendre les mécanismes concrets du risque. Il est alors intéressant d'ouvrir les perspectives de l'étude de certains risques à d'autres sciences et d'adopter une démarche multidisciplinaire. C'est ce que ce travail a tenté d'explorer par le développement d'un modèle physique sur exposition pour la modélisation du risque Auto, modélisation qui permet de répondre au cahier des charges de CCR.

Cette démarche s'inscrit dans la logique de modélisation actuelle de CCR. Ce modèle, qui s'est imbriqué dans le modèle inondation développé par CCR, se décompose en plusieurs modules : le module d'aléa, le module de vulnérabilité et le module de dommages. Le module d'aléa, qui simule les caractéristiques physiques de l'inondation, se base sur le module d'aléa inondation déjà développé en interne. Le module de vulnérabilité fait l'inventaire des éléments exposés à l'inondation et leurs caractéristiques. Enfin, le module de dommages croise les deux premiers modules et applique des taux de destruction pour obtenir la sinistralité.

Aujourd'hui, ce modèle ne présente pas de bons résultats. Tout d'abord, il ne s'appuie pas sur un portefeuille Auto mais sur une estimation de celui-ci, induisant une grande incertitude dans le modèle de vulnérabilité. De plus, nous n'avons disposé que de l'événement de 2010 dans le Var pour calibrer le modèle, ce qui est insuffisant. Enfin, il est à noter qu'en plus de la localisation et du type de crue, l'heure de survenance de la crue a également un impact important sur le montant des dommages. La prise en compte de ce paramètre constitue une des améliorations futures de ce modèle.

Dans le cadre du développement du macro-modèle CCR, le choix a été fait d'implémenter une modélisation physique sur exposition pour les impacts directs, celle-ci répondant aux attentes de CCR. Cela consiste à développer une « brique » supplémentaire aux modules de vulnérabilité et de dommages pour chaque risque. C'est donc la

démarche qui a été adoptée pour le développement du modèle d'estimation des risques agricoles lors d'inondations et présentée dans le Chapitre 3.

Le modèle de vulnérabilité a été développé à partir du Registre Parcellaire Graphique. Cette base de données offre une description à grande échelle et mise à jour annuellement de la majorité des terres agricoles. Il s'agit de la représentation géolocalisée disponible de l'espace agricole français la plus adaptée à nos besoins. Afin de pouvoir traiter tout le territoire métropolitain et d'optimiser le temps de calcul du modèle, la donnée vectorisée du RPG a été transformée en une grille de mailles 500m\*500m. Chaque maille conserve l'information du pourcentage de la surface occupée par chacune des 26 catégories de cultures du RPG.

L'objectif du modèle de dommages est d'associer un niveau de dommages aux caractéristiques d'aléa des parcelles agricoles affectées via l'utilisation de courbes d'endommagement. Ce modèle a été construit à partir des courbes d'endommagement à l'agriculture développées par le groupe de travail national Analyse Coûts-Bénéfices inondations à travers les travaux de l'IRSTEA (Agenais et al., 2013). Ces courbes estiment la perte de valeur ajoutée pour le secteur agricole lors de la survenance d'un événement inondation pour les cinq postes suivants : les dommages au sol, les pertes de fonds en matériel végétal, les frais de replantation du matériel végétal, les pertes de récoltes et les baisses de rendement sur l'année de l'événement, et enfin, les pertes de rendement différé.

Nous avons ensuite collaboré avec l'IRSTEA afin de les adapter aux besoins propres du modèle développé pour CCR. Tout d'abord nous avons procédé à un travail de collecte de données afin de construire des courbes régionalisées et annualisées sur la période 2005-2016 afin de mieux gérer la variabilité des caractéristiques agroéconomiques dans l'espace et le temps. Dans la première version du modèle, la date de survenance était associée à une saison. Cette échelle ne paraissait pas assez fine et adaptée à la variabilité des climats métropolitains et générerait des effets de seuils trop importants aux dates de changement de saison. Nous avons donc utilisé des sorties intermédiaires et hebdomadaires du modèle FLOODAM puis appliqué une moyenne glissante sur cinq semaines afin de lisser l'incertitude et l'effet de seuils. Également, ces sorties intermédiaires ont été utilisées pour pouvoir exprimer les pertes par poste.

L'objectif de cette dernière évolution était de pouvoir mieux estimer, sur chaque maille, les montants indemnisés par les différents systèmes de transfert de risques : FNGRA et assurances récoltes? et donc le reste à charge des exploitants agricoles. Les pertes prises en charge par les assurances récoltes ont été estimées à partir du taux de pénétration de l'assurance agricole en France et des caractéristiques simplifiées et estimées du contrat socle. Pour les indemnisations au titre du FNGRA, les grilles d'indemnisation ont été appliquées.

Le modèle a été appliqué à des événements pour lesquels il existe des RETEX disposant d'éléments relatifs aux pertes au secteur agricole, à savoir, Aude 1999, Bretagne 2000 et 2001, Gard 2002, Arles 2003 et Seine 2016. Les résultats ont été présentés et les sources d'incertitude du modèle ont été détaillées. Afin de fiabiliser le modèle, une mise en place d'une collecte de données suite à chaque événement sera nécessaire pour disposer de données suffisantes pour calibrer le modèle.

Enfin, le dernier chapitre a été pensé comme un document fournissant un bilan des travaux accomplis en terme de développement dans le cadre de la modélisation France entière et globale des impacts. Ce chapitre propose donc un rappel des objectifs de CCR et un état des lieux des travaux de développement accomplis pour l'estimation des pertes automobiles et agricoles. Nous avons ensuite développé les perspectives de développement du modèle pour les pertes d'exploitation (PE) et les impacts macroéconomiques.

Comme décrit dans le chapitre introductif, les PE sont considérées comme une catégorie de pertes distincte des dommages directs et des pertes indirectes. Les pertes d'exploitation sont un phénomène plus difficile à modéliser étant données les multiples causes potentielles de PE et la complexification des composantes géographiques et temporelles. Pour cela, nous avons fait la distinction entre plusieurs types de PE, en fonction du fait générateur de l'arrêt ou du ralentissement de l'activité : PE consécutives à un dommage direct, PE consécutives aux défaillances des réseaux et PE consécutives aux impacts sur la chaîne de production.

Cela nous a permis de disséquer les PE au maximum pour pouvoir en modéliser chaque aspect. Chaque type de PE sera donc modélisé séparément puis ces modèles seront liés, les PE consécutives à un dommage direct ou aux défaillances des réseaux pouvant entraîner des PE dans la chaîne de production. Il sera important de construire ce modèle en prenant en compte le risque de double-comptage.

Le modèle de dommages actuel de CCR fournissant une estimation des PE consécutives à un dommage direct, nous avons procédé à un état des lieux de ce modèle. Nous en avons proposé une amélioration et proposé une nouvelle méthodologie. Pour les autres catégories de PE, nous proposons un état de l'art de la recherche quant à leur modélisation afin de proposer une méthodologie de modélisation à CCR.

Les travaux réalisés dans cette thèse ont permis d'initier un gros travail de développement afin d'obtenir, à terme, un modèle d'estimation des impacts France entière qui respecte le cahier des charges de CCR. Grâce à son architecture par chaînage de sous-modèles, il permet d'obtenir le résultat des estimations par risque, ce qui sera intéressant lors de la divulgation des résultats et pour la mise en place de politiques de gestion du risque inondation. De plus, cette architecture est flexible et permet ainsi de mener des travaux indépendamment sur chaque sous-modèle d'impact.



# BIBLIOGRAPHIE

# 5

Actualités AFP. (2017). Assurance agricole : La nouvelle donne de notre métier, c'est l'imprévisibilité. *News assurances pro*. Extrait de : <https://www.newsassurancespro.com/assurance-agricole-nouvelle-donne-de-metier-cest-limprevisibilite/0169320637>

AFPCN-IMdR (Association Française de Prévention des Catastrophes Naturelles, Institut pour la Maîtrise des Risques). (2014). Vulnérabilité des réseaux et catastrophes naturelles. *Rapport de synthèse des travaux et réunions du groupe de travail AFPCN-IMDR 2008-2012*.

Agenais A.-L. (2010). Évaluation économique des dommages liés à la submersion marine sur l'agriculture. Construction d'un modèle et application au Languedoc-Roussillon, *Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome, Spécialisation Territoires et Ressources : Politiques publiques et Acteurs, Montpellier Sup'Agro, Montpellier, France*.

Agenais A.-L., Grelot F., Brémond P. et Erdlenbruch K. (2013). Dommages des inondations au secteur agricole, Guide méthodologique et fonctions nationales, *Groupe de travail national ACB Inondation*. Extrait de : <https://irsteadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00041499>

Agreste. (2009). Recensement agricole 2010. Extrait de : <http://agreste.agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2010/>

Agricultures et territoires Chambres d'agriculture. (2015). Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt, Guide Pratique : La gestion des crises en Chambre d'agriculture. Extrait de : [https://chambres-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/National/FAL\\_commun/publications/National/Casdar/GuidePratique\\_gestion\\_crises\\_agriculture.pdf](https://chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/National/Casdar/GuidePratique_gestion_crises_agriculture.pdf)

AIR Worldwide. (2017). AIR Multiple Peril Crop Insurance (MPCI) Model for China. Extrait de : <https://www.air-worldwide.com/Publications/Brochures/documents/The-AIR-Multiple-Peril-Crop-Insurance-Model-for-China/>

Albala-Bertrand, J.M. (1993). The Political Economy of Large Natural Disasters With Special Reference to Developing Countries (Oxford : Clarendon Press, 1993). *Journal of Latin American Studies*, 26(1), 272-273. doi : [10.1017/S0022216X00019180](https://doi.org/10.1017/S0022216X00019180)

Albala-Bertrand, J.M. (1993). Natural disaster situations and growth : a macroeconomic model for sudden disaster impacts. *World Development*, 21(9), 1417-1434. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(93\)90122-P](https://doi.org/10.1016/0305-750X(93)90122-P)

Algu P.R. (2015). A Study of Resiliency in New Orleans Neighborhoods Ten Years After Hurricane Katrina. *Thèse de Master de Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College*. [https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool\\_theses/3069](https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_theses/3069)

Apel H., Aronica G. T., Kreibich H., and Thielen A. H. (2009). Flood risk analyses - how detailed do we need to be? *Natural Hazards*, 49, 79-98. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9277-8>

APREF (Association des Professionnels de la Réassurance en France). (2014). Développement du Marché : Assurance et Réassurance Récoltes en France. Extrait de : [www.apref.org](http://www.apref.org)

Aries R., Un système assurantiel, ça s'impose?, *La France Agricole*, 08/06/2017. Extrait de : <http://www.lafranceagricole.fr/actualites/gestion-et-droit/aleas-un-systeme-assurantiel-ca-simpose-1,1,3158911921.html>

Ariyabandu, M.M.. (2001). *Bringing together disaster and development - concepts and practice, some experience from South Asia*. Paper presented at the 5th European Sociological Association Conference in Helsinki.

Association Française de l'Assurance. (2011). Inondations du Var des 15 et 16 juin 2010 - Bilan chiffré au 31 mai. *Assurances de biens et de responsabilité*, 1-12.

Barbut L., Bauduceau N., Devaux Ros C. (2010). Vers une évaluation de la vulnérabilité des activités agricoles aux inondations. *Ingénieries - EAT, IRSTEA édition 2004*, 29-41. Extrait de : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00474031/document>

Bauduceau, N. (2001). Éléments d'analyse des répercussions des inondations de novembre 1999 sur les activités agricoles des départements de l'Aude, des Pyrénées Orientales et du Tarn. *Document de travail. Equipe pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, AELB, Agence de l'eau Loire Bretagne*, 1-111.

Bauduceau, N. (2004a). Rapport de synthèse sur les mesures de réduction de la vulnérabilité des exploitations agricoles face au risque d'inondation. *Document de travail. Equipe pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, AELB, Agence de l'eau Loire Bretagne*.

Bauduceau, N. (2004b). De la caractérisation de la vulnérabilité de l'exploitation agricole face au risque d'inondation à la production d'un outil opérationnel de réduction de la vulnérabilité. *Document de travail. Equipe pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, AELB, Agence de l'eau Loire Bretagne*, 1-52.

Beedell, J., Morris, J., and Hess, T.M. (2012). Land owner compensation and approaches for flood protection work - Mobilising the contribution of Rural Land Management to Flood Risk Management in Scotland, *Main Report to the Scottish Government*. Extrait de : <https://www2.gov.scot/resource/0039/00393714.pdf>

Benlagha N., Grun-Rehomme M., Vasechko O. (2009). Les sinistres graves en assurance automobile : Une nouvelle approche par la théorie des valeurs extrêmes, *Revue MODULAD*, 39. Extrait de : <http://www.modulad.fr>

Blanc C., Brémond P., Erdlenbruch K., Grelot F., Mériaux P. et Tourment R. (2008). Étude préalable à l'analyse économique de la gestion des zones agricoles surinondées du bassin versant de la Touloubre, *Rapport pour le syndicat d'aménagement de la touloubre, Cemagref*.

Blanc C., Brémond P. and Grelot, F. (2010). Projet EVA, Évaluation de la Vulnérabilité Agricole. *Rapport pour la mission Rhône, DREAL Rhône-Alpes, Cemagref*. Extrait de : <http://www.planrhone.fr/index.php?type=404>

Blancher P. (1998). Risques et Réseaux Techniques Urbains. *Collection CERTU*, 18, 1-169.

Bohman A. J., Hattersley R. T. (1967). Low level causeways, *University of New South Wales, Water Research Laboratory*, 100. doi : [10.4225/53/579835d2ef671](https://doi.org/10.4225/53/579835d2ef671)

Boisvert, R. (1992). Indirect Losses from a Catastrophic Earthquake and the Local, Regional, and National Interest. *Congress of the National Earthquake Hazards Reduction Program*, Washington, D.C. : FEMA.

Bourguignon, D. (2014). *Événements et territoires - le coût des inondations en France, Analyses spatio-temporelles des dommages assurés* (thèse de Doctorat) Université Paul Valéry, Montpellier III.

Boyer Chammard R. (2008). *Processus de surveillance et de majoration des contrats flottes d'entreprise d'AXA France* (Mémoire d'actuariat), 1-166. Extrait de : <http://www.ressources-actuarielles.net/C12574E200674F5B/0/1DFAAB6594CF82A3C125762C002F2F43>

Brémond P. (2011). Caractérisation et évaluation économique de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations, *Thèse de doctorat, Spécialité Sciences Economiques*, Montpellier, France. Extrait de : <http://www.theses.fr/2011MON10059>

Brémond P. et Grelot F. (2012). Taking into account recovery to assess vulnerability : application to farms exposed to flooding, *Managing Resources of a Limited Planet, 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software*. Leipzig, Germany. Extrait de : [http://former.iemss.org/sites/iemss2012//proceedings/H3\\_0429\\_Bremonda\\_%20Grelot.pdf](http://former.iemss.org/sites/iemss2012//proceedings/H3_0429_Bremonda_%20Grelot.pdf)

Brémond P., Grelot F. et Agenais A.L. (2013). Flood damage assessment on agricultural areas : review and analysis of existing methods. *4th International Symposium on Flood Defence : Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability*, Institute for Catastrophic Loss Reduction, Toronto, Ontario, Canada.

Brookshire, D. and M. McKee. (1992). Other Indirect Costs and Losses from Earthquakes : Issues and Estimation. *Indirect Economic Consequences of a Catastrophic Earthquake*, Washington, DC : FEMA.

Brookshire D., Chang ., Cochrane H., Olson R., Rose A. et Steenson J. (1997). Direct and Indirect Economic Losses from Earthquake Damage. *Earthquake Spectra*, 13(4), 683-701. <https://doi.org/10.1193/1.1585975>

Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A., and von Winterfeldt, D. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, *Earthquake Spectra*, 19(4), 733-752. Extrait de : <http://courses.washington.edu/cee518/Bruneauetal.pdf>

Bubeck, P. et Kreibich, H. (2011). Natural Hazards : direct costs and losses due to the disruption of production processes. *CONHAZ Report*. Extrait de : <http://www.conhaz.org/>

Bubeck, P., de Moel, H., Bouwer, L.M., et Aerts, J.C.J.H. (2011). How reliable are projections of future flood damage? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 3293-3306. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3293-2011, 2011.>

Caisse Centrale de Réassurance. (2011). *Le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles*, 1-14. Extrait de : <http://www.onrn.fr/site/binaries/content/assets/documents/plaquette-regime-cat-nat-2011-vf.pdf>

Caisse Centrale de Réassurance. (2015). *L'indemnisation des catastrophes naturelles en France*, 1-24. Extrait de : <https://www.ccr.fr/-/indemnisation-des-catastrophes-naturelles-en-france>

Caisse Centrale de Réassurance, Service R& D modélisation, Département des Études Techniques, Direction Réassurances et Fonds Publics-CCR. (2016). *La crue de la Seine en Île-de-France, Étude historique de la crue de 1910 & Modélisation de scénarios de référence*, 1-29.

Caisse Centrale de Réassurance. (2017). Les catastrophes naturelles en France - Bilan 1982-2017. Extrait de : <https://bilan-catnat.ccr.fr/img/RAPPORT-CAT-NAT-WEB.pdf>

Caisse Centrale de Réassurance, Service R&D modélisation, Département des Études Techniques, Direction Réassurances et Fonds Publics-CCR. (2019). *Les Catastrophes Naturelles en France : Bilan 1982-2017*, 1-88.

Cantelaube, P. et Carles, M. (2011). Le registre parcellaire graphique : des données géographiques pour décrire la couverture du sol agricole, *INRA*. Extrait de : [https://www6.inra.fr/cahier\\_des\\_techniques/content/download/3813/34098/version/2/file/12\\_CH2\\_CANTELAUBE\\_registre\\_parcellaire.pdf](https://www6.inra.fr/cahier_des_techniques/content/download/3813/34098/version/2/file/12_CH2_CANTELAUBE_registre_parcellaire.pdf)

Carrera, L., Standardi, G., Bosello, F. et Mysiak, J. (2013). Assessing Direct and Indirect Economic Impacts of a Flood Event Through the Integration of Spatial and Computable General Equilibrium Modelling. *CMCC Research Paper No. 202*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2637313>

Castillo-Rodríguez J. T., Escuder-Bueno I., Perales-Momparler S. and Porta-Sancho J. R. (2016). Enhancing local action planning through quantitative flood risk analy-

sis : a case study in Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 1699-1718. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1699-2016>

Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation. (2008). Évaluation de la pertinence des mesures de gestion du risque d'inondation, *Manuel des pratiques existantes*. Extrait de : [https://www.cepri.net/tl\\_files/pdf/manuelpratiquesexistantesversiondfinitive.pdf](https://www.cepri.net/tl_files/pdf/manuelpratiquesexistantesversiondfinitive.pdf)

Chambre d'Agriculture du Gard pour le compte du SYMADREM. (2009). Étude des enjeux agricoles sur la plaine de Bellegarde/Fourques et couloir de Saint-Gille dans le cadre de l'étude de renforcement de la digue du Rhône rive droite entre Beaucaire et Fourques, Document de travail, Nîmes, France.

Chambres d'Agriculture. (2015). La réduction de la vulnérabilité agricole aux inondations du Rhône. Extrait de : [http://www.agri13.fr/fileadmin/agriculture/docs/page\\_en\\_direct/2011/PED\\_inondations\\_30-12-2011.pdf](http://www.agri13.fr/fileadmin/agriculture/docs/page_en_direct/2011/PED_inondations_30-12-2011.pdf)

Charpentier A. (2013). *Actuariat IARD - ACT2040, Partie 8 - Réassurance* [PowerPoint slides]. Extrait de : <http://freakonometrics.free.fr/slides-2040-8.pdf>

Charpentier A., Dutang C. (2012). *L'Actuariat avec R*. Extrait de : [https://cran.r-project.org/doc/contrib/Charpentier\\_Dutang\\_actuariat\\_avec\\_R.pdf](https://cran.r-project.org/doc/contrib/Charpentier_Dutang_actuariat_avec_R.pdf)

Chatterton, J., Viavattene, C., Morris, J., Penning-Rowsell, E., et Tapsell, S. (2010). The Costs of the Summer 2007 Floods in England. *Flooding and coastal change*, Environment Agency. Extrait de : [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/291190/schol1109brja-e-e.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/291190/schol1109brja-e-e.pdf)

Chien N., Wan Z. (1999). Mechanics of sediments transport. *American Society of Civil Engineers Press*. <https://doi.org/10.1061/9780784404003>

Christin, N., Peinturier, C., Magnier, C., Albertini, J.-P. (2014). Analyse multicritères des projets de prévention des inondations. *Guide méthodologique, Commissariat Général au Développement Durable*. Extrait de : <https://www.gesteau.fr/document/analyse-multicriteres-des-projets-de-prevention-des-inondations>

CIPHS (Center for Infrastructure Protection and Homeland Security), George Madison University. (2001). Critical Infrastructure Protection in the National Capital Region Risk-Based Foundations for Resilience and Sustainability, *Final Report, Volume 20 : Hurricane Isabel : Critical Infrastructure Interdependency Assessment*.

Citeau J.M. (2003). A New Flood Control Concept in the Oise Catchment Area : Definition and Assessment of Flood Compatible Agricultural Activities. Fédération Internationale des géomètres, Working Week, Ecole Nationale de Sciences Géographiques et Institut de Géographie Nationale, 13-17. Extrait de : [https://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig\\_2003/TS\\_14/TS14\\_5\\_Citeau.pdf](https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig_2003/TS_14/TS14_5_Citeau.pdf)

Cochrane, H. (2004). Economic loss : myth and measurement. *Disaster Prevention and Management : An International Journal*, 13(4), 290-296. <https://doi.org/10.1108/>

09653560410556500

Cohignac T., Ecoto G. (2013). La tarification de réassurance CAT-NAT. *Document de travail, Caisse Centrale de Réassurance*, 1-29. Extrait de : [https://www.institutdesactuaires.com/global/gene/link.php?doc\\_id=1241&fg=1](https://www.institutdesactuaires.com/global/gene/link.php?doc_id=1241&fg=1)

Cole, S. (1988). The Delayed impacts of plant closures in a reformulated Leontief model, *Papers in Regional Science Association*, 65, 135-149. <https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1988.tb01162.x>

Cole, S. (1989). Expenditure Lags in Impacts Analysis, *Regional Studies*, 23(2), 105-116. <https://doi.org/10.1080/00343408912331345332>

Consuegra D. (1992). Concept de Gestion des Eaux de Surface : Aspects méthodologiques et application au bassin versant de la Broye en Suisse. *Thèse No 1064. Département de Génie Rural, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne; Lausanne, Suisse.*

Cour des Comptes. (2013). Assurance récolte, Référé. Extrait de : <https://www.ccomptes.fr/fr/documents/24686>

Cox R. J., Ball E. J. (2001). *Stability and safety in flooded streets : Proceedings of conference on hydraulics in Civil Engineering, The Institution of Engineers, 2001.* Barton Australia.

Dacy, D.C., et Kunreuther, H. (1969). *The Economics of Natural Disaster : Implications for Federal Policy.* New York, NY : The Free Press. <https://digitalrepository.unm.edu/nrj/vol11/iss1/11>

Dantec G., Galibert T., Pipien G. (2018). Retours d'expérience des inondations, Propositions d'un dispositif d'organisation et d'un guide méthodologique *Document de travail du CGEDD*, 1-61. Extrait de : <http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr>

Dassanayake D. R., Burzel A. & Oumeraci H. (2015). Methods for the Evaluation of Intangible Flood Losses and Their Integration in Flood Risk Analysis. *Coastal Engineering Journal*, 57(1), 1-35. doi : [10.1142/S0578563415400070](https://doi.org/10.1142/S0578563415400070)

DATAR. (2012). Les Systèmes Urbains Français. *Travaux en Ligne*, n°10. [www.datar.gouv.fr/sites/default/files/travaux\\_en\\_l\\_10\\_synthese\\_susm.pdf](http://www.datar.gouv.fr/sites/default/files/travaux_en_l_10_synthese_susm.pdf)

Davis, R., (1984). Diagnostic reasoning based on structure and behavior, *Artificial Intelligence*, 24(1-3), 347-410. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(84\)90042-0](https://doi.org/10.1016/0004-3702(84)90042-0)

Defra. (2005). Making space for water : Taking forward a new Government strategy for flood and coastal erosion risk management in England. *First Government response to the autumn 2004 Making space for water consultation exercise*, London. [http://www.met.rdg.ac.uk/~sws00rsp/teaching/postgrad/consultation\[1\].pdf](http://www.met.rdg.ac.uk/~sws00rsp/teaching/postgrad/consultation[1].pdf)

Deleuze C., Fotre C., Nuti I., Pierot F. (1991). Evaluation de fonctions de coûts économiques des dommages aux cultures dus aux inondations. *Mémoire d'étude de l'ENGREF*

réalisé pour le CERGREN, 1-50.

Department for Transport. (2009). Unit 3.5.7 : The reliability sub-objective. Dans *Transport analysis Guidance*. Department of Transport, London. <http://www.dft.gov.uk/webtag/documents/experts/pdf/unit3.5.7.pdf>

Desarthe, J. (2013). *Le temps des saisons, Climat, événements extrêmes et sociétés dans l'Ouest de la France*. Paris : Hermann.

Devaux-Ros, C. (2000). Etude de la propagation des crues et des risques d'inondation en Loire Moyenne : évaluation des enjeux et des dommages potentiels liés aux inondations en Loire Moyenne : méthodes et principaux résultats, *Document de travail. Equipe pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, AELB, Agence de l'eau Loire Bretagne*. Extrait de : <https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/notice/etude-de-la-propagation-des-crues-et-des-risques-d-inondation-en-loire-moyenne-evaluation-des-enjeux0>

Dietzenbacher, E. (1997). In Vindication of the Ghosh Model : A Reinterpretation as a Price Model. *Journal of Regional Science*, 37, 629-651. <https://doi.org/10.1111/0022-4146.00073>

DKKV. (2003). Lessons learned : Hochwasservorsorge in Deutschland. Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet, Schriftenreihe des DKKV, (pp. 1-29).

Donaghy, K., Balta-Ozkan, N., et Hewings, G. (2007). Modeling Unexpected Events in Temporally Disaggregated Econometric Input-Output Models of Regional Economies, *Economic Systems Research*, 19, 125-145. doi : [10.1080/09535310701328484](https://doi.org/10.1080/09535310701328484)

DRIEE Ile-de-France. (2012). Approvisionnement Electrique du Grand Paris. *Séminaire 6 mars 2012*. [www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Seminaire\\_du\\_6\\_mars\\_2012\\_-\\_Presentations\\_Approvisionnement\\_electrique\\_du\\_Grand\\_Paris\\_\\_cle2dcb2f-1.pdf](http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Seminaire_du_6_mars_2012_-_Presentations_Approvisionnement_electrique_du_Grand_Paris__cle2dcb2f-1.pdf)

Du Plessis, L.A. et Viljoen, M.F. (1999). Calculation of the secondary effects of floods in the lower Orange River area - A GIS approach, *Water SA*, 25(2), 197-203. Extrait de : [http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/WaterSA\\_1999\\_02\\_apr99\\_p197.pdf](http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/WaterSA_1999_02_apr99_p197.pdf)

Dury, B. et Didier, C. (2006). Activité économique agricole, foncier et environnement écologique du casier d'inondation de Saint-Maurice en Rivière à Allériot, Phase II : chiffrage des impacts agricoles, *Document de travail, Chambre d'Agriculture 71 pour le compte du Syndicat Mixte Saône-Doubs*, Mâcon, France

Duthion, C. (1982). Effets d'une courte période d'excès d'eau sur la croissance et la production du maïs. *Agronomie : sciences des productions végétales et de l'environnement*, 2(2), 125-131. Extrait de : <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=LV2016020084>

Dutta, D., Herath, S., and Musiake, K. (2001). Direct flood damage modeling towards urban flood risk management, *Joint Workshop on Urban Safety Engineering 2001*, Bangkok,

Thailand. [https://www.academia.edu/33788770/Direct\\_Flood\\_Damage\\_Modeling\\_Towards\\_Urban\\_Flood\\_Risk\\_Management](https://www.academia.edu/33788770/Direct_Flood_Damage_Modeling_Towards_Urban_Flood_Risk_Management)

Dutta, D., Herath, S., et Musiak, K. (2003). A mathematical model for flood loss estimation, *Journal of Hydrology*, 277(1-2), 24-49. doi : [10.1016/S0022-1694\(03\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00084-2)

Ecodecision. (2006). Evaluation économique des dommages liés aux inondations, Rapport Final pour l'AEAP (Agence de l'Eau Artois-Picardie). Extrait de : [http://economie.eaufrance.fr/sites/default/files/dommages\\_inondations.pdf](http://economie.eaufrance.fr/sites/default/files/dommages_inondations.pdf)

Eleutério, J., Hattemer, C. et Rozan, A. (2013). Flood risk analysis : impact of uncertainty in hazard modelling and vulnerability assessments on damage estimations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi : [doi:10.5194/nhess-13-983-2013](https://doi.org/10.5194/nhess-13-983-2013)

Elliott J., Twining S., Philipps K., Hockridge B. et Phelps E. (2014). The Economic Impact of 2014 Winter Floods on Agriculture in England, DEFRA. Extrait de : [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/401235/RFI7086\\_Flood\\_Impacts\\_Report\\_\\_2\\_.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/401235/RFI7086_Flood_Impacts_Report__2_.pdf)

EPTB Seine Grands Lacs. (2013). Programme d'Actions de Prévention des Inondations de la Seine et de la Marne Franciliennes (PAPI). *Rapport de Présentation*, Paris. Extrait de : [http://www.seinegrandslacs.fr/sites/default/files/dossier\\_synthese\\_papi.pdf](http://www.seinegrandslacs.fr/sites/default/files/dossier_synthese_papi.pdf)

Erdlenbruch, K., Germano, V., Gilbert, E., Grelot, F. et Lescoulier, C. (2007). Étude socio-économique des inondations sur le bassin versant de l'Orb, *Document de travail, Conseil général de l'Hérault*. Extrait de : [http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/7-4-0\\_bceom-cemagref-rapport\\_orb\\_cle7d38fc.pdf](http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/7-4-0_bceom-cemagref-rapport_orb_cle7d38fc.pdf)

Erdlenbruch, K., Thoyer, S., Grelot, F., Kast, R. et Enjolras, G. (2009). Risk-sharing policies in the context of the French Flood Prevention Action Programmes, *Journal of environmental management*, 91(2), 363-369. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.09.002>

European Commission. (2007). A new EU Floods Directive 2007/60/EC. lien : [http://ec.europa.eu/environment/water/flood\\_risk/index.htm](http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/index.htm)

European Environment Agency, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire (2009), CORINE Land Cover France Guide d'utilisation. Extrait de : [https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-12/clc-guide-d-utilisation-02\\_0.pdf](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-12/clc-guide-d-utilisation-02_0.pdf)

Evans, E. P., Sayers, P., Thorne, C., & Watkinson, A. (2006). The Foresight Future Flooding project : drivers, responses and choices for future flood risk management, *Water Management*, 159. [https://www.researchgate.net/publication/237474773\\_The\\_Foresight\\_Future\\_Flooding\\_project\\_drivers\\_responses\\_and\\_choices\\_for\\_future\\_flood\\_risk\\_management](https://www.researchgate.net/publication/237474773_The_Foresight_Future_Flooding_project_drivers_responses_and_choices_for_future_flood_risk_management)

FEMA (Federal Emergency Management Agency). (2011). Hazus-MH 2.1 Flood model,

*Technical manual*. Extrait de : <https://www.fema.gov/hazus-mh-user-technical-manuals>

FEMA (Federal Emergency Management Agency). (2015). Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Flood Model HAZUS-MH MR3 Technical Manual. *Mitigation Division, Washington, D.C.* Extrait de : <https://www.hsd1.org/?viewetdid=480580>

Förster, S., Kuhlmann, B., Lindenschmidt, K.-E., and Bronstert, A. (2008). Assessing flood risk for a rural detention area. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 311-322. DOI : <https://doi.org/10.5194/nhess-8-311-2008>

Freni, G, La Loggia, G., et Notaro, V. (2010). Uncertainty in urban flood damage assessment due to urban drainage modelling and depth-damage curve estimation, *Water Science and Technology*, 61, 2979-2993. DOI : [10.2166/wst.2010.177](https://doi.org/10.2166/wst.2010.177)

Gayler D., Chilvers M., Abrahams J., Coghlan A., Koob P., Kuslap A., Casinader T., Schneider J., Brown R., Gabriel P., Gauntlett I., Buckle P., Galloway L., Hoffman G., Henri C., Kilby C. et Amiel L. (2001). Economic costs of natural disasters in Australia, *Document de travail 103, Bureau of Transport Economics, Commonwealth of Australia*. Extrait de : [https://www.bitre.gov.au/publications/2001/report\\_103.aspx](https://www.bitre.gov.au/publications/2001/report_103.aspx)

Gerhardt P. M., Gross R. J., Hochstein J. I., *Fundamentals of fluid mechanics, Addison-Wesley, 1992*

Gleyze, J.-F. (2005). La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risque, *Thèse de Doctorat, Géographie, Histoire, Sciences de la Société, Université Paris 7 - Denis Diderot, Paris, 1-539*

Gordon, P., Richardson, H. et Davis B. (1998). Transport-Related Impacts of the Northridge Earthquake, *Journal of Transportation and Statistics*, 1, 22-36.

Goulter, I.C., et Morgan, D.R. (1983). Analyzing alternative flood damage reduction measures on small rural watersheds using multiple return period floods, *Water Resources Research*, 19(6), 1376-1382. DOI : [10.1029/WR019i006p01376](https://doi.org/10.1029/WR019i006p01376)

Green, C., Viavattene, C., and Thompson, P. (2011). Guidance for assessing flood losses. *CONHAZ Report*. Extrait de : <http://www.conhaz.org/>

Groupe de travail du Conseil supérieur d'orientation et de coordination de l'économie agricole et alimentaire. (2017). La gestion des risques en agriculture : un défi et une urgence. Passer d'une approche au cas par cas pour aller vers une véritable stratégie d'ensemble partagée avec les acteurs économiques. Extrait de : <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/84544?token=2c3caab1cc050fc5b0252b3b0657f16b>

Guillaumin, E., Cortier, B., Levasseur, L., Michelet, P., Le My, J.-B., et Dumez, J. (2000). Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. *La Houille Blanche*, 3-4, 126-132. <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/2000041>

Hall, J. W., Dawson, R.J., Sayers, P.B., Rosu, C., Chatterton, J.B., & Deakin, R. (2003). A methodology for national-scale flood risk assessment. *Proceedings of the ICE - Water and*

*Maritime Engineering*, 156 (3), 235-247. ISSN = 1472-4561

Hall, J. W. et Solomatine, D. (2008). A framework for uncertainty analysis in flood risk management decisions. *Journal of River Basin Management*, 6(2), 85-98. <https://doi.org/10.1080/15715124.2008.9635339>

Hallegatte, S. (2008). An Adaptive Regional Input-Output Model and its Application to the Assessment of the Economic Cost of Katrina. *Risk Analysis*, 28, 779-799. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01046.x>

Hallegatte, S., Przulski, V. (2010). The Economics of Natural Disasters : concepts and methods . *Policy Research working paper ; no. WPS 5507*, Washington, DC : World Bank, 11(2), 14-24. <http://documents.worldbank.org/curated/en/255791468339901668/The-economics-of-natural-disasters-concepts-and-methods>

Hallegatte, S., Ranger, N., Mestre, O., Dumas, P., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C. et Muir-Wood, R. (2010). Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities : A case study on Copenhagen, *Climatic Change*(104), 113-137. doi : [10.1007/s10584-010-9978-3](https://doi.org/10.1007/s10584-010-9978-3)

Hallegatte, S. (2012). Modeling the Roles of Heterogeneity, Substitution, and Inventories in the Assessment of Natural Disaster Economic Costs. *Policy Research Working Paper, No. 6047*. World Bank, Washington, DC. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/6050>

Hess C. (2009). *Théorie du risque et réassurance* [Cours, Université Paris Dauphine].

Hess, T. M. and Morris, J. (1986). The Estimation of Flood Damage Costs for Arable Crops, Silsoe, Silsoe College.

Hochrainer, S. (2009). Assessing the Macroeconomic Impacts of Natural Disasters : Are there Any? *Policy Research working paper, No. 4968*. World Bank, Washington, DC. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/4162>

Hoes, O. et Schuurmans, W. (2006). Flood standards or risk analyses for polder management in the Netherlands. *Irrigation and Drainage*, 55, S113-S119. DOI : [10.1002/ird.249](https://doi.org/10.1002/ird.249)

Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1), 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>

Hubert, G. et Ledoux, B. (1999). Le coût du risque, L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations. *Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Agence de l'Eau Seine-Normandie et Grands Lacs de Seine, Presses des Ponts et Chaussées*. Paris, (pp. 1-232).

Huet P., Roussel P., Martin X., Bourget B., Varret J., Guellec J., Monadier P., Sauzey P., Teyssier A. (2001). Mission d'expertise sur les crues de décembre 2000 et janvier 2001 en Bretagne. *IGA, CGPC, CGGREF et IGE*, 1-144. Extrait de : <https://www.ladocumenta>

[tionfrancaise.fr/rapports-publics/014000571-mission-d-expertise-sur-les-crues-de-decembre-2000-et-janvier-2001-en-bretagne](http://documentationfrancaise.fr/rapports-publics/014000571-mission-d-expertise-sur-les-crues-de-decembre-2000-et-janvier-2001-en-bretagne)

Huet P., Martin X., Prime J.-L., Foin P., Laurain C., Cannard P. (2003). Retour d'expérience des crues de septembre 2002 dans les départements du Gard, de l'Hérault, du Vaucluse, des Bouches-du-Rhône, de l'Ardèche et de la Drôme (rapport consolidé après phase contradictoire). IGA, CGPC, CGGREF et IGE, 1-133. Extrait de : <https://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/034000547/index.shtml>

Huizinga, H.J. (2007). Flood damage functions for EU member states. *Technical Report, HKV Consultants. Implemented in the framework of the contract n.382441-F1SC awarded by the European Commission - Joint Research Centre.*

ICPR. (2001). Atlas of flood danger and potential damage due to extreme floods of the Rhine, Koblenz, *International Commission for the Protection of the Rhine*. Extrait de : <https://www.iksr.org/en/public-relations/documentsarchive/rhine-atlas/>

Igigabel M., Chaouch V. et El Fadili M. (2014). Coût des inondations contre les inondations fluviales. *Cerema*, 1-159. ISBN : 978-2-37180-003-8

International Commission for the Protection of the Rhine (2001). Atlas of flood danger and potential damage due to extreme floods of the Rhine, Koblenz, Germany. Extrait de : <https://www.iksr.org/en/public-relations/documentsarchive/rhine-atlas/>

ISDR (International Strategy for Disaster Reduction). (2004). Living with risk : A global review of disaster reduction initiatives, *United Nations Publications*. ISBN/ISSN : 9211010640

Jaramillo, C. R. H. (2009). Do Natural Disasters Have Long-Term Effects on Growth? Universidad de los Andes, Mimeo, Bogota.

Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J.I., Bates, P.D., Feyen, L., Gericke, A., Neal, J., Aerts, J.C.J.H. et Ward, P.J. (2012). Comparative flood damage model assessment : towards a European approach, *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 12, 3733-3752. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3733-2012>

Jonkman, S. N., Bockarjova, M., Kok, M. et Bernardini, P. (2008). Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands, *Ecological Economics*, 66(1), 77-90. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.12.022>

Khaliq, M. N., Ouarda, T. B. M. J., Ondo, J.-C., Gachon, P., & Bobee, B. (2006). Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations : A review. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 534-552. doi : [10.1016/j.jhydrol.2006.03.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.004)

Klijn, F., Baan, P.J.A., De Bruijn, K.M., and Kwadijk, J. (2007). Overstromingsrisico's in Nederland in een veranderend klimaat : Verwachtingen, schattingen en berekeningen voor het project Nederland Later, *Hydraulic Engineering Reports, Delft hydraulics, Delft, Netherlands*, 1-166. Extrait de : <http://resolver.tudelft.nl/uuid:>

015c62a1-558d-422c-8706-efc0e4db2fc3

Kok, M., Huizinga, H.J., Vrouwenfelder, A.C.W.M. et Barendregt, A. (2005). Standard Method 2004 damage and casualties caused by flooding. *Ministerie van Verkeer en Waterstaat*. Extrait de : <http://publicaties.minienm.nl/download-bijlage/58008/dww-2005-009-standard-method-2004-damage-and-casualties-ca.pdf>

Kreibich, H., Thielen, A. H., Petrow, Th., Müller, M. & Merz, B. (2005). Flood loss reduction of private households due to building precautionary measures? lessons learned from the Elbe flood in August 2002. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5 (1), 117-126. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-117-2005>

Kreibich, H., Muller, M., Thielen, A. H., Petrow, T., and Merz, B. (2007). Flood precaution of companies and their ability to cope with the flood in August 2002 in Saxony, Germany, *Water Resources Research* (43). doi : [10.1029/2005WR004691](https://doi.org/10.1029/2005WR004691)

Kreibich H., Piroth K., Seifert I., Maiwald H., Kunert U., Schwarz J., Merz B., Thielen A. H. (2009). Is flow velocity a significant parameter in flood damage modeling? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1679-1692. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1679-2009>

Kreibich, H., Seifert, I., Merz, B., and Thielen, A. H. (2010). Development of FLEMOcs. A new model for the estimation of flood losses in the commercial sector. *Hydrological Sciences Journal*, 55(8), 1302-1314. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.529815>

Kunreuther, H. et Pauly, M. (2004). Neglecting Disaster : Why Don't People Insure Against Large Losses? *Journal of Risk and Uncertainty*, 28(1), 5-21. <https://doi.org/10.1023/B:RISK.0000009433.25126.87>

Lacewell, R.D., Freeman, R., Petit, D., Rister, M.E., Sturdivant, A.W., Ribera, L., and Zinn, M. (2006). Update of Estimated Agricultural Benefits Attributable to Drainage and Flood Control in Willacy County, Texas. *Texas Water Resources Institute*. Extrait de : <http://hdl.handle.net/1969.1/6084>

Lacewell, R., et Eidman, V. (1972). A General Model for Evaluating Agricultural Flood Plains. *American Journal of Agricultural Economics*, 54(1), 92-101. DOI : [10.2307/1237738](https://doi.org/10.2307/1237738)

Lamothe A.-N., Neveu G., Görlach B., Interwies E. (2005). Evaluation of the impact of floods and associated protection policies, Final report. *Document de travail, European Commission, DG Environment*, 1-107. Extrait de : <http://ec.europa.eu>

Le Bihan, G., Payrastre, O., Gaume, E., Moncoulon, D., and Pons, F. (2017). The challenge of forecasting impacts of flash floods : test of a simplified hydraulic approach and validation based on insurance claim data, *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 5911-5928. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5911-2017>

Ledoux, B., (2009). Méthode standard pour l'analyse coût/bénéfice des projets de prévention des inondations, Guide d'accompagnement. Plan Rhône - Volet inondations.

Ledoux Consultants et EGEO Solutions. (2010). Guide d'accompagnement, Catalogue des fonctions de dommages, Base de données enjeux.

Lefrou C. (2000). Les crues des 12, 13 et 14 novembre 1999 dans les départements de l'Aude, de l'Hérault, des Pyrénées-Orientales et du Tarn. Rapport de l'IGE, (pp. 1-99 + annexes)

Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. (2010). Les réseaux techniques face aux inondations ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine, *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, (pp. 1-14).

Lhomme S. (2012). Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain. Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine. *Thèse de doctorat, Université Paris Diderot*, 1-365.

Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. (2012). Network resiliency assessment integrating network interdependencies, *FloodRisk 2012*, Rotterdam, Netherland.

Lhomme, S., Laganier, R., Diab, Y., Serre, D. (2013). Un prototype SIG pour analyser la résilience urbaine : application à la ville de Dublin. *Vertigo*. DOI : [10.4000/vertigo.14502](https://doi.org/10.4000/vertigo.14502)

Lidsky, V., Maudet, C., Malpel, G.-P., Gerster, F., Helfter, M., Lejeune, H., Le Theule, F.-G. (2017). Les outils de gestion des risques en agriculture, *Inspection Générale des Finances & Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces Ruraux*. <https://agriculture.gouv.fr/les-outils-de-gestion-des-risques-en-agriculture>

Lindell, M.K. et Prater C.S. (2003). Assessing Community Impacts of Natural Disasters. *Natural Hazards Review*, 176-185. doi : [10.1061/~ASCE!1527-6988~2003!4:4~176!](https://doi.org/10.1061/~ASCE!1527-6988~2003!4:4~176!)

MAFF & Welsh Office. (1993). Strategy for flood and coastal defence in England and Wales, MAFF Flood and Coastal Defence Division. PB 2197, London.

McDonald, G.T. (1970). Agricultural Flood Damage Assessment : A Review and Investigation of a Simulation Method. *Review of Marketing and Agricultural Economics, Australian Agricultural and Resource Economics Society*, 38(3), 1-16.

Meadowcroft, I. C., Hall, J. W., Ramsbottom, D. M. (1997). Application of risk methods in flood and coastal engineering : Scoping study, *Report SR483, HR Wallingford*.

MEDD. (2005). Fiche de cas : La crue de la Meuse et de ses affluents en janvier 1995 dans les Ardennes, *Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques, Paris*, 79-99.

MEDD. (2005). Réduire la vulnérabilité des réseaux urbains aux inondations, *Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques, Paris*, 1-112, 2005b.

MEDD. (2007). Evaluations socio-économiques des instruments de prévention des inondations. *Études économiques et évaluation environnementale, Paris*, 1-117. Extrait de :

[https://www.cepri.net/tl\\_files/pdf/d4e200703evaluationinstrumentpreventioninondations.pdf](https://www.cepri.net/tl_files/pdf/d4e200703evaluationinstrumentpreventioninondations.pdf)

MEDDE / CGDD. (2009). Assurance des risques naturels en France : sous quelles conditions les assureurs peuvent-ils inciter à la prévention des catastrophes naturelles? *Etudes & documents*, 1. Extrait de : <http://www.developpementdurable.gouv.fr/article.php3?idarticle=4664>

MEDDE / CGDD. (2014). Analyse multicritères des projets de prévention des inondations - Guide méthodologique & Annexes techniques. *Document de travail*, 1-168 + annexes. Extrait de : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/developpement-durable>

MEDDE / CGDD. (2018). Analyse multicritères des projets de prévention des inondations - Guide méthodologique & Annexes techniques. *Document de travail*, 1-166 + annexes. Extrait de : <http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr>

Merz, B., Jim, H., Markus, D., Andreas, S. (2010). Fluvial flood risk management in a changing world, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 509-527. doi : [10.5194/nhess-10-509-2010](https://doi.org/10.5194/nhess-10-509-2010)

Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., and Thieken, A. (2010). Review article : Assessment of economic flood damage., *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 1697-1724. doi : [10.5194/nhess-10-1697-2010](https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010)

Merz, B., Aerts, J., Arnbjerg-Nielsen, K., Baldi, M., Becker, A., Bichet, A., Blöschl, G., Bouwer, L. M., Brauer, A., Cioffi, F., Delgado, J. M., Gocht, M., Guzzetti, F., Harrigan, S., Hirschboeck, K., Kilsby, C., Kron, W., Kwon, H.-H., Lall, U., Merz, R., Nissen, K., Salvatti, P., Swierczynski, T., Ulbrich, U., Viglione, A., Ward, P. J., Weiler, M., Wilhelm, B., and Nied, M. (2014). Floods and climate : emerging perspectives for flood risk assessment and management, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 1921-1942. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1921-2014>

Meyer, V., Becker, N., Markantonis, V., Schwarze, R., van den Bergh, J., Bouwer, L., Bubeck, P., Ciavola, P., Daniel, V., Genovese, E., Green, C., Hallegatte, S., Kreibich, H., Lequeux, Q., Logar, I., Papyrakis, E., Pfurtscheller, C., Poussin, J., Przyluski, V., Thieken, A., Viavattene, C. (2013). Assessing the Costs of Natural Hazards - State-of-the-art and Knowledge Gaps, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 1351-1373. doi : [10.5194/nhess-13-1351-2013](https://doi.org/10.5194/nhess-13-1351-2013)

Michel-Kerjan, E. (2000). Risques à grande échelle dans les systèmes en réseaux : quelques interrogations, *Série Scientifiques, Centre international de recherche en organisations (CIRADO)*, 1-26p. <https://ideas.repec.org/p/cir/cirwor/2000s-02.html>

Middelkoop, H., Van Asselt, M. B. A., Van't Klooster, S. A., Van Deursen, W. P. A., Kwadijk, J. C. J., Buiteveld, H. (2004). Perspectives on Flood Management in the Rhine and Meuse Rivers, *River Research and Application*, 20, 327-342. <https://doi.org/10.1002/rra.782>

- Millinship I. (2015) La Réunion analysis cell generation, JBA Risk Management.
- Mills E. (2005). Insurance in a climate of change, *Science*, 309(5737), 1040-4. doi : [10.1126/science.1112121](https://doi.org/10.1126/science.1112121)
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Stationarity Is Dead : Whither Water Management? *Science*, 319, 573-574. [https://en.vedur.is/media/loftslag/Milly\\_eta1-2008-Stationarity-dead-Science.pdf](https://en.vedur.is/media/loftslag/Milly_eta1-2008-Stationarity-dead-Science.pdf)
- Moncoulon, D. et Quantin, A. (2013). Modélisation des événements extrêmes d'inondation en France métropolitaine. *La Houille Blanche*, 1, 22-26. doi : [10.1051/lhb/2013004](https://doi.org/10.1051/lhb/2013004)
- Moncoulon, D. (2014). *Proposition d'une méthode d'estimation de l'exposition financière aux inondations pour le marché de l'assurance en France, Modélisation hydrologique et économique probabiliste spatialisée* (thèse de Doctorat) Université Paul Sabatier, Toulouse
- Moncoulon, D., Labat, D., Ardon, J., Leblois, E., Onfroy, T., Poulard, C., Aji, S., Rémy, A., and Quantin, A. (2014). Analysis of the French insurance market exposure to floods : a stochastic model combining river overflow and surface runoff, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 2469-2485. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2469-2014>
- Moncoulon, D. et Desarthe J. (2016). La Crue de la Seine en Île-De-France, Etude historique de la crue de 1910 & Modélisation de scénarios de référence. *Document de travail, CCR*, 1-29.
- Moncoulon, D., Veysseire, M., Naulin, J.-P., Wang, Z.-X., Tinard, P., Desarthe, J., Hajji, C., Onfroy, T., Regimbeau, F. et Déqué M. (2016) Modelling the evolution of the financial impacts of flood and storm surge between 2015 and 2050 in France, *International Journal of Safety and Security Engineering*, 6(2), 141-149. doi : [10.2495/SAFE-V6-N2-141-149](https://doi.org/10.2495/SAFE-V6-N2-141-149)
- Morris, J. et Brewin, P. (2014). The impact of seasonal flooding on agriculture : the spring 2012 floods in Somerset, England. *Journal of Flood Risk Management*, 7, 128-140. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12041>
- Morris, J. et Hess, T.M. (1988). Agricultural flood alleviation benefit assessment : a case study. *Journal of Agricultural Economics*, 39, 402-412. DOI : [10.1111/j.1477-9552.1988.tb00600.x](https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.1988.tb00600.x)
- Nguyen T. T. V. (2008). *Flottes automobiles : Un nouveau modèle de tarification. Impact de la conservation sur la distribution du ratio sinistre à primes* (Mémoire d'actuariat), 1-115. Extrait de : [http://www.ressources-actuarielles.net/\\_\\_\\_c12574e200674f5b.nsf/0/0b7f2f5af6084d90bc125762c002dfd03?OpenDocument&ExpandSection=1](http://www.ressources-actuarielles.net/___c12574e200674f5b.nsf/0/0b7f2f5af6084d90bc125762c002dfd03?OpenDocument&ExpandSection=1)
- Noy, I. et Nualsri, A. (2007). What do exogenous shocks tell us about growth theories? *Working paper n.2007-28, Department of Economics, University of Hawaii at Manoa*. <https://ideas.repec.org/p/hai/wpaper/200728.html>
- Noy, I. (2009). The Macroeconomic Consequences of Disasters. *Journal of Development Economics*, 88(2), 221-231. <https://ideas.repec.org/a/eee/deveco/v88y2009i>

[2p221-231.html](#)

NRE (Victorian Department of Natural Resources and Environment). (2000). Rapid appraisal method (RAM) for floodplain management. *Document de travail*, Victoria, Melbourne, Australia. Extrait de : <https://catalogue.nla.gov.au>

NRM (Department of Natural resources and Mines). (2002). Guidance on the assessment of the tangible flood damages. *Document de travail*, Queensland, Australia.

OCDE. (2011). Future Global Shocks, Improving Risk Governance.. *Etude de l'OCDE sur la Gestion des Risques*, OCDE. doi : [10.1787/9789264114586-en](https://doi.org/10.1787/9789264114586-en)

OCDE. (2014). Étude de l'OCDE sur la gestion des risques d'inondation : la Seine en Île-de-France. *OCDE*, 1-220. doi : <https://dx.doi.org/10.1787/9789264207929-fr>

Odjo H. et Ritz V. (2006). Étude de risque pour un portefeuille d'assurance récolte, Groupama, *28th International Congress of Actuaries*. Extrait de : <https://www.actuaries.org/EVENTS/Congresses/Paris/Papers/354.pdf>

Okuyama, Y., Hewings, G.J.D and Sonis, M. (1999). Economic impacts of an unscheduled, disruptive event : a Miyazawa multiplier analysis. Hewings, G.J.D, Sonis, M., Madden, M. and Kimura, Y. (Eds.), *Understanding and Interpreting Economic Structure* (pp. 113-144). [https://doi.org/10.1007/978-3-662-03947-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-03947-2_6)

Okuyama, Y. et Chang, S.E. (2004). Introduction. Okuyama, Y. et Chang, S.E. (Eds.), *Modeling Spatial and Economic Impacts of Disasters* (pp. 1-10). doi : [10.1007/978-3-540-24787-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-24787-6)

Okuyama, Y. (2006). Sequential interindustry model and inventory function : sensitivity analysis. *2006 Intermediate Input-Output Meetings on Sustainability, Trade and Productivity*, Sendai, Japan.

Okuyama Y. (2017). Sequential Interindustry Model and Inventory Function : Sensitivity Analysis, *Journal of Social System Studies* (15), 1-22.

Oosterhaven, J. (1988). On the plausibility of the supply-driven input-output model. *Journal of Regional Science*

Oosterhaven, J. (1989). The supply-driven input-output model : a new interpretation but still implausible. *Journal of Regional Science*

Pelling, M., Özerdem, A., Barakat, S. (2002). The macro-economic impact of disasters, *Progress in Development Studies*, 2(4), 283-305. <https://doi.org/10.1191/1464993402ps042ra>

Penning-Rowsell, E., Priest, S., Parker, D., Morris, J., Tunstall, S., Viavattene, C., Chatterton, J. et Owen, D. (2013). *Flood and Coastal Erosion Risk Management, A Manual for Economic Appraisal*. London, Routledge.

Petit, F. (2009). Concepts d'analyse de la vulnérabilité des infrastructures essentielles : Prise en compte de la cybernétique, *Thèse de doctorat, Département des génies civil, géologique et des mines, Ecole Polytechnique de Montréal, Université de Montréal, Montréal, 1-267.*

Perriez F., Cannard P., Babre S., Arnaud M., Laurain C., Prime J.-L., Martin G., Muller Feuga P. (2003). Les crues des 1er au 5 décembre 2003 dans les régions Auvergne, Bourgogne, Languedoc-Roussillon, Midi-Pyrénées, Provence-Alpes-Côte-d'Azur et Rhône-Alpes, premières estimations des dommages. *Rapport de l'Inspection Générale de l'environnement et de l'équipement*, 1-51. Extrait de : <https://www.ladocumentationfrancaise.fr>

Pflügner W. (2001). Hochwasserschadensdaten und Wasserstand-Schaden-Funktionen (unpublished).

Pfurtscheller, P., Lochner, B., et Thieken, A. H. (2011). Costs of Alpine Hazards. *CONHAZ Report*. Extrait de : <http://www.conhaz.org/>

Pivot, J.-M., et Martin, P. (2002). Farms adaptation to changes in flood risk : a management approach, *Journal of Hydrology*, 267(1-2), 12-25. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00136-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00136-1)

Poirée, M. et Ollier, C. (1973) *Assainissement agricole : drainage par tuyaux ou fossés, aménagement des cours d'eau et émissaires*. Paris : Eyrolles.

Posthumus, H. , Morris, J. , Hess, T. , Neville, D. , Phillips, E. et Baylis, A. (2009), Impacts of the summer 2007 floods on agriculture in England. *Journal of Flood Risk Management*, 2(182-189). doi : [10.1111/j.1753-318X.2009.01031.x](https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01031.x)

Poulin. M. (2012). *Analyse des solutions actuarielles en tarification des traités de réassurance non-proportionnels Non-Vie* (Mémoire d'actuariat), 1-170. Extrait de : <http://docplayer.fr/81106569-Memoire-d-actuariat-promotion-analyse-des-solutions-actuarielles-en-tarification-des-traites-de-reassurance-non-proportionnels-non-vie.html>

Raddatz, C. (2009). The Wrath of God : Macroeconomic Costs of Natural Disasters. *Policy Research Working Paper 5039*, The World Bank, Washington D.C. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/4307>

Ramirez, J., Adamowicz, W.L., Easter, K.W., and Graham-Tomasi, T. (1988). Ex Post Analysis of Flood Control : Benefit-Cost Analysis and the Value of Information, *Water Resources Research*, 24(8), 1397-1405. doi : [10.1029/WR024i008p01397](https://doi.org/10.1029/WR024i008p01397)

Ranger, N., Hallegatte, S., Bhattacharya, S., Bachu, M., Priya, S., Dhore, K., Rafique, F., Mathur, P., Naville, N., Henriot, F., Herweijer, C., Pohit, S., Corfee-Morlot, J. (2011). A preliminary assessment of the potential impact of climate change flood risk in Mumbai. *Climatic Change*, 104(1), 104-139. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9979-2>

Reese S. et Ramsey D. (2010). Riskscape : Flood fragility methodology. *Rapport de travail NZCCRI-2011-05 du National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd pour la Victoria University of Wellington*. Extrait de : <http://www.victoria.ac.nz/climat>

[e-change/reports](#)

Reghezza-Zitt M. (2006). Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine : la métropole parisienne face au risque de crue centennale. *Thèse de Doctorat, Géographie , Paris 10*, Paris. <http://theses.fr/2006PA100192#>

Reghezza-Zitt, M. (2012). *Paris coule-t-il ?*, Paris : Fayard, (pp. 1-96)

Robert, B., Sabourin, J.-P., Glaus, M., Petit, F., and Senay, M.-H. (2003). A new structural approach for the study of domino effects between life support networks. Kreimer, A., Arnold, M., and Carlin, A. (Eds.) *Building safer cities. The futur of disaster risk, Disaster risk management series*, The World Bank, Washington, D.C., 245-272.

Roca M., Bast H., Panzeri M., Hess T. M., Sayers P., Flikweert J., Ogunyoye F., et Young R. (2011). Developing the evidence base to describe the flood risk to agricultural land in England and Wales, R & D Technical Report FD2634/TR, DE-FRA. Extrait de : [http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=10678\\_FD2634\\_Technical\\_Report\\_final\\_v1\\_2.pdf](http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=10678_FD2634_Technical_Report_final_v1_2.pdf)

Romanoff, E., et Levine S.H. (1991). Technical Change and Regional Development : Some Further Developments with the Sequential Interindustry Model. Boyce, D.E., Nijkamp, P. et Shafer, D. (Eds.) *Regional Science : Retrospect and Prospect* (pp. 251-275). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-76311-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-642-76311-3_11)

Rose, A. (1981) Utility lifelines and economic activity in the context of earthquakes. Isenberg, J. (Eds.), *Social and Economic Impacts of Earthquake on Utility Lifelines* (pp. 107-120)

Rose, A., Benavides, J., Chang, S.E., Szczesniak, P., et Lim, D. (1997) The regional economic impact of an earthquake : direct and indirect effects of electricity lifeline disruptions. *Journal of Regional Science*, 37(3), 437-458. doi : [10.1111/0022-4146.00063](https://doi.org/10.1111/0022-4146.00063)

Rose, A. et Benavides, J. (1998) Regional economic impacts. Masanobu Shinozuka, M., Rose, A., Eguchi, R.T. (Eds.), *Engineering and Socioeconomic Impacts of Earquakes : an analysis of electricity lifeline disruptions in the New Madrid area*. NCEER, Buffalo.

Rose, A. et Guha, G. (1999). Computable General Equilibrium Modeling of Electric Utility Lifeline Losses from Earthquakes. *The North American Meetings of the Regional Science Association International*, Montréal, Québec, Canada.

Rose, A. et Liao, S. (2002). Modeling Regional Economic Resiliency to Earthquakes : A Computable General Equilibrium Analysis of Water Service Disruptions. *7th National Conference on Earthquake Engineering*, Oakland, Californie, Etats-Unis.

Rose, A. and Guha, G.S. (2004). Computable general equilibrium modeling of electric utility lifeline losses from earthquakes. Okuyama, Y., Chang, S. (Eds.), *Modeling Spatial and Economic Impacts of Disasters* (pp. 119-141). doi : [10.1007/978-3-540-24787-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-24787-6)

Rose, A. et Liao S.Y. (2005). Modeling Regional Economic Resilience to Disasters : A Computable General Equilibrium Analysis of Water Service Disruptions, *Journal of*

*Regional Science*, 45, 75-112. doi : [10.1111/j.0022-4146.2005.00365.x](https://doi.org/10.1111/j.0022-4146.2005.00365.x)

Rose, A. (2005). Analyzing Terrorist Threats to the Economy : A Computable General Equilibrium Approach. Richardson H. W., Gordon P. et Moore J.E. (Eds.) *The Economic Impacts of Terrorist Attacks*, Edward Elgar Publishing, number 3783, chapitre 11

Rose, A., Oladosu, G. et Liao, S.Y. (2007). Business Interruption Impacts of a Terrorist Attack on the Electric Power System of Los Angeles : Customer Resilience to a Total Blackout, *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*, 27, 513-31. doi : [10.1111/j.1539-6924.2007.00912.x](https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2007.00912.x)

Rose, Adam. (2009). A Framework for Analyzing the Total Economic Impacts of Terrorist Attacks and Natural Disasters, *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 6. doi : [10.2202/1547-7355.1399](https://doi.org/10.2202/1547-7355.1399)

Rostum, J., November, V., Vatn, J. (2008). *cost c19 - Proactive Crisis Management of Urban Infrastructure*, Brussels, cost (European Cooperation in Science and Technology) Office. Extrait de : <https://www.cost.eu/actions/C19/#tabs|Name:overview>

Sauzey P., Monadier P., Renoux J.-P., Robert de Saint Vincent E., Lefrou C., Verrel J.-L., Hornus H. (2001). Rapport de la mission d'expertise sur les crues d'avril 2001 du bassin de la Somme. *Rapport de l'Inspection Générale de l'environnement et de l'équipement*, 1-79. Extrait de : <https://www.ladocumentationfrancaise.fr>

Schanze, J., Schwarze, R., Cartensen, D., and Deilmann, C. (2008). *Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability - Analyzing and Managing Uncertain Futures of Large-Scale Fluvial Flood Risk Systems : Proceedings of the 4th International Symposium on Flood Defence, 2008*. Toronto, Canada.

Shu C., Xia J., Falconer R. A. Lin B. (2011). Estimation of incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters. *Journal of hydraulic research*, 49(6), 709-717. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.616318>

Skidmore, M. and Toya, H. (2002). Do natural disasters promote long-run growth? *Economic Inquiry*, 40(4), 664-687. <https://doi.org/10.1093/ei/40.4.664>

Smith, D.I. (1981). Actual and potential flood damage : a case study for urban Lismore, NSW, Australia. *Applied Geography*, 1(1), 31-39. [https://doi.org/10.1016/0143-6228\(81\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0143-6228(81)90004-7)

Smith K. et Ward R. (1998). Floods : physical processes and human impacts. *John Wiley, Chichester*, 1-382. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199912\)24:13<1261::AID-ESP22>3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199912)24:13<1261::AID-ESP22>3.0.CO;2-%23)

Sohn, J., Hewings, G.J.D., Kim, T.J., Lee, J.S. and Jang, S.G. (2004). Analysis of economic impacts of earthquake on transportation network. Okuyama, Y. et Chang, S.E. (Eds.), *Modeling Spatial and Economic Impacts of Disasters* (pp. 233-256) doi : [10.1007/978-3-540-24787-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-24787-6)

Steinback, S.R. (2004). Using ready-made regional input-output models to estimate

backward-linkage effects of exogenous output shocks. *The Review of Regional Studies*, 34(1), 57-71. ISSN 1553-0892

Tapia-Silva, F.O., Itzerott, S., Foerster, S., Kuhlmann, B., et Kreibich, H. (2011). Estimation of flood losses to agricultural crops using remote sensing. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(7-8), 253,265. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.03.005>

Thieken, A. H., Ackermann, V., Elmer, F., Kreibich, H., Kuhlmann, B., Kunert, U., Maiwald, H., Merz, B., Müller, M., Piroth, K., Schwarz, J., Schwarze, R., Seifert, I. et Seifert, J. (2008). Methods for the evaluation of direct and indirect flood losses. *4th International Symposium on Flood Defence : Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability, Toronto, Ontario, Canada*. Extrait de : [http://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:6063:12/component/escidoc:6064/98\\_Thieken.pdf](http://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:6063:12/component/escidoc:6064/98_Thieken.pdf)

Thieken, A. H., Olschewski, A., Kreibich, H., Kobsch, S., et Merz, B. (2008) Development and evaluation of FLEMOps? a new Flood Loss Estimation Model for the private sector. Proverbs, D., Brebbia, C. A., Penning-Rowsell, E. (Eds.) *Flood Recovery, Innovation and Response*, WIT Press, 315-324. doi : [10.2495/FRIAR080301](https://doi.org/10.2495/FRIAR080301)

Thieken, A. H., Bessel, T., Kienzler, S., Kreibich, H., Müller, M., Pisi, S., et Schröter, K. (2016). The flood of June 2013 in Germany : how much do we know about its impacts? *Natural Hazards and Earth System Science*, 16, 1519-1540. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1519-2016>

Tierney, K. (1997). Impacts of Recent Disasters on Businesses : The 1993 Midwest Floods and the 1994 Northridge Earthquake. Jones B. (Eds.). *Economic Consequences of Earthquakes : Preparing for the Unexpected*, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY. <http://udspace.udel.edu/handle/19716/638>

Torterotot, J.P. (1993) Le coût des dommages dus aux inondations : Estimation et analyse des incertitudes. *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*. Extrait de : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00421862>

Twining, S., Procter, C., Wilson, L., Frost, A., Phillips, K., Turner, T., Tiffin, D., Emery, J., Walker, O., Welch, S., et Wells, A. (2009). Impacts of 2007 Summer Floods on Agriculture in England, *Flood risk management*, 2(3), 182-189. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01031.x>

United States Army Corps of Engineers, AGDAM. (1985). Agricultural Flood Damage Analysis - User's Manual, Computer Program Documentation CPD, *US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC)*. Extrait de : [https://www.hec.usace.army.mil/publications/ComputerProgramDocumentation/AGDAM\\_UsersManual\\_\(CPD-48\).pdf](https://www.hec.usace.army.mil/publications/ComputerProgramDocumentation/AGDAM_UsersManual_(CPD-48).pdf)

United States Army Corps of Engineers. (2005). Memorandum for Planning Community of Practice - Economic Guidance Memorandum, 09-04. Generic Depth-Damage Relationships for Vehicles, *Department of the Army, US Army Corps of Engineers : Washington, D.C.*

United States Department of Agriculture. (1978). Economics - Basic Data for Evaluating Floodwater Damages to Crops and Pastures in the Northeast, *NETSC TECHNICAL NOTE - WATERSHEDS-16 (Rev. 2)*. Extrait de : [https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA\\_NRCSCconsumption/download?cid=nrcseprd410815etext=pdf](https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA_NRCSCconsumption/download?cid=nrcseprd410815etext=pdf)

Van der Veen, A., and Logtmeijer, C. (2003). How vulnerable are we for flooding? A GIS approach. Van der Veen, A., Arellano, A.L.V. et Nordvik, J.P. (Eds.) *In Search of a Common Methodology on Damage Estimation*, (pp. 181-193).

Vegni M. (2011). *Modélisation du coût des sinistres extrêmes en assurance automobile (Mémoire d'actuariat)*, 1-87. Extrait de : <http://www.ressources-actuarielles.net/EXT/ISFA/1226-02.nsf/0/8f8686d23a966c1cc1257a3e003ff478/\protect\T1\textdollarFILE/Memoire%20&%20Resume%20VEGNI%20Marianne.002.pdf>  
[/Memoire%20&%20Resume%20VEGNI%20Marianne.pdf](http://www.ressources-actuarielles.net/EXT/ISFA/1226-02.nsf/0/8f8686d23a966c1cc1257a3e003ff478/\protect\T1\textdollarFILE/Memoire%20&%20Resume%20VEGNI%20Marianne.pdf)

Vilier, J., Kok, M. et Nicolai, R.P. (2014). Assessment of the losses due to business interruption caused by large-scale floods. *Proceedings of the 22nd European Safety and Reliability Conference "Safety, Reliability and Risk Analysis : Beyond the Horizon"*, Amsterdam, The Netherlands. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:b8812922-05e0-4720-ab2d-19707b1f98fe>

Vinet, F. (2003). Crues et inondations dans la France méditerranéenne. Les crues torrentielles des 12 et 13 novembre 1999 (Aude, Tarn, Pyrénées-Orientales, Hérault), *Géographie des risques, géographie, Q.d., Editions du temps*, Nantes.

Vis, M., Klijn, F., De Bruijn, K. M., Van Buuren, M. (2003). Resilience strategies for flood risk management in the Netherlands, *International Journal of River Basin Management*, 1(1), 33-40. <https://doi.org/10.1080/15715124.2003.9635190>

White, G.F. (1945). Human Adjustment to Floods : a geographical project to the flood problem in the United States. Department of Geography, Chicago, IL : The University of Chicago, *Research Paper 29*.

Wilson, R. (1982). Earthquake vulnerability analysis for economic impact assessment, Information Resources Management Office, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Wu, J., Li, N., Hallegatte, S., Shi, P., Hu, A. (2011). A preliminary assessment of indirect economic losses from the Wenchuan earthquake in Sichuan province, China, *Environmental Earth Sciences*, 65, 161-172. DOI : [10.1007/s12665-011-1078-9](https://doi.org/10.1007/s12665-011-1078-9)

Xia J., Falconer R. A., Xiao X., Shu C. (2014). Criterion of vehicle stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies. *Natural Hazards*, 70(2), 1619-1630. doi : [10.1007/s11069-013-0889-2](https://doi.org/10.1007/s11069-013-0889-2)

Xia J., Teo F. Y., Lin B., Falconer R. A. (2011). Formula of incipient velocity for flooded vehicles, *Natural Hazards*, 58, 1-14. doi : [10.1007/s11069-010-9639-x](https://doi.org/10.1007/s11069-010-9639-x)

Yamano, N., Kajitani, Y., and Shumuta, Y. (2007) Modeling the regional economic loss

of natural disasters : the search for economic hotspots. *Economic Systems Research*, 19(2), 163-181, Routledge. doi : [10.1080/09535310701330191](https://doi.org/10.1080/09535310701330191)

## Liste des tableaux

## LISTE DES FIGURES



# ANNEXES

# A



## A.1 DESCRIPTION DU MODÈLE SOUS MATLAB

L'objectif de cette méthode de construction du modèle de pertes agricoles sous Matlab est de rendre les fonctions les plus indépendantes les unes des autres afin de fournir à CCR le modèle le plus robuste et le plus facilement modulable. On obtient ainsi le modèle suivant :

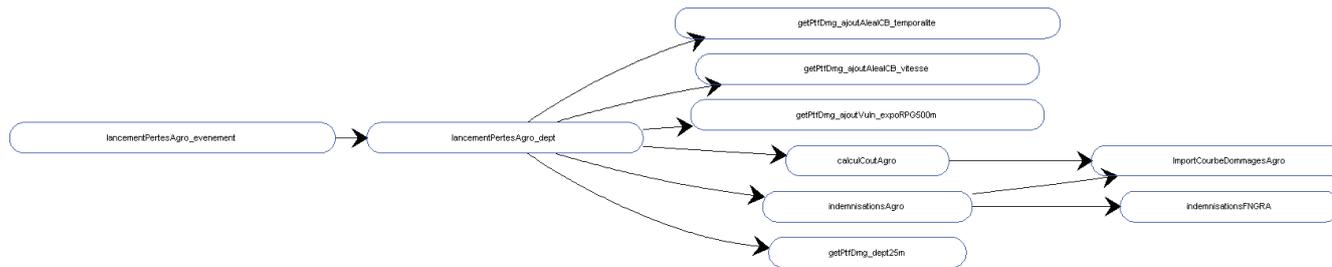


FIGURE A.1 – Schéma descriptif du modèle sous Matlab

### **lancementPertesAgro\_evenement**

Cette fonction lance le modèle sur l'événement étudié pour une culture spécifique. Elle récupère la liste des départements touchés par l'événement, boucle le modèle sur chaque département et agrège les résultats.

### **lancementPertesAgro\_dept**

Cette fonction initialise tout d'abord les valeurs de calibrage de l'aléa, à savoir :

- le calibrage de la vitesse de ruissellement : seuil sous lequel on considère qu'il n'y a pas de ruissellement ;
- le calibrage de la hauteur d'eau de ruissellement : seuil sous lequel on considère qu'il n'y a pas de ruissellement ;
- le calibrage de la hauteur d'eau de débordement : seuil sous lequel on considère qu'il n'y a pas de débordement ;
- les seuils permettant la classification de la vitesse de courant :
  - valeur qualitative de la vitesse du courant, passage de la classe 1 de courant à la classe 2 ;
  - valeur qualitative de la vitesse du courant, passage de la classe 2 de courant à la classe 3 ;
  - sur les mailles de débordement, le modèle ne fait pas d'estimation du débit à partir duquel la vitesse de courant est estimée, on impose donc une classe de vitesse de courant en zone de débordement.

Elle lance ensuite le modèle via les fonctions :

- `getPtfDmg_dept25m`,
- `getPtfDmg_ajoutAleaICB_vitesse`,
- `getPtfDmg_ajoutAleaICB_temporalite`,
- `getPtfDmg_ajoutVuln_expoRPG500m`,

- calculCoutAgro,
- indemnisationsAgro.

### **getPtfDmg\_dept25m**

Cette fonction initialise le portefeuille sur lequel le modèle va s'appliquer. Elle transforme la zone d'étude en une grille et en ressort un tableau de trois colonnes (tPtf) contenant les informations les coordonnées géographiques du centroïde de chaque maille (X,Y) et l'aire de la maille.

### **getPtfDmg\_ajoutAleaICB\_vitesse**

Cette fonction prend en input le tableau tPtf généré par la fonction getPtfDmg\_dept25m. Elle récupère les données d'aléas (les hauteurs de ruissellement, débits ruissellement, hauteurs de débordement), estime la vitesses de courant de ruissellement et applique les valeurs de calibrage de l'aléa. Elle associe ensuite à chaque maille de la grille définie dans la fonction getPtfDmg\_dept25m, ses informations d'aléa dans un format compatible avec l'utilisation des courbes de dommages.

Elle renvoie en output le tableau tPtf enrichi de 6 colonnes :

- deux colonnes de hauteur d'eau (en classe de hauteur d'eau par palier de 10cm) :
  - la hauteur d'eau "min";
  - la hauteur d'eau "max".
- la classe de vitesse de courant;
- un indicateur d'aléa (1 ou 0) sur la maille;
- un indicateur de débordement uniquement (1 ou 0) sur la maille;
- un indicateur de ruissellement uniquement (1 ou 0) sur la maille.

### **getPtfDmg\_ajoutAleaICB\_temporalite**

Cette fonction prend en input le tableau tPtf généré par la fonction getPtfDmg\_dept25m. A partir de l'information de l'événement étudié, cette fonction récupère la date de survenance et elle renvoie en output le tableau tPtf enrichi de 2 colonnes :

- la semaine de l'événement;
- la durée de l'événement.

### **getPtfDmg\_ajoutVuln\_expoRPG500m**

Cette fonction prend en input le tableau tPtf généré par la fonction getPtfDmg\_dept25m.

Elle importe les informations du RPG du département. Elle ne conserve que l'information de la surface de la maille d'exposition couverte par la culture étudiée puis met les données au format compatible avec le modèle. On obtient alors ici une grille de mailles de taille 500m\*500m.

A partir des coordonnées (X,Y) du portefeuille (tPtf), elle associe à chaque maille du portefeuille les informations d'exposition de la maille où elle se géolocalise. Elle renvoie donc en output le tableau tPtf enrichi de 3 colonnes :

- l’ID de chaque maille d’exposition du RPG dans laquelle la maille du portefeuille se géolocalise;
- la part de la maille occupée par la culture de chaque maille d’exposition du RPG d’origine;
- l’aire de chaque maille d’exposition du RPG d’origine.

### **calculCoutAgro**

Cette fonction prend en input le tableau tPtf après que celui-ci a été enrichi des informations d’aléa et de vulnérabilité de la culture étudiée.

A partir de ces informations, elle estime la surface de la culture impactée par de l’aléa et les pertes pour chaque poste. Pour cela, elle fait appel aux fonctions `CoutDommagesCulture`, `ImportCourbeDommagesAgro` et `CoutDommagesAgro`. Ces fonctions permettent l’import de la fonction de dommages correspondant à l’année, la région, la culture et au poste de pertes estimé puis elles associent un niveau de perte aux caractéristiques d’aléa, en effectuant une moyenne sur 5 semaines (2 semaines avant l’événement et 2 semaines après), afin de lisser les incertitudes relatives au calendrier cultural.

Au tableau tPtf enrichi des informations d’aléa et de vulnérabilité, elle ajoute en output 9 colonnes :

- la surface totale impactée par de l’aléa;
- la surface impactée par du débordement;
- la surface impactée par du ruissellement;
- les pertes de fonds en matériel végétal;
- les dommages au sol;
- les frais de replantation du matériel végétal;
- les pertes de rendement de l’année;
- les pertes de rendement différées;
- les pertes totales.

### **indemnisationsAgro**

Cette fonction prend en input le tableau tPtf fournit par la fonction `calculCoutAgro`.

Sur chaque maille, à partir des informations de pertes de récolte de l’année, la fonction applique les garanties d’assurance et le taux de diffusion de l’assurance de la culture pour obtenir, une fois le résultat agrégé, la part indemnisée des pertes de récolte de l’année via l’assurance. Ensuite, elle fait appel à la fonction `indemnisationsFNGRA` qui applique la grille d’indemnisation du FNGRA en fonction des cultures et des postes de pertes.

Au tableau tPtf enrichi des informations d’aléa, de vulnérabilité et de pertes, elle ajoute en output 6 colonnes :

- l’indemnisation de l’assurance pour les pertes de récolte de l’année;
- l’indemnisation versée par le FNGRA pour les pertes de récolte de l’année;
- l’indemnisation versée par le FNGRA pour les dommages au matériel végétal;
- l’indemnisation versée par le FNGRA pour les dommages au sol;
- le total de l’indemnisation versée par le FNGRA.

## Conclusion

Le schéma ci-dessous résume la démarche du modèle :

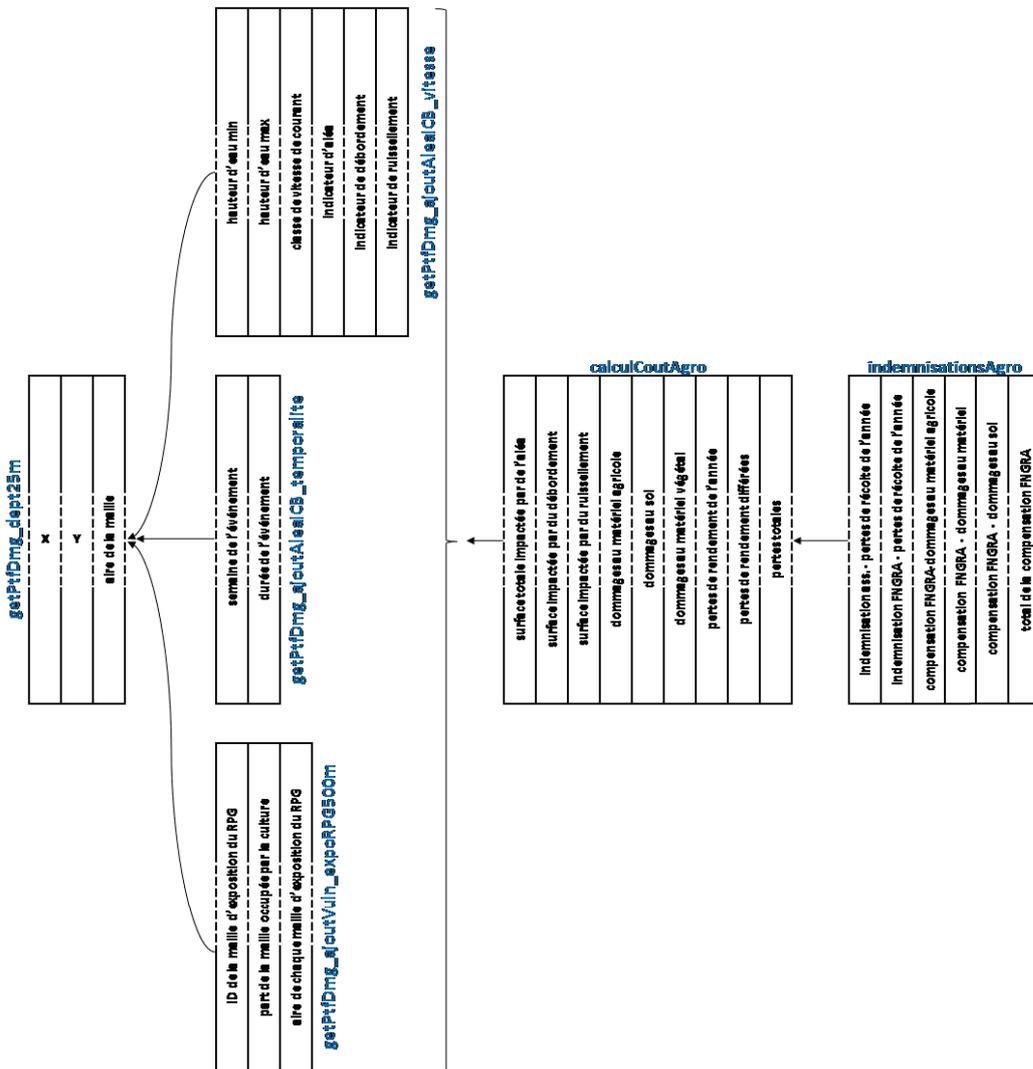


FIGURE A.2 – Schéma descriptif du fonctionnement du modèle sous Matlab

Enfin, ce modèle s'intègre dans le macro-modèle CCR de la façon suivante :

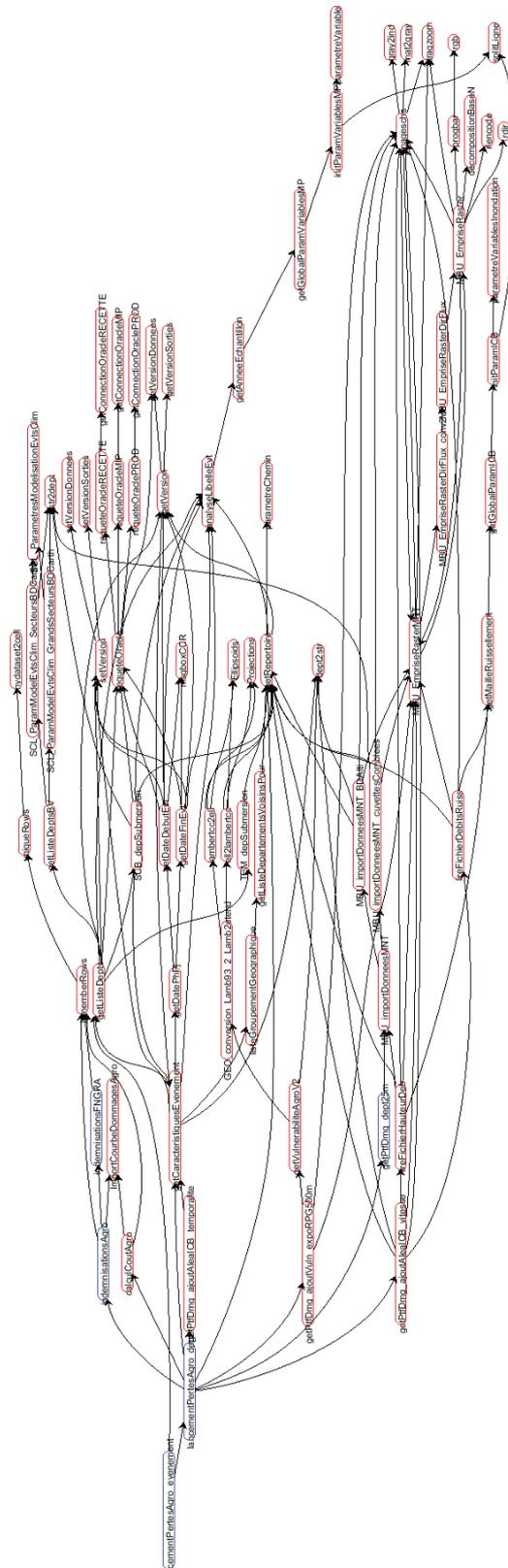


FIGURE A.3 – Schéma descriptif de la démarche du modèle sous Matlab

## A.2 SORTIES COMPLÈTES DU MODÈLE AGRO POUR LES ÉVÉNEMENTS DE RÉFÉRENCE

### A.2.1 Aude 1999

#### Pertes de récoltes et baisses de rendement sur l'année de l'événement

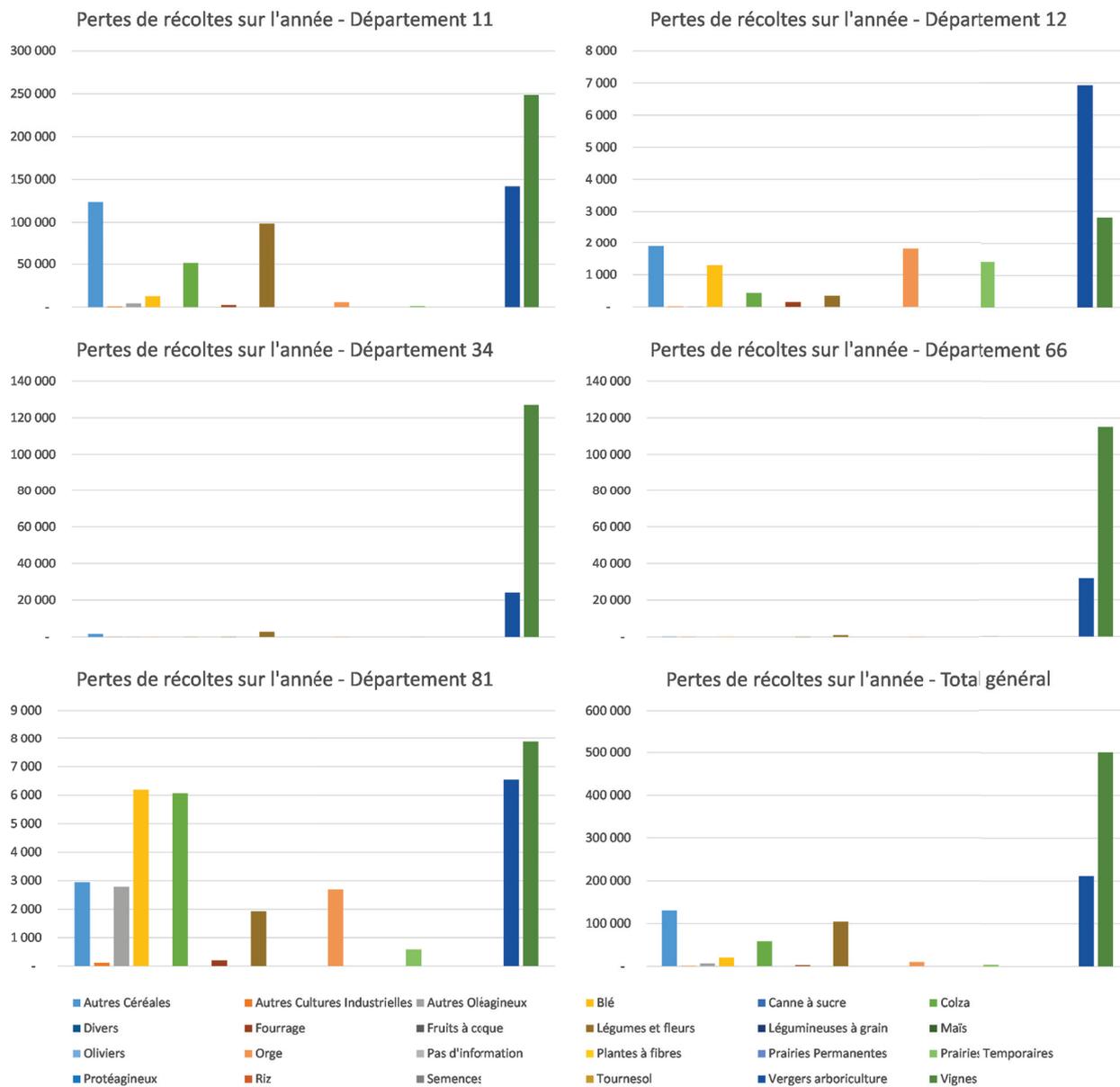


FIGURE A.4 – Résultats Aude 1999 - Pertes de récoltes

**Pertes de rendement différé**



FIGURE A.5 – Résultats Aude 1999 - Pertes de rendement différé

### Domages au Sol



FIGURE A.6 – Résultats Aude 1999 - Domages au Sol

### Dommmages au Matériel Végétal

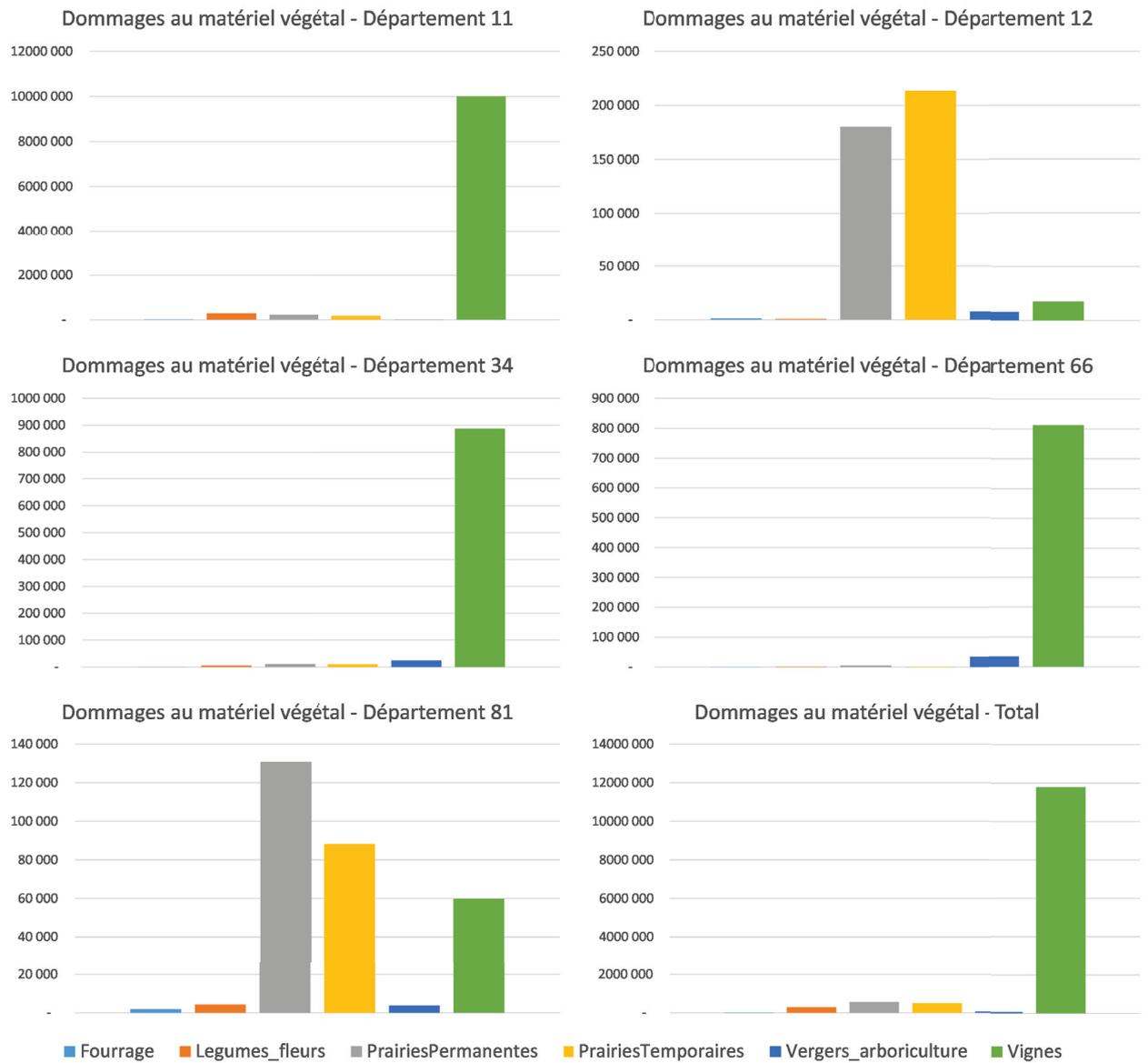


FIGURE A.7 – Résultats Aude 1999 - Dommages au Matériel Végétal

## Indemnisations FNGRA



FIGURE A.8 – Résultats Seine 2016 - Indemnisations FNGRA

### A.2.2 Bretagne 2000

#### Pertes de récoltes et baisses de rendement sur l'année de l'événement

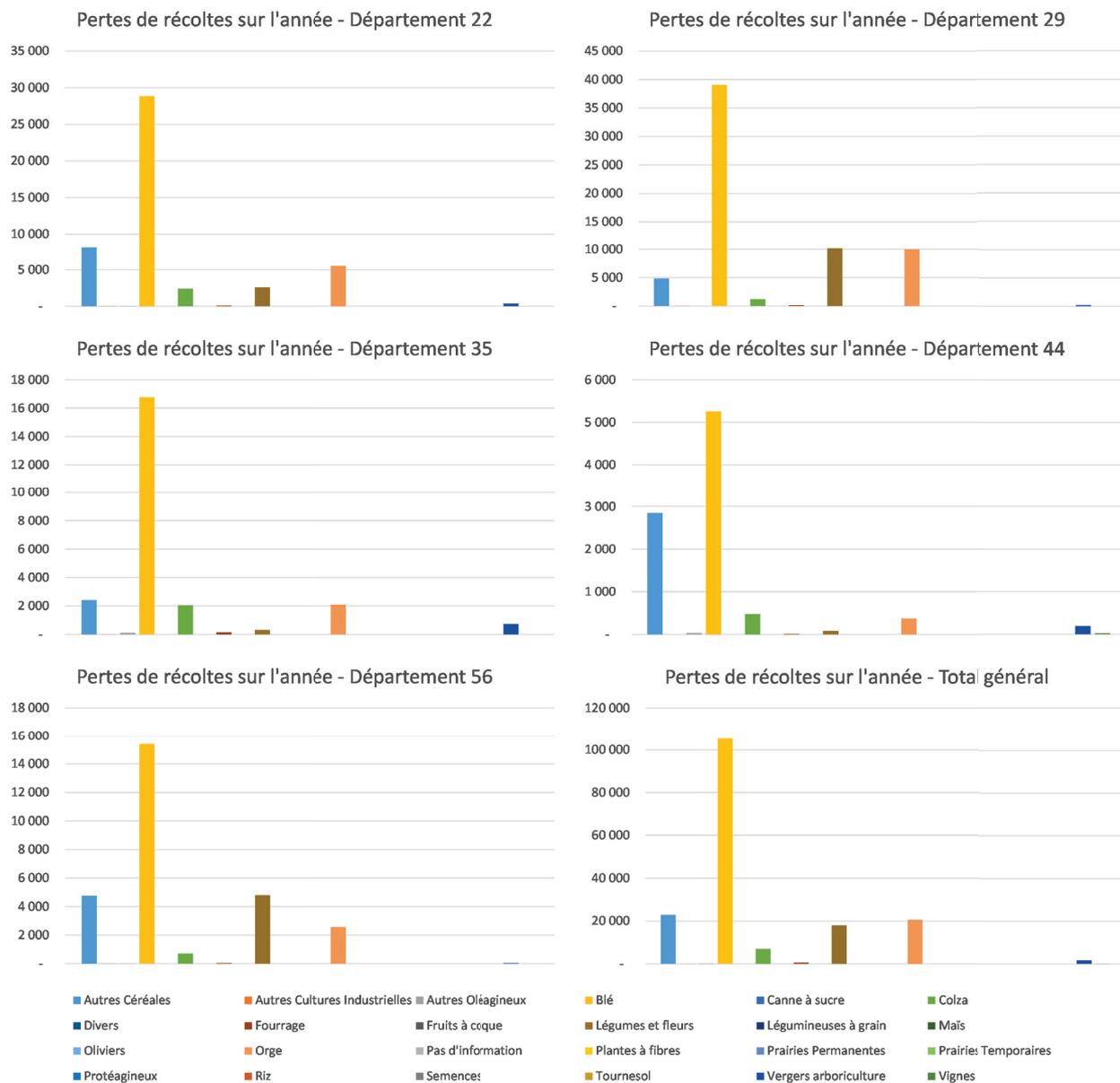


FIGURE A.9 – Résultats Bretagne 2000 - Pertes de récoltes

## Pertes de rendement différé

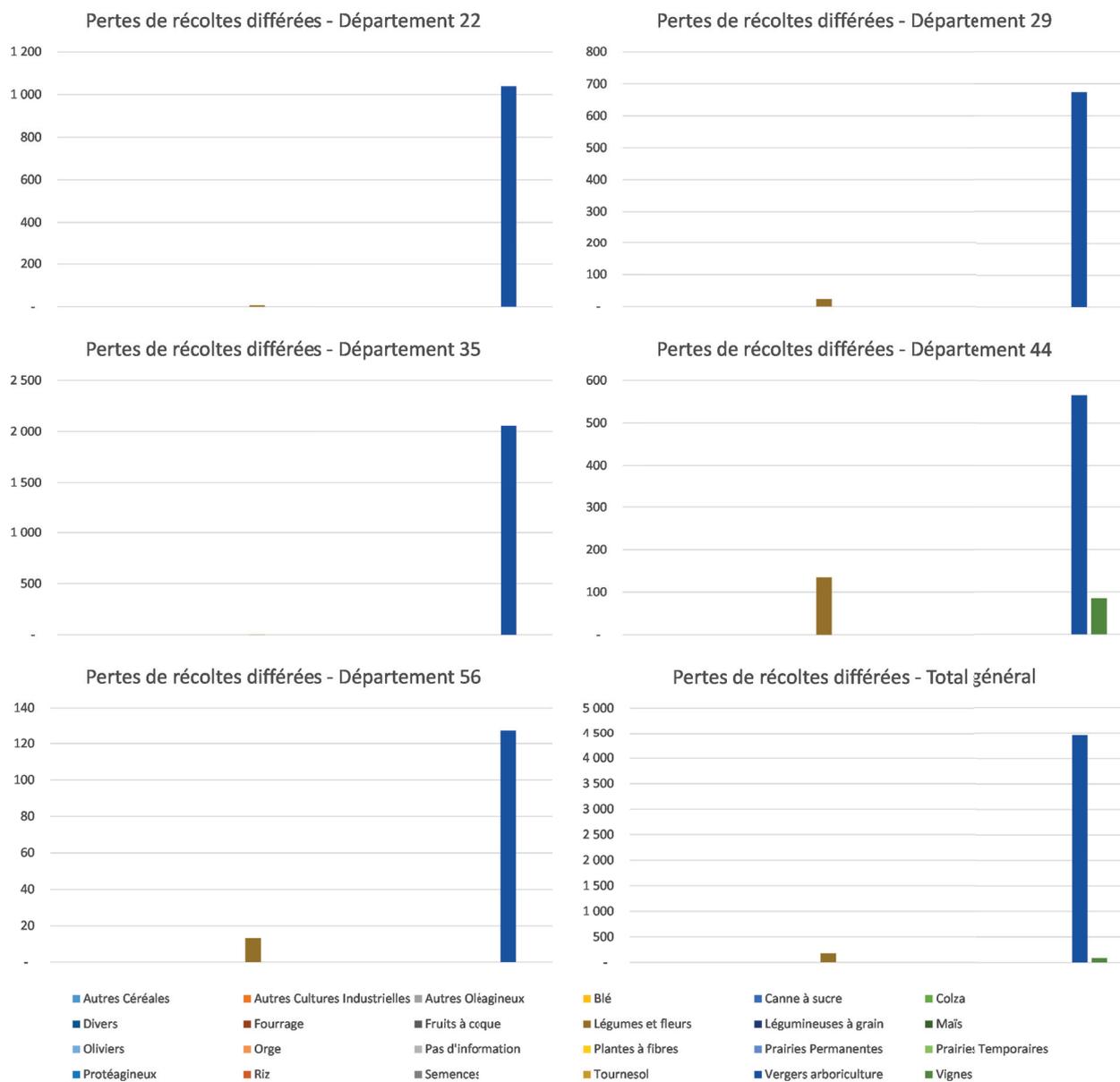


FIGURE A.10 – Résultats Bretagne 2000 - Pertes de rendement différé

### Dommmages au Sol

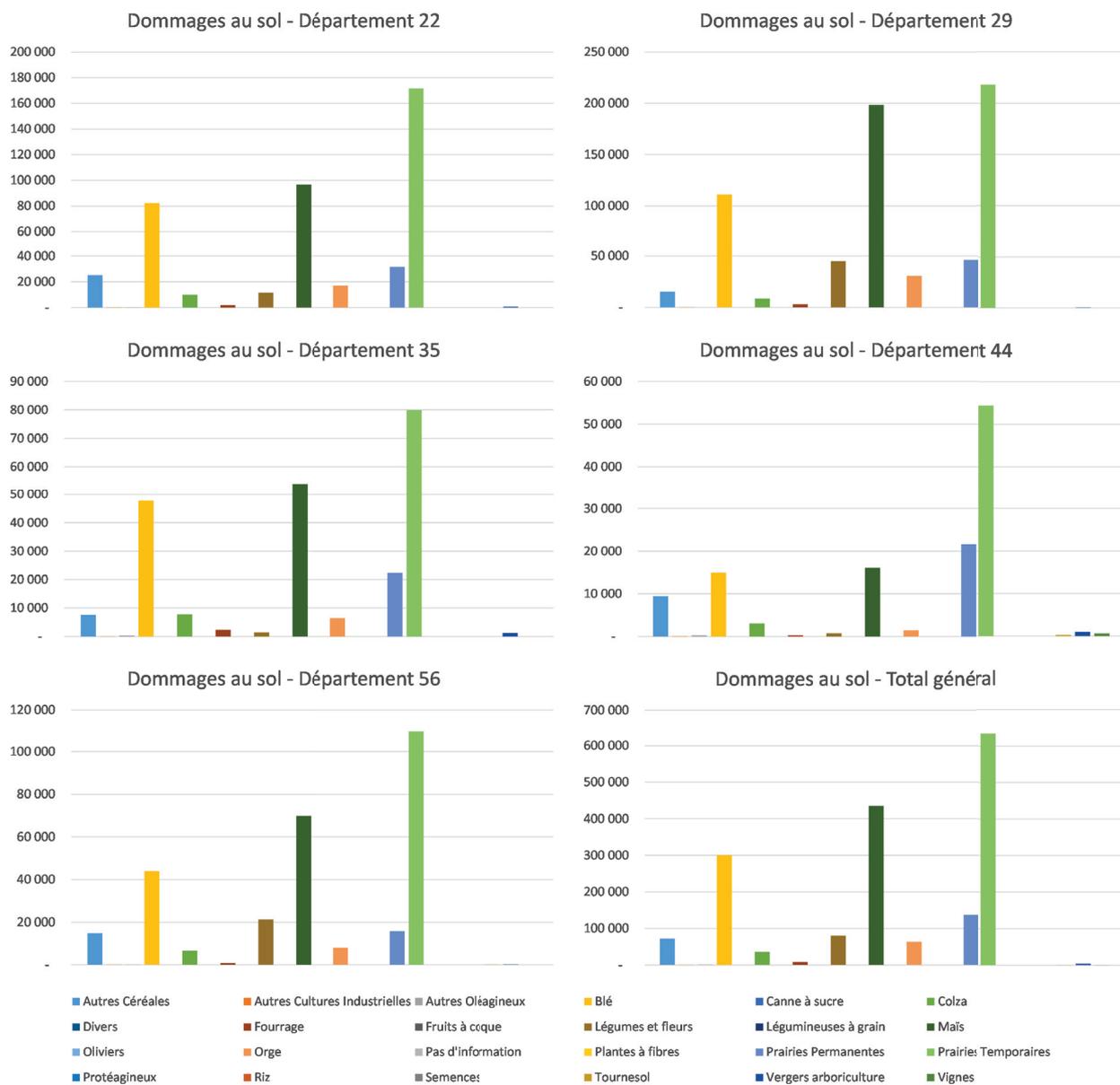


FIGURE A.11 – Résultats Bretagne 2000 - Dommages au Sol

## Dommmages au Matériel Végétal

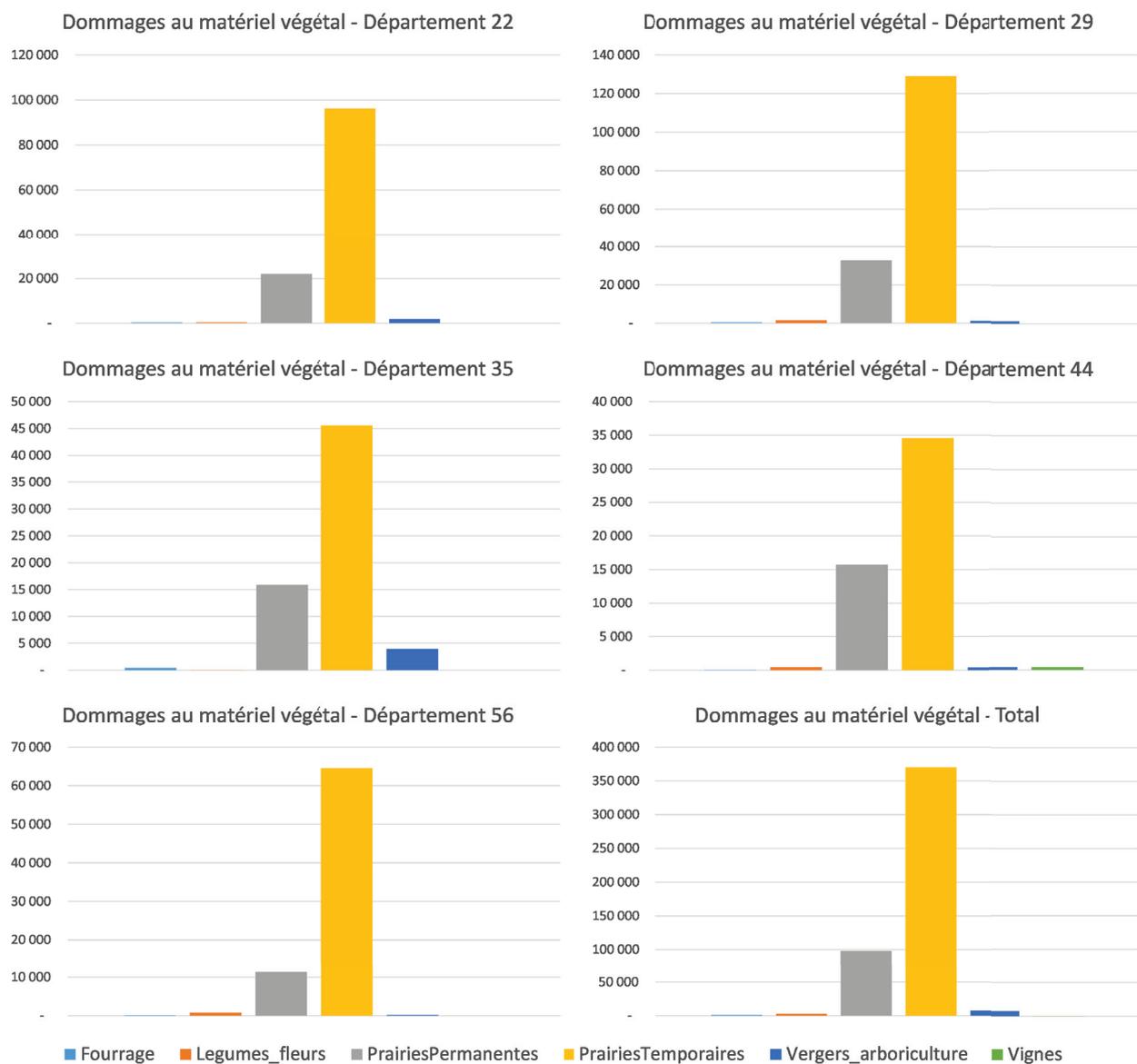


FIGURE A.12 – Résultats Bretagne 2000 - Dommages au Matériel Végétal

### Indemnisations FNGRA

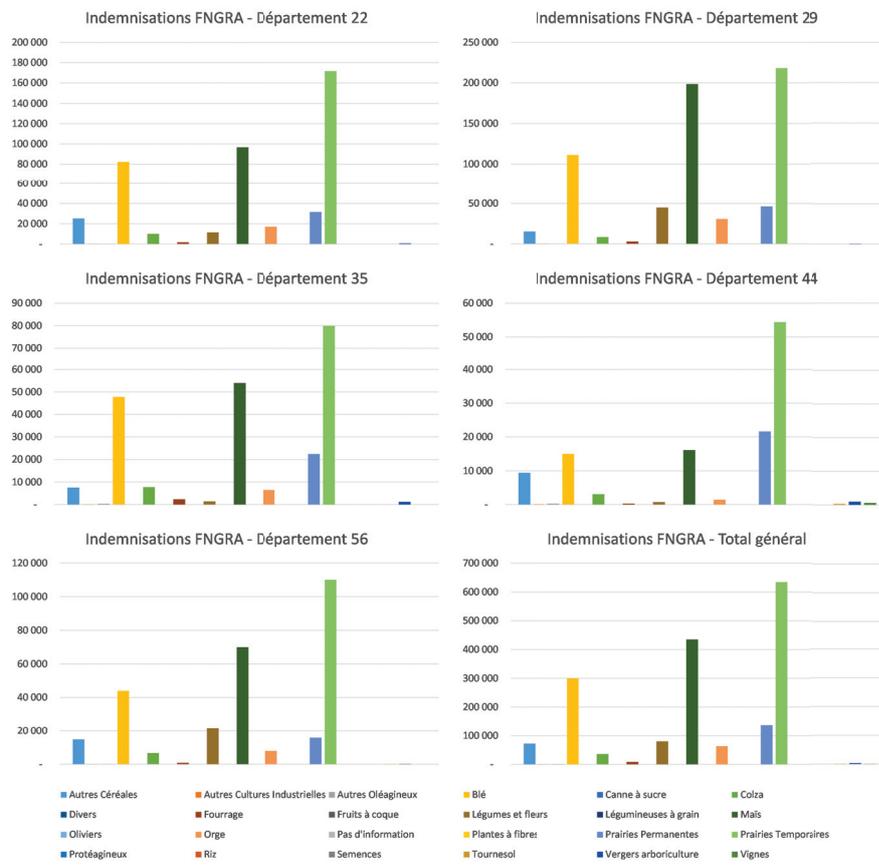


FIGURE A.13 – Résultats Seine 2016 - Indemnisations FNGRA

### A.2.3 Gard 2002

#### Pertes de récoltes et baisses de rendement sur l'année de l'événement



FIGURE A.14 – Résultats Gard 2002 - Pertes de récoltes

Pertes de rendement différé



FIGURE A.15 – Résultats Gard 2002 - Pertes de rendement différé

### Dommages au Sol

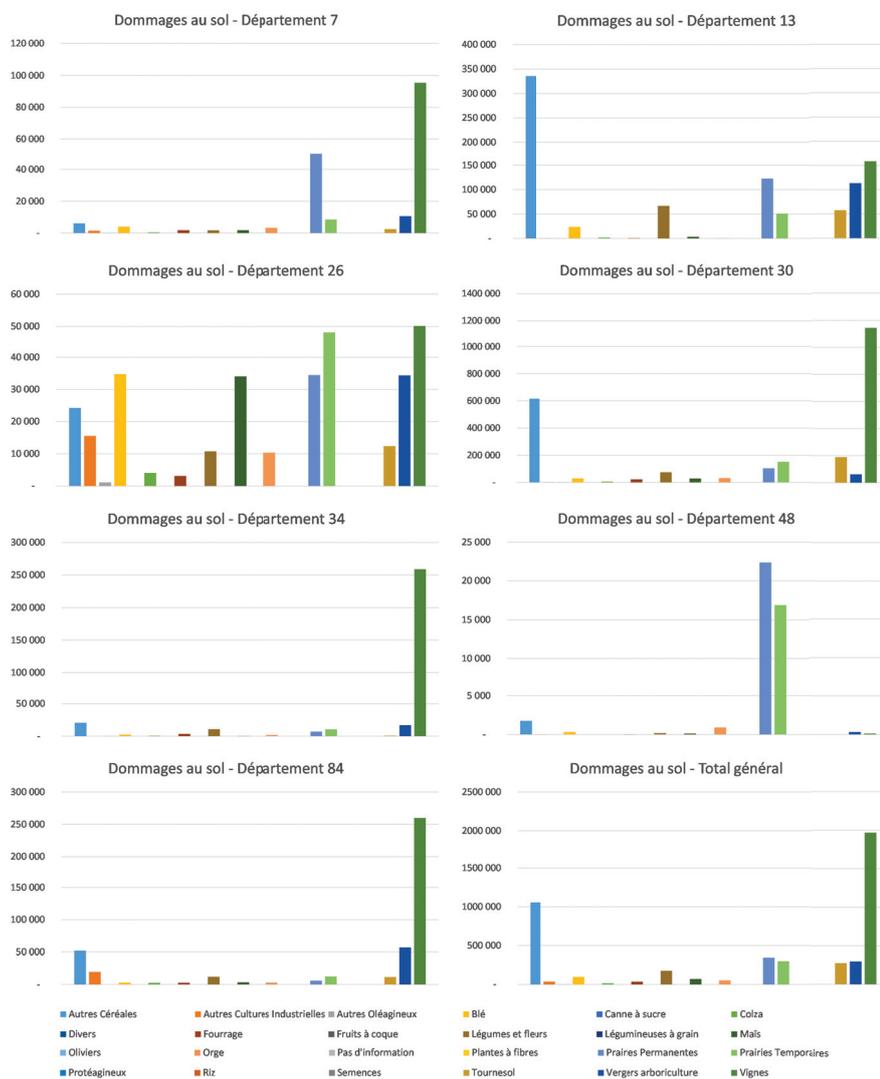


FIGURE A.16 – Résultats Gard 2002 - Dommages au Sol

### Dommmages au Matériel Végétal

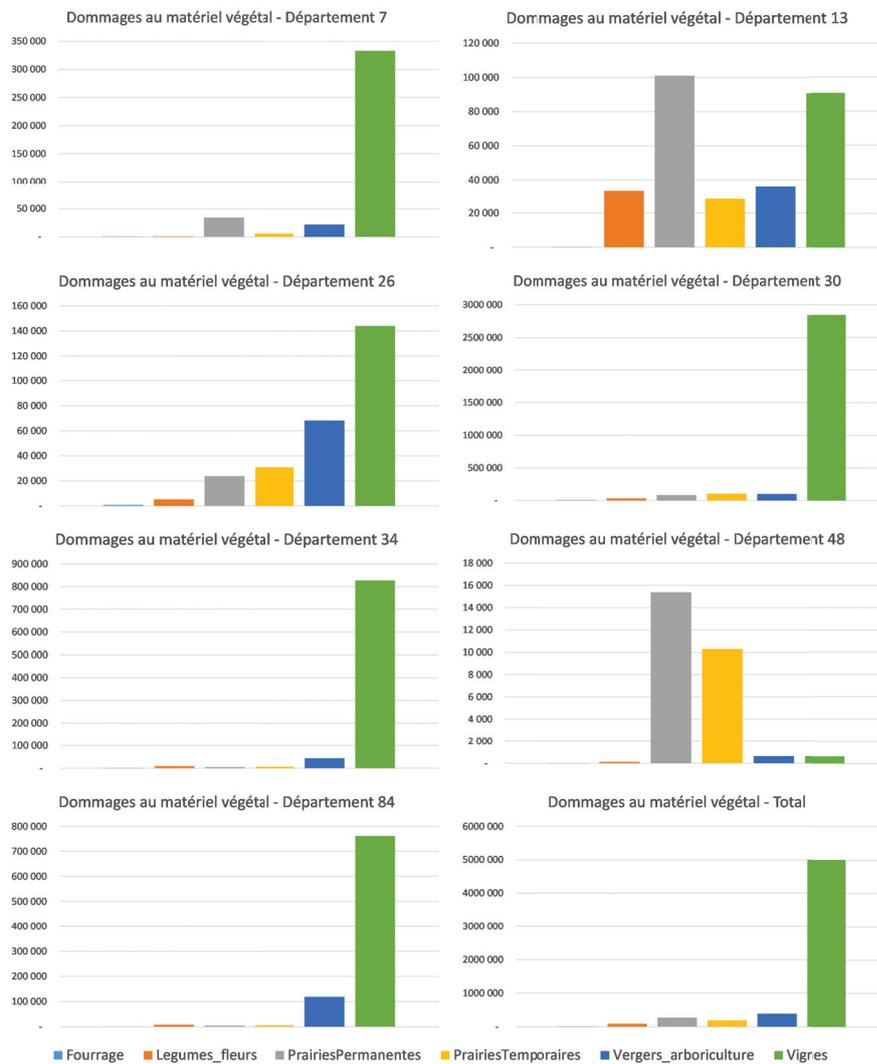


FIGURE A.17 – Résultats Gard 2002 - Dommages au Matériel Végétal

### Indemnisations FNGRA



FIGURE A.18 – Résultats Seine 2016 - Indemnisations FNGRA

A.2.4 Arles 2003

Pertes de récoltes et baisses de rendement sur l'année de l'événement



FIGURE A.19 – Résultats Arles 2003 - Pertes de récoltes





### Dommmages au Matériel Végétal

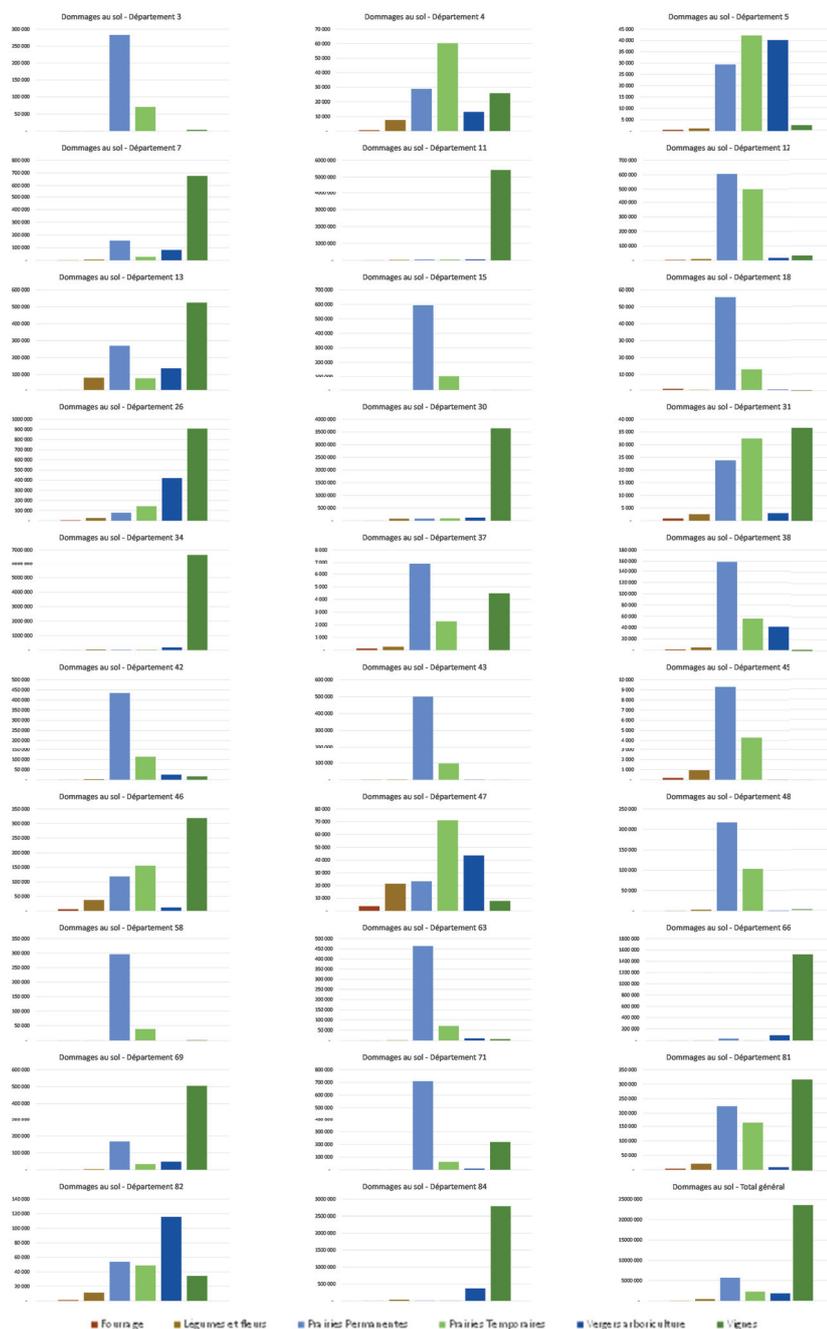


FIGURE A.22 – Résultats Arles 2003 - Dommmages au Matériel Végétal

### Indemnités FNGRA

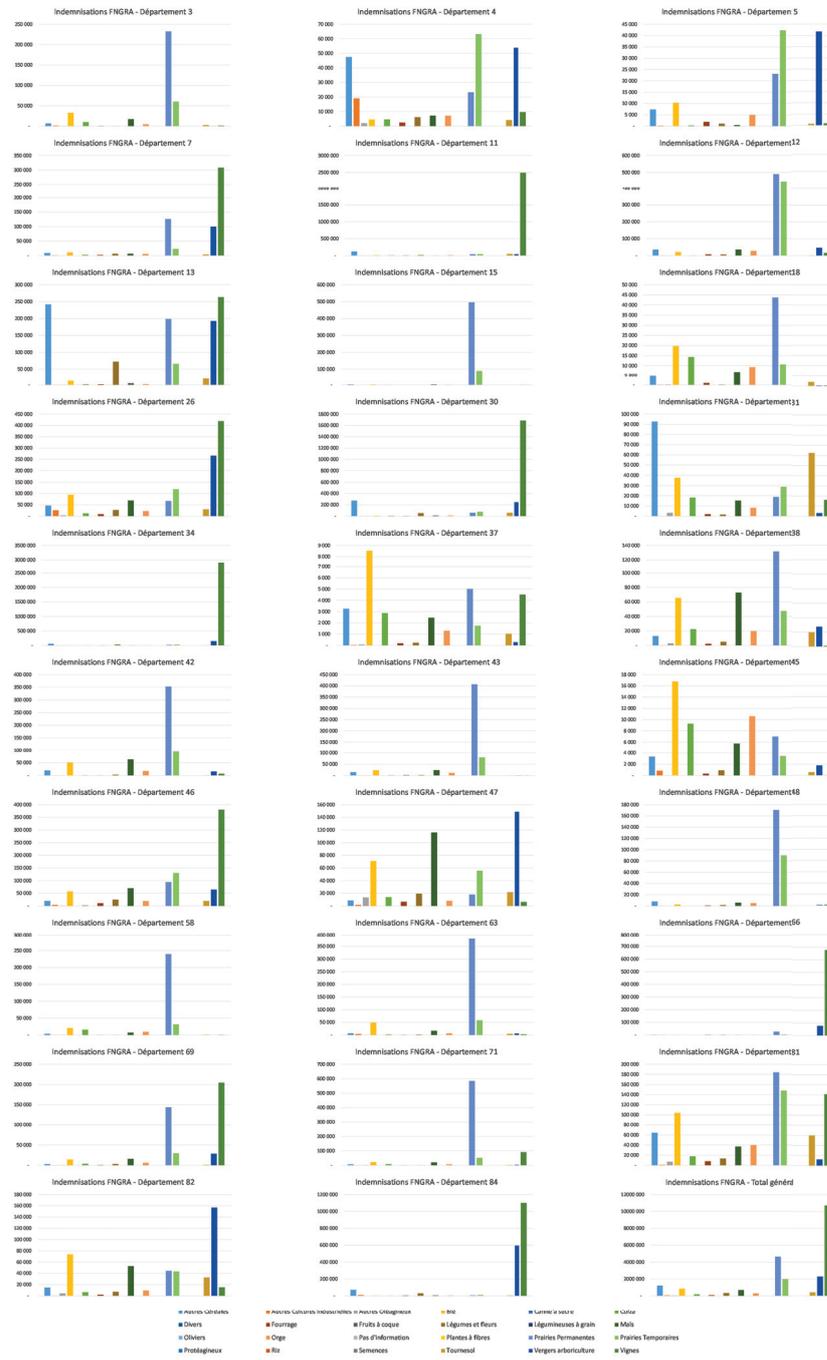


FIGURE A.23 – Résultats Seine 2016 - Indemnités FNGRA

### A.2.5 Seine 2016

#### Pertes de récoltes et baisses de rendement sur l'année de l'événement



FIGURE A.24 – Résultats Seine 2016 - Pertes de récoltes

Pertes de rendement différé

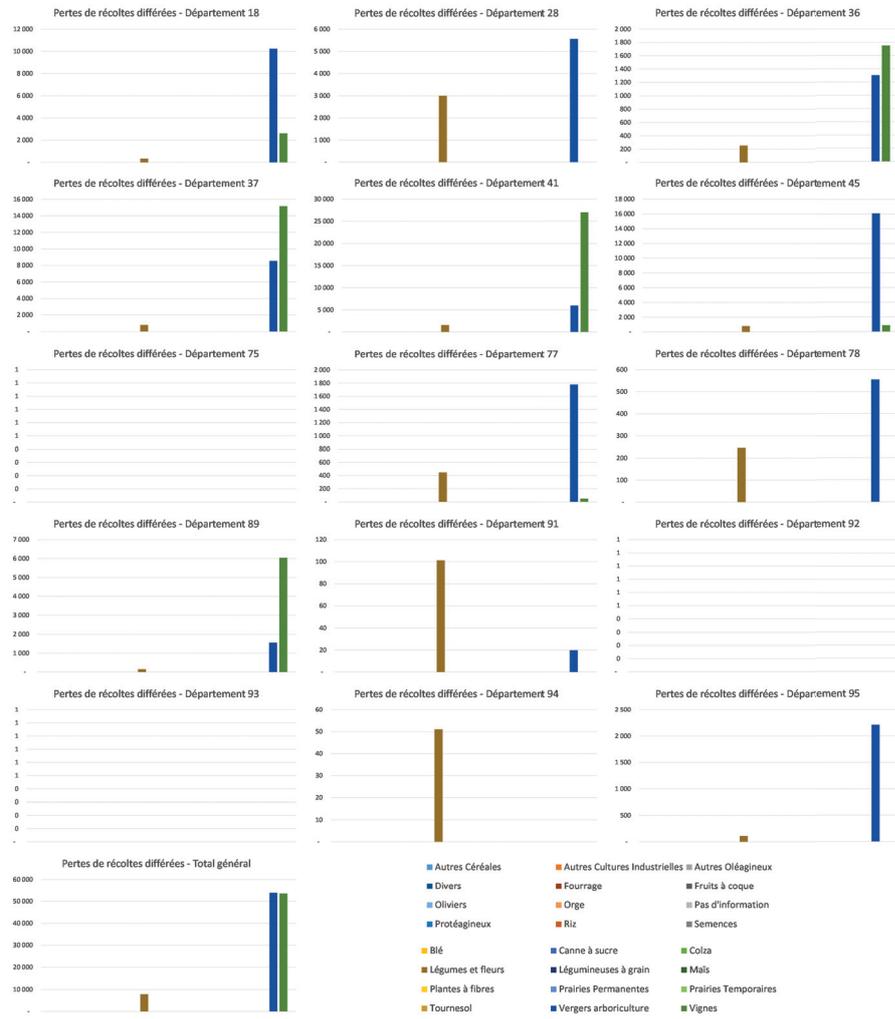


FIGURE A.25 – Résultats Seine 2016 - Pertes de rendement différé

### Dommmages au Sol



FIGURE A.26 – Résultats Seine 2016 - Dommages au Sol

### Dommmages au Matériel Végétal

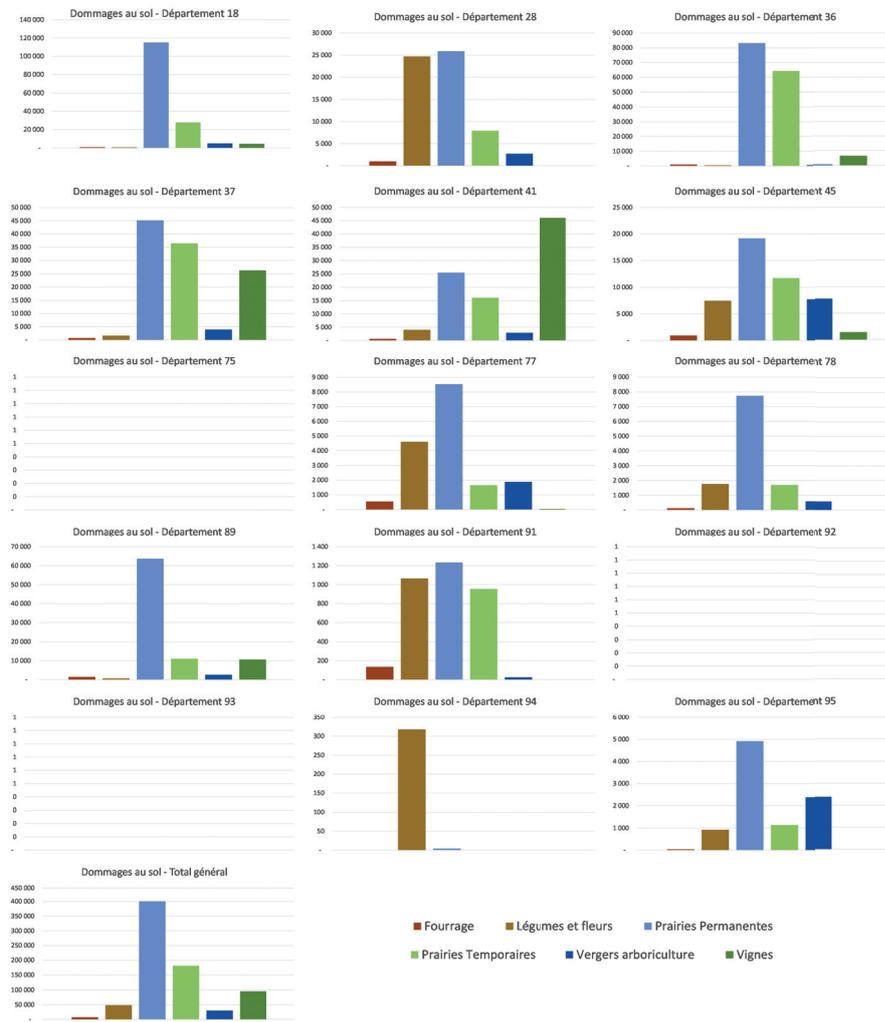


FIGURE A.27 – Résultats Seine 2016 - Dommages au Matériel Végétal

### Indemnisations FNGRA



FIGURE A.28 – Résultats Seine 2016 - Dommages Indemnisations FNGRA