Caractérisation et évaluation économique de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations

Pauline Bremond

▶ **To cite this version:**

Pauline Bremond. Caractérisation et évaluation économique de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations. Economies et finances. Université Montpellier I, 2011. Français. NNT : . tel-00656442v1

HAL Id: tel-00656442

https://theses.hal.science/tel-00656442v1

Submitted on 4 Jan 2012 (v1), last revised 5 Jan 2012 (v2)

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.

UNIVERSITÉ MONTPELLIER I

FACULTE D'ÉCONOMIE

École Doctorale Économie et Gestion de Montpellier

UMR G-EAU

CARACTÉRISATION ET ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DE LA VULNÉRABILITÉ DES EXPLOITATIONS AGRICOLES AUX INONDATIONS

Thèse présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ MONTPELLIER I

Groupe des disciplines **Sciences Économiques** du C.N.U

Section 05

Soutenue publiquement le 12 décembre 2011 par

Pauline BRÉMOND

Sous la direction de Michel GARRABÉ

Jury :

Rapporteur	Marc BENOÎT, Directeur de Recherche, INRA SAD
Rapporteur	Pierre PICARD, Professeur à l'École Polytechnique
Examinateur	Dominique BUREAU, Professeur à l'École Polytechnique et délégué général du Conseil économique pour le développement durable
Examinatrice	Hélène REY-VALETTE, Maître de Conférences HDR, Université Montpellier 1
Directeur de thèse	Michel GARRABÉ, Professeur à l'Université Montpellier 1
Encadrant	Frédéric GRELOT, Chercheur économiste au Cemagref

« La faculté n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur ».

Caractérisation et évaluation économique de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations

Résumé :

L'échec des politiques structurelles de gestion des inondations à réduire les dommages a orienté les décideurs publics vers la restauration de zones de rétention et la réduction de la vulnérabilité. L'évaluation économique de ces politiques requiert une évaluation fine des dommages agricoles car ils contribuent fortement à déterminer leur efficacité. Or, les méthodes existantes n'intègrent que les pertes de récolte. Considérant que la vulnérabilité des exploitations agricoles dépend de la sensibilité et de la capacité à se remettre en route, entraînant respectivement des dommages directs et induits sur l'activité, nous proposons un modèle conceptuel de vulnérabilité permettant l'évaluation de l'ensemble de ces dommages. Trois profils d'exploitants sont définis selon la possibilité de mobiliser des ressources externes (main d'œuvre et matériel) pour la remise en route. Le profil Interne ne dispose d'aucune ressource externe contrairement aux profils Prestation et Solidarité. Après implémentation, le modèle a permis d'évaluer les dommages de trois exploitations types sur le Rhône aval avec une valorisation financière puis économique. Les dommages supportés par les exploitants de profil Interne sont plus élevés que ceux des deux autres profils. Les dommages évités par la mise en place de mesures de réduction de la vulnérabilité sur ces trois exploitations sont ensuite évalués. Nous montrons que les mesures sont plus efficaces et peuvent être mises en œuvre avec un ratio bénéfice-coût supérieur à un, pour les exploitations fréquemment inondées. Elles sont également plus efficaces pour les profils Interne, la mise en œuvre de la solidarité se dégageant comme une mesure intéressante pour toutes les exploitations.

Mots-clés : vulnérabilité, dommages, modélisation systémique, inondation, analyse coût-bénéfice

Characterization and economic evaluation of farm vulnerability to flooding

Abstract:

The failure of structural flood control to mitigate economic losses has lead to a shift towards new policies: floodplain restoration and vulnerability reduction. The economic appraisal of these policies requires an in-depth evaluation of agricultural damage as they are key indicators to determine the efficiency of these policies. However, existing methods only consider harvest loss. We consider that farm vulnerability depends on sensitivity and ability to recover leading respectively to direct damage and induced damage on activity. Based on this, we propose a vulnerability model which allows evaluating the whole of these damages. Three farmer's profiles are defined depending on their ability to access to external resources (workforce and equipment) to recover after flooding. The "Internal" profile has no external resource as opposed to the "Service" and "Solidarity" profiles which can respectively rely on service providing and solidarity. The model is applied to evaluate damages on three farm types of the Rhône River downstream area with a financial and economic valuation. This reveals that damages endured by the profile "Internal" are much higher than those of the two other profiles. Then, avoided damages resulting from the implementation of mitigation measures to reduce vulnerability are evaluated. We prove that these measures are more efficient and can be implemented with Benefit-Cost ratio higher than one, only for the frequently flooded farms. Mitigation measures are also more efficient for the profile "Internal". To organize solidarity between farms emerges as one of the most interesting measure for all farm types.

Keywords: vulnerability, damage, systemic modeling, flooding, Cost-Benefit Analysis

UMR G-EAU CEMAGREF
361 rue JF Breton, BP 5095,34196 MONTPELLIER Cedex 5

« Au sein de cet environnement instable et turbulent, un seul élément reste constant :

le changement.»

Tenzin Gyatso, 14ème Dalai Lama

Aube sur Isawa, Trente six vues du mont Fuji,

Katsushika Hokusai (1760-1849)

À Anthony,

À Fabian,

À mes parents.

REMERCIEMENTS

Étant convaincue de l'importance de l'interdépendance dans notre vie, c'est avec un grand plaisir que je remercie tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens d'abord à remercier ceux qui ont accompagné et guidé l'élaboration de ce travail depuis le début : Frédéric Grelot pour son attention quotidienne et son dynamisme ainsi que Michel Garrabé qui a su m'apporter ses conseils avisés pour faire aboutir ce travail.

Je remercie Pierre Picard et Marc Benoît d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Mes remerciements vont également à Dominique Bureau et Hélène Rey-Valette pour avoir participé au jury de soutenance.

Je tiens également à remercier les membres du comité de thèse qui ont accompagné avec une grande ouverture d'esprit l'évolution du questionnement. Un merci particulier à Nicolas Bauduceau qui a fait les déplacements jusqu'à Montpellier pour partager son expertise sur la question. Merci également à Jean Stéphane Bailly pour sa réactivité et ses bons conseils qui m'ont accompagnée jusqu'aux derniers moments de la rédaction. Merci également à Gilles Belaud pour avoir partagé ses compétences en hydraulique.

Mes remerciements vont également aux personnes de la mission Rhône, en particulier Anne Laure Soleilhavoup, Mathieu Métral, Aurélie Roy, Magali Dupont, de la DREAL Rhône Alpes, Claire Floury de l'Agence de l'Eau RMC, qui ont montré un intérêt constant à la problématique de recherche et nous ont permis d'enrichir les développements conceptuels et théoriques par une application sur la basse vallée du Rhône en participant au financement du projet « Évaluation de la Vulnérabilité Agricole ».

Je remercie vivement les personnes des Chambres d'Agriculture qui ont participé aux comités de pilotage : Mireille Brun, Marie Christine Bidault, Christelle Macé et plus particulièrement Guy Marjollet et Benoit Lescuyer sans qui l'ancrage de terrain de cette thèse n'aurait certainement pas eu la même ampleur. Merci également à Marie-Thérèse Arnault pour nous avoir permis d'accéder aux données d'enquêtes sur les diagnostics de vulnérabilité.

C'est grâce à ce projet que j'ai eu l'immense plaisir de travailler avec Céline Blanc pendant plus d'un an, au cours duquel nous avons réalisé ensemble les entretiens et rédigé le rapport « Évaluation de la Vulnérabilité Agricole » (Blanc et al., 2010). Les mots sont un peu faibles pour qualifier la bouffée de dynamisme et d'optimisme que cela a apporté à mon travail. Merci pour cette belle expérience tant professionnelle qu'humaine.

Je tiens également à remercier ici Géraldine Abrami pour les sessions de modélisation qui ont énergiquement contribué à l'élaboration et à la formalisation de ce modèle.

Concernant la modélisation, après la formalisation du modèle conceptuel, l'implémentation a été un énorme travail que je n'aurais pas pu mener à bout sans les compétences et la disponibilité de Frédéric. Merci pour ces nombreuses séances de travail desquelles ont découlé R-EVA ! Merci aussi à notre geek préféré, Jean Emmanuel, pour ses conseils sur la décoration. Un seul petit regret : si tu avais bien voulu coder en R avec nous, le modèle aurait pu s'appeler ManuREVA...

La collecte de données et la réalisation des entretiens ont constitué un temps important de la thèse. Ce travail de longue haleine mais crucial n'aurait pas été aussi stimulant sans les nombreuses personnes compétentes rencontrées.

Pour les données « Calamité Agricole », je tiens à remercier Jean Luc Bonicel, Sybille Slattery-Oettinger et Anne Tyvaert du Bureau du Crédit et de l'Assurance pour la confiance qu'ils m'ont accordé en autorisant l'utilisation de ces données ; Marc Bailleul du CERIT pour sa disponibilité et les

extractions qu'il a réalisé sur la base de données, en urgence bien sûr ! C'est vraiment très agréable de travailler avec des gens aussi réactifs. Merci à Florence Forest, responsable du Service Economie Agricole et Forêt et l'ensemble du personnel informatique de la DRAAF LR pour leur accueil chaleureux au moment des tentatives d'extraction sur la base de données CALAM. Merci également à tous les chefs des Services Économie Agricole des DDT qui ont bien voulu m'envoyer leurs barèmes d'indemnisation lors de ma consultation nationale par mail. J'espère pouvoir leur faire un retour sur mon travail.

Mes remerciements vont également aux nombreux experts qui nous ont ouvert leurs connaissances. Merci à Luc Cottencin (DRAAF LR) pour sa disponibilité et sa connaissance des données sur l'agriculture (RGA, enquêtes pratiques…), Carine Casse (DDT du Gard) pour son expertise sur les calamités agricoles.

Merci à tous les spécialistes rencontrés : Anne Claire Durel (CER du Gard) ; Yves Nouet et Philippe Caillol (CA du Gard) ; Mathieu Vincent, spécialiste de la pomme qui a répondu à nos nombreuses sollicitations ; Christian Hilaire, Raphael Tisiot du CTIFL de Ballandran ; Jean Louis Branger, enseignant à l'EPLEFPA de Nîmes Rodilhan qui a partagé sa connaissance de la vigne ; Eric Delpon chef d'exploitation du domaine de Lavalette, Philippe Braun (Arvalis), Gérard Féougier (centre français du riz).

Merci également à Eric Gilbert pour ses informations sur l'hydrologie du Rhône.

Les enquêtes auprès des exploitants restent un souvenir très fort, souvent émouvant, et je remercie vivement tous ceux qui ont bien voulu répondre à nos interrogations. J'ai souvent pensé à eux en écrivant et ils ont largement contribué à ma motivation.

Je tiens particulièrement à remercier Philippe Cavalier pour son soutien et la confiance qu'il a bien voulu nous accorder.

Je remercie vivement tous les membres de l'UMR G-EAU pour avoir, au cours des séminaires d'équipes, contribué à faire avancer mon travail de façon constructive.

Je tiens, en particulier, à remercier Nils pour ses questions déconcertantes qui font réfléchir et son initiation à Net logo appliquée à la modélisation de la vulnérabilité des exploitations ; Gabrielle, pour sa façon constructive de m'avoir parfois engagée à regarder les choses sous d'autres perspectives, nous avions commencé à discuter du rôle de la solidarité et c'est une des conclusions importantes de ma thèse.

Merci également à Sylvie, Laetitia et Jean Louis qui ont discuté mes papiers au cours des doctoriales G-eau, chacun avec une perspective différente mais qui m'a aidé à structurer mes idées.

Je remercie Olivier, Katrin et Sylvie pour m'avoir initiée aux différents types de modélisation. Merci à Myriam pour son aide à la réalisation des cartes. Merci à Anne Laurence pour son soutien sur le sprint final. Merci à Audrey, Joana et Séverine pour nos réflexions sur la thématique des inondations. Merci plus largement à Marielle, Sébastien, Guy pour nos discussions. Un merci particulier à Vincent pour sa question à la conférence EAAE de Giessen sans laquelle je me serai sentie un peu incomprise.

Merci à l'ensemble des assistants et assistantes : Nicolas, Kérel, Lina, Carmen pour leur aide précieuse dans notre travail de recherche. Merci aussi à Marie Claude pour son aide informatique.

Je remercie vivement Patrice et Dominique qui m'ont accordé leur confiance et ont soutenu ce projet de thèse.

Je tiens également à remercier Jean Philippe Torterotot pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux et son soutien qui a grandement contribué au fait que je vais pouvoir continuer à les développer.

Merci à Joseph Weinzaepfel qui m'a permis de mettre en œuvre ce projet en m'accordant un grand degré de liberté. L'expérience de collaboration avec l'EPLEFPA de Rodilhan a enrichi mon travail. Merci à tous les personnels de l'EPLEFPA pour leur attention bienveillante : Véronique, Jean Laurent, Stéphanie, Chantal, Greg, Aurélie, Françoise et tous les autres.

Merci particulièrement à Hélène, Nathalie et Franck pour leur intérêt à la thématique.

Je tiens à remercier l'équipe du BTS GEMEAU, en particulier Isabelle et Patrick, qui, en me faisant participer chaque année au MIL Inondation, ont partagé l'évolution de mon questionnement. Merci également à Ariane pour avoir accepté de faire l'exercice de l'analyse comptable d'une exploitation inondée qui a été tout aussi instructive pour les élèves que pour moi.

Je tiens également à remercier Reimund Schwarze et Volker Meyer de l'UFZ qui ont contribué aux réflexions de cette thèse au cours des séminaires à Montpellier et Leipzig. Merci pour ces échanges conviviaux qui ont encouragé mon travail.

Merci à tous ceux qui ont contribué à améliorer la qualité de ce mémoire par leurs relectures : Frédéric, Fabian, Katrin, Olivier, Sylvie, mes parents, Catherine, Nina, Rémi, Anne Laurence…

L'ambiance au travail est aussi un facteur important dans l'aboutissement. Au commencement fut le bureau 14 qui a permis de faire s'épanouir une ambiance conviviale bien que studieuse… Un grand merci donc à tous ceux qui y sont passés pour ces échanges : Carole, Thays, Catherine. Plus particulièrement, merci à Alexandre et Vincent, pour leur solidarité dans les bons moments mais aussi les plus difficiles. Merci aussi à tous les collègues avec qui j'ai partagé de très bons moments : Joana, Delphine, Carlotta, Sarah, Audrey, Géraldine, Séverine, Sylvain, Christelle….

Un grand merci à Augustin sans qui l'ambiance au Cemagref de Montpellier ne serait sûrement pas ce qu'elle est !

Merci aussi à Nicolas Jahier dont les petites blagues nous manquent !

Merci à Isabelle, Virginie, Héloïse, Martine, Claire pour leur attention et leur sourire.

Merci à LISODE pour les déjeuners conviviaux sous les pins, j'espère que j'aurai toujours droit au chocolat après cette thèse.

L'équilibre vient aussi de ceux qui nous entourent au quotidien dans la sphère personnelle.

Merci à celui qui a accompagné cette démarche, tant professionnelle que personnelle, a accueilli avec constance les moments d'euphorie et de doutes, a su m'encourager sans s'essouffler et est allé jusqu'à relire en détail l'intégralité de ce travail, mon compagnon de vie et de cœur, Fabian.

Je remercie également mes parents et toute ma famille qui m'ont soutenue toutes ces années en se demandant quand j'arrêterais d'étudier. Je crois bien que ce n'est pas près de s'arrêter ! Je ne serai pas celle que je suis sans vous tous. Cette thèse sur la vulnérabilité a été aussi l'occasion d'une belle réflexion dans laquelle Anthony m'a accompagnée.

Merci à tous les amis qui m'ont soutenue sur le chemin et depuis toujours !

Ma Loulou à qui je dois tellement que je ne saurais l'écrire, mais nous savons déjà toutes les deux qui sont les meilleures et ça nous suffit !

Merci à Lilie, avec qui j'ai partagé, pendant plus de quatre ans de collocation, mes réflexions sur cette thèse et surtout, sur la vie en général.

Merci à Mathilde et Nico pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et leur amitié atemporelle.

Merci à Juliette et Grégoire pour leur soutien et les discussions sur la vulnérabilité financière…

Merci à Baboue pour son amitié depuis plus de 15 ans ;-)

Merci aux tangueros du lundi : Nina, Rémi, Laure, Colin, Isabelle, Luis…

Merci à Églantine, Claire-Marie, Manu, Tim et Mathilde, Thomas, Marco, Arnaud…

Une pensée particulière pour Myriam dont le rire résonne encore à mes oreilles.

SOMMAIRE

LISTE DES ACRONYMES ..... **XV**

TABLE DES FIGURES ..... **XVII**

LISTE DES TABLEAUX ..... **XXV**

TABLE DES ENCADRÉS ..... **XXIX**

TABLE DES ANNEXES ..... **XXXI**

INTRODUCTION GÉNÉRALE **1**

PARTIE I ..... VULNÉRABILITÉ, MODÉLISATION DES SYSTÈMES AGRICOLES ET ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES PROJETS DE GESTION DES INONDATIONS **17**

CHAPITRE 1. CONCEPTUALISATION ET ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ **19**

1.1 Les concepts clés 20

1.2 Analyse du lien entre les concepts de vulnérabilité, résilience et adaptation 22

1.3 Vulnérabilité et risques naturels 23

1.4 Vulnérabilité, accès et formes de capitaux 27

1.5 Résilience et vulnérabilité 34

1.6 Vulnérabilité et changement climatique 37

1.7 Évaluation de la vulnérabilité 38

1.8 Analyses existantes de la vulnérabilité des systèmes agricoles 42

1.9 Conclusions et hypothèses de travail retenues 46

CHAPITRE 2. MODÉLISATION DES EXPLOITATIONS AGRICOLES **51**

2.1 Objectifs de recherche et modélisation 52

2.2 Modélisation économique d'optimisation de la production agricole 53

2.3 Les couplages de modèles : les modèles bioéconomiques 56

2.4 Modélisation systémique 61

2.5 Modélisation orientée objet et systèmes multi-agents 65

2.6 Conclusions et hypothèses de travail retenues 70

CHAPITRE 3. ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES PROJETS DE GESTION DES INONDATIONS **73**

3.2 Analyse Coût-Bénéfice 74

3.3 ACB et gestion des inondations 77

3.4 Les pratiques existantes de modélisation des dommages agricoles 92

3.5 Éléments de retours d'expérience sur deux catastrophes 101

3.6 Conclusions et hypothèses de travail retenues 103

CONCLUSIONS DE LA PARTIE I 105

PARTIE II ..... DÉVELOPPEMENT DUNE APPROCHE SYSTÉMIQUE DE MODÉLISATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES EXPLOITATIONS AGRICOLES FACE AUX INONDATIONS 107

CHAPITRE 4. MÉTHODE ET CADRE CONCEPTUEL UTILISÉS POUR LA MODÉLISATION 109

4.1 Démarche mise en œuvre 110

4.2 Description du système étudié et de son environnement 111

4.3 Modélisation du fonctionnement de l'exploitation agricole 115

4.4 Les effets de l'inondation sur l'exploitation agricole 119

4.5 Résultats attendus du modèle 123

4.6 Cadre d'évaluation des dommages 124

4.7 Synthèse des principales hypothèses du modèle EVA 125

4.8 Conclusions 127

CHAPITRE 5. DESCRIPTION DU MODÈLE DE VULNÉRABILITÉ EVA 129

5.1 Structure générale du modèle 130

5.2 Territoire, éléments spatiaux et inondation 135

5.3 L'exploitation agricole : composantes physiques, tâches, ressources externes et exploitant 136

5.4 Modèle de données d'entrées 154

5.5 Valorisations financière et économique 157

5.6 Sorties du modèle : indicateurs de vulnérabilité 161

5.7 Conclusion 165

CONCLUSIONS DE LA PARTIE II 167

PARTIE III ..... APPLICATION DU MODÈLE EVA SUR LA ZONE RHÔNE AVAL 169

CHAPITRE 6. CADRE ET HYPOTHÈSES DE L'APPLICATION 171

6.1 Liaison d'une problématique de recherche et des besoins opérationnels 172

6.2 Exploitations types sur le Rhône aval 177

6.3 Données collectées et hypothèses de simulation 183

6.4 Scénarios d'inondations simulés 189

6.5 Conclusions 191

CHAPITRE 7. CARACTÉRISATION ET ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DE TROIS EXPLOITATIONS TYPES. 193

7.1 Plan d'expérience retenu 194

7.2 Indicateurs de vulnérabilité non monétaires 194

7.3 Dommages directs 198

7.4 Approche financière des dommages à l'exploitation 200

7.5 Prise en compte de l'assurance dans l'approche financière 211

7.6 Approche économique des dommages 217

7.7 Conclusions 229

CHAPITRE 8. ÉVALUATION DEs MESURES DE RÉDUCTION DE LA VULNÉRABILITÉ POUR TROIS EXPLOITATIONS TYPES 237

8.1 Plan d'expérience 238

8.2 Modification de la hauteur d'élévation des composantes de l'exploitation 243

8.3 Modification de la localisation des composantes 253

8.4 Modification de la gestion des stocks (M7) 257

8.5 Modification du profil (M8) 260

8.6 Synthèse de l'analyse des mesures 262

8.7 Conclusions 267

CONCLUSIONS DE LA PARTIE III 271

CONCLUSIONS GÉNÉRALES 273

ANNEXES 279

BIBLIOGRAPHIE 373

TABLE DES MATIERES 387

LISTE DES ACRONYMES

ACB : Analyse Coût-Bénéfice

CERIT : Centre d'Etudes et de Réalisations Informatiques de Toulouse

CDE : Comité Départemental d'Expertise

CAP : Consentement À Payer

CAR : Consentement À Recevoir

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

CER : Centres d'Économie Rurale

CARM : Chambres d'Agriculture Rhône Méditerranée

CNR : Compagnie Nationale du Rhône

CUMA : Coopérative d'Utilisation du Matériel Agricole

CUMO : Coopérative d'Utilisation de Main d'Œuvre partagée

CPIER : Contrat de Projets Interrégional État Plan Rhône

DDT : Direction Départementale du Territoire

DAC : Dispositif d'Allègement des Charges

DMA : Dommage Moyen Annuel

DEMA : Dommage Évité Moyen Annuel

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EPLEFPA : Établissement Public Local d'Enseignement et de Formation Professionnelle Agricole

EVA : Évaluation de la Vulnérabilité des exploitations Agricoles

FNGCA : Fonds National de Garantie des Calamités Agricoles

FEAG : Fonds Européen Agricole de Garantie

GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat

INSEE : Institut National de la Statistique et des Études Économiques

PPRI : Plan de Prévention des Risques d'Inondation

PAC : Politique Agricole Commune

RGA : Recensement Général Agricole

SAD : Systèmes Agraires et Développement

SAFER : Société d'Aménagement Foncier et d'Établissement Rural

SMA : Système Multi Agents

SES : Système Socio-Ecologique

SAU : Surface Agricole Utilisée

SIG : Système d'Information Géographique

TVA : Taxe sur la Valeur Ajoutée

UML : Unified Modelling Language

UMR : Unité Mixte de Recherche

UTA : Unité de Travail Annuel

VAN : Valeur Actuelle Nette

ZEC : Zone d'Expansion de Crue

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition départementale du nombre d'arrêtés « Calamité Agricole » recensés entre 2000 et 2007 5
Figure 2 : Évolution des dommages indemnisables dans le système « Calamité Agricole » 6
Figure 3: Crue de mai-juin 1856, débordement du Rhône devant Avignon, vue prise du rocher du Dom (L'illustration) 9
Figure 4 : Crue de novembre-décembre 1935, plaine de Mondragon envahie par les eaux suite à la rupture d'une digue (L'illustration) 9
Figure 5 : Découpage de la gestion des inondations sur le Rhône 10
Figure 6 : Liens entre vulnérabilité, aléa, exposition et impacts 21
Figure 7 : Évolution des courants de recherche sur la vulnérabilité, résilience et adaptation 23
Figure 8: Le modèle d'analyse de la vulnérabilité « Hazard of Place » 24
Figure 9: Confrontation de la définition de la vulnérabilité de Blaikie et al. (1994) et de la définition retenue .. 26
Figure 10 : Cadre PAR (Blaikie et al., 1994) 27
Figure 11 : Synthèse des différentes approches en lien avec la vulnérabilité sociale 28
Figure 12: Modèle des moyens de subsistance durable (« Sustainable Livelihood Approach ») 31
Figure 13: Modèle de vulnérabilité Access 33
Figure 14: Le triangle de la résilience 35
Figure 15 : Représentation temporelle de la vulnérabilité et de la résilience d'une exploitation agricole au risque d'inondation. 44
Figure 16 : Formalisation de l'évaluation de la vulnérabilité 48
Figure 17 : Conception de la vulnérabilité comme une fonction (Dommages =f (Aléa)) 48
Figure 18 : Évolution des dommages suite à l'application d'une mesure de réduction de la vulnérabilité (type 1) 50
Figure 19 : Évolution des dommages après application de mesure de réduction de la vulnérabilité (type2) 50
Figure 20: Architecture du modèle APSIM 58
Figure 21 : Cadre de modélisation de l'évaluation de l'efficacité d'utilisation de l'eau (couplage APSIM/MIDAS) 58
Figure 22 : Organisation du modèle SEAMLESS appliqué de l'échelle parcelle à l'échelle européenne 59
Figure 23 : Architecture du modèle FSSIM avec les composantes activées ■ ou non□ 60
Figure 24 : Formalisme de la plate forme de modélisation dynamique STELLA 63
Figure 25 : Modèle conceptuel d'AGRIPOLIS 69
Figure 26 : Récapitulatif des méthodes d'évaluation de la valeur d'utilité totale d'un actif 78
Figure 27 : Illustration des calculs des Dommages Moyens Annuels et Dommages Évités Moyens Annuels 83
Figure 28 : Étapes pour la réalisation d'une ACB appliqué aux projets de gestion des inondations 84
Figure 29 : Fonction de valeur de la « prospect theory » 89
Figure 30 : Calcul des dommages évités par la mise en place d'un projet de modification de l'aléa 91

Figure 31 : Difficultés pour l'évaluation des dommages évités d'un projet de réduction de la vulnérabilité d'un enjeu 91
Figure 32 : Champ de vigne inondé et souillé d'encombrants 102
Figure 33 : Étapes mise en œuvre pour la modélisation de la vulnérabilité des exploitations agricoles 110
Figure 34 : Structure de l'exploitation agricole dans le modèle 112
Figure 35 : Capitaux internes à l'exploitation agricole 114
Figure 36 : Interactions du système exploitation agricole avec son environnement économique et social à considérer dans l'analyse de la vulnérabilité 115
Figure 37 : Capitaux mobilisables par l'exploitation agricole au cours du processus de production 115
Figure 38: Dimensions de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations 116
Figure 39 : Représentation temporelle de l'itinéraire technique d'une exploitation type arboricole 117
Figure 40 : Exemples de cycles de présence de blé (jaune), de melon (orange) et de salade (vert) sur les parcelles d'une exploitation agricole 118
Figure 41 : Modélisation du fonctionnement de l'exploitation agricole en temps normal 119
Figure 42 : Intersection des temporalités de l'exploitation agricole et de l'inondation 120
Figure 43 : Intersection des distributions spatiales de l'aléa inondation et de l'exploitation agricole pour l'évaluation de la vulnérabilité 121
Figure 44 : Effets directs et induits de l'inondation sur l'exploitation agricole 122
Figure 45 : Relations d'héritage pour les composantes physiques 132
Figure 46 : Relations d'héritage entre les tâches 132
Figure 47 : Relations de composition 132
Figure 48 : Diagramme de classe des relations de localisation utilisées dans le modèle EVA 133
Figure 49 : Diagramme de classe du modèle de vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations 134
Figure 50 : Diagramme d'état des éléments spatiaux 135
Figure 51 : Conditions des transitions entre les états des composantes physiques 138
Figure 52 : Conditions déterminant l'utilisabilité des composantes physiques 139
Figure 53 : Diagramme d'état des parcelles 140
Figure 54 : Diagramme d'état du matériel végétal 141
Figure 55 : Diagramme d'état de la production en cours 142
Figure 56 : Diagramme d'état des bâtiments 143
Figure 57 : Diagramme d'état des matériels 144
Figure 58 : Diagramme d'état du stock d'intrants 145
Figure 59 : Diagramme d'état du stock de produits 146
Figure 60 : Détermination du taux de non réalisation des tâches de production 147
Figure 61 : Contraintes sur la réalisation des tâches, alternatives mises en œuvre par l'Exploitant et conséquences 152
Figure 62 : Modèle de données pour le modèle de vulnérabilité EVA 156
Figure 63 : Exemple de chronologie d'utilisabilité des composantes physiques d'une exploitation 161

Figure 64 : Représentation temporelle des tâches de production et de remise en état sur une exploitation type arboricole (Pomme Royal Gala, 8ha) suite à une inondation de 7 jours en Décembre 162
Figure 65 : Description du modèle d'évaluation de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations et des variables d'entrée et de sortie 164
Figure 66 : Répartitions des sièges d'exploitations recensés dans l'enveloppe de la crue de Décembre 2003 sur le Rhône 179
Figure 67 : Répartition en nombre des exploitations recensées dans l'enveloppe de crue de Décembre 2003 par type de production..... 179
Figure 68 : Répartition en surface des exploitations recensées dans l'enveloppe de crue du Rhône de décembre 2003 par type de production 180
Figure 69: Représentation spatiale des exploitations types 189
Figure 70: Scénarios d'exposition des exploitations types 189
Figure 71 : Chronologie de l'utilisabilité du matériel de l'exploitation type A_8 après une inondation du groupe 2 (semaine 49, durée 1 semaine)..... 195
Figure 72 : Perturbations de la réalisation d'une liste de tâches de l'exploitation type A_8 après une inondation du groupe 2 (semaine 49, durée 1 semaine) 195
Figure 73 : Variation des besoins en main d'œuvre de l'exploitation type A_8 (Profil Prestation) après une inondation du groupe 1 (semaine 18, 36 ou 49 et d'une durée d'une semaine) 196
Figure 74 : Variation des besoins en main d'œuvre de l'exploitation type V_22 (Profil Prestation) après une inondation du groupe 1 (semaine 18, 36 ou 49 et d'une durée d'une semaine) 197
Figure 75 : Variation des besoins en main d'œuvre de l'exploitation type MC_15 (Profil Prestation) après une inondation du groupe 1 (semaine 18, 36 et 49 ou d'une durée d'une semaine) 197
Figure 76 : Dommages directs pour l'exploitation A_8 (scénario du groupe 1) 198
Figure 77 : Dommages directs pour l'exploitation A_8 (scénario du groupe 2) 199
Figure 78 : Dommages directs pour l'exploitation A_8 (scénario du groupe 3) 199
Figure 79 : Montant de dommages financiers pour A_8 (scénario du groupe 1, durée d'une semaine) 201
Figure 80 : Montant de dommages financiers pour V_22 (scénario du groupe 1, durée d'une semaine) 202
Figure 81 : Montant de dommages financiers pour MC_15 (scénario du groupe 1, durée d'une semaine)..... 202
Figure 82 : Montant de dommages financiers pour A_8 (scénario du groupe 2, durée d'une semaine) 203
Figure 83 : Montant de dommages financiers pour V_22 (scénario du groupe 2, durée d'une semaine) 204
Figure 84 : Montant de dommages financiers pour MC_15 (scénario du groupe 2, durée d'une semaine)..... 204
Figure 85 : Montant de dommages financiers pour A_8 (scénario du groupe 3, une semaine)..... 206
Figure 86 : Comparaison de la répartition des dommages financiers pour les profils Prestation et Interne pour A_8 (scénario du groupe 2, durée 1 semaine) 207
Figure 87 : Comparaison de la répartition des dommages financiers pour les profils Prestation et Interne pour MC_15 (scénario du groupe 1, durée 1 semaine)..... 208
Figure 88 : Comparaison de la répartition des dommages financiers pour les profils Prestation et Interne pour V_22 (scénario du groupe 2, durée 1 semaine) 209

Figure 89 : Comparaison de la perte de revenu pour les profils Prestation et Interne pour A_8 (scénarios du groupe 2, durée 1 semaine) 210
Figure 90 : Comparaison de la perte de revenu pour les profils Prestation et Interne pour MC_15 (scénario du groupe 1, durée 1 semaine) 210
Figure 91 : Comparaison de la perte de revenu pour les profils Prestation et Interne pour V_22 (scénario du groupe 2, durée 1 semaine) 211
Figure 92 : Montant des dommages économiques pour les profils Prestation et Interne d'A_8 (scénario d'inondation du groupe 1, durée d'une semaine) 218
Figure 93 : Rapport entre les dommages économiques pour les profils Interne et Prestation d'A_8 (scénarios d'inondation du groupe 1, pour quatre durées de submersion) 218
Figure 94 : Montant des dommages économiques (k€/exploitation) pour les profils Prestation et Interne d'A_8 (scénarios d'inondation du groupe 2, durée d'une semaine) 219
Figure 95 : Rapport entre les dommages économiques pour les profils Interne et Prestation d'A_8 (scénarios d'inondation du groupe 2, quatre durées de submersion) 219
Figure 96 : Montant des dommages économiques (k€/exploitation) pour les profils Prestation et Interne de V_22 (scénarios d'inondation du groupe 1, durée d'une semaine) 220
Figure 97 : Rapport entre les dommages économiques pour les profils Interne et Prestation de V_22 (scénarios d'inondation du groupe 1, quatre durées de submersion) 220
Figure 98 : Montant de dommages économiques (k€/exploitation) pour les profils Prestation et Interne de V_22 (scénarios d'inondation du groupe 2, durée d'une semaine) 221
Figure 99 : Rapport entre les dommages économiques pour les profils Interne et Prestation de V_22 (scénarios d'inondation du groupe 2, quatre durées de submersion) 221
Figure 100 : Montant des dommages économiques (k€/exploitation) pour les profils Prestation et Interne de MC_15 (scénario d'inondation du groupe 1, durée d'une semaine) 222
Figure 101 : Rapport entre les dommages économiques pour les profils Interne et Prestation de MC_15 (scénarios d'inondation du groupe 1, quatre durées de submersion) 222
Figure 102 : Montant de dommages économiques (k€/exploitation) pour les profils Prestation et Interne de MC_15 pour les scénarios d'inondation du groupe 2 et pour une durée d'une semaine 223
Figure 103 : Rapport entre les dommages économiques pour les profils Interne et Prestation de MC_15 (scénarios d'inondation du groupe 1 et pour quatre durées de submersion) 223
Figure 104 : Montant des dommages économiques pour l'exploitation type A_8 (Profil Prestation) pour quatre hauteurs d'eau (durée d'une semaine, vitesse faible) 224
Figure 105 : Montant de dommages économiques pour l'exploitation type V_22 (Profil Prestation) pour quatre hauteurs d'eau (durée d'une semaine, vitesse faible) 224
Figure 106 : Montant de dommages économiques pour l'exploitation type MC_15 (Profil Prestation, scénario du groupe 3, durée d'une semaine, vitesse faible) 225

Figure 107 : Dommages économiques pour les trois exploitations types avec le profil Prestation pour une crue de printemps, d'automne et d'hiver (scénario du groupe 3, hauteur= 50 cm, durée d'une semaine, vitesse faible) 226
Figure 108 : Montant des dommages économiques pour A_8 (Profil Prestation) pour quatre durées d'inondation (vitesse faible) et d'une hauteur de 20 cm et 150 cm 227
Figure 109 : Montant des dommages économiques pour V_22 (Profil Prestation) pour quatre durées d'inondation (vitesse faible) et d'une hauteur de 20 cm et 150 cm 228
Figure 110 : Montant des dommages économiques pour MC_15 (Profil Prestation) pour quatre durées d'inondation (vitesse faible) et d'une hauteur de 20 cm (1) et 150 cm (2) 228
Figure 111 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20 cm et d'une durée d'une semaine 244
Figure 112 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 50 cm et d'une durée d'une semaine 244
Figure 113 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation du petit matériel pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20 cm et d'une durée d'une semaine 247
Figure 114 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation des intrants pour une inondation de 20 cm et d'une durée d'une semaine 249
Figure 115 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation des intrants pour une inondation de 100 cm et d'une durée d'une semaine 249
Figure 116 : Dommages évités (k€/exploitation) par la plantation su buttes pour une inondation de 50 cm et d'une durée d'une semaine 252
Figure 117 : Dommages évités (k€/exploitation) par la relocalisation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20 cm et d'une durée d'une semaine 253
Figure 118 : Dommages évités (k€/exploitation) par la relocalisation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 100 cm et d'une durée d'une semaine 254
Figure 119 : Dommages évités (k€/exploitation) par l'évacuation de matériels (tracteurs) pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20 cm et d'une durée d'une semaine 255
Figure 120 : Dommages évités (k€/exploitation) par l'évacuation de matériels (tracteurs) pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 100 cm et d'une durée d'une semaine 256
Figure 121 : Dommages évités par la mise en place d'une mesure de gestion des stocks d'intrants sur les trois exploitations types pour un scénario d'inondation de 20 cm (a) et 100 cm (b) pendant une durée d'une semaine 259
Figure 122 : Dommages évités (k€/exploitation) par la modification du profil des exploitants pour une inondation de 20 cm et d'une durée d'une semaine 260
Figure 123 : Dommages évités (k€/exploitation) par la modification du profil des exploitants pour une inondation de 100 cm et d'une durée d'une semaine 261
Figure 124 : Récapitulatif de la procédure d'indemnisation du FNGCA 289
Figure 125 : Evolution des prix moyens de campagnes en Languedoc Roussillon 321

Figure 126: Montant des dommages au bâtiment par exploitation type (k€/bâtiment) en fonction des scénarios d'inondation 345
Figure 127 : Montant de dommages au matériel (k€) pour chaque exploitation type en fonction de la hauteur d'eau d'inondation 346
Figure 128 : Montant des dommages au stock d'intrants (k€/ exploitation) en fonction de la hauteur d'eau et de la période d'occurrence 347
Figure 129 : périodes d'application du taux d'actualisation pour l'évaluation des dommages au matériel végétal 348
Figure 130 : Montant des dommages au sol (€/ha) en fonction des cultures et des scénarios d'inondation 351
Figure 131 : Montant des dommages au sol (€/exploitation type) en fonction des cultures et des scénarios d'inondation 351
Figure 132 : Montant des dommages aux cultures de pomme Royal Gala de l'exploitation type arboriculture en fonction des scénarios d'inondation 353
Figure 133 : Montant des dommages aux cultures de raisin de l'exploitation type viticulture en fonction des scénarios d'inondation 354
Figure 134 : Montant des dommages aux cultures (k€/ha) de l'exploitation mixte maraichage/céréale en fonction des scénarios d'inondation 355
Figure 135 : montant des dommages aux cultures (k€/ha) de l'exploitation mixte maraichage/céréale en fonction des scénarios d'inondation 355
Figure 136 : comparaison de trois méthodes d'évaluation des dommages totaux sur des parcelles en arboriculture (k€/ha) pour une vitesse d'inondation faible 357
Figure 137 : comparaison de trois méthodes d'évaluation des dommages totaux sur des parcelles en viticulture (k€/ha) pour une vitesse d'inondation faible 357
Figure 138 : comparaison de trois méthodes d'évaluation des dommages totaux sur des parcelles en arboriculture (k€/ha) pour une vitesse d'inondation forte 358
Figure 139 : comparaison de trois méthodes d'évaluation des dommages totaux sur des parcelles en viticulture (k€/ha) pour une vitesse d'inondation forte 358
Figure 140 : Montant de dommages économiques évités (k€/exploitation) par la surélévation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 361
Figure 141 : Montant de dommages économiques évités (k€/exploitation) par la surélévation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 50cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 361
Figure 142 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 100cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 362

Figure 143 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation de certains matériels pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 362
Figure 144 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation de certains matériels pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 50cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 363
Figure 145 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation de certains matériels pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 100cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 363
Figure 146 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation des intrants pour une inondation de 20cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 364
Figure 147 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation des intrants pour une inondation de 50cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 364
Figure 148 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation des intrants pour une inondation de 100cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 365
Figure 149 : Dommages évités (k€/exploitation) par la plantation sur buttes pour l'exploitation type A_8 pour les trois hauteurs d'eau et une durée d'une semaine (vitesse faible) 365
Figure 150 : Dommages évités (k€/exploitation) par la relocalisation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 366
Figure 151 : Dommages évités (k€/exploitation) par la relocalisation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 50cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 366
Figure 152 : Dommages évités (k€/exploitation) par la relocalisation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 100cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 367
Figure 153 : Dommages évités (k€/exploitation) par l'évacuation de certains matériels pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 367
Figure 154 : Dommages évités (k€/exploitation) par l'évacuation de certains matériels pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 50cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 368
Figure 155 : Dommages évités (k€/exploitation) par l'évacuation de certains matériels pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 100cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible) 368
Figure 156 : Dommages évités par la mise en place d'une mesure de gestion des stocks d'intrants sur les trois exploitations types pour un scénario d'inondation de 50% des parcelles et du bâtiment avec 20 cm (a), 50 cm (b) et 100 cm (c), pendant une durée d'une semaine et avec une vitesse faible 369

Figure 157 : Montant de dommages économiques évités (k€/exploitation) par la modification du profil des exploitants pour une durée d'une semaine (a) et de deux semaine (b) pour une inondation de 20 cm (vitesse faible) 369
Figure 158 : Montant de dommages économiques évités (k€/exploitation) par la modification du profil des exploitants pour une durée d'une semaine (a) et de deux semaine (b) pour une inondation de 50cm (vitesse faible) 370
Figure 159 : Montant de dommages économiques évités (k€/exploitation) par la modification du profil des exploitants pour une durée d'une semaine (a) et de deux semaines (b) pour une inondation de 100cm (vitesse faible) 370

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Montants de dommages indemnisables et indemnisés sur la période 2000 à 2007 7
Tableau 2 : Comparaison des montants de dommages indemnisés pour cause d'inondation par le système « Calamité Agricole » en 2002 et 2003 en France et sur les 5 départements du Rhône aval 7
Tableau 3 : Normes-guide d'objectifs en zones rurales 43
Tableau 4 : Proposition d'une typologie des effets des inondations 81
Tableau 5 : Paramètres de l'aléa considérés dans les études d'évaluation des dommages agricoles 93
Tableau 6 : Méthodes d'évaluation des dommages agricoles recensées et analysées 95
Tableau 7 : Types d'indicateurs économiques utilisés pour évaluer le dommage aux récoltes 99
Tableau 8 : Nombre d'études considérant différents types de culture pour l'évaluation des dommages aux récoltes 99
Tableau 9 : Nombre d'études utilisant des fonctions d'endommagement spécifiques par type de culture 100
Tableau 10 : Principales hypothèses du modèle de vulnérabilité 125
Tableau 11 : Description des tâches de remise en route devant être effectuées en fonction des états atteints par les composantes 148
Tableau 12 : Définition des profils de capitaux social et financier des exploitations agricoles 149
Tableau 13 : Mode de réalisation et besoin en ressources pour la réalisation 150
Tableau 14 : Modalités associées aux modes de réalisation en fonction des contraintes sur les conditions de réalisation 151
Tableau 15 : Quantification et valorisation du dommage sur les composantes physiques 157
Tableau 16 : Hypothèses de valorisation financière et économique 158
Tableau 17 : Coûts associés aux alternatives de réalisation des tâches 159
Tableau 18 : Articulation du projet « Évaluation de la vulnérabilité agricole » et du travail de thèse 176
Tableau 19 : Synthèse des caractéristiques de la culture de la pomme Royal Gala 181
Tableau 20 : Synthèse des caractéristiques de l'exploitation type arboriculture fruit à pépin de moins de 15 ha 181
Tableau 21 : Synthèse des caractéristiques de la vigne retenue (cépage rouge palissé) 182
Tableau 22 : Synthèse des caractéristiques de l'exploitation type viticole 182
Tableau 23 : Synthèse des caractéristiques des cultures de l'exploitation type « maraîchage/céréales » de 15 ha 182
Tableau 24 : Synthèse des caractéristiques de l'exploitation type « maraîchage/céréales » de 15 ha 183
Tableau 25 : Rappel des caractéristiques retenues pour les exploitations types 183
Tableau 26 : Hypothèses de valorisation de main d'œuvre et d'utilisation du matériel utilisés pour l'évaluation financière 185
Tableau 27 : Données sur les exploitations (Farm) 187
Tableau 28 : Données sur les tâches de production (Production tasks) 187

Tableau 29 : Données sur l'endommagement (Damaging Data) 188
Tableau 30 : Données sur les tâches de remise en état (Recovery tasks)..... 188
Tableau 31 : Données sur la valorisation monétaire (Monetizing Data)..... 188
Tableau 32 : Paramètres des scénarios d'exposition et d'aléa retenus pour les simulations du chapitre 7 194
Tableau 33 : Montants de dommages financiers (k€) pour les exploitations types 205
Tableau 34 : Source d'indemnisation des dommages par type de composante de l'exploitation agricole..... 212
Tableau 35 : Scénarios d'inondation utilisés pour simuler les dommages et leur indemnisation..... 213
Tableau 36 : Montants (k€) des dommages financiers bruts, d'indemnisation et de dommages nets pour l'exploitation type V_22 (Profil Prestation)..... 214
Tableau 37 : Montants (k€) de dommages financiers bruts, d'indemnisation et de dommages nets pour l'exploitation type V_22 (Profil Interne) 215
Tableau 38 : Comparaison du taux d'indemnisation (montant brut des dommages financiers/indemnisation) pour les profils Prestation et Interne de l'exploitation type V_22..... 216
Tableau 39 : Bilan des montants des dommages économiques pour les trois exploitations types pour les quatre hauteurs d'eau (Profil Prestation, durée d'une semaine, vitesse faible)..... 225
Tableau 40 : Paramètres d'aléa..... 238
Tableau 41 : Paramètres des exploitations..... 239
Tableau 42 : Mesures à évaluer 239
Tableau 43 : Nombre de simulations et temps de calcul associés..... 240
Tableau 44 : périodes de retour associées aux hauteurs d'eau..... 240
Tableau 45 : Exemple de table de données définissant l'organisation spatiale de l'exploitation dans EVA 243
Tableau 46 : Bilan des DEMA et du coût maximal (k€/exploitation) pour la surélévation du bâtiment..... 245
Tableau 47 : Exemple de table de données définissant les caractéristiques des composantes localisées dans un bâtiment..... 246
Tableau 48 : Bilan des DEMA (k€/exploitation) et du coût maximal (k€/exploitation) pour la surélévation du petit matériel mobile 247
Tableau 49 : Bilan des DEMA (k€/exploitation) et du coût maximal (k€/exploitation) pour la surélévation des intrants..... 250
Tableau 50 : Bilan des DEMA (k€/exploitation) et du coût maximal (k€/exploitation) pour la plantation sur butte 252
Tableau 51 : Bilan des DEMA (k€/exploitation) et du coût maximal (k€/exploitation) pour la relocalisation d'un bâtiment..... 254
Tableau 52 : Bilan des DEMA (k€/exploitation) et du coût maximal (k€/exploitation) pour l'évacuation des tracteurs..... 256
Tableau 53 : Exemple de table de données de la gestion des périodes d'achat des intrants sous EVA 258
Tableau 54 : Bilan des DEMA (k€/exploitation) et du coût maximal (k€/exploitation) pour l'évacuation des tracteurs..... 259

Tableau 55 : Bilan des DEMA (k€/exploitation) et du coût maximal (k€/exploitation) pour l'évacuation des tracteurs 262
Tableau 56 : Classement des mesures en fonction des DEMA pour A_8 264
Tableau 57 : Classement des mesures en fonction des DEMA pour V_22 264
Tableau 58 : Classement des mesures en fonction des DEMA pour MC_15 265
Tableau 59 : récapitulatif des systèmes d'assurances Cat Nat et l'assurance Multirisque en agriculture 291
Tableau 60 : Variables utilisées dans le calcul des dommages agricoles 302
Tableau 61 : Liste des fonctions utilisées pour le calcul des dommages 302
Tableau 62 : Caractéristiques des exploitations arboricoles sur les 5 départements du Rhône aval (07, 13, 26, 30, 84) 317
Tableau 63: Type et coût des intrants stockés sur l'exploitation type en arboriculture 318
Tableau 64: Évolution de la quantité des intrants sur l'exploitation type en arboriculture 318
Tableau 65 : Détails des caractéristiques de la culture de pomme Royal Gala 319
Tableau 66 : Liste du matériel de l'exploitation type en arboriculture 319
Tableau 67: Type et coût des intrants stockés sur l'exploitation type en arboriculture 321
Tableau 68: Part de chaque type d'intrant présent sur l'exploitation par mois pour deux modes de gestion envisageables sur l'exploitation 321
Tableau 69 : Liste du matériel de l'exploitation type viticole 322
Tableau 70 : Présence de la récolte sur la parcelle 323
Tableau 71: Type et coût des intrants stockés sur l'exploitation type en arboriculture 323
Tableau 72: Évolution de la quantité des intrants sur l'exploitation type maraîchage/céréale 324
Tableau 73 : Rendements et prix de vente de la culture de melon entre 2001 et 2006 325
Tableau 74 : Rendements et prix de vente de la culture de salade entre 2001 et 2006 325
Tableau 75 : Caractéristiques des cultures de l'exploitation type « maraîchage/céréales » de 15 ha 326
Tableau 76 : Rendements et prix de vente de la culture de salade entre 2001 et 2006 326
Tableau 77 : Liste du matériel de l'exploitation type en maraîchage /céréale 326
Tableau 78 : Fonction d'endommagement utilisée pour les bâtiments agricole 345
Tableau 79: Fonction d'endommagement du stock d'intrants 347
Tableau 80 : Coûts associés aux dommages sur le matériel végétal 348
Tableau 81 : Montant de dommage au matériel végétal pour les exploitations types 349
Tableau 82 : Matrice d'endommagement du sol utilisée pour notre étude 349
Tableau 83 : Estimation des coûts des dommages aux sols pour les différents types de culture 350

TABLE DES ENCADRÉS

Encadré 1 : Illustration de l'application d'un modèle hydro bioéconomique « Evaluation of the water use efficiency of alternative farm practices at a range of spatial and temporal scales: A conceptual framework and a modelling approach » (Moore et al., 2010) 58
Encadré 2 : FSSIM, a bio-economic farm model for simulating the response of EU farming systems to agricultural and environmental policies (Louhichi et al., 2010) 60

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : SYSTÈMES D'ASSURANCE ET D'INDEMNISATION DES DOMMAGES AGRICOLES («CATNAT» ET « CALAMITÉ AGRICOLE ») 281

ANNEXE 2 : GLOSSAIRE 293

ANNEXE 3 : GÉNÉRALITÉS SUR LES MÉTHODES D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE 297

ANNEXE 4 : LISTE DES OBJETS DU MODÈLE DE VULNÉRABILITÉ (EVA) 299

ANNEXE 5 : MISE EN ÉQUATIONS DU CALCUL DES DOMMAGES 301

ANNEXE 6 : MESURES DE RÉDUCTION DE LA VULNÉRABILITÉ ANALYSÉES DANS LE CADRE DU PROJET « ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ AGRICOLE » 309

ANNEXE 7 : LISTE DES ENTRETIENS RÉALISÉS AUPRÈS D'EXPERTS 313

ANNEXE 8 : DESCRIPTION DES EXPLOITATIONS ENQUÊTÉES 315

ANNEXE 9 : DÉTAILS DES CHOIX ET HYPOTHÈSES SUR LA CONSTRUCTION DES EXPLOITATIONS TYPES 317

ANNEXE 10 : ITINÉRAIRES TECHNIQUES DE QUELQUES PRODUCTIONS DE LA ZONE RHÔNE AVAL 327

ANNEXE 11 : TEMPS DE RÉALISATION DES TÂCHES POUR LES CULTURES DES EXPLOITATIONS TYPES 339

ANNEXE 12 : DONNÉES TECHNIQUES SUR LE MATÉRIEL NÉCESSAIRE À LA RÉALISATION DES TÂCHES 343

ANNEXE 13 : ÉVALUATION DES DOMMAGES DIRECTS 345

ANNEXE 14 : DOMMAGES ÉVITÉS PAR LES MESURES DE RÉDUCTION DE LA VULNÉRABILITÉ SUR LES TROIS EXPLOITATIONS TYPES 361

ANNEXE 15 : BILAN DES DEMA POUR LES TROIS EXPLOITATIONS TYPES 371

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis 2002, l'Europe a subi d'importantes inondations qui ont eu de fortes conséquences économiques (Wisner et al., 2004). Le montant des dégâts matériels pour la seule Allemagne suite à la crue de l'Elbe en 2002 a été estimé à 11,6 milliards d'euros (Thieken et al., 2007). Ces évènements ont remis en cause les méthodes classiques de gestion des inondations consistant à la construction de digues (augmentation des risques de rupture de digues, aggravation des phénomènes en aval) en montrant leur incapacité à diminuer les dommages subis. Ils ont amené à reconsidérer, dans une perspective plus intégrée, les différentes politiques envisageables pour la gestion du risque inondation (Brouwer et al., 2004 ; Kenyon et al., 2008).

Les politiques de gestion du risque d'inondation ont globalement pour objectif de limiter les effets des inondations sur les enjeux du territoire définis classiquement comme les biens et activités représentant une valeur pour la société. Pour cela, différentes voies peuvent être combinées (Penning-Roswell et al., 2005 ; Wisner et al., 2004, p 239), selon qu'elles portent sur :

- l'aléa en modifiant les écoulements par endiguement ou en modifiant les capacités de stockage à l'échelle du bassin versant par le maintien ou la restauration des Zones d'Expansion de Crue (ZEC), la création de retenues locales ou de réservoir de stockage ;
- la vulnérabilité des territoires en réglementant l'occupation future du sol, ou en modifiant les caractéristiques de ses enjeux existants, en organisant la gestion de crise et le retour à la normale ;
- la répartition des conséquences par des transferts de ressources financières basés sur le principe de mutualisation (assurance et systèmes d'indemnisation) ce qui contribue également à faciliter la remise en route suite à l'inondation.

- *Évolution des politiques de gestion des inondations*

La nécessité d'une approche plus intégrée de la gestion des inondations a contribué à l'émergence de nouvelles politiques publiques qui consistent à redonner un espace de liberté aux rivières (« Make space for water »), à accepter et s'adapter au risque d'inondation (« Living with floods ») (Brouwer et al., 2001 ; Hansson et al., 2008 ; Johnson et al., 2007). La Directive Cadre Inondation du 23 octobre 2007, va également dans ce sens en reconnaissant les inondations comme un phénomène naturel ne pouvant être évité et constituant une menace pour les vies humaines. L'article 14 préconise la mise en place de « plans de gestion [envisageant], lorsque cela est possible, le maintien et/ou la restauration des plaines d'inondation, ainsi que des mesures visant à prévenir et à réduire les conséquences négatives pour la santé humaine, l'environnement, le patrimoine culturel et l'activité économique ».

En France, instaurés en 2002 par le Ministère de l'Environnement, les Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) se veulent le reflet de cette nouvelle orientation des politiques de

gestion des inondations (MEDDTL, 2009). Ces outils contractuels entre les collectivités locales et l'État, ont pour objectif de financer certains projets de prévention des inondations sélectionnés dans le cadre d'un appel à projet national. Entre 2003 et 2006, 54 projets ont été retenus représentant une enveloppe de 884 millions d'euros (MEDDTL, 2009). Pour les grands fleuves français, comme la Loire et le Rhône, des programmes spéciaux (Plan Grand Fleuve) ont également été lancés depuis 1994 sur la Loire et 2004 sur le Rhône. Le budget total du Plan Loire sur la période allant de 2000 à 2013 est de 383 millions d'euros et l'enveloppe prévue sur le Rhône pour la période de 2005 à 2015 est de 600 millions d'euros[1].

Une large partie des financements est à destination de la réduction de l'aléa (80 %). Parmi ces actions, la circulaire du 19 janvier 2005 rappelle que les politiques de rétention des eaux à l'amont constituent une priorité de l'Etat en appliquant les principes de la loi sur les risques du 30 juillet 2003 qui prévoit, dans le cas de la création des zones de rétention, l'obligation de l'indemnisation des dommages créés en ces termes : « Les dommages matériels touchant les récoltes, les cultures, le cheptel mort ou vif, les véhicules terrestres à moteur et les bâtiments causés par une sur-inondation liée à une rétention temporaire des eaux dans les zones grevées de servitudes […] ouvrent droit à indemnités pour les occupants. »

Dans les PAPI et les Plans Grand Fleuve, l'accent est également mis sur les actions de réduction de la vulnérabilité qui représentent 10 % des financements représentant 200 millions d'euros sur sept ans, soit 30 millions d'euros par an (CEPRI, 2009). Ces actions nouvelles et faisant l'objet de peu de retour d'expérience ont du mal à se mettre en place (CGEDD-MEEDAT, 2009). L'Équipe Pluridisciplinaire Loire avait commencé à s'y intéresser pour les activités agricoles (Bauduceau, 2001 ; 2004b ; 2005a) et les activités économiques (Mengual, 2008). Actuellement, sur la Loire, un programme de réduction de la vulnérabilité des activités économiques est en cours de réalisation. Il vise à « renforcer la compétitivité ligérienne par la réduction de la vulnérabilité aux inondations des activités économiques du bassin de la Loire ». Les objectifs annoncés sont la réalisation de 3 000 diagnostics de vulnérabilité pour un coût de 9 millions d'euros et la mise en œuvre de mesures de réduction de vulnérabilité sur 900 activités pour un coût de 13,5 millions d'euros. Le Plan Rhône a plutôt axé la réduction de la vulnérabilité sur les activités agricoles dont le budget est fixé à 15 millions d'euros dans le Contrat de Projet Interrégional État (Plan Rhône, 2007) pour un budget total du volet Inondation de 310 millions d'euros.

[1] Communication de Philippe ORIGNAC, Direction de l'eau (Ministère en charge de l'Environnement), le 21 mars 2006.

- *Évolution de la place des zones agricoles dans la gestion des inondations*

Entre les années 1970 à 1990, en Europe, les projets de gestion des inondations sur les zones agricoles ont principalement porté sur la protection ou le drainage par aménagement d'un réseau d'assainissement agricole. À titre d'exemple, en France, les superficies agricoles drainées sont passées de 300 000 à plus de 2 millions d'hectares entre 1970 et 1993 (Nédélec, 2005). Les effets principaux de ces projets étaient d'augmenter les rendements, de diminuer les coûts de production et de permettre aux agriculteurs de produire des cultures à plus forte valeur ajoutée. Ces projets avaient globalement des impacts positifs en termes de rendement facilement mesurables de façon monétaire. Morris (1992) souligne, toutefois, que les autres effets potentiellement négatifs comme le changement de pratiques culturales n'ont pas été intégrés dans les évaluations économiques obligatoires au Royaume-Uni pour la réalisation de ces projets. L'objectif du considérable soutien financier apporté à travers ces projets au secteur agricole, était d'atteindre un approvisionnement alimentaire durable (Morris, 1992). Cependant, dès les années 1980, l'autosuffisance était largement atteinte, notamment grâce à la Politique Agricole Commune (PAC). Dès lors, les critiques sur le soutien à la production agricole ainsi que sur les dommages environnementaux associés aux modes de production intensifs ont commencé à émerger. Ces difficultés ont d'ailleurs entraîné les premières réformes de la PAC avec la mise en place de quotas laitiers en 1983 et la première réforme de 1992. En termes de gestion des inondations, ils ont permis d'envisager un changement de paradigme où les zones agricoles pourraient s'adapter et contribuer à recevoir les eaux d'inondation, à travers la restauration ou la création de zone de rétention des eaux et la réduction de la vulnérabilité.

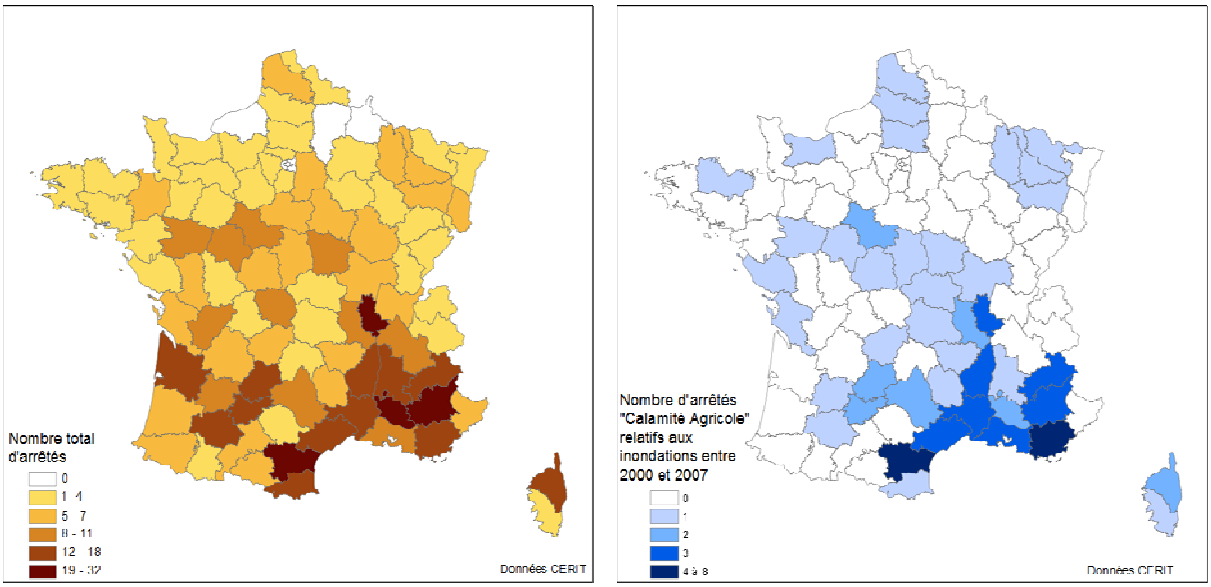
Dans la mise en place des politiques de gestion des inondations telles que la restauration de ZEC, il y a un fort présupposé qui est que les exploitations agricoles sont toujours capables comme elles ont pu l'être historiquement de vivre avec les inondations, d'en supporter les conséquences et de s'en remettre. Or, sur le terrain, plusieurs constats sont frappants :

- les systèmes de production agricoles ont changé (modernisation du matériel, production à plus forte valeur ajoutée, intensification des élevages) et n'ont pas cherché à s'adapter aux inondations car ils en étaient souvent protégés ;
- les conséquences des inondations ont évolué. L'inondation est rarement décrite comme un phénomène bénéfique, notamment sur le Rhône, les agriculteurs redoutent l'érosion des sols, les dépôts de débris et d'encombrants, envisagent la possibilité de pollution de leur sol.

D'un point de vue conceptuel, il apparait donc important de décortiquer et d'analyser le phénomène de vulnérabilité des exploitations agricoles qui vont tenir un rôle central dans ces politiques pour effectivement valider le présupposé fondateur de leur mise en place.

– *Le poids des inondations sur le secteur agricole*[2]

Très peu d'analyses du poids des inondations sur le secteur agricole existent. Nous proposons donc une analyse des données issues de la procédure « Calamité Agricole » permettant une première estimation des dommages dus aux inondations sur ce secteur. La procédure « Calamité Agricole » vise à l'indemnisation des exploitants touchés par des évènements climatiques exceptionnels par le Fond National de Garantie des Calamités Agricoles[3]. Entre 2000 à 2007, jusqu'à 32 arrêtés « Calamité Agricole » par département ont été pris pour l'ensemble des calamités (figure 1, a) et jusqu'à 8 arrêtés en raison d'inondation (figure 1, b). Globalement, les calamités ont plus fortement touché la moitié sud de la France. Cette tendance est nettement confirmée pour les arrêtés relatifs aux inondations, en particulier, dans l'Aude, le Gard, les Bouches-du-Rhône et le Var qui sont les départements les plus touchés.



(a) (b)

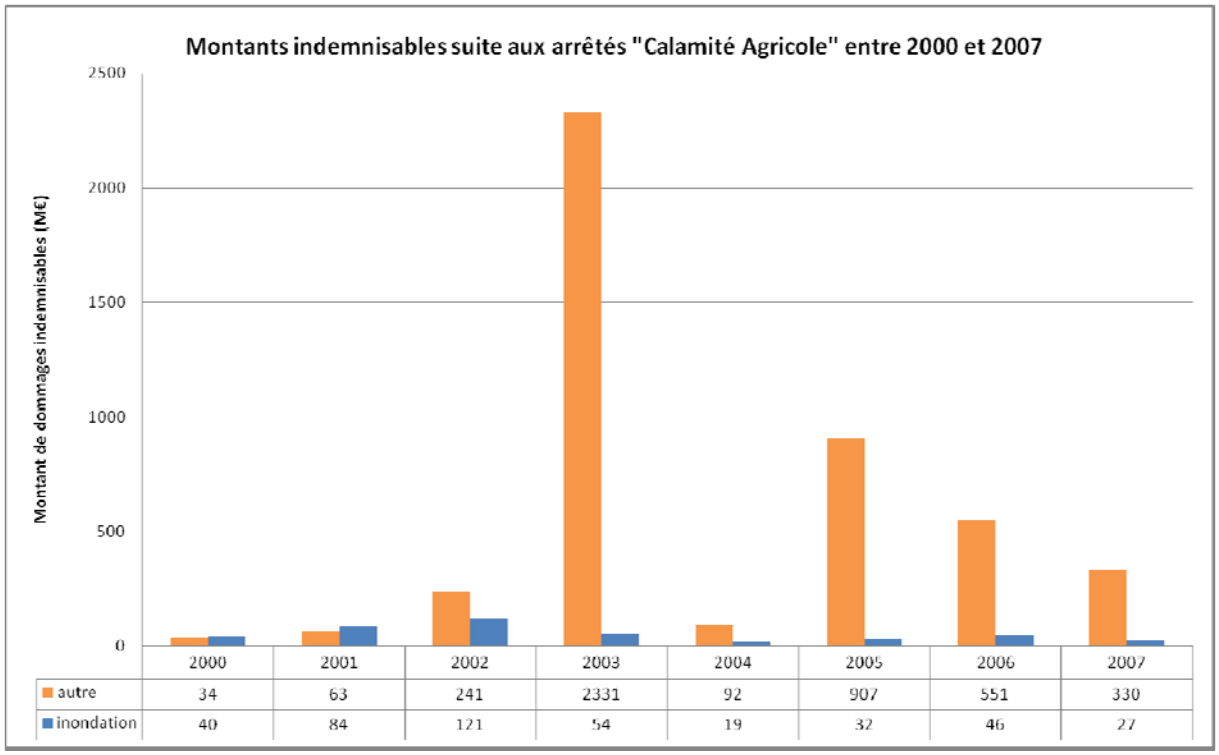
Figure 1 : Répartition départementale du nombre d'arrêtés « Calamité Agricole » recensés entre 2000 et 2007

Le montant indemnisable correspond au montant de dommages calculés sur la base des dossiers déposés par les exploitants suite à une calamité agricole et retenus par l'administration suite à

[2] Les données utilisées pour réaliser les figures présentées dans cette section, nous ont été fournies par le Centre d'Etudes et de Réalisations Informatiques de Toulouse (CERIT). Elles se présentent sous la forme de la liste des arrêtés « Calamité Agricole » par année et localisation d'occurrence.

[3] Pour une description détaillée du système « Calamité Agricole », se référer à l'annexe 1.

l'application des seuils d'éligibilité[4]. Entre 2000 et 2007, les montants indemnisables relatifs aux inondations varient entre 30 et 85 millions d'euros/an et entre 30 millions et plus de 2 milliards d'euros/an pour les autres types de calamité (figure 2). Les montants de dommages indemnisables relatifs aux inondations sont globalement assez constants en comparaison des autres types de calamités[5].



Réalisé d'après données CERIT

Figure 2 : Évolution des dommages indemnisables dans le système « Calamité Agricole »

Le montant indemnisé correspond au montant effectivement versé par l'administration aux exploitants sinistrés reconnus comme éligibles. Entre 2000 à 2007, le montant d'indemnisations versées correspond à 30 %, en moyenne, du montant indemnisable. Les inondations entraînent en

[4] Ces seuils d'éligibilité prévoient que le dommage pour une exploitation doit être supérieur à 13 % du produit théorique brut de l'exploitation et 30 % du produit brut théorique de la culture considérée. Notons que pour une éventuelle utilisation des données issues de la procédure « Calamité Agricole », il faut tenir compte du fait que les dommages aux exploitations touchées mais dont les pertes sont inférieures aux seuils d'éligibilité, ne sont pas comptabilisées.

[5] Les dommages liés aux autres calamités peuvent varier fortement d'une année sur l'autre. En particulier, les sécheresses de 2003 et 2005 ont un poids important.

moyenne une indemnisation légèrement supérieure aux autres calamités agricoles avec un taux de 35 % d'indemnisation par rapport au dommage indemnisable (tableau 1).

Tableau 1 : Montants de dommages indemnisables et indemnisés sur la période 2000 à 2007

Type d'arrêté	Montant de dommages indemnisables (M€)	Montant des indemnisations (M€)	Indemnisable/ Indemnisation
Autre	4 550	1 276	28%
Inondation	421	146	35%
Total	4 971	1 422	29%

Réalisé d'après données CERIT

En 2002 et 2003, la quasi-totalité des indemnisations « Calamité Agricole » versées au titre des inondations l'ont été sur les cinq départements du Rhône aval (tableau 2) en raison de l'occurrence de deux crues qualifiées de centennales.

Tableau 2 : Comparaison des montants de dommages indemnisés pour cause d'inondation par le système « Calamité Agricole » en 2002 et 2003 en France et sur les 5 départements du Rhône aval

	Montant indemnisé relatif aux inondations (M€)		Montant indemnisable (M€)
Année	France	Rhône aval	Rhône aval
2002	47	45	112
2003	18	15	35

Réalisé d'après données CERIT

L'analyse des données « Calamité Agricole » montre que les inondations sont des phénomènes assez fréquents et représentent des montants de dommages élevés sur les zones agricoles. En particulier dans la zone aval du Rhône, les deux crues de 2002 et 2003 ont eu des conséquences majeures car d'importantes surfaces agricoles sont potentiellement inondables[6]. Cette première estimation des dommages, nous amène à considérer dans quelle mesure ils sont pris en compte pour l'aide à la décision concernant les projets de gestion des inondations et si les méthodes existantes d'évaluation pour le secteur agricole permettent cette évaluation.

- *Place de l'évaluation dans le contexte décisionnel*

L'évaluation économique mesure la variation d'utilité produite sur l'ensemble des acteurs concernés par un projet par rapport à une situation témoin. La mise en œuvre de la Directive Cadre 2007/60/CE relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, constitue un pas important vers une application plus systématique de l'évaluation avant la mise en place des projets. En effet, bien que l'évaluation économique ne soit pas rendue explicitement obligatoire, la Directive encourage fortement les états membres à prendre en compte les coûts et bénéfices dans la mise en

[6] La majorité des rives du Rhône étant endiguées, les impacts se font par débordement ou rupture des digues.

place des plans de gestion (Chapitre IV, article 7). En France, le rapport d'évaluation des PAPI (CGEDD-MEEDAT, 2009) pointe une défaillance concernant l'évaluation économique qui a été, dans ces programmes, peu mise en œuvre et préconise un développement méthodologique pour accompagner les maîtres d'ouvrage dans la démarche.

En pratique, la plupart des pays pratiquant l'évaluation économique pour la gestion des inondations utilisent déjà le cadre de l'Analyse Coût-Bénéfice (ACB) (Brouwer et al., 2004), les bénéfices étant le plus souvent évalués par la méthode des dommages évités (Penning-Roswell et al., 2005). La réalisation d'une ACB d'un projet de gestion des inondations requiert l'utilisation de données concernant l'aléa, l'occupation du sol et la vulnérabilité (Erdlenbruch et al., 2008a). Les zones d'expansion de crue correspondant à plusieurs évènements d'inondation sont croisées avec une carte d'occupation des sols établissant la typologie des enjeux. La vulnérabilité des enjeux est ensuite représentée sous la forme de courbes de dommages permettant, pour chaque type d'enjeu, d'exprimer le montant de dommage monétaire correspondant à un scénario d'aléa.

Les politiques actuelles de gestion des inondations, que ce soit la restauration de ZEC ou la réduction de la vulnérabilité, ont des effets importants sur les zones agricoles. L'évaluation des dommages sur ces zones devient donc centrale pour l'évaluation économique.

En termes méthodologiques, l'évaluation de la réduction de la vulnérabilité pose un nouveau défi. En effet, les projets classiques comme la construction de digues modifient seulement les paramètres d'aléa et peuvent donc être évaluées en utilisant, pour chaque enjeu concerné, la même fonction de dommages. Par contre, la réduction de la vulnérabilité s'applique à l'échelle de l'enjeu, en modifiant certaines de ces caractéristiques, pour limiter les dommages directs et les pertes induites sur l'activité. Ainsi, une réflexion sur la vulnérabilité de l'enjeu et la construction d'une nouvelle fonction de dommage doit être engagée. Par ailleurs, si les méthodes d'évaluation des dommages agricoles se limitent actuellement à l'évaluation des pertes de récolte, la réduction de la vulnérabilité a des effets sur d'autres composantes de l'exploitation agricole (matériel, intrants) et sur la continuité de son activité nécessitant la prise en compte de ces dommages dans l'évaluation.

Par ailleurs, en termes d'applicabilité, la restauration des ZEC et la création de rétention soulèvent des questions d'équité et de répartition des bénéfices attendus de ces politiques entre les différents groupes d'acteurs qui peuvent être un frein important à leur mise en œuvre. Dans les négociations engagées, les débats sur les compensations confirment l'intérêt d'une évaluation plus exhaustive des dommages causés aux exploitations agricoles que les seules pertes de récolte (Erdlenbruch et al., 2008b ; Erdlenbruch et al., 2009).

- *Les besoins opérationnels des décideurs du Plan Rhône*

En France, ces questions sont particulièrement pertinentes sur le bassin versant du Rhône, fleuve de 812 km de long, et dont l'histoire est marquée par de nombreuses crues : 1840, 1856, 1890, 1896, 1907, 1910, 1935, 1951, 1955, 1957, 1990, 1993, 1994, 2002 et 2003 (Mission Rhône, 2009b). En particulier, celle de Mai 1856 a causé des dommages importants tant sur les villes comme Lyon que sur les zones agricoles (figure 3).

Source : Mission Rhône(2009b)

Figure 3: Crue de mai-juin 1856, débordement du Rhône devant Avignon, vue prise du rocher du Dom (L'illustration)

La gestion classique par la construction de digues a longtemps été le paradigme dominant. Mais, ses limites sont apparues avec les conséquences désastreuses des ruptures de digues, en 1935 (figure 4) puis en 1993, 1994 et 2003.

Source : Mission Rhône (2009b)

Figure 4 : Crue de novembre-décembre 1935, plaine de Mondragon envahie par les eaux suite à la rupture d'une digue (L'illustration)

En 2003, le volet « inondation » du Plan Rhône, piloté par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) de Rhône Alpes, a ainsi été mis en place suite à ces crues majeures. En 2007, le programme de gestion a été reconduit jusqu'en 2013 dans le cadre du Contrat de Projet Interrégional du Plan Rhône et appuyé par un soutien de l'Union Européenne à travers le FEDER (2007). Ce programme est décliné selon un découpage en trois zones

géographiques (figure 5) : le Rhône amont de sa source à Givors, le Rhône moyen de Givors à Viviers, le Rhône aval de Viviers à l'exutoire dans la mer Méditerranée.

Source : DIREN Rhône Alpes

Figure 5 : Découpage de la gestion des inondations sur le Rhône

L'axe 1 porte sur la réduction de l'aléa et envisage principalement, de préserver les ZEC existantes et de reconquérir des zones qui étaient des ZEC naturelles avant les aménagements de protection réalisés par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). L'axe 2 porte sur la réduction de la vulnérabilité des activités économiques. Le secteur agricole est particulièrement concerné par les actions de réduction de la vulnérabilité dans le Plan Rhône et l'enjeu affiché est « au-delà de la simple mise en sécurité des personnes, des animaux et des biens matériels d'adapter le choix des cultures et, d'une manière générale, la conduite des exploitations afin d'assurer sa viabilité » (Mission Rhône, 2009a). Il s'agit donc, d'une part, de mettre en place un programme efficient d'un point de vue économique mais également permettant la diminution des dommages supportés par les exploitants pour assurer leur viabilité sur le territoire. Cette politique de réduction de la vulnérabilité agricole est principalement envisagée sur la zone Rhône aval où se concentrent des exploitations agricoles diversifiées.

Lors de la mise en œuvre de l'axe 2, les gestionnaires du Plan Rhône se sont retrouvés confrontés à des questions à plusieurs niveaux.

Dans un premier temps, ils ont cherché à déterminer :

- Quelles zones du territoire devaient être prioritairement ciblées ?
- Quels types d'exploitations devaient bénéficier de ces mesures ?
- Combien de mesures pourraient être mises en place ?

Pour ce premier état des lieux, une mission de réduction de la vulnérabilité agricole en zone inondable a été créée en 2005, composée de la Chambre Régionale d'Agriculture Provence Alpes Côte d'Azur et des Chambres Départementales d'Agriculture de l'Ardèche, des Bouches-du-Rhône, de la Drôme, du Gard et du Vaucluse. Près de 3000 exploitations agricoles représentant environ 105 km²

de surface agricole utile ont ainsi été identifiées comme potentiellement concernées par le risque d'inondation. Puis, un diagnostic qualitatif des facteurs de vulnérabilité par types de production a été mené sur la base de 300 entretiens[7]. Il a abouti à la proposition d'une liste de mesures de réduction de la vulnérabilité, d'un plan d'action des mesures à mettre en place et d'un chiffrage des coûts. Cinq groupes de mesures en fonction de leurs effets attendus sur les exploitations agricoles peuvent être distingués : les mesures de gestion de crise (plan d'urgence, plan de remise en route…), les mesures organisationnelles de l'exploitation (gestion des stocks…), les mesures physiques dans les bâtiments (surélévation…), les mesures physiques sur les parcelles (sensibilité des cultures…), les mesures financières (assurance…).

Dans un second temps, il était important pour les décideurs, dans le contexte de financement public, de déterminer l'efficacité et l'efficience de ces mesures sachant que le budget alloué était inscrit dans le Plan Rhône. Le questionnement opérationnel portait sur :

- l'identification des effets des mesures sur les exploitations ;
- la classification des mesures en termes d'efficacité pour différents types d'exploitation ;
- la détermination de l'efficience des mesures.

Or, comme cela a été dit précédemment les mesures de réduction de la vulnérabilité ne peuvent pas être évaluées en utilisant les méthodes existantes d'évaluation des dommages agricoles. C'est dans ce cadre, que le Plan Rhône est venu solliciter notre équipe pour développer une méthode d'évaluation des dommages agricoles permettant de réaliser l'évaluation des mesures de réduction de la vulnérabilité.

- **Problématique et questions de recherche**

Le contexte général présenté et son illustration opérationnelle sur la zone aval du Rhône nous conduit à analyser la vulnérabilité agricole face aux inondations. Plus précisément, nous cherchons à déterminer l'apport d'une modélisation de la vulnérabilité à l'échelle de l'exploitation agricole pour caractériser et évaluer les effets des inondations sur les zones agricoles.

[7] Ces entretiens utilisaient comme support des guides de diagnostic adaptés au contexte du Rhône aval à partir de ceux élaborés par le Plan Loire.

L'enjeu de cette modélisation est double puisqu'il s'agit de :

- permettre l'évaluation des dommages à l'échelle de l'exploitation (évaluation financière) et amener une réflexion sur la vulnérabilité ;
- contribuer à l'amélioration l'évaluation économique des projets de gestion des inondations en proposant une évaluation des dommages agricoles plus large que les seuls dommages aux cultures et permettant d'évaluer la réduction de la vulnérabilité.

Pour cela, la thèse s'articule autour de trois groupes de questions de recherche :

- Quels sont les cadres théoriques relatifs aux concepts de vulnérabilité et de modélisation des systèmes agricoles, compatibles avec l'évaluation économique et pertinents pour la construction de notre modèle de vulnérabilité ?
- Quels sont les caractéristiques et processus majeurs de la vulnérabilité aux inondations à l'échelle des exploitations agricoles ?
- Quelle est la pertinence des indicateurs produits par le modèle de vulnérabilité pour caractériser et évaluer les effets des inondations à l'échelle de l'exploitation ? Dans quelle mesure le modèle de vulnérabilité peut être utilisé pour évaluer les projets de réduction de la vulnérabilité ?

- **Plan de la thèse**

La thèse s'articule autour de trois parties principales qui viennent apporter des réponses à ces trois questions de recherche.

- *Première question : comment articuler les concepts théoriques de vulnérabilité, modélisation systémique et évaluation économique ?*

Le concept de vulnérabilité est très largement utilisé par différentes disciplines. Pour l'évaluation économique, il désigne globalement la propension des enjeux à subir des dommages. En pratique, dans le cadre de l'évaluation économique des projets de gestion des inondations, la modélisation de la vulnérabilité des enjeux est relativement peu développée et représentée de façon très synthétique par une courbe de dommages. Pour les enjeux agricoles, la modélisation de la vulnérabilité se réduit, le plus souvent, à l'expression des pertes surfaciques de récoltes en fonction de l'intensité de l'inondation. Cette modélisation est très fruste mais convient de façon opérationnelle pour évaluer économiquement les projets classiques de gestion des inondations. Par contre, quand il s'agit d'approfondir les effets de la mise en place d'une ZEC ou d'évaluer des mesures de réduction de la vulnérabilité, cette modélisation est inutilisable.

Or, les cadres théoriques et propositions de modèles foisonnent tant pour la modélisation des exploitations que de la vulnérabilité. Il nous est donc apparu nécessaire de proposer une revue de

littérature des différents cadres théoriques et modèles conceptuels qui permettrait de développer un modèle de vulnérabilité à l'échelle de l'exploitation agricole.

La thèse commence (chapitre 1, p 19) par une analyse du concept de vulnérabilité et de certains concepts attenants (résilience, adaptation). L'objectif de ce chapitre est de fixer une définition de ces concepts qui sont ensuite utilisés tout au long de la thèse. Nous analysons également les différents cadres existants pour l'analyse de la vulnérabilité et retenons ceux qui nous paraissent pertinents pour le développement de notre modèle. Nous introduisons ainsi, une définition de la vulnérabilité intégrant les phases d'endommagement et de remise en route ainsi que l'approche des capitaux multiples formalisée en économie par Ekins (1992) qui nous permet, dans le modèle, de prendre en compte l'importance des dotations en capital physique, humain, social et financier pour la remise en route.

Le chapitre 2 (p 51) propose une analyse critique des types de modélisation des exploitations agricoles susceptibles d'être utilisés pour le modèle de vulnérabilité. Cette analyse est organisée autour des contraintes de modélisation suivantes :

- permettre l'intégration et la discussion des connaissances expertes ;
- permettre la discussion des hypothèses de modélisation ;
- être compatible avec le modèle des capitaux multiples.

Nous retenons dans ce chapitre une approche de modélisation systémique des exploitations agricoles en discutant les hypothèses sur le modèle de rationalité retenu.

Le chapitre 3 (p 73) nous permet d'analyser les méthodes d'évaluation économique et les hypothèses et limites qu'elles sous-tendent. Nous proposons ainsi une réflexion sur la méthode des dommages évités et l'apport de la théorie des capitaux multiples dans le cadre de l'évaluation économique. De plus, nous analysons précisément les difficultés soulevées par la mise en œuvre des nouvelles politiques de gestion pour l'évaluation économique, citées précédemment. Les méthodes existantes pour l'évaluation des dommages agricoles font ensuite l'objet d'une méta-analyse permettant de déterminer quels types de dommages sont pris en compte et avec quels indicateurs.

Nous concluons la première partie en explicitant les différentes hypothèses de travail formulées ainsi que les apports et limites induites par celle-ci sur le modèle.

- *Deuxième question : Proposer un modèle conceptuel de la vulnérabilité avec une approche à l'échelle de l'exploitation agricole*

La partie II (p 107) propose une description détaillée du modèle de vulnérabilité, appelé par la suite EVA[8], en explicitant les hypothèses de modélisation.

Dans le chapitre 4 (p 109), nous exprimons de façon littérale les principes de modélisation, à savoir :

- les limites du système étudié et ses relations avec son environnement ;
- la description des formes de capitaux et de leur évolution suite à l'inondation ;
- l'intégration de l'organisation du travail ;
- la prise en compte des stratégies de remise en route.

En particulier, nous introduisons trois profils d'exploitants (Interne, Prestation, Solidarité) nous permettant de définir en fonction des dotations en capital financier et social, le type de stratégie de remise en route pouvant être mis en œuvre par l'exploitant. Le profil Interne (faible capital social et financier) représente le cas d'un exploitant isolé et ne disposant pas d'alternatives pour poursuivre son activité en cas de contrainte alors que les profils Prestation et Solidarité peuvent mobiliser des ressources externes.

Le chapitre 5 (p129) décrit le modèle conceptuel en utilisant un formalisme Unified Modelling Langage, classiquement utilisé en modélisation, et propose une description des composantes de l'exploitation et des processus en œuvre suite à l'inondation. Ce chapitre est l'occasion de préciser les différentes hypothèses de modélisation. Nous terminons par une description du modèle de données d'entrée et des sorties.

- *Troisième question : analyser la pertinence d'une modélisation de la vulnérabilité aux inondations à l'échelle de l'exploitation agricole pour l'évaluation des dommages*

Dans cette dernière partie nous proposons une application du modèle EVA sur trois exploitations types de la zone Rhône aval permettant de déterminer la capacité du modèle à :

- caractériser la vulnérabilité et évaluer les dommages sur les exploitations agricoles ;
- contribuer à l'évaluation économique de mesures de réduction de la vulnérabilité.

Cette application repose sur une implémentation en langage R du modèle EVA.

Nous introduisons au chapitre 6 (p 171), une description des trois exploitations types retenues comme représentatives de la zone Rhône aval et des données utilisées dans l'application. Nous

[8] EVA, nom attribué au modèle, correspond à l'acronyme Évaluation de la Vulnérabilité Agricole.

détaillons également les hypothèses de valorisation. En effet, les dommages simulés avec le modèle EVA peuvent être valorisés d'un point de vue financier (coûts supportés par l'exploitant) ainsi que d'un point de vue économique pour une utilisation dans une évaluation économique.

Le chapitre 7 (p 193) illustre l'application aux trois exploitations types retenues sur la zone Rhône aval pour certains scénarios d'inondations. Il est fait le choix de ne tester que des scénarios d'inondation entraînant potentiellement des effets induits sur l'activité. L'évaluation des dommages est réalisée avec une valorisation financière puis économique et intègre les dommages directs (décrits en annexe 13) et induits. Une comparaison entre les trois profils d'exploitants montre que les dommages simulés avec le profil Interne sont globalement plus élevés quelle que soit la valorisation.

Dans le chapitre 8 (p 237), nous utilisons le modèle EVA pour évaluer les dommages évités par la mise en place de différents types de mesures de réduction de la vulnérabilité. L'enjeu de ce chapitre est d'explorer l'efficacité des mesures de réduction de la vulnérabilité pour certains scénarios d'inondation probable sur la zone d'application. Nous comparons l'efficacité de chacune des mesures pour les trois exploitations types et pour les profils d'exploitants avant de proposer une synthèse. Ce travail exploratoire constitue une étape préalable et nécessaire à la réalisation d'une ACB qui n'est pas réalisée dans ce travail mais pourrait l'être par la suite en s'appuyant sur des exploitations localisées et dont les scénarios d'exposition pour plusieurs évènements d'inondation sont connus.

Enfin, ce travail s'achève sur une conclusion générale reprenant les intérêts et limites du modèle pour l'analyse de la vulnérabilité des exploitations agricoles et pour l'évaluation économique des politiques de gestion des inondations.

Nous revenons en particulier sur l'intérêt d'intégrer pour certains scénarios d'inondation, l'approche à l'échelle de l'exploitation agricole qui permet de capter les effets induits sur l'activité suite à l'endommagement direct du capital physique. Nous proposons ensuite une analyse des apports du modèle en termes d'appui à la décision. Enfin, les perspectives de développements ultérieurs du modèle sont décrites.

PARTIE I VULNÉRABILITÉ, MODÉLISATION DES SYSTÈMES AGRICOLES ET ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES PROJETS DE GESTION DES INONDATIONS

Dans cette première partie, nous présentons une revue de littérature sur les trois concepts centraux de notre approche : la vulnérabilité, la modélisation des exploitations agricoles et l'évaluation économique. Peu de connexions existent entre ces différents groupes de littérature. Or, notre objectif de recherche est de proposer un modèle de vulnérabilité permettant d'exprimer les effets de l'inondation à l'échelle de l'exploitation agricole. Bien que le concept de vulnérabilité soit important dans l'évaluation économique des projets de gestion des inondations puisqu'il permet d'exprimer le montant de dommages subis par un enjeu, il est souvent modélisé de façon simplifiée. En particulier, pour les zones agricoles, le système exploitation agricole n'est pas considéré et les dommages sont généralement exprimés en termes de pertes de récolte monétarisées. Il s'agit donc dans cette partie :

- d'identifier les cadres existants dans la littérature autour de la vulnérabilité et de la modélisation des exploitations agricoles pertinents pour notre modèle de vulnérabilité à l'échelle de l'exploitation agricole ;
- d'établir les définitions et hypothèses de travail mobilisées ensuite dans la modélisation de la vulnérabilité.

Le premier chapitre présente une analyse critique des cadres théoriques développés autour du concept de vulnérabilité. Principalement, nous retenons une définition précise de la vulnérabilité et précisons les hypothèses de travail retenues pour le développement du modèle de vulnérabilité.

Le second chapitre propose un aperçu des différents types de modélisation pouvant être appliqués aux exploitations agricoles en précisant les avantages et limites de chaque approche pour notre démarche. Nous décrivons enfin l'approche de modélisation retenue et précisons les hypothèses attenantes.

Le troisième chapitre pose le cadre défini par l'évaluation économique, en particulier, l'Analyse Coût-Bénéfice. La pratique relative à l'évaluation des projets de gestion des inondations est ensuite présentée et accompagnée d'une discussion sur les hypothèses et difficultés relatives aux nouvelles politiques. Une méta-analyse des méthodes existantes pour l'évaluation des dommages sur les zones agricoles permet finalement de montrer l'intérêt d'une approche d'évaluation reposant sur une véritable appréhension de la vulnérabilité de l'exploitation agricole en tant que système économique.

CHAPITRE 1. CONCEPTUALISATION ET ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ

Le concept de vulnérabilité, ainsi que les concepts attenants d'adaptation et de résilience, sont utilisés de plus en plus fréquemment, autant par les chercheurs dans différentes disciplines que par les opérationnels (Vogel et al., 2007), pour aborder des problématiques de gestion des risques, de changement climatique ou de pauvreté et de développement. Bien que faisant l'objet de nombreux travaux, aucun consensus n'est réellement établi autour de leurs définitions entraînant parfois même des confusions (Gallopin, 2006 ; Janssen et al., 2006b ; O'Brien et al., 2005). Fondamentalement, une définition de base peut toutefois être retenue pour la ***vulnérabilité*** qui est communément définie comme ***la propension d'un système à être perturbé par un choc***.

La variabilité des définitions s'explique en partie par la diversité des disciplines (économie, géographie, sociologie, anthropologie) qui mobilisent ces concepts avec des épistémologies différentes. Selon O'Brien et al (2005), la définition est aussi orientée par les objectifs de recherches classés en deux types que sont l'évaluation quantitative et l'analyse des processus. L'opposition de ces deux objectifs est toutefois artificielle dans notre approche car nous cherchons à proposer une modélisation explicite des processus pour évaluer quantitativement la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations. L'enjeu de ce chapitre est tout d'abord de préciser les définitions retenues pour la vulnérabilité et les concepts liés comme la résilience, l'adaptation ou l'exposition [9]. L'ensemble des termes est récapitulé dans un glossaire (annexe 2).

Sur la base d'une revue de littérature autour du concept de vulnérabilité, nous déterminons les cadres et définitions retenues en répondant aux quatre questions suivantes :

- Quelles sont les composantes de la vulnérabilité à intégrer dans l'analyse ?
- Comment sont considérés les systèmes, leurs composantes et leur environnement?
- Quels liens, limites et recoupements peuvent être établis entre le concept de vulnérabilité et les concepts proches de résilience, adaptation ?
- Comment évaluer la vulnérabilité ?

[9] Les définitions retenues tout au long de la thèse sont identifiées par une police spécifique ***définition***.

1.1 Les concepts clés

1.1.1. Définitions retenues des concepts de vulnérabilité, résilience et adaptation

En 1996, Cutter proposait déjà près de 20 définitions de la vulnérabilité et une certaine confusion existe sur les distinctions et liens pouvant être établis entre la vulnérabilité, la résilience et l'adaptation. Gallopin (2006) propose une analyse approfondie des liens entre ces concepts et sa conceptualisation nous parait être la plus poussée pour définir et distinguer les concepts de vulnérabilité, résilience et adaptation. Nous la retenons par la suite et la précisons aux vues des autres cadres théoriques.

La ***vulnérabilité*** est définie comme la ***propension d'un système à subir des transformations significatives en conséquence de ses interactions avec des processus ou des évènements internes ou externes.***

Cette première partie de la définition précise que la vulnérabilité doit être analysée à l'échelle d'un système et repose sur ses caractéristiques. Ensuite, Gallopin (2006) affine cette définition en proposant de distinguer deux composantes de la vulnérabilité.

La vulnérabilité résulte de deux facteurs principaux caractéristiques des systèmes :

- ***leur sensibilité (capacité à être transformé par une perturbation),***
- ***leur capacité de réponse (capacité à s'ajuster, résister à la perturbation, en modérer les dommages potentiels, gérer les conséquences des transformations).***

Cette seconde partie de la définition met en évidence deux phases que nous intégrons dans le modèle de vulnérabilité que sont l'endommagement, lié à la sensibilité des éléments du système, et la remise en route, c'est-à-dire la phase de retour à une situation d'équilibre, liée à la capacité de réponse.

Le questionnement sur la vulnérabilité des systèmes, nous amène à réfléchir sur des concepts attenants afin de bien les distinguer et de comprendre les liens existants. Nous proposons ici les définitions générales de ces concepts qui sont analysés plus précisément par la suite.

La résilience est généralement admise comme le niveau de perturbation qu'un système peut subir sans être profondément modifié dans ses fonctionnalités (Holling, 1973).

La ***capacité d'adaptation*** est généralement admise comme un ***processus par lequel un système s'adapte à de nouvelles conditions***.

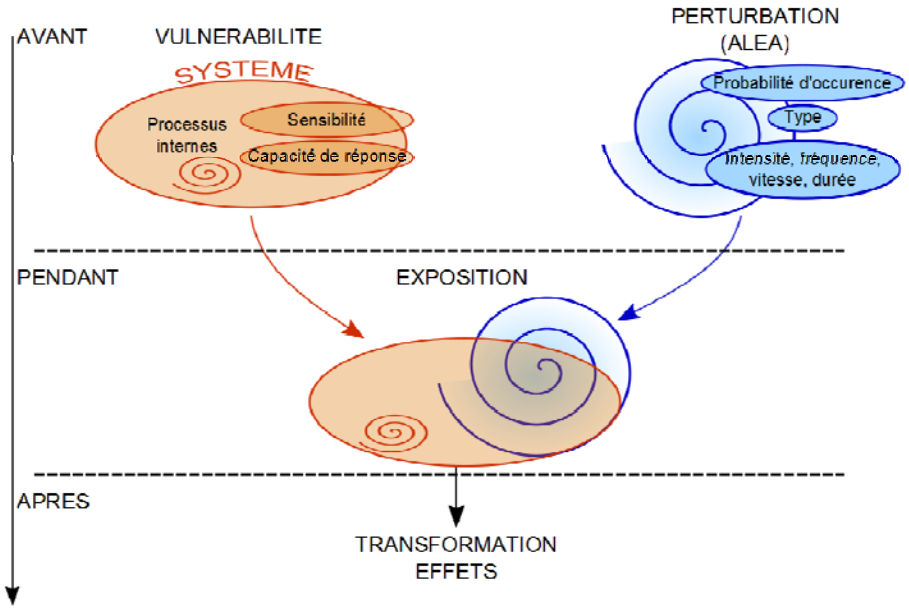
1.1.2. Vulnérabilité, aléa, exposition et effets

Selon la définition retenue, la vulnérabilité est caractéristique d'un système et se définit par rapport à un évènement particulier. Dans le cas des inondations, le terme aléa est généralement utilisé pour désigner cet évènement.

Selon le dictionnaire de langue française, le terme ***aléa***, emprunté du latin *alea* « dé, jeu de dés, hasard, chance », se définit comme un ***hasard favorable ou, plus souvent, défavorable*** c'est-à-dire un ***évènement se produisant de façon aléatoire et pouvant être à l'origine d'impacts***. Pour les inondations, le phénomène physique aléatoire peut généralement être caractérisé par une probabilité d'occurrence en fonction de son intensité.

Dans la littérature sur la vulnérabilité, l'exposition est parfois considérée comme une composante de la vulnérabilité. A l'instar de Gallopin (2006) (figure 6), nous considérons l'exposition, la vulnérabilité et l'aléa comme des concepts distincts. L'***exposition*** est définie comme le ***degré, la durée, l'ampleur du contact entre un aléa et un système*** (Adger, 2006 ; Gallopin, 2006). La vulnérabilité est caractéristique d'un système et préexiste à l'occurrence d'un aléa. L'aléa est indépendant et n'a pas de conséquences s'il n'y a pas de contact avec un enjeu. L'exposition correspond au contact entre un système caractérisé par sa vulnérabilité et un aléa caractérisé par ses paramètres. Temporellement, la phase d'exposition est la phase pendant laquelle l'aléa se produit sur le système. Cette exposition entraîne une transformation du système qui dépend à la fois de la vulnérabilité et des caractéristiques de l'aléa. Les ***effets*** résultant sur le système sont alors définis comme ***modifications attendues sur des enjeux liées à l'occurrence d'une perturbation*** (Garrabé, 1994, p.151)**.**

L'évaluation de la vulnérabilité pour un aléa donné revient alors à évaluer et comparer les effets entre la situation avec et sans exposition à l'aléa.



D'après Gallopin (2006)

Figure 6 : Liens entre vulnérabilité, aléa, exposition et impacts

1.2 Analyse du lien entre les concepts de vulnérabilité, résilience et adaptation

Janssen et al (2006b) ont réalisé une analyse bibliométrique sur 2286 articles publiés entre 1967 et 2005 sur les questions de la résilience, de la vulnérabilité et de l'adaptation. Cette analyse met en évidence que le nombre de publications a augmenté de façon considérable entre 1995 et 2005, ce qui coïncide avec l'intérêt croissant porté au changement climatique et que si les notions de résilience, vulnérabilité et d'adaptation, ont été initialement faiblement corrélées, l'orientation actuelle va vers une plus grande intégration.

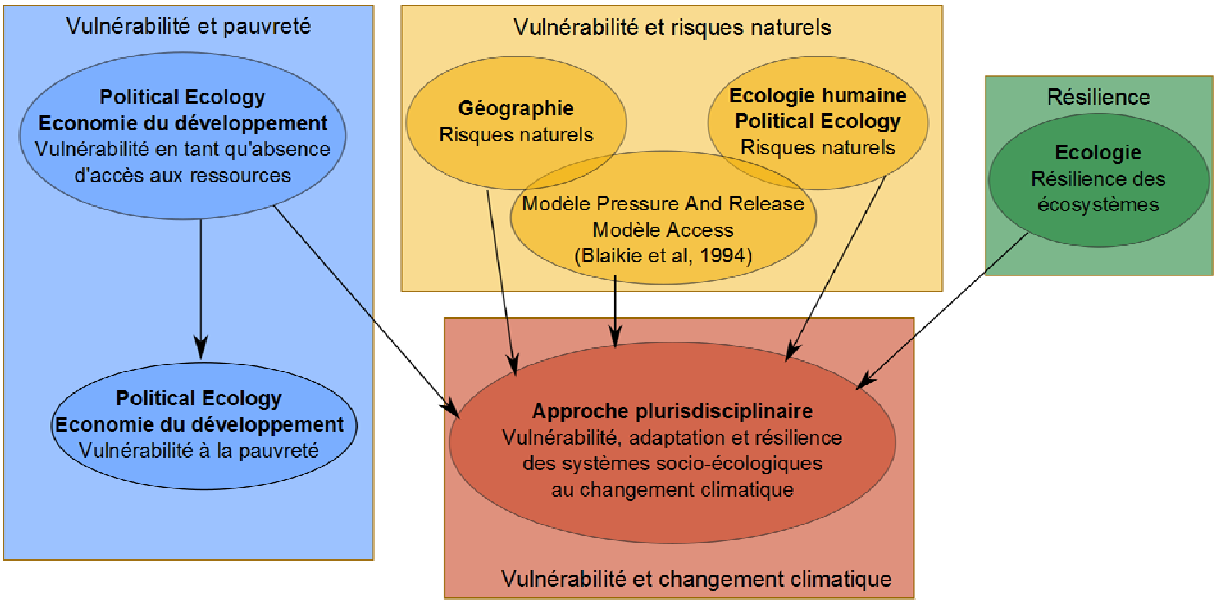
La figure 7 montre l'évolution de la mobilisation des concepts de vulnérabilité et résilience dans les communautés scientifiques. A l'origine, deux grands courants ont contribué à alimenter la recherche sur le concept de vulnérabilité (Adger, 2006):

- Le courant de recherche sur les risques naturels comprend deux sous-groupes que sont l'approche de type géographe sur les aléas et l'approche de type Political Ecolgy[10] centrée sur les individus et leur relation à l'environnement (Füssel, 2007). Blaikie et al (1994 ; 2004) recoupent ces deux approches dans les modèles Pressure And Release et Access qui sont décrits dans la section 1.3.
- Le courant de recherche sur les conditions d'accès aux ressources, la pauvreté et le développement, mobilise également le concept de vulnérabilité en centrant l'approche sur les individus, leur capacité à gérer et subsister en fonction des ressources disponibles et de leur accès (Adger et al., 1999).

Au départ développé de façon isolée en écologie, le concept de résilience est maintenant largement utilisé par la communauté travaillant sur le changement climatique (Füssel, 2007), ce qui devrait permettre de faire converger les différents courants de recherche, tant sur la vulnérabilité que sur la résilience (Adger, 2006).

[10] La définition proposée par le site du réseau international de chercheurs « Political Ecolgy » est la suivante : « La Political Ecology peut être définie [...] comme l'étude des relations de pouvoir à propos de la gestion de l'espace et de l'environnement (inégalités dans les coûts et bénéfices, inéquités sociales)».

http://www.politicalecology.fr/index.php/projets/political_ecology



Adaptation d'Adger (2006)

Figure 7 : Évolution des courants de recherche sur la vulnérabilité, résilience et adaptation

Dans les sections suivantes, nous présentons une revue plus détaillée de ces différents courants de recherche (figure 7) :

- la vulnérabilité dans la gestion des risques naturels (section 1.3, p23)
- la vulnérabilité par rapport aux problématiques de pauvreté et de développement (section 1.4, p27)
- l'approche par la résilience (section 1.5, p34)
- la vulnérabilité dans le changement climatique (section 1.6, p37).

1.3 Vulnérabilité et risques naturels

La recherche sur les risques naturels a, depuis sa création, cherché à intégrer les sciences physiques et sociales. La discipline principale, la géographie, physique puis humaine dans les années 1990, utilise une méthode d'analyse qui repose sur l'étude et la comparaison de cas (Janssen et al., 2006b). La conception prédominante est de considérer que le risque auquel un groupe d'individus est exposé est la résultante de deux composantes que sont l'intensité de l'aléa et la vulnérabilité des individus. Le ***risque*** peut ainsi être défini comme l'***intersection potentielle d'un aléa et d'une vulnérabilité*** ; l'exposition correspondant à l'intersection effective.

1.3.1. Distinction entre vulnérabilité biophysique et vulnérabilité sociale

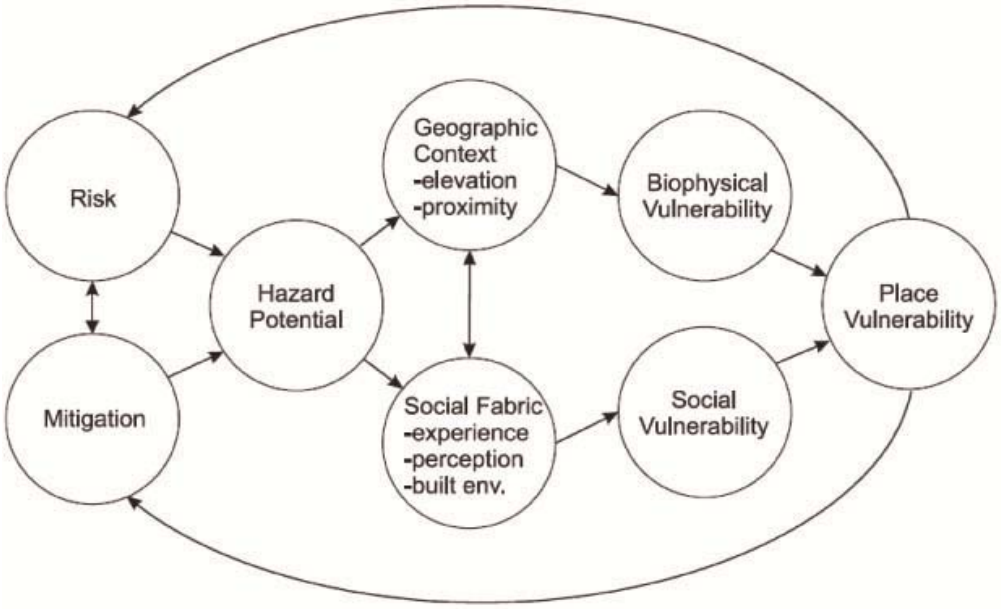
Au sein de la recherche sur les risques naturels, une première distinction structurante s'est établie entre vulnérabilité biophysique et vulnérabilité sociale.

L'étude de la vulnérabilité biophysique insiste sur les conséquences des aléas climatiques sur les composantes physiques des systèmes (rendement, érosion…) alors que l'étude de la vulnérabilité

sociale se concentre sur les questions d'accès , de droit et de capital social (O'Brien et al., 2005). La vulnérabilité sociale est définie par Adger et al (1999) au niveau des individus et groupes sociaux comme leur capacité à faire face et à s'adapter à tout stress externe ayant un impact sur leurs capacité de subsistance et leur bien-être.

Le cadre d'analyse « Hazard of Place » (figure 8) développé par Cutter (1996 ; 2003) qui combine vulnérabilité biophysique et sociale, permet une analyse selon deux angles : d'une part, la vulnérabilité est attachée à une localisation ; d'autre part, elle résulte d'une composante biophysique et d'une composante sociale.

L'aléa potentiel s'exprime différemment sur les individus en fonction de deux composantes. Premièrement, leur contexte géographique détermine leur vulnérabilité biophysique et deuxièmement, le contexte social détermine leur vulnérabilité sociale (figure 8). Puis, c'est l'intersection et l'interaction entre la vulnérabilité sociale et biophysique qui permet de définir la vulnérabilité locale (Place vulnerability). Une boucle de rétroaction de la vulnérabilité locale vers le risque et la protection implique que le niveau de vulnérabilité locale va pouvoir influencer ces aspects.



Source : Cutter et al. (1996 ; 2003)

Figure 8: Le modèle d'analyse de la vulnérabilité « Hazard of Place »

Cutter montre ensuite que si la partie biophysique de la vulnérabilité a souvent été bien investiguée, la partie sociale a longtemps été délaissée. Cette vulnérabilité qui est difficilement quantifiable est notamment absente de tous les rapports d'évaluation post-catastrophe (Cutter et al., 2003). Les concepts utilisés par Cutter sont pertinents pour notre analyse de vulnérabilité. En effet, l'identification d'une vulnérabilité biophysique et d'une vulnérabilité sociale met en évidence la nécessité d'analyser l'ensemble de ces processus à l'origine d'effets sur le système. Cependant,

l'application de ce cadre d'analyse pour l'évaluation de la vulnérabilité menée dans cette thèse ne nous parait pas envisageable pour plusieurs raisons. Premièrement, il ne propose pas de formalisation du système étudié. Deuxièmement, ce modèle de vulnérabilité ne propose pas d'analyse des processus biophysiques et sociaux qui conditionnent la vulnérabilité. Il ne permet pas de finaliser explicitement le lien entre vulnérabilité biophysique et sociale déterminant la vulnérabilité locale. Les concepts de vulnérabilité biophysique et sociale restent abstrus et l'analyse du lien entre vulnérabilité biophysique et sociale n'est donc pas réellement établie.

Finalement, on peut s'interroger sur l'intérêt conceptuel de cette distinction entre vulnérabilité sociale et biophysique qui parait si structurante dans la littérature de la vulnérabilité aux risques naturels. En effet, comme le souligne Adger (2006) et O'Brien(2005) dès lors que l'analyse se porte sur les systèmes socio-écologiques, il semble difficile d'analyser de façon dissociée les processus biologiques, biophysiques et la composante sociale.

1.3.2. Une définition cherchant à unifier le courant sur la gestion des risques naturels

Le livre « At Risk », édité une première fois en 1994 (Blaikie et al., 1994) puis réédité en 2004 (Wisner et al., 2004), est centré sur la vulnérabilité des individus face aux risques naturels. La définition de la vulnérabilité proposée par Blaikie et al est couramment citée dans la littérature. Les auteurs définissent la vulnérabilité comme « les caractéristiques et la situation, d'une personne ou d'un groupe de personnes, qui influencent leur capacité à anticiper, gérer, résister et se remettre de l'impact d'un évènement naturel ».

Dans cette définition, l'échelle d'analyse est celle des individus ou groupes d'individus. Dans notre approche, l'échelle d'analyse est l'exploitation agricole en tant que SES.

Blaikie et al mettent en avant plusieurs processus qui déterminent la vulnérabilité que sont le fait d'anticiper, de supporter et de se remettre d'un évènement. Dans notre conception de la vulnérabilité, la capacité à anticiper l'évènement peut correspondre à deux concepts différents en fonction de leur temporalité[11]. La capacité d'anticipation à court terme (gestion de crise) est intégrée à la vulnérabilité. Par contre, la capacité d'anticipation à moyen et long termes, relève, selon nous, de la capacité d'adaptation, même si, ces deux concepts sont fortement liés dans le sens où un système ayant une grande capacité d'adaptation devient, à moyen et long termes, moins vulnérable. Cependant, dans une optique d'évaluation, il apparait intéressant de dissocier ces deux concepts afin d'être en mesure d'évaluer d'une part, la vulnérabilité et d'autre part les effets d'une adaptation.

[11] La temporalité est le caractère relatif au temps.

Ensuite, les processus de gestion et de résistance reflètent, de notre point de vue, assez mal la phase d'endommagement et de remise en route des systèmes exposés (figure 9).

Vulnérabilité (Blaikie et al, 1994)	Anticiper	Gérer	Résister	Se remettre
Vulnérabilité (Définition retenue)	Gérer la crise		Être endommagé	Se remettre
Adaptation (Définition retenue)	Modifier ses caractéristiques (moyen et long termes)			

Figure 9: Confrontation de la définition de la vulnérabilité de Blaikie et al. (1994) et de la définition retenue

Nous proposons dans la sous-section suivante une revue des cadres d'analyse de la vulnérabilité proposés par les auteurs de « At Risk ».

1.3.3. Cadres d'analyse proposés : lien entre vulnérabilité sociale et biophysique

Blaikie et al. proposent trois cadres d'analyse de la vulnérabilité par rapport aux risques naturels :

- le modèle « Risk Hazard » (RH),
- le modèle « Pressure and Release » (PAR),
- le modèle « Access ».

Ces trois modèles montrent une évolution vers l'élaboration d'un cadre de plus en plus précis en déconstruisant progressivement les « boîtes noires » et en formalisant de plus en plus précisément les processus implicites de la vulnérabilité. Cette démarche a également pour objectif d'intégrer et de formaliser la composante sociale dans l'analyse de vulnérabilité.

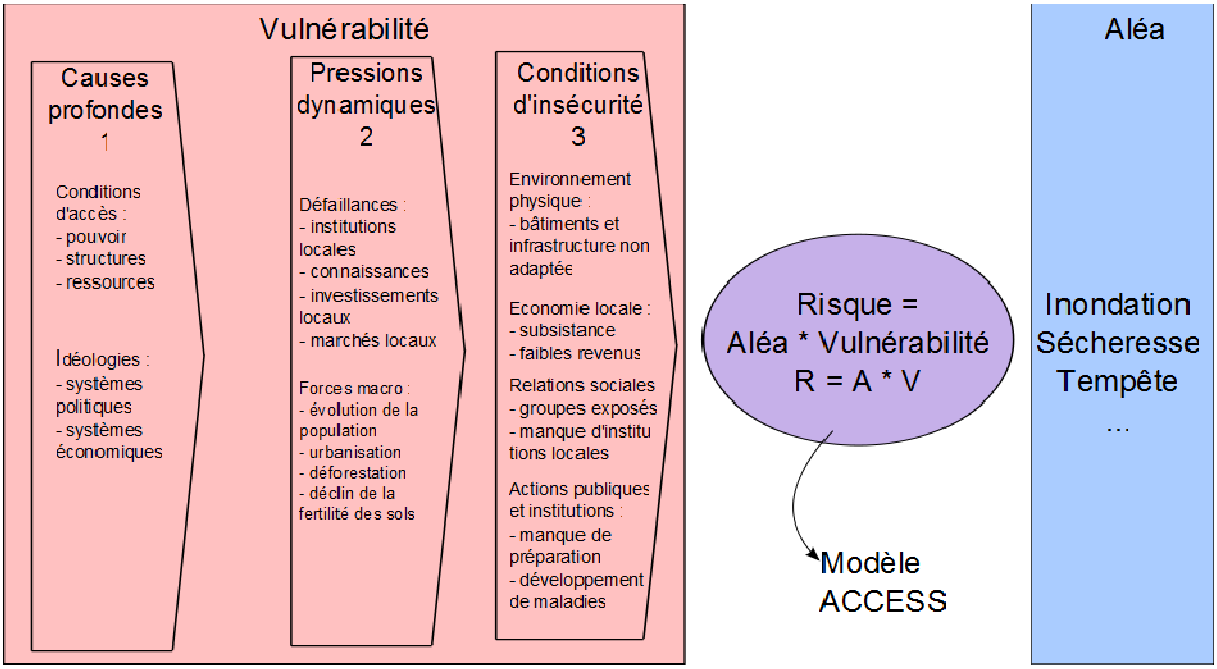
- *Modèle Risk Hazard*

Le premier modèle, le modèle Risk-Hazard est illustratif d'une conception plutôt biophysique de la vulnérabilité. Il propose d'exprimer les impacts d'un aléa comme une fonction de l'exposition et de la sensibilité d'une entité exposée à cet aléa (fonction dose – réponse). La fonction dose – réponse représente de façon implicite tous les processus en œuvre dans la caractérisation de la vulnérabilité. Elle permet de caractériser les impacts comme un indicateur de la vulnérabilité mais ne permet pas d'expliquer les processus, à l'intérieur du système étudié, par lesquels les conséquences de l'aléa sont amplifiées ou atténuées (Turner II et al., 2003a).

- *Modèle Pressure And Release*

Le modèle Pressure And Release (PAR) est, selon Adger (2006), le résultat de la confluence des courants de recherche permettant d'intégrer les composantes biophysique et sociale de la vulnérabilité. Le cadre PAR (figure 10) permet de décrire de façon explicite le risque comme une fonction de la perturbation liée à l'aléa et de la vulnérabilité de l'unité exposée. L'aléa et la

vulnérabilité jouent ici comme deux forces opposées qui interagissent en appliquant une pression sur le système (Wisner et al., 2004). Il propose d'analyser les grands déterminants de la vulnérabilité en les regroupant en trois thèmes que sont les causes profondes, les pressions dynamiques et les conditions d'insécurité. Cependant, tout en proposant une première ouverture de la « boîte noire » par rapport aux cadres proposés par Cutter ou le modèle RH, ce cadre ne propose pas de rentrer explicitement dans les processus déterminant la vulnérabilité et la formalisation du système étudié. C'est principalement cela qui a amené les auteurs à développer le troisième cadre d'analyse de vulnérabilité, le modèle Access, qui est plus centré sur les processus à l'échelle de l'individu. Dans la figure 10, le modèle Access est proposé pour analyser plus finement le croisement de l'aléa et de la vulnérabilité à l'échelle des individus. Nous présentons ce modèle dans la section 1.4.2 (p29) car il mobilise le même cadre conceptuel que les analyses de vulnérabilité sociale.



Traduction de Wisner et al. (2004)

Figure 10 : Cadre PAR (Blaikie et al., 1994)

Pour les deux modèles présentés dans cette section, une question se pose quant à l'applicabilité pour la caractérisation et surtout l'évaluation de la vulnérabilité. En effet, même si ces cadres proposent un certain nombre d'indicateurs, la construction d'une véritable fonction dose-réponse n'est pas envisagée à partir du modèle PAR. Les indicateurs produits ne se veulent pas représentatifs d'une quantification des processus en œuvre, contrairement à notre démarche.

1.4 Vulnérabilité, accès et formes de capitaux

Le concept de vulnérabilité a également été mobilisé pour aborder les questions de développement et de pauvreté. Cette approche a permis le développement de cadres théoriques

que nous mobilisons, en particulier, l'introduction de nouvelles formes de capitaux dans l'analyse des systèmes. La figure 11 propose une synthèse de ces différentes approches. Les théories développées s'organisent autour de deux types de questionnements :

- Les problématiques d'accès et de capacité d'utilisation des ressources traitées en Political Ecolgy (Ribot, Peluso) et en Economie du Développement (Sen),
- La conceptualisation de nouvelles formes de capitaux et les modes de substitution et d'utilisation de ces capitaux, traités en économie et par le courant pluridisciplinaire d'étude des moyens de subsistance (Sustainable Livelihood Approach, SLA).

Les sous-sections suivantes abordent ces deux problématiques.

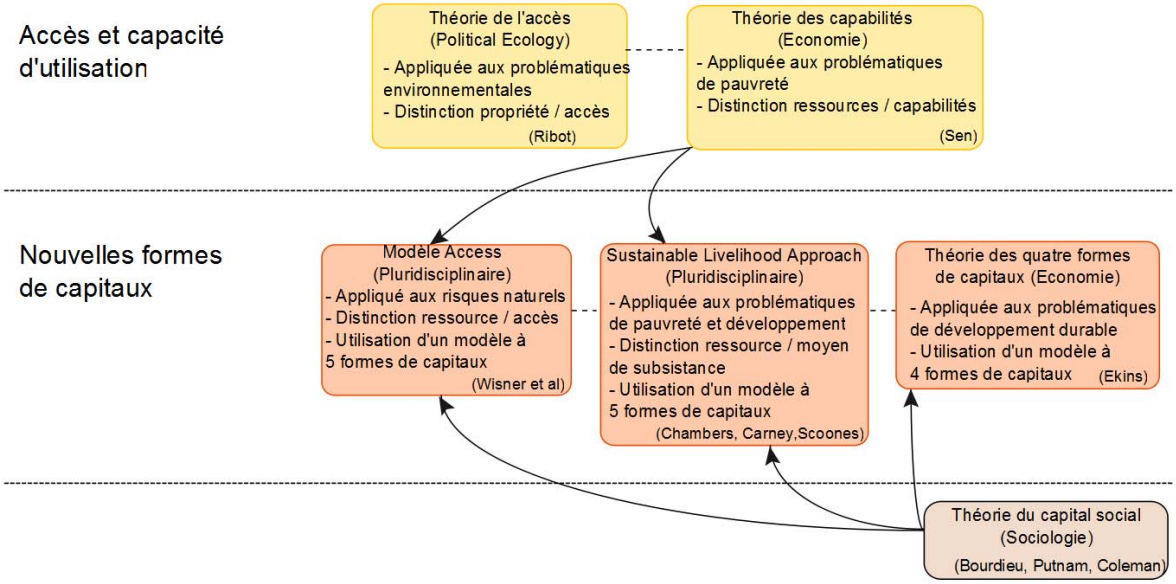


Figure 11 : Synthèse des différentes approches en lien avec la vulnérabilité sociale

1.4.1. Vulnérabilité et questions d'accès aux ressources : la théorie des capabilités

En économie, les questions d'accès aux ressources ont principalement été traitées par Sen qui a développé le concept de capabilités. Les ***capabilités*** représentent « ***l'ensemble des modes de fonctionnement humain qui sont potentiellement accessibles à une personne, qu'elle les exerce ou non*** » (in Lallau et al., 2009 ; Sen, 1992).

Cette approche vient apporter une critique sur l'approche classique de l'utilité dans le sens où le bien-être est défini en fonction des possibilités réelles dont dispose un individu pour réaliser un certain nombre de fonctionnements (Gondard-Delcroix et al., 2004) alors que dans la théorie classique, les conditions d'accès sont implicitement considérées identiques pour tous les agents. La qualité de vie est conceptualisée comme un ensemble d'actions et façons d'être (« doings and beings ») qui sont évaluables. Selon le cadre théorique développé par Sen (1989), l'évaluation du bien être passe par l'évaluation de la réalisation de ces fonctionnements associée à la capabilité.

Dans les travaux de Sen, il n'y a pas d'utilisation explicite du concept de vulnérabilité. Certains économistes français (Gondard-Delcroix et al., 2004 ; Lallau et al., 2009) ont tenté de formaliser le lien entre capabilité et vulnérabilité. L'analyse est appliquée à la vulnérabilité de ménages dans les pays en développement (sous section 1.4.3, p 33).

En Political Ecology, Ribot et Peluso (2003) proposent de mobiliser la théorie de l'accès pour l'analyse de vulnérabilité. Cette approche est proche de la théorie des capabilités développée par Sen. Elle analyse les mêmes questionnements d'accès aux ressources mais vise à expliquer plus largement les relations de l'Homme à l'Environnement. Ribot (2009) propose d'intégrer les théories sur les conditions d'accès et de capabilités à l'analyse de la vulnérabilité aux risques climatiques à l'échelle des individus et des groupes sociaux.

1.4.2. Nouvelle conception des formes de capitaux en économie et vulnérabilité

- *Ekins et la théorie des capitaux en économie*

Le concept de ***capital*** est défini en économie comme un ***stock d'enjeu apportant un flux de biens et services qui contribuent au bien-être des individus*** (Ekins et al., 2008). Dans la théorie néoclassique, les facteurs de production considérés sont la terre, le capital et le travail. Dans ce triptyque, le capital est généralement considéré dans un sens réduit qui correspond aux biens manufacturés permettant eux-mêmes de produire d'autres biens ou des services (Ekins, 1992, p 148). Cependant, comme le souligne Ekins (2008), les flux de bénéfices peuvent provenir de beaucoup d'autres sources que les simples produits manufacturés. Il élabore une théorie mettant en relation les capitaux manufacturés, humains, sociaux et naturels dans le processus de production et la création de bien-être (Ekins, 1992 ; in Ekins et al., 2008).

En économie, cet élargissement des formes de capitaux soulève des débats concernant l'adéquation de la terminologie de capital pour les formes de capitaux autres que manufacturés et en particulier le capital social (in Adger, 2003 ; Arrow, 2000). Ekins (2008) justifie la terminologie « capital » dans son modèle de la façon suivante : « Toutes les formes de capitaux ne peuvent être identifiées que par les bénéfices qu'elles produisent. Lorsque ces bénéfices correspondent à une valeur monétaire, alors, la valeur du stock de capital correspond à la valeur nette actualisée du flux de bénéfices dans le temps. Les bénéfices ne sont pas moins réels s'ils ne peuvent pas être évalués mais il faudra alors décrire le stock de capital et le quantifier de manière différente ».

Ekins ne fait pas de lien explicite entre la théorie des capitaux multiples et la vulnérabilité des systèmes.

- *Définitions des différentes formes de capitaux*

Nous définissons ici les différentes formes de capitaux proposées dans la littérature en retenant la définition mobilisée dans le modèle de vulnérabilité.

1. Le ***capital manufacturé ou le capital physique*** se définit comme ***l'ensemble des biens matériels (infrastructures, bâtiments, matériel) permettant de produire des biens et services*** (Carney, 1998 ; Ekins et al., 2006).
2. Le ***capital humain*** est défini comme ***l'ensemble des compétences, connaissances, capacités à travailler permettant d'assurer une production de bien-être*** (Carney, 1998 ; Ekins et al., 2006).
3. Le ***capital naturel*** correspond à ***l'ensemble des ressources naturelles (bois, eau, énergie…) incluant les ressources difficilement valorisables (biodiversité, écosystèmes…) participant à la création de services écologiques*** (Carney, 1998 ; Ekins et al., 2006).
4. Concernant le capital social, différentes conceptions existent dans la littérature[12] (Bourdieu, 1980 ; Coleman, 1988 ; Putnam, 1995). Nous privilégions une conception individuelle du ***capital social*** que nous définissons comme ***l'ensemble des ressources sociales (réseaux, aide mutuelle, associations..) que les personnes peuvent mobiliser pour assurer un processus de production de bien-être***.
5. Ensuite, nous définissons le ***capital financier*** comme ***l'ensemble des ressources financières (épargne, prêt, subventions…) pouvant être mobilisées pour assurer un processus de production de bien-être*** (Carney, 1998).
6. Enfin, mentionnons qu'actuellement, une nouvelle forme de capital tend à être proposée dans les analyses. Il s'agit du ***capital institutionnel*** qui se définit comme « ***l'ensemble des institutions qui constituent la structure incitative organisant les relations entre les individus ou entre les organisations au sein des processus de productions économiques et sociaux*** » (Garrabé, 2007).

- *L'approche des moyens de subsistance durable*

La théorie des capitaux multiples est également mobilisée dans l'approche par les moyens de subsistance durable, « Sustainable Livelihood Approach», développée dans la fin des années 1980 suite à la parution du rapport Bruntland de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le

[12] Pour une analyse détaillée sur le capital social voir (Zenou, 2003)

Développement en 1987 et qui a été soutenue par le Département du Développement International (DFID) au Royaume-Uni (Solesbury, 2003). La notion de moyen de subsistance durable a été définie par Chambers et Conways (1992) de la manière suivante :

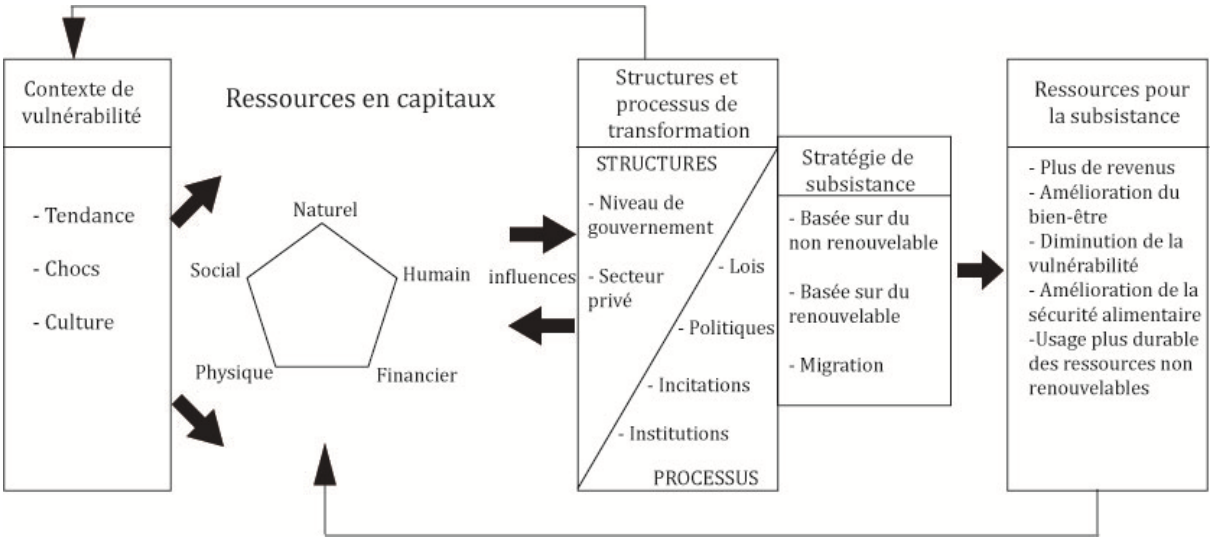
« Un moyen de subsistance inclut les capabilités, enjeux (zone d'approvisionnement, ressources, demande et accès) et activités nécessaires comme moyen de vie.

Un moyen de subsistance est durable lorsqu'il permet de :

- supporter et de se remettre de chocs et de stress, de maintenir ou d'améliorer les capabilités des enjeux ;
- développer des opportunités de moyen de subsistance pour les générations futures ;
- contribuer aux bénéfices nets d'autres moyens de subsistance du niveau local au niveau global et à court, moyen et long termes. »

L'approche des capitaux multiples a également été introduite et leur typologie définie par Carney (1998) et Scoones (1998).

L'approche des « Sustainable Livelihood » propose de considérer le capital financier comme une forme de capital à part entière contrairement à Ekins qui le considère comme une forme de capital social.



Traduit de Carney (1998)

Figure 12: Modèle des moyens de subsistance durable (« Sustainable Livelihood Approach »)

Le modèle des moyens de subsistance (figure 12) permet d'analyser la vulnérabilité en termes de facteurs externes (contexte de vulnérabilité), de ressources disponibles (les cinq formes de capitaux) et des processus et structures influençant ensuite la possibilité d'utiliser ces ressources au sens des capabilités. Sur cette base, les individus élaborent une stratégie qui conditionne leur vulnérabilité. Cette stratégie permet une rétroaction vers les formes de capitaux qui peuvent ainsi évoluer. Cette approche suppose une distinction entre les formes de capitaux et les processus de subsistance ou de

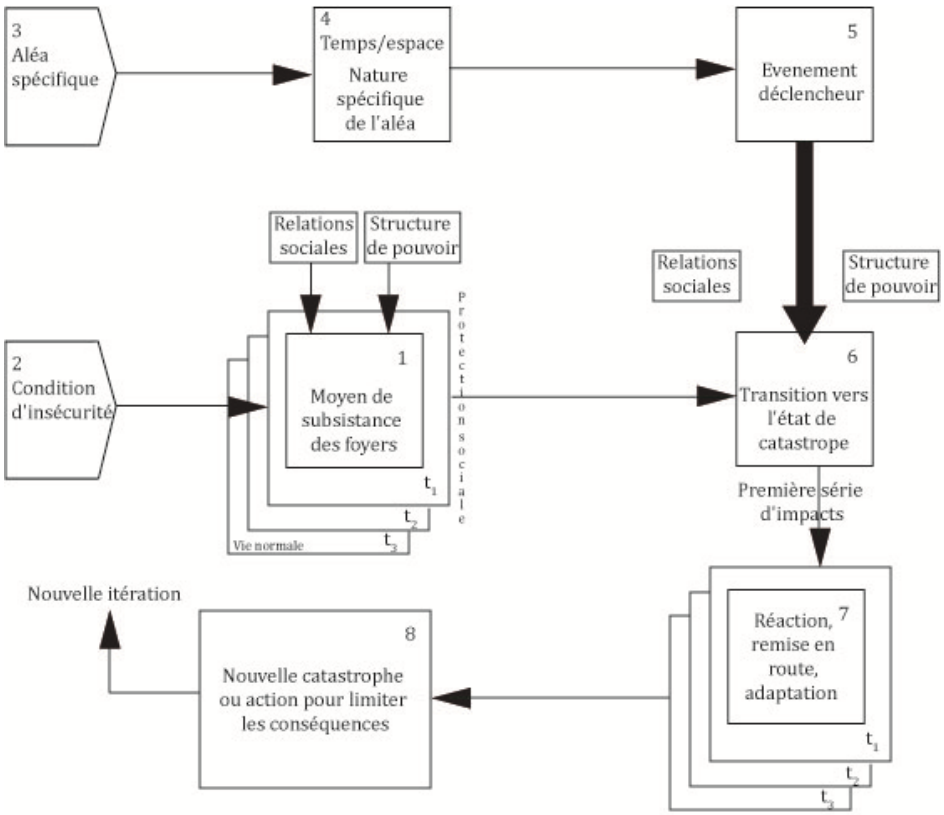
vulnérabilité. Nous ne conservons pas cette distinction qui a un intérêt conceptuel limité par la suite. En effet, il nous apparait plus pertinent de considérer que les formes de capitaux disponibles font partie intégrantes des processus et stratégies mises en œuvre par les acteurs concernés.

- *Le modèle Access : conditions d'accès et théorie des capitaux multiples appliquées aux risques naturels*

La théorie des capitaux multiples, ainsi que la notion d'accès aux ressources, sont également mobilisées dans le modèle Access élaboré par Wisner et al. (2004). Les approches de modélisation Access et Sustainable Livelihood se sont développées en parallèle mais ne revendiquent pas de filiation. Elles ont cependant des domaines d'application différents. Les SLA visent l'étude de la pauvreté et du développement quand l'approche de Wisner et al. (2004) est orientée sur les risques naturels. Elle vise à approfondir les processus sociaux et dynamique de la vulnérabilité à l'échelle des individus en complément du modèle Pressure And Release présenté à la section 1.3.3 (p 26).

Globalement, l'objectif du modèle Access est d'expliquer à l'échelle micro, les conditions d'établissement et la trajectoire de vulnérabilité d'un groupe d'individus. Ce modèle (figure 13) propose d'analyser, en situation normale, la capacité des personnes à acquérir des moyens de subsistance en fonction des ressources (modèles des cinq formes de capitaux) auxquelles ils ont accès et sur la base desquelles ils prennent leurs décisions. Des profils (Access profiles) sont alors associés aux différents groupes sociaux. Cette approche repose sur le constat empirique que les conditions d'accès aux ressources conditionnent les dommages subis pendant et après la catastrophe suivant les possibilités de remise en route disponibles. Un point important pour notre approche est la façon dont Wisner et al. envisagent la remise en route (p 113). Ils considèrent qu'elle est principalement déterminée par la possibilité de réaction des personnes dans la limite des ressources existantes et en fonction de leurs objectifs de réalisation. Les personnes se retrouvent alors souvent confrontées à des décisions dépassant la gestion routinière. Le modèle Access n'a pas vocation à permettre une évaluation de la vulnérabilité mais plutôt à expliciter des processus biophysiques et sociaux conditionnant la vulnérabilité des individus.

Le modèle Access est proche de notre conception de la rationalité et des déterminants de la décision dans la situation post inondation. Ainsi, nous considérons que les exploitants ont pour objectif de retrouver un fonctionnement normal de l'exploitation et que lorsque plusieurs alternatives sont envisageables pour retrouver ce fonctionnement normal, le choix entre les différentes alternatives est déterminé par les ressources dont l'exploitant dispose, en particulier, son capital social et son capital financier.



Traduction de Wisner et al. (2004)

Figure 13: Modèle de vulnérabilité Access

1.4.3. Stratégie de remise en route et substituabilité de certaines formes de capitaux

Gondard-Delcroix et al. (2004) ont appliqué les théories des capabilités et des capitaux multiples pour l'étude de la vulnérabilité et des stratégies de gestion des risques de foyers ruraux à Madagascar. Elle montre principalement l'importance du capital social dans les stratégies de gestion des risques et la substituabilité de certaines formes de capitaux.

Pour les auteurs (Gondard-Delcroix et al., 2004), la vulnérabilité ne résulte pas uniquement de l'aléa auquel les foyers sont soumis dans un lieu et un moment précis mais aussi de leurs capacités de réaction incluant la capacité à résister aux effets négatifs et se remettre des aléas subis. Cette capacité de réaction est conceptualisée par les capabilités et le travail mené montre qu'il existe une substituabilité des capabilités et des formes de capitaux qui permettent aux foyers d'élaborer des stratégies de gestion des risques. Le capital social joue alors un rôle majeur en se substituant au capital financier. L'entraide en termes matériel (prêt de matériel agricole) et humain (main d'œuvre) ou financier (emprunt à taux nul auprès de membres de la famille) sont les principales variables explicatives de la capacité de réaction de ces foyers ruraux. Cependant, comme le soulignent les auteurs, la disponibilité du capital social dépend de la nature et de l'ampleur du choc.

Nous mobilisons, dans cette thèse, une vision élargie des formes de capitaux de l'exploitation agricole et retenons l'hypothèse de la substituabilité de ces formes de capitaux pour expliquer les stratégies de remise en route des exploitants suite à l'inondation. La question qui peut également être soulevée est celle de la formation, de l'utilisation et de la régénération de ce stock de capital.

1.5 Résilience et vulnérabilité

Les concepts de vulnérabilité et de résilience sont souvent confondus ou perçus comme recouvrant les mêmes processus ou des processus opposés (in Cutter, 1996 ; Timmerman, p21). Afin d'éclaircir les distinctions et liens entre ces deux concepts, la section suivante propose une revue de littérature.

1.5.1. Définition originelle de la résilience en écologie

Il est important de revenir à la définition originelle, et communément admise dans la communauté travaillant sur la résilience[13], qui a été proposée par Holling en 1973. La ***résilience*** est définie comme la ***capacité d'un système à retrouver ses fonctionnalités suite à l'occurrence d'un choc***. Dans son article (1973), Holling remet en question la façon de considérer l'évolution des populations en écologie et pointe le fait que le suivi d'un nombre d'individus dans une population n'est pas un bon indicateur. Il faudrait plutôt être en mesure de suivre les amplitudes d'oscillation des populations. Il oppose clairement la notion de résilience à celle de stabilité (p 17). La ***stabilité*** est définie comme la ***capacité du système à revenir à un état d'équilibre après une perturbation temporaire***.

L'approche par la résilience met en avant les dynamiques non linéaires, les effets de seuil et repose sur l'interprétation mathématique des observations empiriques menées sur les écosystèmes (Janssen et al., 2006a). Walker et al. (1981), étudiant l'évolution des savanes en milieu semi-aride, poussent encore plus loin le caractère dynamique et suggèrent que la résilience est la capacité à s'adapter aux changements en exploitant les phénomènes d'instabilité plutôt que la capacité à absorber une perturbation et à revenir à l'état initial avant aléa. Les systèmes considérés peuvent ainsi adopter plusieurs formes d'équilibre qualifiées d'attracteurs et localisées dans des bassins

[13] Il s'agit de la « Resilience Alliance »[13], groupe de recherche fondé en 1999, financé par un réseau d'institutions international et dont le directeur fondateur est Holling.

http://www.resalliance.org

d'attractions. Lorsque le système est fortement perturbé, il peut alors basculer d'un bassin d'attraction vers un autre (Gallopin, 2006).

Dans la conception initiale de la résilience, il est donc clair que les questions principales portent sur :

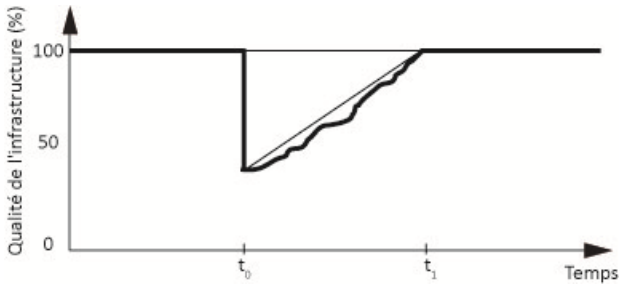
- la définition des fonctionnalités des systèmes,
- la définition des zones d'équilibre des systèmes dans les bassins d'attractions.

S'inscrivant dans cette démarche, Carpenter et al. (2001) proposent, pour évaluer la résilience, de mesurer l'amplitude de perturbation que le système peut subir en maintenant ses fonctionnalités indispensables.

1.5.2. La stabilité : une vision ingénieuriale de la résilience

Pimm (1984) propose une définition, qui est selon Holling une vision plus ingénieuriale de la résilience. Il considère que la résilience peut être définie comme la rapidité de retour à un état stable suite à une perturbation. Cette définition est, à notre sens, plus proche de la définition de la stabilité que de la résilience. Le temps de retour à l'état stable est un des résultats attendus du modèle de vulnérabilité.

En économie, les situations analysées sont des situations d'équilibre général ou partiel et le concept de résilience est souvent réduit à ce concept de stabilité. C'est également le cas du point de vue de la recherche appliquée et de l'ingénierie des risques naturels, (Tierney et al., 2007) comme l'illustre la figure 14.



D'après Tierney et al. (2007)

Figure 14: Le triangle de la résilience

1.5.3. Résilience et théorie de la viabilité

Martin (2005) s'attache à proposer une conceptualisation de la résilience utilisant le formalisme de la théorie de la viabilité et à l'appliquer aux systèmes écologiques et sociaux.

Les modèles de viabilité reposent sur la définition de fonctions mathématiques déterminant l'évolution de l'état de systèmes gouvernés par des dynamiques non déterministes sous un certain nombre de contraintes. La modélisation de l'évolution de ces systèmes prévoit les interactions avec l'environnement. Les modifications induites par le système sur son environnement ont une

rétroaction sur l'état même du système considéré. Ces contraintes sont appelées contraintes de viabilité dans le sens où le système doit s'adapter à ces contraintes ou disparaitre. Ces contraintes de viabilité permettent de définir un concept central dans la théorie de la viabilité, les noyaux de viabilité qui sont composés de l'ensemble des états à partir desquels il existe au moins une évolution qui satisfasse les contraintes indéfiniment.

Martin propose d'évaluer la résilience d'un système par l'inverse du coût de restauration d'une fonctionnalité perturbée. Ainsi, si les fonctionnalités d'un système n'ont pas pu être restaurées dans un temps défini, le coût est infini et indique que le système n'est pas résilient. Ce coût peut être économique (monétaire) et/ou écologique (perte de biodiversité, pollutions). Les perturbations envisagées sont décrites par une correspondance qui, à chaque état du système, associe l'ensemble des états atteignables à partir de cet état suite à une perturbation.

Dans cette approche, les questions de recherche posées portent sur :

- la formalisation mathématique du fonctionnement des systèmes et de leur évolution ;
- la définition des noyaux de viabilité en fonction des contraintes ;
- la définition et l'évaluation des fonctionnalités des systèmes.

Ces questions sont différentes des objectifs de cette thèse qui sont de caractériser et d'évaluer les processus expliquant la vulnérabilité des systèmes. Contrairement à l'approche de la viabilité, il ne s'agit pas de déterminer les fonctionnalités souhaitées des systèmes agricoles mais d'analyser les processus permettant de retrouver un état initial après un choc.

Par ailleurs, les modèles mathématiques de viabilité requièrent, pour pouvoir être résolu avec les outils calculatoires existants, de ne faire intervenir qu'un nombre limité de variables permettant de définir les trajectoires des systèmes en fonction de leur état. Les travaux menés sur la vulnérabilité des systèmes agricoles sont relativement peu nombreux et il apparait difficile à ce stade de proposer un système réduit de variables explicatives du fonctionnement et des contraintes portant sur ces systèmes.

1.5.4. La résilience dans notre modèle

Nous considérons la vulnérabilité et la résilience comme deux concepts distincts ; la vulnérabilité déterminant les effets subis jusqu'au retour à un état d'équilibre et la résilience déterminant la capacité d'un système à retrouver un état d'équilibre pouvant être différent de l'état initial. Le modèle de vulnérabilité proposé ne vise pas à analyser et évaluer la résilience des systèmes agricoles aux inondations. Notre objectif d'évaluer les effets de l'inondation sur les exploitations agricoles, nous amène à faire l'hypothèse simplificatrice d'une stabilité de ces systèmes suite à l'inondation. Nous considérons ainsi que les exploitations agricoles sont parfaitement résilientes, dans le sens où elles retrouvent leur état initial qui est un des états leur permettant de réaliser les fonctionnalités

attendues. Nous proposons dans le chapitre 3 une discussion de cette hypothèse souvent nécessaire en évaluation économique (sous-section 3.3.5, p 86).

1.6 Vulnérabilité et changement climatique

Cette section montre comment le changement climatique amène un rapprochement des concepts de vulnérabilité, résilience et adaptation, à l'instar des résultats de l'analyse bibliométrique présentés par Janssen et al. (2006b). L'analyse des conséquences du changement climatique s'inscrit dans une temporalité à long terme et concerne différentes modifications des aléas (augmentation des évènements extrêmes, modification des tendances climatiques…). L'analyse des conséquences de ces phénomènes passe par trois types de questions de recherche :

- Comment les systèmes sont-ils perturbés par ces évènements ? Cette question requiert l'analyse de la vulnérabilité.
- Quels sont les seuils en termes d'aléas subis déterminant une rupture dans le fonctionnement des systèmes (perte de certaines fonctionnalités) ? Cette question passe par l'analyse de la résilience.
- Quelles sont les possibilités d'adaptation à ces changements ?

Lier les concepts de vulnérabilité, résilience et adaptation pour analyser les conséquences de ces phénomènes sur les systèmes socio-écologiques apparait donc un enjeu pour l'analyse du changement climatique (Adger, 2006 ; Janssen et al., 2006a ; Polsky et al., 2007).

1.6.1. La notion de Socio-Ecological System

Un ***système socio-écologique*** (Socio-Ecological System SES) se définit comme un ***système incluant des sous-systèmes sociaux (humains) et écologiques (biophysiques) en interaction*** (Gallopin, 2006). La littérature sur le changement climatique s'accorde pour dire que les systèmes socio-écologiques parfois appelés systèmes couplés humain-environnement (Turner II et al., 2003b), sont l'unité de base pour réaliser les analyses liées au changement climatique car ils permettent d'appréhender les dimensions biophysique et sociale des processus en tenant compte des rétroactions, ainsi que des processus non linéaires et stochastiques (Gallopin, 2006 ; Janssen et al., 2006a).

L'exploitation agricole est considéré dans notre approche comme un SES et nous développons dans le chapitre 2, les choix de modélisation induits par l'approche systémique.

1.6.2. Adaptation et vulnérabilité

Le concept d'adaptation qui était déjà une préoccupation des anthropologues depuis le début des années 1900 (Janssen et al., 2006b), est devenu central dans l'analyse du changement

climatique. Dans les années 1990, ce concept a commencé à être utilisé sans lien réel avec la conception des anthropologues pour envisager les actions anthropiques mises en œuvre pour limiter les effets du changement climatique. Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) définit l'***adaptation*** comme ***l'ajustement des systèmes naturels ou anthropiques en réponse à des stimuli climatiques actuels ou attendus qui limite les dommages et favorise le développement d'opportunités*** (IPCC, 2001).

Le concept d'adaptation est plus souvent mobilisé pour décrire l'adaptation au changement climatique que l'adaptation à des risques naturels déjà existant sur un territoire. Historiquement, c'est plutôt le concept de mitigation (incluant protection et prévention) qui était utilisé (Cutter et al., 2008) pour la gestion des risques. Cependant, le rapport du GIEC propose un nouveau cadrage : les actions de ***mitigation*** correspondent aux ***actions anthropiques pour réduire les sources d'émissions ou augmenter le stockage des gaz à effets de serre*** (IPCC, 2001) et l'adaptation concerne l'ajustement des caractéristiques des SES permettant d'influencer la vulnérabilité et la résilience des systèmes (Adger, 2003 ; Walker et al., 2004).

La mise en œuvre de l'adaptation peut s'envisager de différentes façons qui ont des implications en termes de décisions publique (Fankhauser et al., 1999 ; Smit et al., 2002) :

- Elle peut être autonome ou sous l'influence d'une politique, ce qui implique alors une intervention de l'Etat en termes d'incitation ou de régulation.
- En termes de temporalité, elle peut être proactive par anticipation (vision stratégique) ou en réponse tactique à un choc.
- Elle peut s'appliquer à différentes échelles territoriales (parcelle, exploitation, région, Etat) n'induisant pas les mêmes niveaux de responsabilité et de mobilisation des acteurs (exploitants, coopératives, collectivités, états et agences).
- Les formes proposées d'adaptation peuvent porter sur des protections locales, de l'amélioration de l'organisation, de l'organisation de réseau social ou encore de l'assurance.

Nous considérons l'adaptation comme une modification à moyen et long terme du système, permettant de limiter les effets négatifs d'un aléa sur celui-ci.

1.7 Évaluation de la vulnérabilité

1.7.1. Évaluation par des approches multicritères

L'évaluation est au centre des questions de recherche sur la vulnérabilité et la principale difficulté reste l'élaboration de méthodes comparables et qualitatives (Luers et al., 2003 ; Polsky et al., 2007). Cette difficulté est intimement liée à la définition et l'évaluation des indicateurs de

vulnérabilité. Nous présentons dans cette section les méthodes multicritères avant de présenter, dans la section suivante, les méthodes d'évaluation utilisant un indicateur agrégé.

Dans la littérature, deux approches de construction des indicateurs de vulnérabilité utilisés dans les méthodes d'évaluation multicritères de la vulnérabilité peuvent être distinguées :

- Les indicateurs de vulnérabilité choisis sont issus d'une analyse des processus de vulnérabilité sur des systèmes particuliers ;
- Les indicateurs sont produits sur la base d'un cadre conceptuel de la vulnérabilité existant.

Dans le premier groupe, des approches d'analyse systémique de vulnérabilité ont été menées sur différents types d'enjeux comme les activités agricoles (Bauduceau, 2004a ; Reid et al., 2007) et économiques (Mengual, 2008). Ce type d'approches est plutôt orienté par l'analyse des systèmes et le cadre conceptuel de vulnérabilité est généralement moins formalisé que dans les approches du second groupe. Si ces approches permettent d'expliciter finement les mécanismes de vulnérabilité sur un type de système, elles manquent de généricité pour comparer la vulnérabilité sur différents systèmes.

Dans le second groupe, les approches reposent sur un cadre formalisé de la vulnérabilité et l'objectif est de pouvoir rendre les évaluations comparables quels que soient les systèmes étudiés. A cet effet, Polsky et al. (2007) présentent un cadre d'analyse de vulnérabilité basé sur des indicateurs classés en trois groupes : exposition, sensibilité, capacité d'adaptation. Cette décomposition de la vulnérabilité n'est pas cohérente avec notre conception de la vulnérabilité car dans notre approche exposition et capacité d'adaptation sont des concepts distincts de la vulnérabilité.

1.7.2. Évaluation économique de la vulnérabilité

- *Variation de bien être et fonctions d'utilité*

La définition de fonctions d'utilité permet aux économistes de mesurer la variation du bien être d'agents en fonction de variables ordonnées correspondant à un panier de biens. La mesure de la variation d'utilité ramenée à un seuil est utilisée pour étudier les phénomènes de pauvreté (Foster et al., 1984). Dans la lignée de ces travaux, Adger (2006) propose une évaluation de la vulnérabilité reposant sur la variation de bien être des individus et précise que pour différencier l'évaluation de la vulnérabilité de l'évaluation de la pauvreté, la définition du bien être doit être pensée dans un sens plus large que le seul revenu. La formalisation proposée par Adger est la suivante :

$$V_\alpha = \frac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{q}\left(W_0 - W_i / W_0\right)^\alpha\right]$$

Où V_α est l'indicateur de vulnérabilité,

W_i représente le bien être de l'individu (de 1 à q, les individus sont de plus en plus vulnérables)

W_0 est le seuil de bien être en dessous duquel les individus sont considérés vulnérables

n les nombre total d'individus concernés (foyer, agriculteurs, communes…)

q est le nombre d'individus au dessous du seuil de bien être

Plusieurs applications de cette mesure de la vulnérabilité ont été proposées :

- Ligon et al. (2003) proposent une mesure de la vulnérabilité reposant sur l'utilité des foyers. Dans cette analyse, la vulnérabilité est considérée comme le bien être résultant du niveau de richesse ainsi que de l'ensemble des aléas auxquels le système est soumis. L'indicateur d'utilité retenu est la dépense de consommation des foyers étudiés.
- Dans le domaine de l'économie du changement climatique, ces approches sont également utilisées (Tol, 2002). Les indicateurs tels que le revenu par habitant ou le produit intérieur brut sont généralement utilisés.
- Luers et al. (2003) proposent une évaluation de la vulnérabilité des systèmes agricoles au Mexique face à l'augmentation de la température liée au changement climatique. Le système considéré est une exploitation agricole. Le rendement du blé est utilisé comme indicateur du bien être. Une fonction a été établie pour exprimer le rendement en fonction de la température, du type de sol et du mode de gestion. Deux facteurs de stress (ou aléa) ont été pris en compte : le climat (variabilité et changement) et les fluctuations du marché.
- Antle et al. (2004) proposent d'évaluer la vulnérabilité des exploitations agricoles au changement climatique et leur capacité d'adaptation. Pour cela, il envisage la vulnérabilité comme une fonction de cinq variables que sont, les pratiques culturales (apport d'intrants), les différentes formes de capitaux affectant la production (manufacturés, humain, social, naturel), le régime climatique, les prix des intrants et les prix de vente. Selon les critères classiques d'optimisation en économie, la fonction de production est supposée concave. Les auteurs montrent, par une approche économétrique, que les impacts sur les revenus sont les plus importants pour les exploitants disposant des plus faibles dotations en capitaux.

Comme le souligne Adger (2006), la mesure du bien être par la définition d'une fonction d'utilité nécessite d'être en mesure de proposer une conception large de l'utilité ne se limitant pas seulement au revenu car sinon l'évaluation de la vulnérabilité se limite à l'évaluation de la pauvreté. Or, dans les faits, la plupart des études utilisent un indicateur lié au revenu du fait de la difficulté de mobiliser d'autres types de données.

Par ailleurs, l'étude menée par Luers et al. (2003) souligne la nécessité de bien connaitre les processus régissant la vulnérabilité des systèmes avant de les modéliser. Par exemple pour cette étude, il est nécessaire de déterminer la corrélation entre la température et le rendement des cultures, ou encore la corrélation entre le rendement, les pratiques des exploitants et leur revenu. En

application, les modèles mathématiques retenus simplifient fortement cette complexité afin de proposer des solutions analytiques.

- *Évaluation économique et évaluation de la vulnérabilité*

L'évaluation économique des projets de gestion des inondations est présentée en détail au chapitre 3 (p 73). Dans cette section, nous montrons comment l'évaluation économique et l'évaluation de la vulnérabilité peuvent être liées.

L'objet d'une évaluation économique de projet est de mesurer la variation d'utilité produite par le projet par rapport à une situation témoin. La méthode d'évaluation économique la plus fréquemment utilisée est l'analyse Coût-Bénéfice. Elle consiste à évaluer et comparer les coûts et les bénéfices résultant de la mise en œuvre d'un projet. Les ***coûts*** sont définis comme ***l'ensemble des dépenses monétaires (coûts d'investissement, d'entretien…) et non monétaires (externalités et coûts d'opportunité) liées à la réalisation d'un projet***. Les ***bénéfices*** correspondent à la ***valeur attribuée à l'ensemble des effets positifs d'un projet***. Les ***effets*** correspondent aux ***modifications attendues sur des enjeux liées à l'occurrence d'une perturbation***.

Pour être en mesure de proposer une variation de l'utilité totale, il faut donc être capable de proposer des méthodes d'évaluation des effets positifs et négatifs d'un projet ; les dépenses monétaires étant généralement mieux connues.

En France, Torterotot (1993) a proposé une définition de la vulnérabilité adaptée au cadre de l'évaluation économique de projet. Il définit la vulnérabilité comme une « fonction qui exprime les [effets] potentiels par rapport aux paramètres de l'aléa, aux enjeux (quantité et nature des biens exposés) et aux ressources mobilisables pour limiter les impacts (délai de réaction disponible, capacité des acteurs à réagir) » (Torterotot, 1993).

Lorsque l'évaluation est réalisée ex-post (après l'occurrence de l'aléa ou d'un projet), cela implique d'être en mesure de collecter et quantifier les effets sur les systèmes considérés. Ex ante (avant l'occurrence de l'aléa ou d'un projet), cela implique d'être en mesure de produire des modèles permettant de simuler ces effets sur les différents systèmes.

En pratique, l'évaluation économique des projets de gestion des inondations utilise généralement pour chaque type d'enjeux concernés, des fonctions de dommages qui permettent de relier un montant de dommages à une intensité de l'aléa. Ces fonctions reposent sur l'évaluation de la vulnérabilité des différents enjeux mais masquent la complexité sous-jacente à l'identification, la quantification et la valorisation des effets des inondations sur les systèmes. En pratique, le manque de compréhension des effets des inondations sur les systèmes et la difficulté à en proposer une valorisation monétaire, a conduit à une évaluation de la vulnérabilité très souvent réduite aux

dommages directs. Cette simplification est de plus en plus critiquée (Brown et al., 2002 ; Hubert et al., 1999, p.46 ; Messner et al., 2005).

La difficulté réside donc bien dans l'identification des effets d'un aléa sur un système, ce qui nécessité une compréhension de la vulnérabilité des systèmes.

Gleyze et al. (2007) et Grelot (2004, pp. 20-42) proposent de distinguer endommagement matériel et fonctionnel afin de mieux qualifier les effets d'une inondation sur un système.

Nous retenons cette classification dans notre approche et distinguons deux types d'effets sur les éléments physiques suite à l'occurrence d'une inondation:

- les effets directs sur des biens physiques correspondant aux dégradations subies et nécessitant une action de réparation (en cas de dégradation partielle) ou de remplacement (en cas de destruction) pour revenir à l'état initial ;
- les effets liés à l'impossibilité d'usage des biens physiques qui correspondent à deux cas l'impossibilité d'usage pendant la période de submersion et l'impossibilité d'usage de l'élément avant sa remise en état s'il a été dégradé.

1.8 Analyses existantes de la vulnérabilité des systèmes agricoles

1.8.1. Méthode Inondabilité

La méthode Inondabilité, développée par le Cemagref (Gilard, 1998), propose une conception originale de l'évaluation de la vulnérabilité, qu'il est difficile de comparer aux autres méthodes. Elle vise à une modélisation quantifiée en parallèle et indépendante de l'aléa et la vulnérabilité, afin de les rendre comparables. La quantification de la vulnérabilité prévoit la définition d'un aléa maximal défini par sa période de retour, qui représente la limite d'acceptabilité associée à une occupation du sol donnée (désignée par risque maximal acceptable). Si l'analyse hydrologique du territoire montre qu'une parcelle donnée est inondée plus fréquemment que cet événement limite (cf. tableau 3), l'évènement est qualifié d' « inacceptable ». Au contraire, si l'évènement se produit moins fréquemment que cet évènement limite, la situation est qualifiée comme « acceptable ». A titre d'exemple, les valeurs maximales acceptables (normes guides d'objectifs de protection) retenues dans cette méthode pour une typologie définie dans les zones rurales sont présentées dans le tableau 3.

Cette méthode a fait l'objet de nombreux questionnements quant à son applicabilité (Lang et al., 2009), en particulier sur le secteur agricole. En effet, la parcelle est la base du croisement entre vulnérabilité et aléa dans cette méthode.

Tableau 3 : Normes-guide d'objectifs en zones rurales

	Critères de vulnérabilités				
Type de culture	**Saison**	**Durée de submersion**	**Hauteur de submersion**	**Fréquence de submersion**	**Vitesse d'écoulement**
Maraîchage	Printemps Eté / automne	< 1 j 1 < d < 3j		5 ans 5 ans	0.25 m/s 0.25 m/s
Terres cultivées de printemps	Printemps / Eté Hiver Automne	8 j 1 mois 1 mois		5 ans 1 an 1 an	
Terres cultivées d'hiver	Hiver Printemps / Eté Automne	1 mois 3 j 8 j			
Vignes	Eté Automne Hiver	> 0 >0 1 mois		10 ans 10 ans	0.25 m/s 0.25 m/s
Verger	Printemps / Eté hiver	> 1j 1 mois	1 m	10 ans 1 an	0.5 m/s

Source : Gilard (1998)

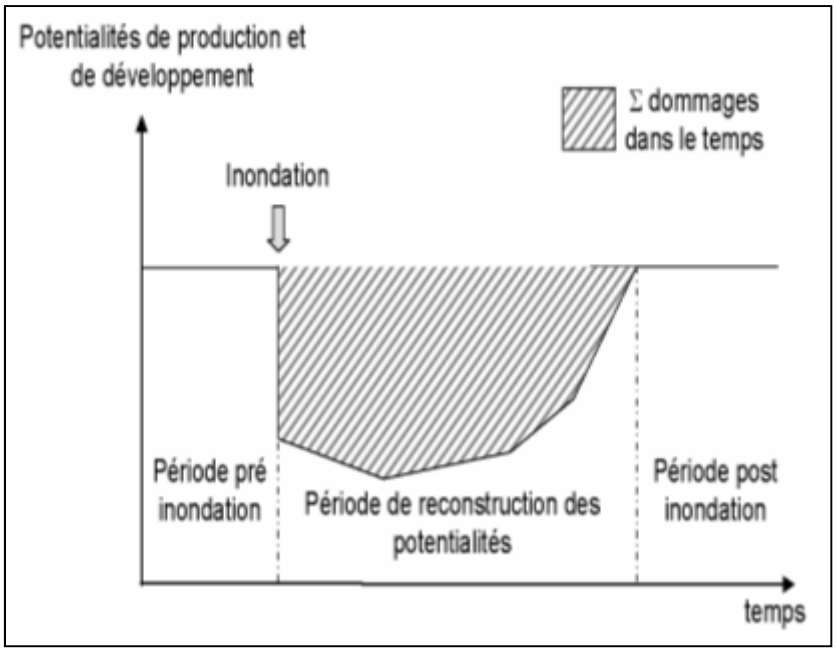
Or, lors du travail réalisé pour définir les événements limites pour le secteur agricole, il a été montré que l'approche à la parcelle ne permet ni d'appréhender le volet décisionnel de l'installation en zone inondable (Longhini, 1997) ni de déterminer le seuil de perte économique acceptable (Longhini, 1998), deux aspects pourtant nécessaires pour déterminer le risque maximal acceptable, indicateur de la vulnérabilité dans cette méthode. Cela montre donc que le choix de l'échelle d'évaluation de la vulnérabilité est déterminant et nous a amené à considéré la vulnérabilité à l'échelle de l'exploitation agricole.

1.8.2. Approches semi-quantitatives d'évaluation

L'Equipe pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature s'est engagée dès 2000, dans une démarche de diagnostic et de réduction de la vulnérabilité des activités économiques, en particulier agricoles. Les crues de l'Aude de 1999 ont permis la réalisation d'un retour d'expérience sur la vulnérabilité agricole , qui a mis en évidence deux résultats génériques (Bauduceau, 2001):

- l'importance d'une approche à l'échelle de l'exploitation agricole pour comprendre les conséquences subies et donc la vulnérabilité des zones agricoles
- la nécessité d'une approche temporelle du phénomène inondation afin de considérer la période de remise en route suite à l'inondation (figure 15).

De plus, Pivot et al. (2002) montrent qualitativement sur la base d'enquêtes, si les dommages directs suite à l'inondation sont à considérer, ils ne sont pas la seule conséquence de l'inondation à l'échelle de l'exploitation. La disponibilité des ressources de production et le temps de nettoyage induit par l'inondation entraînent des perturbations de l'organisation du travail qui peuvent avoir des répercussions sur l'activité.



Source : Bauduceau (2001)

Figure 15 : Représentation temporelle de la vulnérabilité et de la résilience d'une exploitation agricole au risque d'inondation.

Les travaux menés par le Plan Loire ont mis en évidence 47 critères de vulnérabilité (Barbut et al., 2004 ; Bauduceau, 2004b) classés puis hiérarchisés selon les méthodes d'analyse structurelle et multicritères. L'objectif était de déterminer les critères leviers (sensibilité du matériel ou des bâtiments, fragilité financière…) afin de construire des guides de diagnostic destinés aux agriculteurs. Ces guides, adaptés à chaque type de production, permettent à leurs utilisateurs, d'une part, de percevoir dans leur ensemble les impacts que leur activité serait susceptible de subir en cas de crue majeure et, d'autre part, d'être aidé dans le choix de mesures de réduction de vulnérabilité adaptées à leur situation (Bauduceau, 2005a). L'exploitation agricole y est considérée comme un système constitué de plusieurs composantes qui sont : les parcelles (productions végétales, équipement des parcelles, sols…), les stocks, le matériel d'exploitation, les bâtiments, le cheptel. La composante financière de l'exploitation est également prise en compte. L'analyse de l'endommagement de chacune des composantes est réalisée en utilisant des indicateurs qui peuvent être qualitatifs ou quantitatifs et l'estimation de ces indicateurs est réalisée par l'exploitant lui-même. Six thèmes permettent de caractériser les effets d'un scénario d'inondation, choisi par l'exploitant, sur les différentes composantes de l'exploitation (directs et indirects), les effets internes dus aux interactions entre les différentes composantes ainsi que les dommages à long terme.

Ces critères ne sont pas directement mobilisables pour l'évaluation économique mais notre modèle conceptuel de vulnérabilité intègre la connaissance experte produite par cette approche.

1.8.3. Tentative d'évaluation quantitative de la vulnérabilité agricole

Posthumus et al. (2009) montrent également que le fait de ne prendre en compte et de ne quantifier que les effets des inondations sur les parcelles (pertes de récolte) ne reflète pas totalement les effets des inondations et donc la vulnérabilité des zones agricoles. L'analyse repose sur un retour d'expérience des inondations de l'été 2007 en Angleterre (ADAS, 2007) et de 78 enquêtes auprès d'exploitants. Posthumus et al. (2009) utilisent dans leur questionnaire des indicateurs de vulnérabilité semblables à ceux proposés par Bauduceau (2005) et tentent de proposer une estimation monétaire de ces différents indicateurs. Les effets directs sur les cultures et les bâtiments sont considérés mais également les effets indirects comme par exemple la remise en état des parcelles, la surcharge de travail, la perte de marché ou de contrats. Les auteurs mettent en évidence deux niveaux de conclusions :

- Premièrement, en termes de répartition des montants de dommages, ils montrent que même si sur cette inondation, la proportion de dommages sur les cultures est importante par rapport aux autres types de dommages, il est envisageable de quantifier ces autres dommages. Le poids important des dommages aux cultures peut s'expliquer simplement par le fait que sur la zone étudiée, les cultures sont principalement des cultures d'été.
- Deuxièmement, l'analyse des conséquences économiques sur la zone agricole ne permet pas de prendre en compte les conséquences financières sur les exploitations qui ont été lourdes et ont entraîné des faillites. Ainsi, la question des conséquences relatives sur un enjeu particulier devient importante comme l'avait déjà montré Brouwer (2007) pour les foyers ruraux soumis au risque d'inondation au Bangladesh.

1.9 Conclusions et hypothèses de travail retenues

1.9.1. Définition de la vulnérabilité

De manière générale, la vulnérabilité se définit comme la propension d'un système à être perturbé par un choc. Elle résulte de deux composantes caractéristiques des systèmes :

- leur sensibilité (capacité à être transformé par une perturbation) ;
- leur capacité de réponse (capacité à s'ajuster, résister à la perturbation, en modérer les dommages potentiels, gérer les conséquences des transformations).

La sensibilité et la capacité de réponse dépendent des dotations en capital physique, humain, financier, social et institutionnel dont disposent les systèmes.

La vulnérabilité se définit donc comme la propension d'un système à subir des effets suite à une exposition à un aléa en fonction de sa sensibilité et de sa capacité de réponse, qui sont déterminées par l'ensemble de ses dotations en capital physique, humain, financier, social et institutionnel.

1.9.2. Le système : l'exploitation agricole

Nous avons montré, à travers la littérature sur la vulnérabilité agricole, que l'échelle de la parcelle était généralement reconnue comme inadéquate pour appréhender la notion de vulnérabilité (Bremond et al., 2009). Nous analysons la vulnérabilité à l'échelle de l'exploitation agricole, considérée comme un système complexe et dynamique constitué de composantes physiques en interaction conformément à une organisation régie par une entité humaine. L'exploitation agricole est envisagée comme un SES dans le sens où nous considérons ses interactions avec l'environnement naturel (aléa d'inondation) et son environnement socio-économique notamment son réseau social et son réseau économique (filières amont et aval).

1.9.3. L'aléa et l'exposition : la crue et l'inondation

L'aléa est défini comme un évènement se produisant de façon aléatoire et pouvant être à l'origine d'effets. L'aléa considéré est une ***crue*** qui correspond à un ***dépassement d'un débit considéré comme seuil pour le cours d'eau*** (Ledoux, 2006). L'exposition correspondant au degré, à la durée et à l'ampleur du contact entre un aléa et un système, est appelée dans ce cas, inondation. Elle résulte de l'occurrence d'une crue sur un territoire considéré comme un enjeu.

L'aléa de crue peut être caractérisé par plusieurs paramètres : sa période d'occurrence, sa hauteur, sa durée, sa vitesse. L'association d'une intensité d'aléa en termes de hauteur, durée et vitesse est généralement faite par l'utilisation de modèles hydrologiques et hydrauliques. Concernant la saison d'occurrence, l'association d'une probabilité à chaque aléa fait appel à des techniques d'hydrologie fréquentielle. Ce paramètre est reconnu comme ayant une importance

majeure sur les zones agricoles (Wisner et al., 2004, p106). Lorsqu'il est possible d'associer des probabilités objectives à un niveau d'intensité de l'aléa, la caractérisation est complète. Dans le cas des crues, cette caractérisation est généralement possible. On parle alors de crue décennale pour une crue ayant une période de retour équivalente à dix ans, de crue centennale pour une crue ayant une période de retour de cent ans. Pour l'évaluation économique, il est important de pouvoir associer à chaque niveau d'aléa une probabilité afin d'être en mesure de pondérer les dommages occasionnés par ceux-ci.

1.9.4. Place de la résilience dans l'analyse

La résilience se définit comme la capacité d'un système à conserver ses fonctionnalités suite à l'occurrence d'un choc (Holling, 1973). Cette définition ne présuppose pas de l'état du système avant et après le choc. Il est simplement nécessaire pour qu'un système soit résilient qu'il conserve les mêmes fonctionnalités.

La modélisation développée suppose une résilience des exploitations agricoles dans un sens restreint. En effet, nous considérons que les exploitations agricoles cherchent à, et ont la capacité de, revenir à leur état initial, c'est-à-dire avant l'inondation. Cette hypothèse simplifie fortement les processus envisageables. Les changements de bassin d'attraction, les pertes ou gains de fonctionnalités des systèmes ne sont pas traités ici.

La perspective d'une analyse de la résilience des systèmes agricoles aux inondations soulèverait, par ailleurs, une interrogation sur la pertinence du choix de l'échelle d'analyse. Le choix de l'approche à l'échelle de l'exploitation agricole vise à analyser les processus micros en œuvre dans ce système et conditionnant sa capacité à subir des dommages et à se remettre d'une inondation. La faillite d'une exploitation se caractériserait par une réorganisation du tissu économique (rachat des biens physiques par d'autres exploitations agricoles, utilisation de la surface pour d'autres activités économiques…) dont il serait nécessaire de caractériser la capacité à assurer les mêmes fonctionnalités. Ces phénomènes se situent hors de notre cadre d'analyse.

1.9.5. Evaluation de la vulnérabilité

- *Dimension temporelle de l'analyse de la vulnérabilité*

L'évaluation de la vulnérabilité est définie comme l'évaluation des effets de l'inondation (aire en gris sur la figure 16) sur une échelle temporelle allant de l'occurrence de l'aléa (t_1) jusqu'au retour du système à sa situation initiale (t_2).

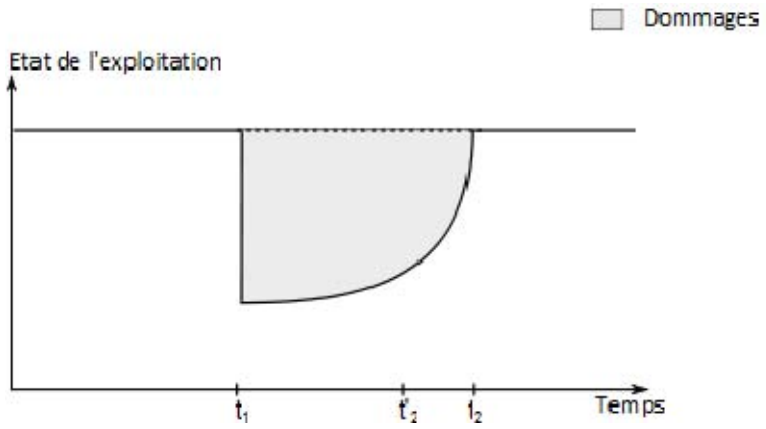


Figure 16 : Formalisation de l'évaluation de la vulnérabilité

- *Effets considérés*

Notre conception de l'évaluation de la vulnérabilité revient donc à considérer la vulnérabilité comme une fonction permettant de quantifier l'ensemble des effets subis par un système en fonction d'une intensité d'aléa (figure 17). Ces effets peuvent ensuite être valorisés et permettent d'exprimer les ***dommages*** définis comme les « ***valeurs anthropocentriques mais pas nécessairement monétaires, que la société et/ou ses membres attribuent aux effets »*** (Torterotot, 1993, p.11). L'enjeu de notre travail est donc de réfléchir à la construction de cette fonction comme indiqué sur la figure 17.

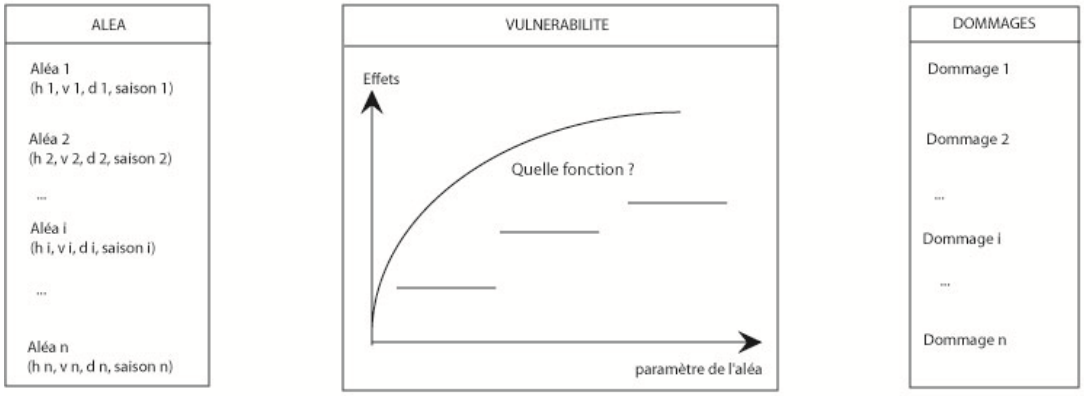


Figure 17 : Conception de la vulnérabilité comme une fonction (Dommages =f (Aléa))

Selon la classification proposée par Grelot (2004), nous retenons deux types d'effets à caractériser, quantifier et valoriser dans notre modèle :

- les effets de dégradation ou effets directs sur les composantes physiques du système ;
- les effets induits sur l'activité liés à l'indisponibilité des composantes physiques ; l'indisponibilité pouvant résulter de la submersion ou de la dégradation des composantes physiques.

Il s'agit donc de proposer une évaluation ex-ante reposant sur :

- un modèle d'endommagement permettant d'exprimer les effets directs sur les composantes physiques de l'exploitation agricole ;
- un modèle de la capacité de réponse, en fonction des dotations en capitaux, permettant d'estimer les effets induits sur l'activité.

- *Hypothèses sur la remise en route (capacité de réponse)*

Pour analyser le processus de remise en route des exploitations agricoles, nous mobiliserons les théories de l'accès et des capitaux multiples. Différents profils d'exploitants sont définis en fonction de leur capacité d'accès aux différents types de capitaux physique, humain, financier, social et naturel.

L'hypothèse de substituabilité, notamment entre capital physique, financier et social est utilisée pour caractériser les stratégies de remise en route des exploitants dans l'analyse de la vulnérabilité.

- *Place de l'adaptation*

Nous nous intéressons à un type de politique de gestion des inondations potentiellement envisagé sur les zones agricoles que sont les mesures de réduction de la vulnérabilité. A travers la terminologie « mesures de réduction de vulnérabilité », il s'agit en fait d'adapter les exploitations agricoles à la potentielle occurrence d'une inondation afin de limiter les dommages subis et d'améliorer la remise en route des exploitations. L'objectif de ces mesures est de diminuer la vulnérabilité dans le sens où elles permettent de limiter le montant total de dommages subis (surélévation des produits, gestion des stocks d'intrants, organisation de prêt de matériel).

Artificiellement, il est possible de distinguer deux effets de la mise en place de ces mesures :

- Premièrement, les effets sur la première composante de la vulnérabilité, la sensibilité, permettant de limiter l'endommagement de l'exploitation agricole (figure 18).

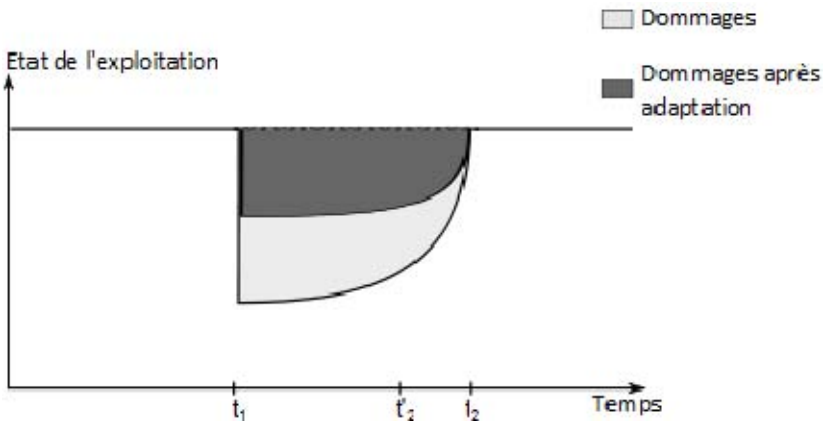


Figure 18 : Évolution des dommages suite à l'application d'une mesure de réduction de la vulnérabilité (type 1)

- Deuxièmement, les effets sur la deuxième composante, la capacité de remise en route, permettant spécifiquement de réduire le temps de remise en route de l'exploitation (sur la figure 19 de t2 à t'2).

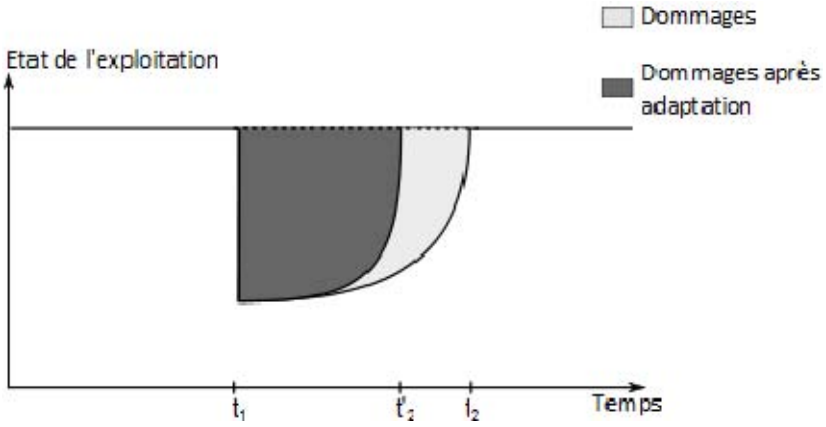


Figure 19 : Évolution des dommages après application de mesure de réduction de la vulnérabilité (type2)

En réalité, nous montrons que la remise en route dépend de la sensibilité. La différence principale entre l'adaptation et la réduction de la vulnérabilité réside dans la temporalité envisagée. En effet, la mise en place de mesures de réduction de la vulnérabilité est entendue comme l'adaptation au contexte actuel d'inondation alors que l'adaptation est plutôt envisagée, dans le contexte du changement climatique, à très long terme.

CHAPITRE 2. MODÉLISATION DES EXPLOITATIONS AGRICOLES

« Les modèles sont des représentations partisanes, au bon sens du terme, c'est-à dire qu'au sein de multiples possibilités d'expression et de représentations, ils sont le choix d'un partisan »

(Bouleau, 1999).

Un nombre important d'interprétations de la notion de modélisation existe selon les disciplines, les objectifs, les points de vue épistémologiques (Frigg et al., 2006) et chacune utilise des méthodologies, des hypothèses de base mais aussi des représentations et des langages qui peuvent être très différents. Les choix de modélisation sont en fait intimement liés aux objectifs de recherche.

Notre objectif est double : caractériser et évaluer la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations. Il impose une réflexion sur la modélisation de la structure et du fonctionnement de l'exploitation agricole. La revue de littérature des approches de modélisation présentée dans ce chapitre, nous permet de préciser les hypothèses de travail retenues sur la modélisation.

Après une présentation des objectifs et de la démarche de modélisation, une revue des grands types de modélisation qui ont été développés sur les systèmes agricoles est proposée. Premièrement, nous présentons quelques approches d'optimisation économique puis nous décrivons les approches par couplage de modèles, les approches systémiques et les approches orientées objet. Ces approches ne sont pas exclusives les unes des autres et peuvent être combinées. Cependant, elles utilisent des conceptions et des hypothèses parfois différentes, qu'il convient d'expliciter. Par exemple, l'approche par couplage envisage un découpage du système en sous-unités pouvant être modélisées de manière indépendante alors que l'approche systémique propose une conceptualisation du système dans son ensemble.

De plus, les choix de modélisation de la décision dépendent fortement du type de rationalité considéré. Dans notre approche, la modélisation de la décision est importante pour analyser la phase de remise en route des exploitations suite aux inondations.

Nous proposons donc, une analyse des intérêts, limites et hypothèses sous-jacentes des différentes approches de modélisation pour traiter la problématique de la vulnérabilité agricole aux inondations avant de proposer en conclusion les hypothèses de travail retenues et les perspectives.

2.1 Objectifs de recherche et modélisation

2.1.1. Positionnement

Selon Treuil et al. (2008), le modèle est une construction abstraite qui permet de comprendre le fonctionnement d'un système de référence en répondant à une question qui le concerne. Il correspond à une représentation mathématique, graphique ou informatique des objets et des relations entre ceux-ci dans un domaine restreint du monde réel (INRA, 2003).

La modélisation est un des principaux outils utilisés dans la démarche scientifique mais elle n'est pas utilisée par tous pour répondre aux mêmes objectifs. Or, les objectifs recherchés orientent les choix de modélisation. Deux grands groupes d'objectifs peuvent être identifiés. Les premiers sont liés au développement de la connaissance : représenter, formaliser, échanger, communiquer... Les seconds sont liés à l'action : prédire, diagnostiquer, concevoir, classifier…(INRA, 2003)

Par exemple, dans « Why Model ? », Epstein (2008) propose seize bonnes raisons de faire de la modélisation en dehors de la prédiction. Parmi celles-ci, nous en retiendrons quatre qui ont animé notre démarche :

- expliquer ;
- guider la collecte de données ;
- découvrir de nouvelles questions ;
- montrer en quoi le simple (complexe) est complexe (simple).

Notre approche de modélisation consiste à conceptualiser et à évaluer la vulnérabilité des exploitations agricoles face aux inondations. Nos questions de recherche s'articulent donc autour de deux ensembles d'objectifs. Le premier est de formaliser la connaissance sur la vulnérabilité des exploitations agricoles en produisant un modèle capable d'être soumis à la discussion. Le second objectif est de proposer une méthodologie de simulation et de collecte des données permettant de quantifier économiquement la vulnérabilité.

2.1.2. Étapes de la démarche

Pour passer de la définition d'une question de recherche à la simulation, Le Bars (2003), sur la base des travaux de Ricordel et al. (2000), propose la mise en œuvre de quatre étapes :

1. l'analyse qui correspond au processus de découverte et de description du problème ;
2. la modélisation qui correspond au processus de définition d'une représentation structurée ;
3. l'implémentation qui correspond au processus de construction d'un algorithme de calcul permettant d'aboutir à des éléments quantifiables et qui requiert un certain nombre de données qui devront être identifiées et collectées si non existantes ;

4. la simulation qui correspond à la phase d'utilisation du modèle et permet d'obtenir des sorties qui ont été préalablement définies.

Les étapes 1 et 2 de cette démarche sont présentées dans la partie II (présentation du modèle) et les étapes 3 et 4, dans la partie III (applications).

2.2 Modélisation économique d'optimisation de la production agricole

Avant de présenter les différentes approches de modélisation, nous évoquons la démarche mise en œuvre dans les modèles classiques d'optimisation de la production agricole, à savoir la modélisation de la production et la modélisation de la décision en explicitant les hypothèses sous-jacentes concernant la rationalité. Différentes modélisations de la production et de la décision peuvent être envisagées.

2.2.1. Modélisation de la production

La modélisation de la production sur les exploitations agricoles peut être envisagée de plusieurs façons. Classiquement, les modèles économiques d'exploitation agricole utilisent des fonctions de production qui permettent d'exprimer le lien entre les facteurs de production mobilisés par l'exploitation et son niveau de production. Elle représente une formalisation implicite des interactions entre les facteurs de production et le niveau de rendement produit. La fonction de production la plus couramment utilisée est celle de Cobb Douglas qui relie la production aux apports en certains intrants (terre, eau, azote, capital financier…) et travail. Diverses techniques peuvent être mobilisées pour estimer les coefficients de la fonction de production en fonction des questions de recherche. Ces estimations peuvent par exemple prendre en compte l'aversion au risque des exploitants, le temps et contrôler les biais liés à l'hétérogénéité des exploitations agricoles (Koundouri et al., 2009 ; Kumbhakar et al., 2003). Les techniques d'économétrie des panels qui utilisent des séries de données sur plusieurs années, peuvent également être utilisées (Abdulai et al., 2007).

Les approches par couplage et les approches systémiques utilisent également parfois des modèles agronomiques pour modéliser la production. Ces modèles agronomiques sont des modèles biophysiques visant à déterminer le rendement des productions en fonction de différents paramètres physiques (climatologiques, pédologiques, hydrologiques…) et des pratiques des exploitants. Ils peuvent être considérés comme des fonctions de production détaillées (Flichman et al., 2003).

2.2.2. Modélisation de la décision par l'approche de rationalité classique

- *Hypothèses de rationalité*

Classiquement, les modèles d'optimisation se fondent sur la théorie micro-économique de la firme. Ils reposent d'une part sur l'existence d'une fonction de production et d'autre part, sur la définition d'une fonction d'objectifs visant la maximisation d'une fonction d'utilité ou de profit (Brossier et al., 1990a). Ces modèles mathématiques d'optimisation, décrits ci-après, reposent sur la théorie classique de la rationalité utilisée par l'économie néoclassique. Cette théorie est basée sur les hypothèses suivantes :

1. Il existe une fonction de préférence de l'agent impliquant que ses objectifs sont clairement exprimés et peuvent être rangés selon un ordre de préférence.
2. L'agent dispose d'une information parfaite sur la fonction de préférence, c'est-à-dire que l'ensemble des solutions possibles dans une situation de décision est parfaitement connu par le décideur.
3. Les conséquences de chacune des solutions possibles sont connues et estimables avec une parfaite certitude par l'agent.
4. Il existe une comparabilité et une cardinalité des décisions c'est-à-dire que l'agent est capable de comparer ces différentes décisions entre elles en les ramenant à un indicateur unique.

- *Résolution mathématique associée*

Les outils de programmation mathématique sont classiquement utilisés pour optimiser la fonction de préférence, appelée fonction d'objectifs, sous certaines contraintes (Blanco Fonseca et al., 2008). Dans le cas de la programmation linéaire, la fonction d'objectif à optimiser ainsi que les contraintes sont linéaires et continues alors que dans le cas de la programmation mathématique positive, la fonction d'objectif est non linéaire.

Pour l'application au cas des exploitations agricoles (Jacquet et al., 2008), après la définition d'une fonction de production, les contraintes en termes d'occupation des terres, de rotation, de travail, de trésorerie doivent être décrites en découpant l'exploitation agricole par activités.

La programmation linéaire est un outil qui a longtemps été utilisé en recherche opérationnelle et particulièrement pour l'évaluation des politiques agricoles (Boussard et al., 1997 ; Kerselaers et al., 2007) ainsi que les problématiques de gestion de l'eau (Berbel et al., 2000 ; Bouzit et al., 1994 ; Graveline et al., 2007). L'orientation est actuellement au développement de modèles non-linéaires dans le cadre du paradigme classique d'existence de solutions optimales (Bouyssou et al., 2006).

2.2.3. De la rationalité substantive à la rationalité procédurale (Simon, 1976)

Le modèle de rationalité classique bien qu'encore largement utilisé, a montré certaines limites. Dès les années 1950, les travaux d'Herbert Simon (1955) ont jeté le doute sur la pertinence du modèle d'optimisation sous contraintes comme seul paradigme admissible de rationalité. Et, dans le domaine de la recherche opérationnelle, les limites de la modélisation exclusive des problèmes de décision sous forme d'optimisation sont également apparues. Une solution « optimale dans le modèle » n'apparaissait pas toujours optimale pour l'agent concerné (Bouyssou et al., 2006, p17). Simon pointe spécifiquement trois hypothèses implicites de la théorie classique de la décision qui lui paraissent non applicables dans la réalité des organisations (Moscarola, 1984 in Bouyssou et al, 2006), à savoir :

- les agents connaissent bien leur problème ;
- ce problème est toujours représentable comme un problème d'efficacité ;
- l'information et les ressources nécessaires pour trouver une solution sont toujours disponibles.

Pendant les années 1950, Simon a donc développé sa théorie de la « rationalité limitée » (Simon, 1955), selon laquelle un décideur confronté à un problème de choix se comporte selon un critère de « satisfaction » au sens où il choisit la première solution trouvée qui « satisfait » ses besoins ; il ne choisira pas selon un critère d'optimisation idéal et irréaliste. Les hypothèses de ce qui devient en 1955, la rationalité limitée sont les suivantes (Bouyssou et al., 2006, p183) :

1. il est impossible de donner des probabilités à tous les évènements et même tout simplement d'énumérer tous les évènements possibles avec leurs combinaisons ;
2. les préférences du décideur ne sont pas rationnelles au sens de la maximisation d'une fonction d'utilité et elles sont multicritères et changeantes, ce qui entraîne l'impossibilité d'avoir une fonction d'utilité globale pour le choix ;
3. les décisions s'étalent dans le temps et, dans les organisations, forment un processus temporel dans lequel les sous-décisions ne sont pas indépendantes entre elles, mais peuvent être prises à des moments et des niveaux différents avec des critères non identiques ;
4. l'information est fondamentale et conditionne très fortement la décision.

Cette définition de la rationalité est celle qui est principalement utilisée dans les approches agronomiques de modélisation systémique et dans la majorité des systèmes multi-agents. L'hypothèse de rationalité limitée peut aussi être modélisée grâce à la programmation mathématique. Pour les agronomes, cette façon de modéliser la décision a émergée dans les années 1990 selon le concept de « modèles d'action » développé par Sébillote (2010)(cf. sous section 2.4.3 p 63).

2.3 Les couplages de modèles : les modèles bioéconomiques

Actuellement, les problématiques environnementales occupent une place majeure dans l'analyse des exploitations agricoles. Or, ces nouvelles problématiques nécessitent des modélisations plus explicites des interactions entre les pratiques des exploitants et les pollutions que les fonctions de production. Cette préoccupation a amené certains chercheurs à proposer des couplages entre des modèles économiques d'une part et des modèles biophysiques, agronomiques ou hydrologiques d'autre part.

2.3.1. Principes de modélisation

Un modèle bioéconomique d'exploitation agricole peut être défini comme un modèle qui lie une représentation des décisions des exploitants concernant la gestion des ressources à une représentation des modifications et externalités associées sur l'environnement (Janssen et al., 2007). Globalement, l'objectif des équipes de recherche développant depuis quelques années ces modèles est de pouvoir assembler les modèles développés dans plusieurs disciplines pour accéder à une évaluation intégrée des politiques (Janssen et al., 2007 ; Reidsma et al., 2010 ; Van Ittersum et al., 2008).

Janssen et al. (2007) proposent une classification des modèles bioéconomiques selon trois groupes en fonction de leurs objectifs :

- explorer la pertinence de configurations alternatives et d'innovations technologiques à l'échelle de l'exploitation, c'est-à-dire évaluer si une technologie est viable financièrement et aura des effets environnementaux positifs ;
- prévoir et évaluer les effets des changements de politiques agricoles (Berentsen et al., 1995) pour l'aide à la décision ;
- proposer des améliorations méthodologiques à l'attention des autres chercheurs.

Le couplage a d'abord été fait entre un modèle agronomique des impacts environnementaux des techniques de production d'une part, et d'un modèle économique, d'autre part. Par la suite, d'autres composantes sociales et environnementales ont été intégrées (Dent et al., 1995).

Concernant la modélisation de la fonction d'objectif, selon la revue des modèles bioéconomiques d'exploitations agricoles effectuée par Janssen et al. (2007), la plupart des modèles bioéconomiques utilisent des modèles de programmation mathématique normative fréquemment basés sur la programmation linéaire mais des techniques de plus en plus élaborées comme la programmation mathématique positive sont utilisées.

La principale difficulté rencontrée dans ce type d'approche est selon Flichman et al. (2003) est la compatibilité en termes d'entrées et sorties des différents modèles utilisés en couplage.

Nous proposons dans les deux sous-sections suivantes une analyse des modèles développés dans deux projets de recherche qui visent une approche intégrée des couplages de modèles : APSIM et SEAMLESS.

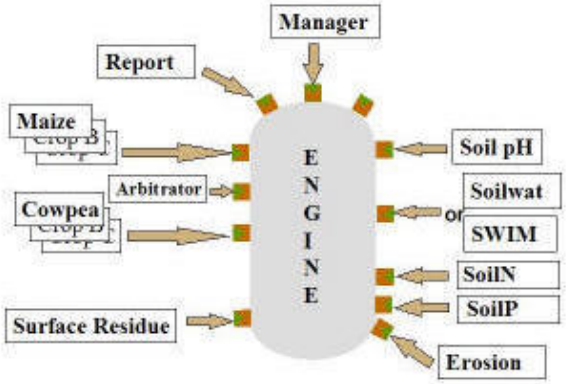
2.3.2. The Agricultural Production Systems Simulator (APSIM)[14]

Le logiciel APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) est un cadre de modélisation modulaire qui a été développé par une unité de recherche australienne sur les systèmes de production agricole (ASPRU), composée à la fois des agences du CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) et du gouvernement de l'Etat du Queensland. APSIM a été développé au départ pour simuler les processus biophysiques dans les systèmes agricoles, en particulier, prédire les rendements des productions en fonction du climat, du génotype tout en considérant la gestion des ressources (eau, type de sol…) à l'échelle de l'exploitation agricole (Keating et al., 2003 ; McCown et al., 1996).

Toutefois, dans les publications les plus récentes (Moore et al., 2010), l'objectif est également de coupler ces modèles agronomiques afin d'obtenir des sorties en termes économiques et environnementaux en lien avec les pratiques vis-à-vis du changement climatique.

APSIM est composé des modules suivants :

- un ensemble de modèles biophysiques simulant les processus dans les systèmes agricoles (plante, érosion, évaporation…) ;
- un ensemble de modules portant sur les pratiques qui permettent de spécifier des règles de gestion ;
- plusieurs modules de gestion des bases de données d'entrées et de sorties du modèle ;
- un processeur qui gère le processus de simulation.



[14] Site web du projet APSIM : http://www.apsim.info/Wiki/APSIM-and-the-APSIM-Initiative.ashx

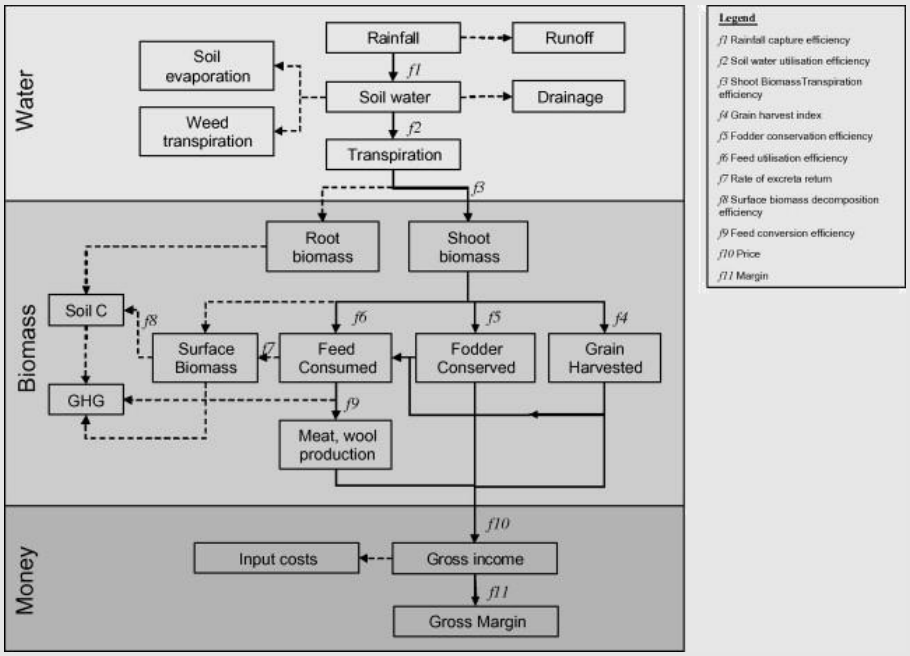
Source : Moore et al. (2007)

Figure 20: Architecture du modèle APSIM

Moore et al. (2007) ont proposé le cadre de modélisation, Common Modelling Protocol, qui pointe l'intérêt de la modularité pour modéliser les exploitations agricoles à différentes échelles (parcelles, élevage, exploitation…) ainsi que pour permettre l'intégration d'autres composantes ou sous-systèmes à modéliser et tester différents modèles de simulation pour chaque composante. L'encadré 1 propose d'approfondir l'analyse de ce modèle bioéconomique à travers un exemple d'application de la démarche APSIM.

Encadré 1 : Illustration de l'application d'un modèle hydro bioéconomique « Evaluation of the water use efficiency of alternative farm practices at a range of spatial and temporal scales: A conceptual framework and a modelling approach » (Moore et al., 2010)

Moore et al. (2010) utilisent le modèle biophysique APSIM en couplage avec le modèle économique MIDAS pour déterminer l'efficacité d'utilisation de l'eau pour différents systèmes de production en lien avec l'application de contraintes de gestion environnementales. L'intérêt principal de cette approche est de permettre de déterminer sur la base des modèles biophysiques et agronomiques les coefficients techniques associés à ces différentes pratiques plutôt que de les estimer sur dire d'experts comme le font la plupart des études sur le sujet. Ces coefficients techniques et le rendement issu des modèles biophysiques et agronomiques sont ensuite utilisés dans le modèle économique MIDAS. MIDAS est un modèle statique de programmation linéaire. La figure 21 montre comment est articulé le couplage entre le modèle économique (Money), le modèle biophysique (Water) et le modèle agronomique (Biomass).



Source : (Moore et al., 2010)

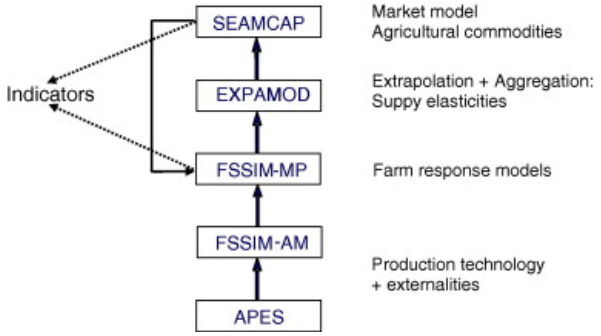
Figure 21 : Cadre de modélisation de l'évaluation de l'efficacité d'utilisation de l'eau (couplage APSIM/MIDAS)

Un des principaux intérêts de ce type de modèle est la modularité qui permet de travailler individuellement à l'amélioration de chacun des modules du modèle. Cependant, on peut constater que le lien entre le module économique et le module agronomique se fait principalement par

l'intermédiaire du rendement et des coefficients techniques. Il n'y a pas dans le modèle de boucle de rétroaction entre les objets de ces modèles qui sont construits séparément.

2.3.3. La démarche SEAMLESS[15]

SEAMLESS est une plate-forme développée par des chercheurs européens qui vise principalement à permettre une évaluation intégrée (Integrated assessment) de l'impact des politiques publiques sur les systèmes agricoles à plusieurs échelles allant de la parcelle à l'Union Européenne. Tout comme APSIM, cette approche repose sur un cadre de modélisation modulaire. Les modules peuvent aussi bien être des modèles, que des bases de données ou même des indicateurs. Les enjeux liés au développement de cette initiative sont bien développés dans l'article de Van Ittersum et al. (2008). La démarche SEAMLESS s'organise autour de cinq modèles (figure 22) couplés permettant une analyse depuis l'échelle de la parcelle jusqu'à l'échelle européenne.



Source : Van Ittersum et al. (2008)

Figure 22 : Organisation du modèle SEAMLESS appliqué de l'échelle parcelle à l'échelle européenne

SEAMCAP est un modèle de marché qui utilise les sorties du modèle économique à l'échelle de l'exploitation (FSSIM) qui ont été préalablement traitées dans un modèle économétrique (EXPAMOD) permettant l'agrégation pour passer à l'échelle européenne. Le modèle d'exploitation agricole (FSSIM-MP) utilise un modèle de simulation du comportement des agriculteurs (FSSIM-AM) basé sur un modèle de production agricole (APES) et d'un modèle de programmation mathématique. Deux chaînes de modèles peuvent être distinguées. APES-FSSIM fait le lien entre un modèle de simulation biophysique et un modèle bioéconomique d'exploitation agricole.

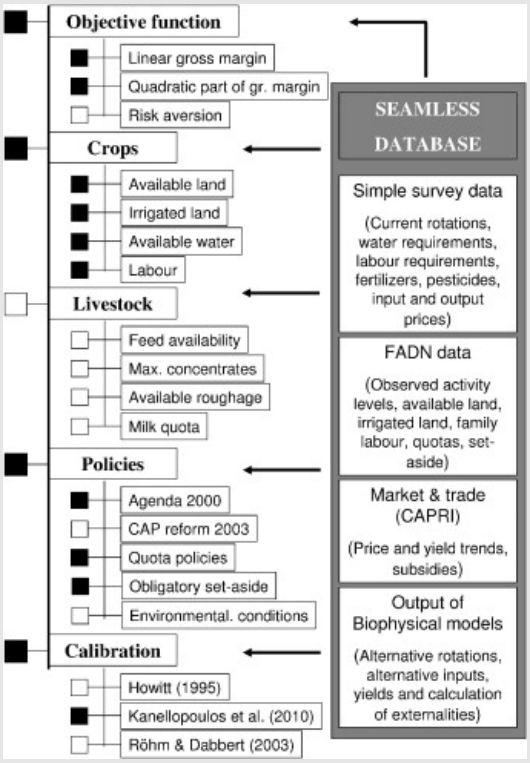
Depuis les années 1990, l'approche SEAMLESS a été utilisée à différentes échelles pour l'évaluation de politiques (Wossink et al., 1992) et de l'innovation technique (Berentsen et al., 1995). La programmation linéaire a été principalement utilisée pour ces applications. Pour SEAMLESS, le simulateur de système agricole (Farming Systems Simulator, FSSIM) a été peu à peu amélioré,

[15] Site web du projet SEAMLESS : http://www.seamless-ip.org/

notamment par l'utilisation de la programmation mathématique positive (Louhichi et al., 2009). Il est présenté en détail dans l'encadré 2.

Encadré 2 : FSSIM, a bio-economic farm model for simulating the response of EU farming systems to agricultural and environmental policies (Louhichi et al., 2010)

FSSIM est un modèle d'optimisation qui maximise la marge brute totale des exploitations agricoles sous des contraintes de ressources et de politiques. La fonction d'objectif à maximiser, à savoir la marge brute totale, se compose d'une partie linéaire et d'une partie quadratique. Le modèle FSSIM est lui-même organisé de façon modulaire (figure 23). L'objectif de FSSIM est d'être générique et transférable. Pour cela, les auteurs ont particulièrement veillé à : (1) séparer les modèles et les bases de données et créer une base de données cohérente à l'échelle européenne pour l'élaboration d'exploitations types ; (2) élaborer un modèle modulaire permettant de prendre en compte de façon différentielle certaines composantes, contraintes ou méthodes de calibration.



Source : (Louhichi et al., 2010)

Figure 23 : Architecture du modèle FSSIM avec les composantes activées ■ ou non□

Ce modèle permet de simuler ex ante les effets de la mise en place de politiques telles que la PAC, sur des exploitations types définies sur la base du Réseau d'Information Comptable Agricole.

Cependant, ces modèles ne permettent pas d'envisager le changement de structure des exploitations agricoles ou les phénomènes de rupture importants comme les catastrophes naturelles. Pour l'étude des changements structurels, Zimmermann et al. (2009) montrent que seuls deux types d'approches permettent de répondre à ces problématiques : la modélisation stochastique (chaînes de Markov) et les Systèmes Multi Agents. Les Systèmes Multi Agents requièrent pour l'élaboration des règles de comportement une connaissance assez fine des agents modélisés. Or, cette approche est difficilement envisageable avec les données existantes à l'échelle d'application choisie par

SEAMLESS pour l'évaluation des politiques qui est l'échelle européenne et requerrait une collecte de données importante.

2.3.4. Intérêt et limites de ces approches

L'avantage principal des approches de couplage de modèles repose sur leur caractère modulaire. Cela leur permet d'envisager une amélioration différentielle de chaque sous-modèle et la comparaison des résultats obtenus en utilisant différents sous-modèles développés dans la même optique. Par ailleurs, comme l'illustre la démarche SEAMLESS, ils permettent d'envisager le changement d'échelle qui est une problématique majeure pour l'analyse des politiques publiques.

Cependant, ces approches présentent également certaines limites. En effet, comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, le couplage repose sur l'utilisation de sorties d'un sous-modèle pour alimenter, en entrée, un autre sous-modèle. Cette conception modulaire nécessite que les interactions entre les objets de deux sous-modèles différents soient déjà bien connues afin que les entrées et sorties des différents sous-modèles soient cohérentes. Mais, la raison principale de l'impossibilité de mobiliser, au stade actuel de la recherche sur la vulnérabilité, les approches par couplage est que les modèles d'endommagement des exploitations agricoles ont été peu investigués.

2.4 Modélisation systémique

Dans cette section, il s'agit de présenter l'approche de modélisation systémique qui est une approche générique utilisée aussi bien en économie que dans d'autres disciplines (écologie, mécanique des fluides…).

2.4.1. Définition de l'approche systémique

L'approche systémique a été développée dans les années 50 et la théorie générale des systèmes formalisée par Von Bertalanffy (1968). Elle a été alimentée par les réflexions du Club de Rome[16] (1972). Partant du constat que l'utilisation de modèles analytiques n'est pas adaptée aux problèmes complexes auxquels nous sommes confrontés, l'approche systémique propose une nouvelle conception de la modélisation visant à l'explicitation de ces phénomènes ; la finalité restant de pouvoir identifier les algorithmes sous-jacents aux phénomènes.

[16] Groupe de réflexion pluridisciplinaire réunissant des scientifiques, décideurs publics et industriels sur la problématique du développement dans un monde complexe et interdépendant. Ils se font mondialement connaitre en 1972 par la publication d'un rapport intitulé « The limits to growth ».

Les travaux de Von Bertalanffy, puis LeMoigne (1990 ; 1994), permettent peu à peu de structurer l'épistémologie du courant systémique.

Un ***système*** y est défini comme un ***ensemble d'éléments en interactions*** (Von Bertalanffy, 1968, p37).

D'un point de vue méthodologique, l'étude des systèmes doit tenir compte de trois critères :

- le nombre d'éléments ;
- leur espèce, au sens de leurs caractéristiques ;
- les relations entre ces éléments.

Dans l'étude des systèmes, deux types de caractéristiques peuvent être distinguées :

- Les ***caractéristiques sommatives ne dépendent pas du fait qu'un élément se trouve à l'intérieur d'un système,*** c'est-à-dire qu'elles peuvent être déterminées sans connaissance du système et additionnées entre elles ***;***
- Les ***caractéristiques constitutives dépendent des relations spécifiques à l'intérieur du système*** et nécessite une compréhension et une formalisation des liens qui les unissent.

Les interactions entre les éléments confèrent des propriétés nouvelles ou émergentes au système complexe par rapport à ses différents éléments constitutifs.

L'approche systémique et la théorie des systèmes visent à promouvoir une approche globale permettant d'appréhender à la fois les caractéristiques sommatives et constitutives des phénomènes complexes.

Von Bertalanffy (1968) précise bien que cette approche ne s'oppose pas à l'approche de modélisation mathématique. Le langage mathématique permet d'exprimer des phénomènes de façon plus précise que le langage ordinaire en utilisant des algorithmes. Toutefois, il mentionne également qu'il est « préférable d'avoir d'abord un modèle non mathématique avec ses imperfections mais qui exprime un point de vue antérieurement négligé avec l'espoir de lui associer un algorithme correct que de partir de modèles mathématiques fondés sur des algorithmes qui risquent de restreindre le champ de vision ».

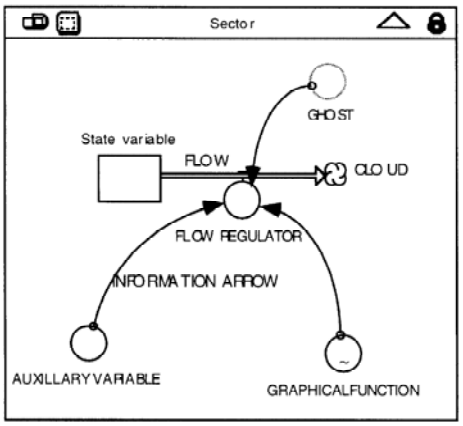
2.4.2. Modélisation dynamique des systèmes

La modélisation dynamique repose sur une approche fonctionnelle de définition de stocks et de flux (Sterman, 2000) :

$$stock(t) = \int_{t_0}^{t} \left[inflow(s) - outflow(s) \right] ds + stock(t_0)$$

Ensuite des variables auxiliaires sont généralement introduites pour représenter les interactions entre les variations de stock et des variables externes. Ces modèles reposent principalement sur la définition d'une série d'équations différentielles.

Ce type de modélisation est très utilisé pour les problématiques environnementales, notamment d'utilisation de ressources. Dans ce type de modélisation appliquée aux systèmes écologiques et économiques, le langage STELLA (figure 24) peut être utilisé (Costanza et al., 1998a ; Costanza et al., 1998b ; Costanza et al., 2001). Cette interface facilite la construction des modèles dynamiques. Il permet, par exemple, de traiter simultanément l'évolution hydrologique d'un bassin, l'évolution de pratiques agraires d'une population et ses revenus (Morardet et al., 2010).



(Costanza et al., 2001)

Figure 24 : Formalisme de la plate forme de modélisation dynamique STELLA

2.4.3. Modélisation systémique appliquée aux systèmes agronomiques

- *Historique*

L'application de l'approche systémique aux systèmes agricoles s'est développée dans les années 1980 (Hervé et al., 2009 p.27), principalement portée par l'unité « Systèmes Agraires et Développement » (SAD) de l'INRA (Brossier et al., 1990b). Dès les années 1970, une équipe pluridisciplinaire intégrant agronomie, zootechnie, économie, sociologie et biométrie s'est formée pour comprendre les freins à l'adoption du progrès technique. Au niveau international, à la même époque, l'approche systémique appliquée aux systèmes agricoles, appelée « Farming Systems », se développe également (Simmonds, 1985) pour analyser les politiques d'aide au développement. Les ressortissants de ce courant « systémique » se sont ensuite ouverts aux systèmes multi-agents (SMA) et aux jeux de rôles.

- *Quelques concepts clés*

Le courant de modélisation systémique des exploitations agricoles a introduit des concepts que nous mobilisons dans la modélisation de la vulnérabilité. Nous en définissons ici quatre particulièrement importants dans notre approche : le système de production, l'itinéraire technique, le modèle de décision et l'organisation du travail.

Le ***système de production*** a été défini par Reboul (1976) comme un « mode de combinaison entre terre, forces et moyens de travail à des fins de production végétale et/ou animale ». En détaillant plus précisément les formes de capitaux mobilisées pour la production, nous considérons l'exploitation agricole comme un ***système mobilisant des capitaux physique, humain, financier et social à des fins de production végétale et/ou animale***. Notons que les différentes formes de capitaux sont mises en interaction par une organisation des tâches de production gérée par une entité décisionnelle, l'exploitant.

Les concepts d'itinéraire technique, organisation du travail et modèle de décision sont profondément liés. Ils permettent de lier les actions menées par les exploitants au rendement produit sur les parcelles. Ainsi, l'***itinéraire technique***, défini par Sébillote en 1978 (in Brossier et al., 1990b, p.23) comme ***« une suite logique et ordonnée de techniques culturales appliquées à une espèce végétale cultivée*** », permet d'établir une série de tâches devant être réalisées par l'exploitant pour atteindre un certain niveau de rendement. L'itinéraire technique est donc lié à une certaine organisation du travail sur l'exploitation agricole, gérée par l'exploitant qui prend des décisions routinières tactiques.

Le concept de décision a été au centre de la recherche systémique centrée sur l'action. S'appuyant sur le concept de la rationalité limitée, les chercheurs du SAD ont alors développé un « ***modèle d'actions*** » qui ***exprime les objectifs à atteindre ainsi que les règles de décision attenantes*** (Sébillote et al., 1990)***.*** Ces règles de décision sont formalisées par des agronomes sur la base d'enquêtes et de l'observation des pratiques des agriculteurs (Darré et al., 2004). L'intérêt de la définition de ces règles est de pouvoir aussi prévoir ce que l'exploitant envisage de faire dans le cas où les conditions ne permettent pas de suivre le calendrier (itinéraire technique) initialement prévu. Les modèles d'action envisagent donc la définition de solution de rattrapage selon le principe que l'agriculteur tente de se prémunir contre une non-réalisation ou une réalisation en conditions désastreuses (Sebillotte et al., 2010). Ces modèles d'actions sont particulièrement adaptés à la modélisation des décisions routinières. Pour les décisions non routinières, comme par exemple l'occurrence d'une inondation, ils ont été peu utilisés notamment, car les règles de décision sont plus difficiles à déterminer.

La modélisation de l'organisation du travail sur l'exploitation agricole développée par Attonaty et al. (1990) avec le modèle OTELO, repose sur l'établissement de calendriers de travail journaliers en lien avec les itinéraires techniques des productions et des règles de gestion. Elle a principalement été utilisée pour le conseil auprès des agriculteurs céréaliers en montrant l'influence des pratiques d'organisation du travail sur la productivité (Papy et al., 1988).

Notre modèle n'a pas vocation à modéliser finement l'organisation du travail et les décisions routinières. Nous nous sommes concentrés sur les modes de gestion mises en œuvre par les exploitants suite à une inondation en considérant que l'organisation du travail en temps normal est régie par l'itinéraire technique et que, comme supposé dans les modèles d'action, l'exploitant cherche à éviter une non-réalisation des tâches et utilise des modes de réalisation alternatifs pour accomplir ces tâches. Nous précisons en conclusion quelles sont les contraintes portant sur les modes de réalisation alternatifs.

2.5 Modélisation orientée objet et systèmes multi-agents

2.5.1. Conception objet, conception fonctionnelle

La modélisation orientée objet est une approche de représentation des systèmes associée à un langage de programmation qui permet de concevoir des programmes agencés autour d'entités autonomes. Elle oblige à décomposer les systèmes étudiés et à expliciter leur fonctionnement et les interactions des objets définis. Dans le cadre du développement informatique, on distingue les méthodes de conception objet et les méthodes de conception fonctionnelle. Si la représentation objet repose sur une vision systémique, elle est centrée sur les entités constituant le système étudié, en définissant les liens entretenus entre les entités et les opérations dont elles sont capables. Le formalisme fonctionnel repose sur une approche systémique classique et est centré sur la fonction associée au système (entrées-sorties) (Ferber, 1995, p113). Cela n'exclut pas que les conceptions objet et fonctionnelle puissent être combinées en associant des fonctions à certains objets.

2.5.2. Distinction objet / agent

La modélisation orientée objet a permis le développement des Systèmes Multi-Agents (SMA). Les agents peuvent être définis comme des objets dont la composante décisionnelle et l'autonomie sont plus importantes. Treuil et al. (1996) proposent de différencier agents et objets en qualifiant les objets d'inanimés et les agents d'animés. Ferber (1995) propose deux définitions distinctes des objets et agents. Ainsi, la notion d'objet est définie par trois concepts (Ferber, 1995, p61):

- la relation classe/instance, qui décrit la classe comme un modèle structural et comportemental et l'instance comme un représentant d'un modèle ;
- l'héritage, qui permet de dériver une classe d'une autre et de faire bénéficier la première des caractéristiques de la seconde ;
- l'envoi de message, qui autorise la définition de procédures dont le code diffère en fonction du receveur du message.

Un agent est défini (Ferber, 1995, p 13) comme une « entité physique ou virtuelle » :

- qui est capable d'agir dans un environnement ;
- qui peut communiquer directement avec d'autres agents ;
- qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser) ;
- qui possède des ressources propres ;
- qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement ;
- qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune) ;
- qui possède des compétences et offre des services ;
- qui peut éventuellement se reproduire ;
- dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

Au sens de Ferber (1995, p.14), les systèmes multi-agents se composent :

- d'un environnement,
- d'un ensemble d'objets situés et passifs,
- d'un ensemble d'agents, objets particuliers qui représentent les entités actives et qui sont dotés d'un corps, d'attributs, d'un mécanisme de contrôle et d'un ensemble de comportements
- d'un ensemble de relations d'interactions entre les objets,
- d'un ensemble d'opérations permettant la perception, la production, la consommation et la transformation d'objets,
- des opérateurs chargés de la mise à jour de l'environnement.

2.5.3. Modélisations objet/SMA des exploitations agricoles

Depuis les années 1990, dans la continuité des approches systémiques développées par les agronomes (sous section 2.4.3, p 63), les approches de modélisation orientée objet se sont développées pour traiter des problématiques agricoles comme par exemple les pratiques de gestion et d'organisation du travail (Hervé et al., 2002 ; Neil et al., 1999 ; Sherlock et al., 1997). Ensuite, l'approche par les SMA a été de plus en plus mobilisée pour la modélisation des systèmes agricoles, que ce soit pour l'étude de l'adaptation au changement climatique (Janssen et al., 1998), la gestion des ressources naturelles (Barreteau et al., 2004) ou encore les questions de changements structurels (Appel et al., 2010 ; Balmann, 1997 ; Happe, 2004 ; Happe et al., 2004 ; Happe et al., 2006) et d'innovation (Kaufmann et al., 2009).

Les modèles multi-agents font partie des approches « bottom-up » ce qui implique qu'il n'y a pas de règle générale contrôlant le comportement des agents à un niveau agrégé mais des règles établies par les modélisateurs pour chaque catégorie d'agent définie. En particulier, cela permet d'expliciter et de choisir le type de rationalité adoptée par l'agent et sa modélisation.

2.5.4. Description et Unified Modelling Language (UML)

Comme l'expriment Happe et al. (2004), faire le choix des SMA et de la modélisation objet, force à une exigence de clarté dans la formulation des hypothèses. Cela demande également des outils de représentation permettant de soumettre le modèle à la discussion. Ceci est d'autant plus important lorsqu'une grande partie des connaissances modélisées proviennent d'un savoir expert (Happe, 2004). Le processus de construction et de validation de la modélisation passe donc nécessairement par la représentation du modèle. Pour cela, UML (Unified Modelling Language) s'avère un outil particulièrement intéressant et structurant (Le Page et al., 2005). Il s'agit d'un langage semi-formel aujourd'hui standard permettant d'exprimer ou d'élaborer des modèles orientés objet, indépendamment de tout langage de programmation. Ayant été conçu pour représenter un système informatique à travers la description de ses entités, de leurs activités et de leurs interactions, UML s'est révélé un support adapté à la conceptualisation de modèles systémiques (Roux-Rouquié et al., 2004). UML est un langage de description qui propose notamment une panoplie de diagrammes appelés « vues » permettant de présenter visuellement un modèle conceptuel selon des angles différents : les diagrammes de classes pour décrire la structure d'un modèle, les diagrammes d'activité pour décrire les règles de comportement d'une entité, les diagrammes de séquences pour définir l'agencement temporel des interactions entre les entités, et les diagrammes d'états pour caractériser les transitions qui font passer les entités d'un état à un autre.

2.5.5. Exemple du modèle AGRIPOLIS[17] : un SMA pour l'évaluation économique de la Politique Agricole Commune

Le modèle AGRIPOLIS (Agricultural Policy Simulator) qui a été développé par Happe en collaboration avec Kellerman et Balmann, est un exemple majeur de modélisation multi-agents appliquée aux systèmes agricoles. Conçu dans un premier temps comme un automate cellulaire (Balmann, 1997), le modèle AGRIPOLIS a ensuite beaucoup évolué et intégré de nombreux attributs

[17] Pour une description détaillée d'AGRIPOLIS voir (Happe, 2004 ; Happe et al., 2004)

.

et fonctions (Happe et al., 2004). Il a pour objectif d'expliciter les phénomènes de changement structurel des exploitations agricoles en lien avec les changements politiques, en particulier la Politique Agricole Commune (PAC), mais aussi de proposer des simulations quantitatives de ces changements et d'en donner des indicateurs économiques.

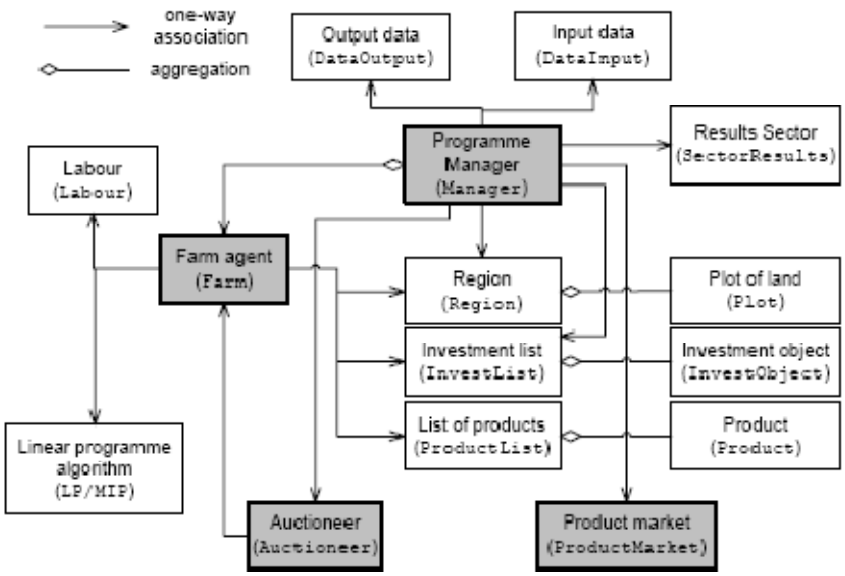
Le cadre conceptuel d'AGRIPOLIS est constitué de trois composantes principales, à savoir : les exploitations agricoles, les marchés et l'espace agricole (ensemble de parcelles). Cette représentation est considérée caractéristique des exploitations familiales de la zone étudiée. Dans ce modèle, les agents sont définis comme des entités agissant individuellement, faisant partie d'un environnement et agissant sur lui. Deux types d'agents sont définis : l'agent exploitation agricole et l'agent marché. Le plus important, l'agent exploitation agricole, correspond à une entité qui décide de manière autonome de son organisation, des productions, de l'objectif à atteindre (par exemple maximiser le revenu du foyer) et qui réagit par rapport à son environnement.

Le second type d'agent, l'agent marché, coordonne l'offre et la demande des biens (produits, facteurs de production) sur les marchés. Il est spécifiquement dédié à la gestion des terres agricoles et réalise les transactions entre agents de type « exploitation agricole ». Le comportement de cet agent est très simplifié puisqu'il n'a pas d'autre objectif que de coordonner.

L'objectif de l'agent exploitation agricole est de maximiser le revenu du foyer composé des trois sources : la production agricole, la location de parcelles, le travail de la main d'œuvre familiale en dehors du foyer. Pour les contraintes de trésorerie, des possibilités de prêts sont définies. Le type de rationalité de l'agent est une rationalité limitée dans le sens où l'agent ne connait pas, au moment où il prend ses décisions de gestion, les décisions qui ont été prises par les autres exploitants. Un modèle de programmation linéaire est utilisé pour résoudre l'algorithme de maximisation du revenu du foyer.

Les interactions entre agents se font principalement par l'intermédiaire de l'agent marché. L'allocation des terres est régie par un mécanisme itératif. Ensuite, en fonction de la rentabilité de la parcelle, à chaque période, l'agent décide d'arrêter, de poursuivre ou d'augmenter le nombre de locations.

Un modèle conceptuel a d'abord été élaboré avant d'être implémenté en programme informatique permettant la simulation. La structure orientée objet a permis une représentation UML (figure 25) des différents aspects du modèle (description statistique des objets et attributs puis description dynamique).



Source : Happe (2004)

Figure 25 : Modèle conceptuel d'AGRIPOLIS

En conclusion, les auteurs insistent sur l'importance de formuler des hypothèses explicites et discutables. En effet, travaillant sur des processus complexes, très discutés tant par les scientifiques que les experts locaux, Happe et al. (2004) considèrent que s'efforcer à rendre le modèle explicite fait partie du processus de validation. En cela, l'UML et les représentations qui peuvent en être issues sont précieuses dans le processus de modélisation tant pour la structuration que pour la validation.

2.6 Conclusions et hypothèses de travail retenues

2.6.1. Choix d'une modélisation systémique

Les approches par couplage présentent un intérêt certain qui est de pouvoir mobiliser différents modèles biophysiques existants dans un modèle global. Dans notre cas, la modélisation de l'endommagement des systèmes agricoles face aux inondations a été relativement peu investiguée et les travaux qui ont été menés relèvent principalement de la littérature grise avec une approche plutôt qualitative. L'approche par couplage n'est donc pas envisageable, à ce stade, sur la vulnérabilité agricole.

Notre choix de modélisation s'est orientée vers une approche systémique et une représentation conceptuelle orientée objet. Cependant, nous préférons éviter la dénomination « orientée objet » pour qualifier la modélisation car elle est souvent associée au langage de programmation utilisé pour l'implémentation[18].

L'approche systémique permet à la fois de considérer les caractéristiques sommatives et de faire émerger les caractéristiques constitutives liées aux interactions des éléments du système. L'approche défendue est que la vulnérabilité des exploitations agricoles dépend de la propension de chacune des composantes physiques de l'exploitation à être endommagée (caractéristiques sommatives) mais aussi des perturbations de l'activité de production suite à l'endommagement des facteurs de production (caractéristiques constitutives). Le système « exploitation agricole » est ainsi caractérisé comme un ensemble de composantes en interaction qui mobilisent du capital physique (parcelle, bâtiment, matériel…), du capital humain (main d'œuvre), financier et social à des fins de production végétale et/ou animale

De plus, notre objectif étant de construire un modèle explicite de la vulnérabilité des exploitations agricoles, la représentation orientée objet utilisant le langage UML s'est avérée pertinente. En effet, elle constitue un outil permettant une co-construction et une validation des hypothèses par les experts locaux, les chercheurs de différentes disciplines ainsi que les agriculteurs concernés.

[18] Or, l'implémentation utilisée pour le cas d'application présenté dans la partie 3 utilise le langage R qui n'est pas un langage orienté objet.

Les potentialités qu'offre l'approche retenue sont nombreuses. Certaines ont été mises en œuvre et sont présentés dans les parties 2 et 3 de cette thèse, à savoir :

- permettre une construction pluridisciplinaire et une validation des hypothèses de modélisation par la construction d'un modèle conceptuel ;
- permettre le choix d'un type de rationalité et d'un modèle de décision ;
- permettre un suivi temporel des composantes de l'exploitation suite au processus d'inondation.

Par ailleurs, cette approche de modélisation laisse envisager certaines perspectives de développement et d'amélioration du modèle de vulnérabilité :

- Il est envisageable de localiser les différentes composantes de l'exploitation agricole, en particulier les parcelles et bâtiments, et de faire des simulations sur des bassins versants réels.
- Il est possible d'envisager un changement d'échelle du système étudié (exploitation, relations entre exploitations, filière) en prenant en compte les interactions entre agriculteurs (entraide) ainsi que les interactions entre agriculteurs et les filières amont (approvisionnement) et aval (transformation, stockage et vente des produits).
- Il est envisageable de prendre en compte une capacité d'apprentissage aux exploitants. En effet, le phénomène d'inondation fait référence à une certaine connaissance du risque par l'exploitant. Suite à l'occurrence de plusieurs aléas, il serait donc intéressant de pouvoir envisager une évolution dynamique des stratégies de gestion comme une forme d'apprentissage de l'exploitant. Ceci pourrait être réalisé par la modification de certaines caractéristiques des composantes de l'exploitation (surélévation, déplacement des zones de stockage) ainsi que par l'affectation de nouvelles procédures de gestion à l'agent décisionnel comme l'organisation de l'évacuation ou l'organisation de la remise en état.

2.6.2. Choix d'une rationalité procédurale et d'un modèle de décision de type « action »

- *Rationalité limitée*

Le modèle de décision qui est mis en œuvre dans la modélisation de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations repose sur une approche de rationalité limitée. En effet, les hypothèses du modèle classique de rationalité nous paraissent difficilement applicables s'agissant de la prise de décision post-inondation. Par exemple, les enquêtes qui ont pu être réalisées dans la littérature grise auprès d'exploitants ayant subi des inondations (Bauduceau, 2001 ; 2004a), montrent que le plus souvent, les agriculteurs se retrouvent catapultés dans un processus décisionnel d'urgence dans lequel l'objectif est plutôt de « faire au mieux avec les moyens du bord ».

- *Fonction d'objectif et contraintes*

Notre modélisation ne vise pas à simuler finement la structure et le fonctionnement d'une exploitation agricole en temps normal mais à caractériser les écarts par rapport à ce fonctionnement normal, dus à l'inondation.

Nous considérons donc que l'organisation du travail en temps normal est régie par l'itinéraire technique et que comme supposé dans les modèles d'action, l'exploitant cherche à éviter une non-réalisation des tâches. Pour cela, nous supposons la mise en œuvre de modes de réalisation alternatifs pour réaliser ces tâches. Sur la base de la théorie des capitaux et à l'instar des auteurs du modèle Access (Wisner et al., 2004), nous considérons que les exploitants ne disposent pas tous des mêmes niveaux de capitaux leur permettant d'accéder à ces modes de réalisation alternatifs. Ainsi, nous envisageons la définition de différents profils d'exploitants en fonction des capitaux social et financier mobilisables et qui conditionnent les modes de réalisation disponibles pour l'exploitant.

CHAPITRE 3. ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES PROJETS DE GESTION DES INONDATIONS

Nous avons présenté en introduction l'évolution des politiques de gestion des inondations et de la place des zones agricoles dans celles-ci. Pour la mise en œuvre de ces nouvelles politiques deux problèmes se posent aux décideurs l'évaluation de leur efficience et leur acceptabilité. Pour ces deux points, les enjeux agricoles étant particulièrement concernés, l'évaluation des effets des inondations et des projets sur les zones agricoles devient centrale.

L'évaluation des projets consiste à mesurer ou estimer un écart entre deux indicateurs représentant deux situations alternatives, la situation observée et la situation témoin. Différentes approches d'évaluation peuvent être distinguées (Garrabé, 1994):

- L'évaluation économique mesure les effets positifs et négatifs d'un projet sur le bien être de la collectivité définie comme l'ensemble des acteurs concernés par le projet.
- L'évaluation financière mesure les résultats financiers et de la rentabilité des projets pour un acteur en particulier (Houdayer, 1999).
- L'évaluation sociale vise à une évaluation des effets de redistribution suite à la mise en place d'un projet et à l'évaluation de l'utilité sociale.

Dans ce chapitre, nous centrons l'analyse sur l'évaluation économique et en particulier, de l'Analyse Coût-Bénéfice avant de centrer le propos sur l'évaluation économique appliquée au projet de gestion des inondations. A la suite de ces sections descriptives, nous proposons une discussion de l'utilisation de la méthode des dommages évités dans notre modélisation de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations.

Nous analysons ensuite les difficultés méthodologiques soulevées pour l'évaluation économique des nouvelles politiques de gestion des inondations, en particulier, la réduction de la vulnérabilité. Enfin, nous proposons une revue détaillée des méthodes d'évaluation des dommages agricoles nous permettant de conclure sur les besoins et propositions d'amélioration de la modélisation de la vulnérabilité.

3.2 Analyse Coût-Bénéfice

Nous centrons notre propos sur l'Analyse Coût-Bénéfice (ACB), méthode d'évaluation de la valeur d'utilité et qui est la plus fréquemment utilisée[19]. Cette section propose une présentation des principes et étapes de réalisation d'une ACB reposant principalement sur le document « Analyse Coûts-Bénéfices et Environnement » publié par l'OCDE (Pearce et al., 2006).

3.2.1. Historique et principes théoriques

Les fondements théoriques de l'ACB reposent sur plusieurs apports dont le premier est le concept d'externalité, introduit par Sidgwick en 1887, et que Pigou associe, en 1920, à la différence entre coûts privés et coûts collectifs. Par ailleurs, Dupuit (1844, 1853) propose que les politiques soient évaluées sur la base des préférences des individus et introduit la notion de Consentement À Payer (CAP).

L'ACB s'inscrit dans le cadre de l'économie du bien-être moderne portée par les travaux de Kaldor et Hicks qui introduisent la notion de compensation potentielle en s'opposant au critère de Pareto. Ce dernier considérerait qu'une modification d'une situation n'est un progrès social que si au moins une personne bénéficie d'un gain sans que quiconque ne subisse de perte. Kaldor et Hicks (1939) proposent, eux, que le critère de validation d'un projet repose sur la capacité potentielle des gagnants à compenser les perdants. C'est sur ce principe de compensation potentielle que repose, actuellement, la validation des projets par ACB.

3.2.2. Quelques définitions : coûts, bénéfices et valeur actuelle nette

Les bénéfices et coûts d'un projet évalués dans une ACB sont respectivement définis comme des augmentations ou des réductions du bien-être humain (utilité). Pour cela, l'ACB vise à identifier et quantifier en utilisant des termes monétaires les effets positifs et négatifs d'un projet sur l'ensemble des agents concernés sur une période déterminée.

Les coûts correspondent aux dépenses monétaires (coûts d'investissement, d'entretien…) et non monétaires (externalités et coûts d'opportunité) liées à la réalisation d'un projet.

Les ***bénéfices*** correspondent à la ***somme des augmentations des utilités induites par la mise en œuvre du projet pour l'ensemble de la collectivité***.

Ainsi, un projet répond aux critères de l'ACB si la somme actualisée dans le temps des bénéfices sociaux est supérieure à celle des coûts. La société est considérée comme l'ensemble des individus.

[19] Pour une description générale des méthodes utilisées en évaluation économique cf. annexe 3.

Deux principes d'agrégation sont implicitement appliqués dans l'ACB : les bénéfices résultent de l'agrégation des CAP des individus et les bénéfices et coûts sont également agrégés dans le temps en appliquant un taux d'actualisation qui attribue un poids plus importants aux coûts et bénéfices présents. Les bénéfices et coûts futurs actualisés sont appelés valeurs actuelles.

La Valeur Actuelle Nette (VAN) constitue le résultat synthétique du rapport entre les bénéfices et coûts agrégés et actualisés[20].

3.2.3. Etapes de l'analyse coût-bénéfice

Les étapes misent en œuvre pour l'application de l'Analyse Coût-Bénéfice sont les suivantes (Garrabé, 1994 ; Pearce et al., 2006) :

1. Le projet doit être clairement défini en termes d'objectifs, de durée de vie, de zone spatiale d'influence.
2. Les différentes options envisagées doivent être identifiées afin de pouvoir les classer selon un critère d'efficience. A défaut, la réalisation d'une option est comparée à l'option de ne rien faire.
3. L'espace social, c'est-à-dire l'ensemble des acteurs, susceptibles de voir leurs bénéfices et/ou coûts modifiés par le projet doivent être identifiés.
4. Les effets du projet sur l'utilité des individus doivent être identifiés.
5. Les effets doivent être quantifiés. Pour cela, il existe différentes méthodes développées pour évaluer les préférences vis-à-vis de ce changement de situation et la variation de bien-être induite (cf. sous-section 3.2.4, p76). Cette évaluation doit être réalisée avec une perspective temporelle, pour chaque année de durée de vie du projet.
6. Le choix et l'application d'un taux d'actualisation permet ensuite de tenir compte des préférences temporelles des individus quant au moment où ils reçoivent les bénéfices ou supportent les coûts d'un projet. L'ensemble des coûts et bénéfices résultant de la mise en œuvre du projet est donc actualisé sur la durée de vie du projet.
7. Des coefficients de pondération peuvent être associés aux coûts et bénéfices du projet pour refléter leur valeur sociale pour différents groupes d'agents. Un coefficient de pondération peut également être utilisé pour tenir compte de l'aversion au risque du décideur.
8. Les coûts et bénéfices actualisés sont comparés donnant la Valeur Actuelle Nette (VAN).

[20] Lorsque la VAN est supérieure à 1, le projet est qualifié d'efficace économiquement.

3.2.4. Méthodes d'évaluation de la variation d'utilité dans l'ACB

Les méthodes d'évaluation de la variation d'utilité reposent sur l'observation des préférences qui peuvent être révélées ou déclarées.

La figure 30 reprend la classification de ces méthodes proposée par Garrabé (1994). Nous pouvons distinguer d'une part, les valeurs d'actifs marchands qui peuvent être évaluées sur la base des prix observés sur les marchés en faisant parfois l'objet de rectifications et, d'autre part, les valeurs d'actifs hors marché. Ce sont souvent ces valeurs qui sont recherchées dans les ACB appliquées aux problématiques environnementales.

Deux approches ont été développées pour évaluer ces valeurs d'actifs hors marché : l'une passe par la mesure des préférences déclarées ; l'autre, par la mesure des préférences révélées. Les méthodes basées sur les préférences déclarées sont appliquées par le biais d'enquêtes et reposent sur des marchés théoriques. Parmi la liste présentée dans la figure 26, les méthodes par préférences déclarées les plus fréquemment utilisées sont les suivantes :

- L'évaluation contingente consiste à faire exprimer aux individus concernés une valeur monétaire proposée ou librement exprimée correspondant à une modification. Il s'agit d'un consentement à payer lorsque la modification constitue une amélioration et un consentement à recevoir lorsqu'il s'agit d'une dégradation.
- La modélisation des choix (choice modelling) propose de classer les choix des individus. Une application de ce type de méthode est l'analyse conjointe. Elle est proche de l'évaluation contingente mais plutôt que de demander aux individus une estimation monétaire, elle propose de faire des arbitrages et classements sur différents scénarios proposés.

Au sein de l'autre groupe reposant sur la mesure des préférences révélées, trois catégories sont distinguées en fonction des types de marchés sur lesquelles elles reposent. Nous ne détaillerons pas ici l'ensemble de ces méthodes d'évaluation mais nous listons les plus utilisées dans les évaluations environnementales :

- La méthode des coûts de déplacement consiste à mesurer la valeur d'un bien par le coût que les agents sont disposés à payer pour se rendre sur le lieu. Cette méthode, comme le souligne Grelot (2004), n'est pas adaptée à la gestion des inondations.
- La méthode des prix hédoniques repose sur l'hypothèse que le prix d'un bien dépend de certaines caractéristiques procurant une satisfaction aux agents. Cette méthode est parfois utilisée pour l'ACB des projets de gestion des inondations (Shabman et al., 1996).
- La méthode des dommages évités est la plus fréquemment utilisée pour l'évaluation des bénéfices des projets de gestion des inondations. L'hypothèse sur laquelle elle repose est que

le CAP des agents peut être évalué par la réduction des dommages attendue suite à la réalisation d'un projet.

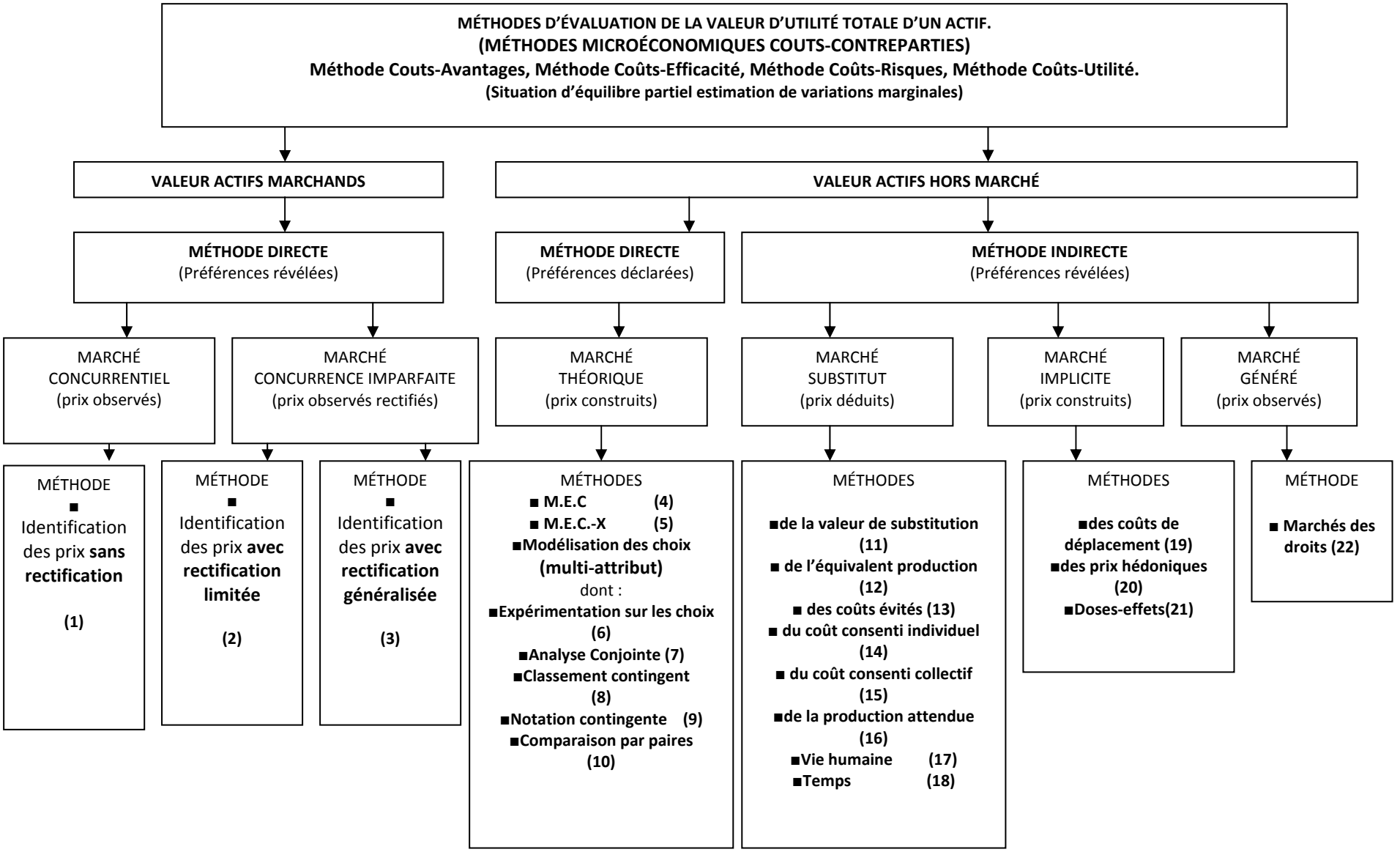
3.3 ACB et gestion des inondations

La plupart des pays pratiquant l'évaluation économique pour la gestion des inondations utilisent le cadre de l'analyse coût-bénéfice (Brouwer et al., 2004). Cette méthode a d'abord été développée aux Etats-Unis où l'évaluation économique des projets de gestion de l'eau est obligatoire depuis le Flood Control Act de 1936 (Hanley et al., 1993). Les recherches méthodologiques ont été principalement menées par l'US Army Corps of Engineers aux États-Unis et le FHRC au Royaume-Uni. La mesure de la variation de l'utilité et donc des bénéfices peut être évaluée selon plusieurs méthodes (sous section 3.2.4, p 76).

3.3.1. Contexte en France et en Europe

En France, la pratique de l'évaluation économique pour l'évaluation des projets de gestion des inondations a été initiée dans les années 1960 par les bureaux d'études, en particulier le BCEOM pour accompagner l'introduction du principe de rationalisation des choix budgétaires introduite dans l'administration. A la même époque, cette pratique a été également initiée en Angleterre principalement par le Flood Hazard Research Center (Middlesex University). Cependant, en France, elle a été ensuite peu développée par la recherche, alors qu'en Angleterre, elle s'est considérablement étoffée sous l'impulsion des ministères de l'Environnement et de l'Agriculture qui ont rendu l'évaluation économique obligatoire pour tous les projets de gestion des inondations fluviales et d'érosion côtière. La recherche méthodologique a ainsi fortement été développée (Ministry of Agriculture Fisheries and Food, 1999 ; Penning-Roswell et al., 2005). La pratique de l'évaluation économique est aussi une composante essentielle de la prise de décision pour les projets de gestion des inondations aux Pays Bas et en Allemagne (Hubert et al., 1999). Dans le contexte actuel, les financeurs, en particulier l'Europe, sont de plus en plus demandeurs de la justification d'un critère d'efficience d'utilisation des fonds publics pour la réalisation des projets incitant fortement à l'évaluation économique.

La mise en œuvre de la Directive Cadre 2007/60/CE relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, constitue un pas important vers une application plus systématique de l'évaluation avant la mise en place des projets. En effet, bien que l'évaluation économique ne soit pas rendue explicitement obligatoire, la Directive encourage fortement les États membres à prendre en compte les coûts et bénéfices (avantages) dans la mise en place des plans de gestion : « Les plans de gestion des risques d'inondation tiennent compte d'aspects pertinents tels que les coûts et avantages… » (Chapitre IV, article 7).



Source : Garrabé (Cours IAMM 2011)

Figure 26 : Récapitulatif des méthodes d'évaluation de la valeur d'utilité totale d'un actif

En France, cette orientation des financeurs vers une évaluation économique plus systématique est notable. Cependant, le retard pris pendant plusieurs années requiert un travail important pour définir des méthodologies stables permettant au maitre d'ouvrage d'exprimer des cahiers des charges clairs pour la réalisation des évaluations économiques. Dans ce cadre, le rôle de la recherche en ingénierie économique est particulièrement important pour définir des méthodes explicites et mobilisables par des collectivités et des bureaux d'études. Le développement méthodologique que nous proposons et son application dans le cadre de la collaboration avec le Plan Rhône entre dans cette optique. Les partenariats entre la recherche et les bureaux d'études apparaissent également comme un moyen efficace de développement et de transfert méthodologique. A titre d'exemple, en France, le Programme Cadereau équivalent à un PAPI et proposé par la ville de Nîmes a fait l'objet d'une évaluation économique (Gilbert, 2008)réalisée conjointement par le bureau d'études EGIS-EAU et des chercheurs de l'UMR G-EAU, à la demande du MEDTL.

3.3.2. Classification des effets[21] liés aux inondations

- *Effets directs /indirects, instantanés / induits*

Différentes catégories d'effets des inondations sont à identifier pour entreprendre une évaluation. Notons ici que leur classification fait l'objet d'un certain nombre de discussions et peut entraîner certaines confusions sur les types de dommages considérés dans les analyses. La classification proposée vise à distinguer les effets selon les échelles spatiale (un enjeu particulier, les enjeux en zone inondable, les enjeux hors zone inondable) et temporelle (effets à court, moyen et long termes).

Tout d'abord, une distinction spatiale peut être faite : les ***effets directs sont les modifications attendues sur les enjeux exposés à l'inondation*** et les ***effets indirects concernent les enjeux non exposés à l'inondation***.

Ensuite, une seconde distinction, d'ordre temporel, peut être établie. Le Flood Hazard Research Center propose ainsi, de distinguer les dommages des pertes. Plutôt que le terme perte, nous utilisons par la suite la terminologie « effet induit » proposée par Bauduceau (2004b) pour les exploitations agricoles. Cela permet de préciser avec une perspective temporelle les effets se propageant dans le temps sur un système particulier et à l'extérieur de celui-ci.

[21] Bien que le terme dommage soit couramment utilisé, nous préférons utiliser dans cette section décrivant les conséquences des inondations sur les enjeux, le terme effet qui est plus neutre et permet potentiellement d'englober les effets positifs et négatifs.

Les ***effets instantanés résultent du contact physique direct entre l'eau d'inondation et les biens vulnérables***. Comme ces effets sont généralement traités par type d'enjeu, les effets instantanés directs sont souvent appelés effets directs. L'ampleur de ce dommage peut être quantifiée par le coût de restauration du système à son état initial ou la perte de valeur ajoutée si la restauration est impossible.

Les effets induits sont caractérisés comme la modification de l'activité d'un système économique résultant des effets directs de l'inondation sur ses dotations en capitaux.

Les ***effets indirects résultent des ruptures dues aux effets directs et induits sur le réseau économique et social***. Ils concernent les filières amont et aval des activités économiques.

Dans la suite du texte, comme nous centrons notre propos sur un type d'enjeux, les exploitations agricoles, les effets directs instantanés sont appelés effets directs et les effets directs induits, effets induits. La modélisation envisage également les relations socio-économiques avec les filières amont et aval et donc les effets indirects et secondaires sans les analyser précisément.

- *Effets tangibles et intangibles*

Une autre distinction est ensuite généralement établie entre effets tangibles et intangibles. À la différence des effets tangibles, les ***effets intangibles*** sont considérés comme ***non mesurables et donc non exprimables dans une unité, notamment monétaire, permettant de les classer et de les comparer***. La perte de vies humaines fait l'objet de nombreuses discussions concernant sa qualité tangible ou intangible.

Sont classiquement considérées comme des effets intangibles les catégories suivantes : les pertes de biens privés irremplaçables ou culturel, le stress et l'anxiété provoquée à moyen et long terme, les ruptures sociales, la perte de confiance en l'Etat…

Le tableau 4 propose une typologie des catégories d'effets présentées ci-avant illustrée de quelques exemples à vocation non exhaustive.

Tableau 4 : Proposition d'une typologie des effets des inondations

Espace \ Temps	Instantanés		Induits	
	Tangibles	**Intangibles**	**Tangibles**	**Intangibles**
Directs (Effets sur un système considéré)	Endommagement ou destruction physique de tous les biens (habitat, équipements, récoltes, stocks…) Perte de vies humaines Pertes de bétail Routes et infrastructures de communication Coûts des secours	Destruction de biens privés irremplaçables (souvenirs, patrimoine) Mort des animaux de compagnie Pertes de biens culturels et historiques Pertes environnementales	Perte de valeur ajoutée en raison de l'endommagement des facteurs de production Évacuation et relogement des habitants Déplacement et relogement du bétail Coûts de nettoyage	Effets psychologiques Problèmes de santé Diminution de la confiance envers les autorités publiques Perte de services environnementaux et récréatifs
Indirects (Effets sur les autres enjeux non inondés)	Augmentation des temps de transport liés à l'endommagement des infrastructures Délais ou arrêts des flux d'approvisionnements (matière première, matériel..) en provenance de la zone d'inondation	Pertes de biens culturels et historiques Pertes environnementales	Interruption d'activité dans la zone d'inondation liée à la perturbation d'activité des systèmes endommagés Interruption d'activité dans la zone d'inondation liée à la rupture des réseaux Interruption d'activité liée à la perte de biens culturels, patrimoniaux, historiques	Perte de services environnementaux et récréatifs Diminution de la confiance envers les autorités publiques

3.3.3. Mise en œuvre d'une ACB pour l'évaluation d'un projet de gestion des inondations[22]

Dans le contexte de la gestion des inondations, la méthode d'évaluation des bénéfices la plus répandue est celle des dommages évités (Shabman et al., 1996). A la démarche générale de mise en œuvre d'une ACB présentée à la section 3.2.3 (p 75), la problématique de la gestion des inondations rend nécessaire la prise en compte des dimensions hydrologique et socio-économique (Brouwer et al., 2008).

- *Dommage Moyen Annuel et Dommage Évité Moyen Annuel*

Comme l'indique le MultiColoured Manual (Penning-Roswell et al., 2005, p38), la méthode des dommages évités utilisée pour l'évaluation des projets de gestion des inondations, fait globalement consensus. Il s'agit d'une combinaison de deux évaluations :

1. l'évaluation de la diminution (augmentation) du risque mesurée en termes de probabilité d'occurrence de ***scénarios***[23] d'inondation évités
2. l'évaluation de la vulnérabilité des enjeux mesurée en termes de dommages causés par ces scénarios et évités (additionnés) résultant du projet.

Elle repose sur deux concepts clés déterminés sur la base de cette analyse croisée entre l'hydrologie et la vulnérabilité : le Dommage Moyen Annuel (DMA) et le Dommage Évité Moyen Annuel (DEMA). Erdlenbruch et al. (2008a) proposent une définition précise de ces concepts.

Le ***DMA*** se définit comme la ***somme des dommages associés aux différents scénarios d'inondation pondérés par la probabilité d'occurrence de ces scénarios***. Le DMA correspond ainsi à la valeur des dommages attendue chaque année.

Il peut être exprimé selon l'équation suivante, où D(T) est le dommage calculé pour l'évènement de période de retour T et Td correspond à la période de retour de la crue débordante :

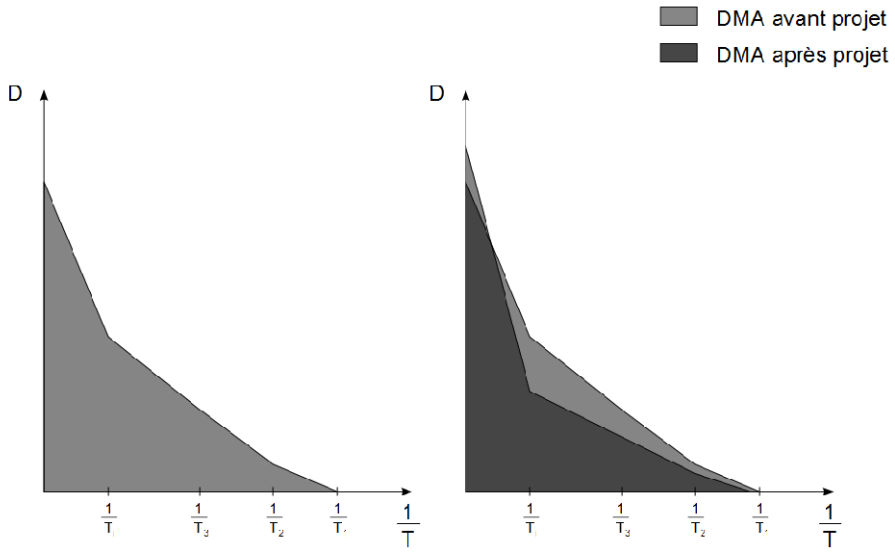
$$DMA = \int_{T=Td}^{T=\infty} D(T)p(T)dT$$

Le ***DEMA*** se définit ensuite comme ***la différence entre le DMA sans projet*** (aire en gris clair sur la figure 27) ***et le DMA avec projet*** (aire en gris foncé sur la figure 27). Dans cette démarche, si des

[22] Pour une description détaillée de la démarche de réalisation d'une ACB utilisant la méthode des dommages évités voir l'article d'Erdlenbruch et al (2008a).

[23] ***Un scénario correspond à une combinaison particulière des paramètres de l'aléa (hauteur, vitesse, durée, période d'occurrence) pouvant être associée à une probabilité d'occurrence***.

dommages supplémentaires sont attendus sur certains enjeux ou en raison d'effets sur l'urbanisation après aménagement, ils sont intégrés dans le calcul du DEMA.



Source : d'après (Erdlenbruch et al., 2008a)

Figure 27 : Illustration des calculs des Dommages Moyens Annuels et Dommages Évités Moyens Annuels

- *Calcul de la VAN*

La VAN est un indicateur permettant de comparer dans la même unité, monétaire, les coûts et bénéfices d'un projet. Les coûts sont ici entendus comme les coûts d'investissement et d'entretien du projet, les bénéfices mesurés par les DEMA incluent les dommages effectivement évités mais aussi les dommages supplémentaires.

La VAN est exprimée de la façon suivante, où C_0 est le coût initial du projet, B_i correspondent aux bénéfices attendus du projet sur la période, n est la durée de vie considérée du projet et r_i est le taux d'actualisation :

$$VAN = -C_0 + \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\prod_i^n (1 + r_i)} (B_i - C_i)$$

source : d'après (Erdlenbruch et al., 2008a)

- *Étapes de la réalisation d'une ACB (Erdlenbruch et al., 2008a)*

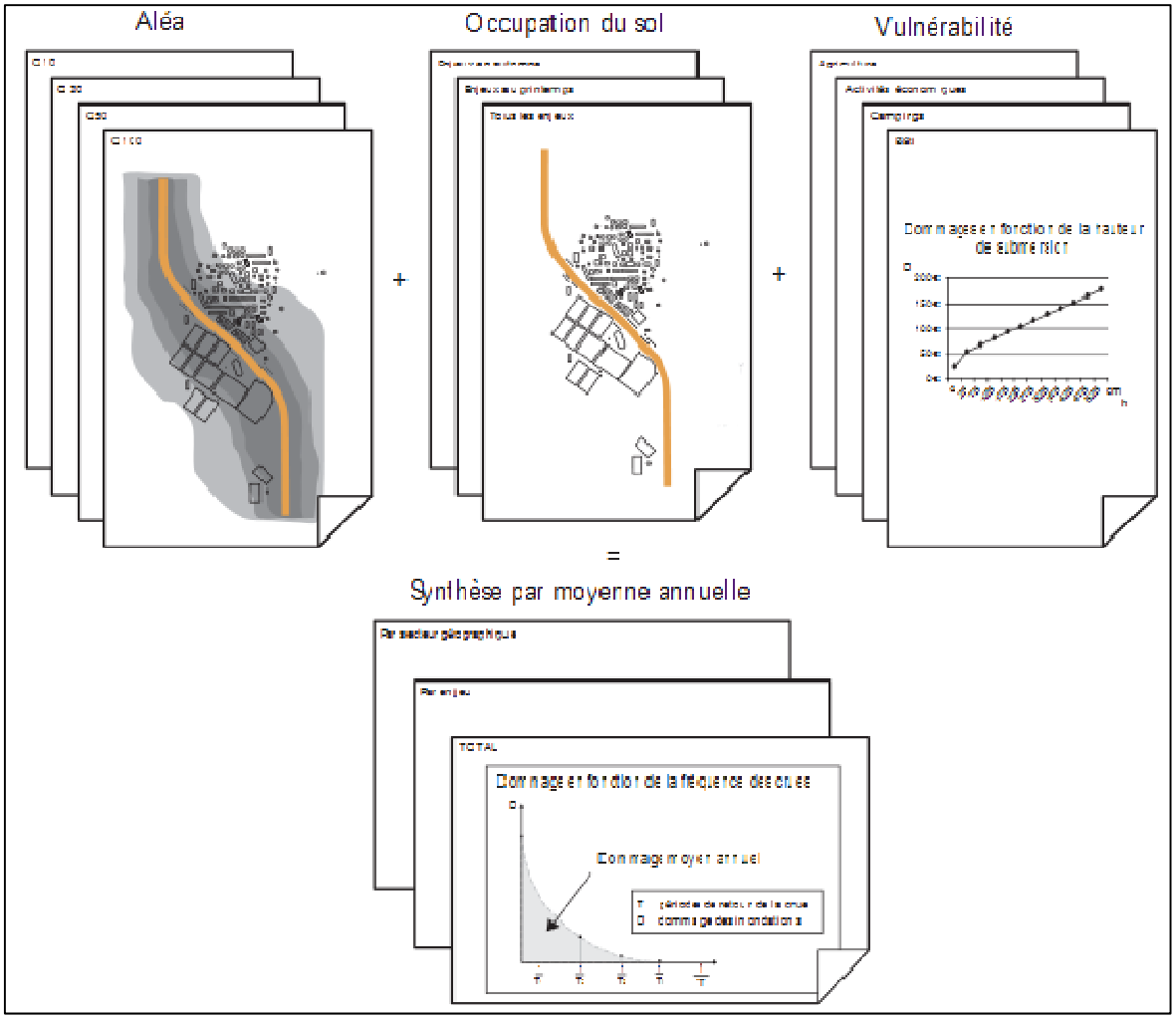
En pratique, la réalisation d'une ACB d'un projet de gestion des inondations requiert l'utilisation de données spatialisées concernant l'aléa, l'occupation du sol et la vulnérabilité.

Concernant l'aléa, il est nécessaire de connaitre les zones d'expansion de crue correspond à plusieurs (au moins 3) évènements d'inondation (crue débordante, crue cinquentenale, crue centenale).

Ces différents scénarios sont superposés avec une carte d'occupation des sols contenant des informations sur la typologie des enjeux, leur surface et leur localisation.

La vulnérabilité des enjeux est ensuite représentée sous la forme de ***courbes de dommages permettant, pour chaque type d'enjeu, d'exprimer le montant de dommage monétaire correspondant à une intensité d'aléa***.

Dans le cadre de notre modélisation, il s'agit d'améliorer l'évaluation des dommages sur un type d'enjeu particulier : les zones agricoles. Pour la réalisation d'une ACB globale, si le projet de gestion des inondations à évaluer a des effets sur d'autres enjeux du territoire, il s'agira d'utiliser les fonctions de dommages existantes pour ces autres enjeux.



Source : Erdlenbruch et al. (2008a)

Figure 28 : Étapes pour la réalisation d'une ACB appliqué aux projets de gestion des inondations

Pour chaque type d'enjeu, les DMA peuvent ensuite être calculés avec et sans projet de gestion d'inondation. Ces DMA sont ensuite sommés pour l'ensemble des enjeux et les DEMA peuvent alors être déterminés. Enfin, la VAN est calculée en tenant compte de l'actualisation.

3.3.4. Effets des alertes sur les dommages évités

LE FHRC s'est interrogé sur les effets des alertes sur les dommages évités et a réalisé de nombreuses enquêtes (1200) pour déterminer les facteurs de réduction du dommage en cas d'alerte. Colin Green propose l'équation suivante pour les exprimer :

$$FDA = PFA * R * PRA * PHR * PHE$$

Où :

- FDA représente le dommage évité réel (Actual Flood Damage Avoided),
- PFA représente le dommage potentiellement évité par évacuation (Potential Flood Damage Avoided), c'est-à-dire les biens physiques mobiles,
- R représente la fiabilité de la procédure d'alerte mesurée par la proportion de la population exposée alertée avec un temps suffisant pour mettre en œuvre l'action,
- PRA est la proportion de personnes disponibles pour répondre à l'alerte (Proportion of Residents Available),
- PHR est la proportion de personnes capables de répondre à l'alerte (Proportion of Households able to Response),
- PHE est la proportion de personnes répondant effectivement (Proportion of Households Effective).

En 1997, au démarrage de cette recherche, l'hypothèse était que le coefficient correspondant à la réponse aux alertes (PRA*PHR*PHE) était de l'ordre de 70%. Cependant, la poursuite de ces recherches laisse penser que ce coefficient est plus proche de 30% que de 70%. Cependant, il convient de ne pas négliger le potentiel de réduction des dommages de l'alerte qui ne peut être effectif que si la chaine complète comprenant la prévision, l'alerte et la réponse fonctionne.

3.3.5. Discussions sur l'utilisation de la méthode des dommages évités

Conceptuellement, la méthode des dommages évités doit permettre de prendre en compte tous les effets spatiaux et temporels liés à la modification des scénarios d'inondation sur un territoire.

Ces effets incluent normalement les dommages évités liés :

- aux réparations d'enjeux endommagés,
- au remplacement des enjeux détruits ou à la perte de valeur ajoutée,
- aux pertes de valeur ajoutée liée aux ruptures d'activité hors transferts,
- aux dommages intangibles bien que plus difficiles à prendre en compte.

Deux questions importantes concernant l'utilisation de la méthode des dommages évités pour l'évaluation des projets de gestion des inondations nous paraissent importantes à discuter :

1. L'hypothèse de stabilité sous-jacente à cette méthode

2. La difficulté dans les pratiques actuelles d'identifier les hypothèses et choix de modélisation implicites.

- *Hypothèse de stabilité dans l'ACB et théorie des capitaux élargie*

La méthode des dommages évités s'appuie sur l'hypothèse que les enjeux sont résilients au sens réduit du terme[24] c'est-à-dire qu'ils retrouvent leur état initial après la perturbation permettant d'estimer le dommage par le coût du retour à l'état initial.

Alors que l'économie du bien être, dans laquelle s'inscrit l'ACB, ne considère que les formes classiques de capitaux, la théorie des capitaux multiples (cf. chapitre 1) propose que les systèmes économiques mobilisent des capitaux physiques mais aussi humain, social, financier, institutionnel et naturel dans le processus de production.

Suite à une perturbation, pour revenir à son « état initial », un système économique peut alors substituer certaines formes de capitaux à d'autres. Par exemple, le capital physique (matériel, intrants…) faisant défaut en raison d'un endommagement peut être momentanément substitué en utilisant du capital financier pour payer une prestation ou en mobilisant du capital social (prêt de matériel).

Nous constatons donc ici qu'en utilisant le cadre des capitaux élargis, même si le système revient, après une perturbation, à son niveau initial en termes de capitaux physique et humain, des transferts se sont produits au niveau des capitaux financier et/ou social.

Notre objectif est de développer un modèle permettant d'évaluer les dommages sur les exploitations agricoles utilisable dans le cadre de l'ACB et compatible avec la méthode des dommages évités. Cependant, nous souhaitons également qu'il soit compatible avec la théorie des capitaux élargis en introduisant les concepts de capital social et financier. Si l'enjeu de notre travail n'est pas ici de tester l'hypothèse de résilience supposée dans l'ACB, il s'agit toutefois de permettre la production d'indicateurs (consommation de capital social et financier) qui pourraient permettre, par la suite, de déterminer dans quelle mesure et à quelle condition l'hypothèse d'une résilience, au sens d'un retour à un état identique à l'état initial, est vérifiée.

- *Explicitation des effets considérés*

Des usages différents de l'ACB peuvent être envisagés. Ainsi, elle peut être utilisée comme une règle de décision stricte excluant tout projet ne répondant pas au critère de la VAN. Cette approche

[24] Ce sens correspond pour rappel au concept de stabilité.

est largement contestée et l'utilité principale de l'ACB est, selon nous, de permettre une discussion autour des effets de la mise en place d'un projet. Cependant, l'utilisation de plus en plus courante de cette méthode, entraîne certaines dérives. En particulier, les fonctions de dommage qui sont utilisées dans les évaluations sont souvent des boites noires qu'il est parfois impossible de décortiquer pour retrouver les hypothèses de modélisation concernant les effets considérés, les hypothèses de quantification et de valorisation monétaire[25]. Dans la modélisation proposée, notre effort principal a donc été de rendre explicite les différentes hypothèses de modélisation considérées pour évaluer les dommages sur les exploitations agricoles.

3.3.6. Difficultés méthodologiques pour l'application de l'ACB aux nouvelles politiques de gestion des inondations

Nous avons vu en introduction que l'évolution des politiques de gestion des inondations posait des difficultés pour l'évaluation économique. Ces difficultés se situent à deux niveaux :

- Premièrement, la restauration des ZEC et la création de rétention soulèvent des questions d'équité et de répartition des bénéfices attendus qui rendent nécessaire la réflexion sur les compensations qui reposent sur l'évaluation des sur-dommages causés aux exploitations agricoles.
- Deuxièmement, les nouvelles politiques comme la création de zone de rétention et surtout la réduction de la vulnérabilité ciblent en particulier les enjeux agricoles et ont des effets complexes qu'il faut être en mesure d'évaluer pour l'évaluation économique.

  - *Questions d'équité et de compensation : nécessité d'élaborer une méthode explicite d'évaluation des dommages*

En termes théoriques, les questions de compensation sont au cœur du débat pour l'application de l'ACB. En effet, l'ACB repose sur un critère d'efficience qui représente une amélioration de l'équilibre de Pareto. Ainsi, si le projet permet d'apporter une amélioration du bien être de la société sans diminuer le bien être d'un individu, il est considéré comme permettant une amélioration de l'équilibre de Pareto. Lorsque plus aucune amélioration ne peut être apportée, il s'agit d'une situation Pareto optimale. La difficulté est qu'un projet est rarement réalisable sans qu'il y ait des perdants. Un perdant est défini comme un agent subissant des pertes liées à la réalisation d'un

[25] Notons que ce propos ne concerne par les travaux méthodologiques développés notamment par le FHRC qui témoignent d'un effort d'explicitation et de transférabilité.

projet sans recevoir de bénéfices (Brent, 2006, p39). C'est ainsi que la notion de test de compensation est introduite. Le critère de Kaldor Hicks repose sur une compensation potentielle qui permet de valider les actions où les bénéficiaires peuvent potentiellement (et pas véritablement) compenser les coûts auprès de ceux qui les supportent. Cependant, cette notion est souvent remise en question en raison du principe d'équité[26] (Farrow, 1998 ; Sen, 2000).

Sur le terrain, la loi sur les Risques de 2003, impose ces compensations pour tous les projets de création de zone de rétention et même si rien n'est prévu pour le cas des restauration de ZEC, la compensation est un levier majeur pour l'acceptabilité des projets (Brémond et al., 2007). Ces résultats sont issus d'une expertise menée pour la Direction Générale de la Prévention des Risques sur les pratiques de compensations mises en œuvre dans le cadre des PAPI. Elle met également en évidence que l'une des principales difficultés des acteurs souhaitant mettre en place ces compensations reste l'évaluation des dommages causés par la mise en place du projet.

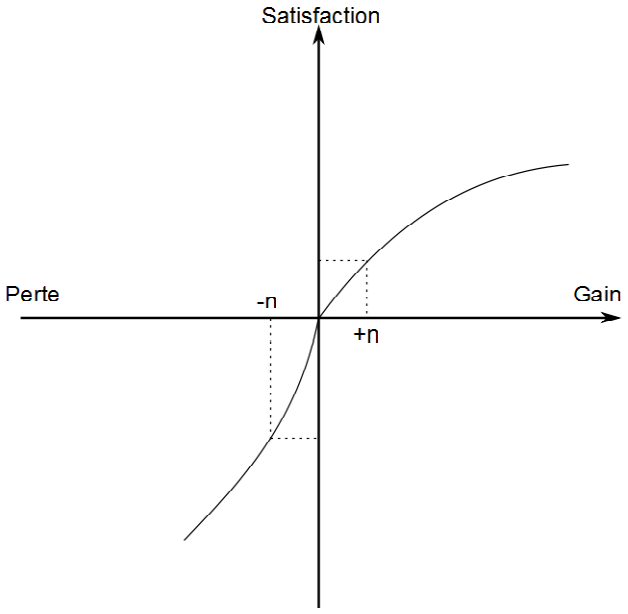
- *Dissymétrie de fonctions d'utilité par rapport aux pertes et aux gains*

Kahneman et Tversky (1979) ont introduit une nouvelle approche des questions d'utilité en situation risquée dans le champ de l'économie comportementale avec la « prospect theory » (théorie des perspectives) qui les amène à définir une fonction de valeur différente de la fonction d'utilité classiquement utilisée. Cette fonction de valeur a trois caractéristiques principales (figure 29) :

1. elle est définie en termes de variation par rapport à un état de référence ;
2. elle est généralement concave pour les gains et convexe pour les pertes ;
3. elle a une pente plus importante pour les pertes que pour les gains.

Le point qui nous intéresse plus particulièrement concerne la dissymétrie entre l'utilité procurée par les pertes et les gains. En effet, les auteurs montrent que la perte d'utilité ressentie par une modification de la situation de référence peut être deux fois plus importante que le gain d'utilité ressenti par une même modification positive. Ce point est développé dans l'article de Tversky et Kahneman (1991) qui soulignent notamment les implications que cette dissymétrie peut avoir sur la bonne conduite des négociations.

[26] Pour plus de détail sur ces questions, Farrow (1998) présente une analyse des problématiques d'équité soulevées par l'ACB appliquée aux questions environnementales. Il propose notamment la mise en place de tests complémentaires au critère de Kaldor Hicks, basés sur la compensation véritable entre des sous groupes de population identifiés.



D'après (Kahneman et al., 1979)

Figure 29 : Fonction de valeur de la « prospect theory »

Ce phénomène est important pour la mise en œuvre des politiques de gestion des inondations par restauration de zone d'expansion de crue ou de sur-inondation. Dans le cadre de l'Analyse Coût-Bénéfice, ces travaux pourraient amener à accorder un poids plus important aux dommages générés par la mise en place d'un projet. Ce point est particulièrement important pour les projets de création ou de restauration de Zone d'Expansion de Crue qui génèrent des dommages supplémentaires sur certaines zones, en particulier agricoles pour protéger des zones urbaines.

Pour conclure, en théorie comme en pratique, la question de la compensation et les poids accordés aux gains et aux pertes pourraient jouer un rôle primordial dans l'acceptabilité et l'évaluation des projets. Dans tous les cas, que ce soit pour la compensation ou la pondération, une évaluation précise des dommages causés par le projet est nécessaire. En effet, dans le processus de négociation, la difficulté réside principalement dans la possibilité de se baser sur une méthode d'évaluation des dommages faisant consensus et qui précise de façon explicite les types d'effets envisagés.

- *Réduction de la vulnérabilité : complexité des effets et nécessité d'entrer dans la compréhension de la vulnérabilité*

L'évaluation des mesures de réduction de la vulnérabilité aux inondations reste très peu développée. Quelques tentatives sont à noter comme par exemple, l'évaluation de mesures de réduction de la vulnérabilité des habitations (imperméabilisation de cave, sécurisation des cuves de fioul) par Kreibich et Schwarze(2011). Leurs conclusions sont que les mesures peu coûteuses sont rentables lorsque l'habitation est fréquemment inondée, ce qui ne devrait logiquement pas se

produire lorsque l'urbanisation est correctement réglementée. Pour les zones agricoles, la situation est différente. En effet, il peut être acceptable que ces zones soient inondées et les mesures de réduction de la vulnérabilité permettent alors de maintenir les activités sur ces zones en limitant les dommages occasionnés. Les effets des mesures de réduction de la vulnérabilité sur les activités économiques sont plus complexes que sur l'habitat domestique. En effet, la majorité des mesures de réduction de la vulnérabilité visent à diminuer les dommages physiques directs sur les bâtiments, les parcelles et leur contenant mais aussi, à améliorer l'organisation des activités pendant et après l'inondation.

Classiquement les méthodes d'évaluation économique des dommages liés aux inondations par la méthode des dommages évités, utilisent des fonctions d'endommagement par catégorie d'enjeu qui caractérisent la vulnérabilité de l'enjeu considéré. Généralement, les courbes d'endommagement permettent d'exprimer un montant de dommage en fonction de la hauteur d'eau d'inondation. La hauteur d'eau est déterminée à partir d'un modèle hydraulique. La répartition de cette information sur l'aléa est spatialisée. Par ailleurs, l'information sur la typologie des enjeux est également spatialisée. Le croisement de la couche d'information sur les enjeux et l'aléa permet d'associer une hauteur d'eau en chaque point d'un enjeu et donc de calculer en utilisant la fonction d'endommagement caractéristique, le dommage résultant.

Pour les projets de modification de l'aléa, l'évaluation des bénéfices par la méthode des dommages évités prévoit de comparer les dommages résultant sur le territoire avant et après la mise en place du projet dont l'effet principal considéré est une diminution de la hauteur d'eau. Comme le montre la figure 30, le calcul des dommages évités utilise dans ce cas pour un enjeu la même fonction d'endommagement et consiste simplement à calculer le différentiel, généralement positif, entre la situation avant et après projet.

Une première question qui se pose, lorsqu'il est nécessaire d'évaluer de manière précise et explicite les dommages comme c'est le cas pour la création ou la restauration de zone de rétention, est de savoir quelles sont les hypothèses de construction des fonctions d'endommagement, c'est-à-dire les effets pris en compte, les méthodes utilisées pour l'estimation et l'évaluation. Ce premier problème est lié à une construction abstruse, « boîte noire », des fonctions d'endommagement.

La deuxième question qui se pose pour l'évaluation économique des projets de réduction de la vulnérabilité est de déterminer comment les mesures de réduction de la vulnérabilité modifient effectivement la fonction d'endommagement des enjeux comme l'illustre la figure 31.

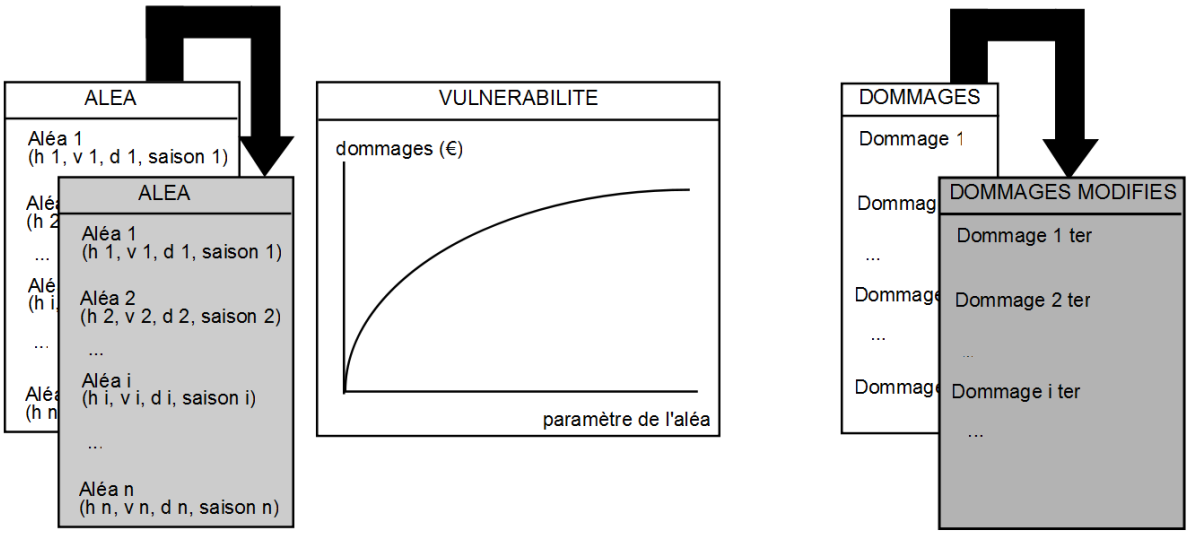


Figure 30 : Calcul des dommages évités par la mise en place d'un projet de modification de l'aléa

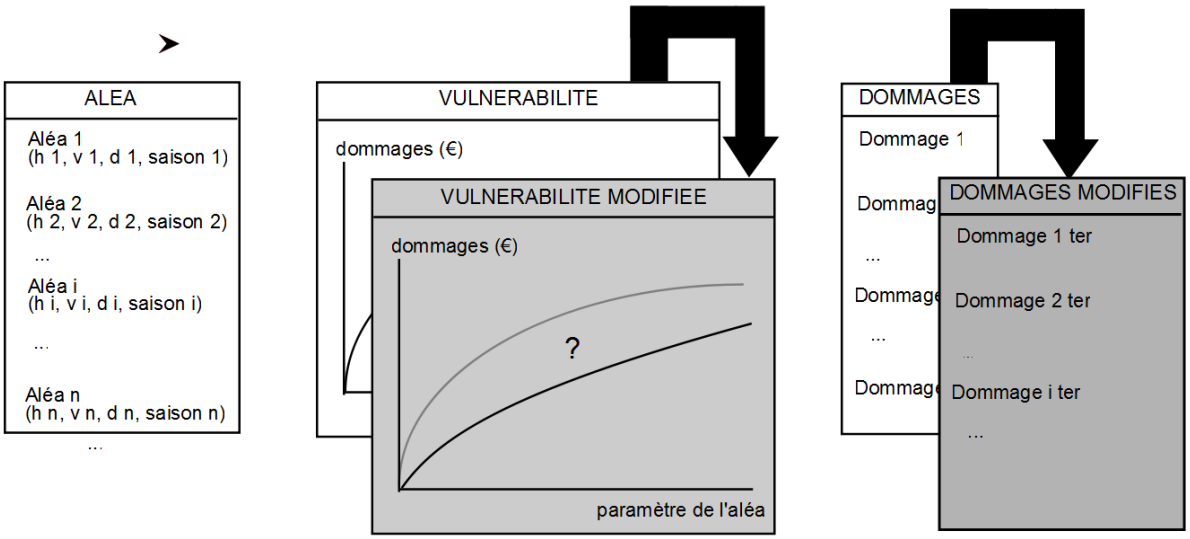


Figure 31 : Difficultés pour l'évaluation des dommages évités d'un projet de réduction de la vulnérabilité d'un enjeu

3.3.7. Conclusions

Nous avons montré dans la section 3.3.6 que les projets de restauration et de création de zones de rétention ainsi que les projets de réduction de la vulnérabilité des activités économiques, en particulier agricoles, sont susceptibles de poser des difficultés pour l'évaluation économique et réclament une évaluation des dommages précise et explicite. La section suivante propose donc une revue des méthodes existantes pour évaluer les dommages sur le secteur agricole afin d'identifier si elles permettent ou non d'évaluer les projets actuellement développés.

3.4 Les pratiques existantes de modélisation des dommages agricoles

Dans cette section, une revue des méthodes d'évaluation des dommages sur le secteur agricole ayant pu être recensées est présentée.

3.4.1. Aperçu général

Nous avons pu recenser 24 études portant de façon plus ou moins spécifique sur les dommages au secteur agricole. En Europe, la majorité des études a été réalisée après 2000 alors qu'aux USA la plupart ont été réalisées avant 2000. Cette tendance peut être analysée selon deux perspectives. D'une part, l'intérêt pour l'évaluation économique des projets est beaucoup plus récent en Europe qu'aux Etats-Unis où cette pratique est obligatoire depuis 1936. Ainsi, l'évaluation des dommages agricoles comme celle des autres secteurs fait l'objet de recherche de manière plus récente en Europe. Le deuxième élément d'explication porte sur les politiques de gestion des inondations. En Europe, les politiques de restauration de zone d'expansion de crue et de création de zone de rétention sont mises en place depuis peu et concernent tout particulièrement les zones agricoles. Cependant, bien que certains travaux mentionnent ce questionnement (Forster et al., 2008), le manque de travaux sur l'évaluation des dommages agricoles est fréquemment souligné.

Les études recensées avaient globalement deux objectifs non exclusifs l'un de l'autre :

- proposer une méthodologie d'évaluation des dommages agricoles appliquée ou non sur une zone ;
- évaluer un projet en calculant les bénéfices du projet par la méthode des dommages évités.

Une méthode tient une place particulière, il s'agit de la méthode Inondabilité. Cette méthode a été abordée dans le chapitre 1 (sous section 1.8.1, p 42). Si elle permet d'établir des seuils de niveau d'acceptabilité de l'inondation par type de secteur, elle ne permet pas de quantification monétaire du niveau de dommage. Cette méthode n'a donc pas été intégrée dans l'analyse comparative qui va suivre.

Afin de comparer les différentes méthodes d'évaluation des dommages agricoles, nous avons distingué plusieurs critères :

- les paramètres de l'aléa pris en compte,
- les catégories de dommages considérées sur la zone agricole,
- les indicateurs de dommages utilisés pour chacune des composantes.

Les critères de comparaison sont parfois liés. En effet, suivant les catégories de dommages considérées certains paramètres de l'aléa sont plus importants à considérer que d'autres. Ainsi, pour le calcul des dommages aux cultures, la saisonnalité est importante alors qu'elle a peu d'influence sur les dommages aux bâtiments ou au matériel.

3.4.2. Paramètres de l'aléa pris en compte pour l'estimation des dommages

Sur les 24 études recensées, 20 prennent en compte la saisonnalité de l'aléa. Cette saisonnalité est considérée en ajustant un niveau d'endommagement différent en fonction des périodes de l'année. Les méthodes peuvent considérer des périodes mensuelles ou des périodes définies en fonction du type de culture considéré. Contrairement à la plupart des autres enjeux du territoire, la saisonnalité est un paramètre déterminant car les dommages aux cultures, par exemple, varient de manière considérable en fonction de la saison.

La majorité (17) de ces études prend également en compte la hauteur d'eau pour déterminer les dommages agricoles. Le paramètre hauteur d'eau est le plus facile à obtenir dans les études hydrauliques et il est le plus fréquemment utilisé pour le calcul des dommages sur d'autres enjeux comme l'habitat domestique. De nombreuses méthodes (14) prennent également en compte la durée de submersion.

Très peu de méthodes prennent en compte la vitesse d'écoulement pour déterminer le niveau de dommages. La prise en compte de ce paramètre est surtout importante pour les crues de type torrentiel car dans ce cas, la majorité des dommages provient de l'arrachement des plantations et de l'érosion des sols. Nous avons recensé 4 études prenant en compte ce paramètre.

Enfin, les paramètres de dépôt par transport solide et de pollution des sols ne sont pris en compte dans aucune des études que nous avons recensées.

Le tableau 5 récapitule l'ensemble des combinaisons de paramètres pris en compte pour le calcul des dommages sur les zones agricoles dans les méthodes existantes recensées. Nous pouvons constater que seulement 2 études prennent 4 paramètres d'aléa en considération.

Tableau 5 : Paramètres de l'aléa considérés dans les études d'évaluation des dommages agricoles

Saison	Hauteur	Durée	Vitesse	Nombre d'études
Non	oui	non	non	2
		oui	non	2
Oui	non	non	non	1
		oui	non	6
	oui	non	non	5
			oui	2
		oui	non	4
			oui	2

3.4.3. Catégories de dommages considérées

- *Les dommages directs*[27]

Nous avons défini cinq catégories de dommages directs pouvant être prises en compte dans les méthodes d'évaluation de dommages agricoles. Il s'agit des dommages aux cultures, aux bâtiments, au matériel et aux stocks, ainsi que les dommages aux sols.

Le tableau 6 propose une analyse des différentes catégories de dommages considérées dans les études d'évaluation des dommages agricoles recensées.

Si toutes les méthodes prennent en compte de manière plus ou moins fine les dommages aux cultures, peu de méthodes tiennent compte des autres catégories de dommages directs.

Huit seulement prennent en compte les dommages aux bâtiments agricoles (hangars et serres). Les évaluations des dommages au bâti, au matériel et stock peuvent être liées puisque ces éléments sont parfois considérés comme contenus dans les bâtiments agricoles et dans ce cas l'évaluation se fait globalement sur les bâtiments. Cependant, la majorité des études prenant en compte les dommages aux hangars agricoles utilisent les mêmes fonctions de dommages que pour l'habitat classique. Seulement deux études évoquent les dommages aux sols dus à l'inondation en termes de nécessité de nettoyage et de fumure induite par l'inondation et une seule de ces deux études propose une évaluation quantitative et monétaire de ce dommage (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010).

Certaines études proposent une évaluation d'autres catégories de dommages. En particulier, deux études réalisées en France (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010 ; SIEE et al., 2003) proposent une évaluation des dommages sur les plantations (vergers ou vignoble). L'une de ces deux études (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010) propose également de prendre en compte les pertes de récolte induites par la replantation du verger ou du vignoble.

Deux études proposent également d'intégrer dans l'évaluation des dommages aux zones agricoles, les dommages aux infrastructures telles que les routes.

[27] Ces dommages correspondent à la catégorie des effets instantanés directs.

Tableau 6 : Méthodes d'évaluation des dommages agricoles recensées et analysées

					Paramètres de l'aléa						Catégories de dommages considérées					
Auteur	**Année**	**Pays**	**Bassin Versant**	**Objectif**	**Saison**	**Hauteur**	**Durée**	**Vitesse**	**Dépôts**	**Pollution**	**Cultures**	**Bâtiments**	**Matériel**	**Sol**	**Stock**	**Autres**
Blanc	2007	France	Touloubre	évaluation projet	Oui	oui	non	non	non	non	oui	oui	non	non	non	non
Bureau of Transport Economics (BTE)	2001	Australie		méthodologie pour le calcul dommages	Oui	non	oui	non	non	non	oui	oui	non	non	non	non
Chambre d'Agriculture du Gard	2010	France	Fourques/ Beaucaire	Calcul de dommages potentiels et évaluation projet	oui	oui	oui	oui	non	non	oui	non	oui	oui	oui	matériel végétal, perte de récolte future, stocks
Consuegra	1992	Suisse	Broye	calcul de dommages potentiels	oui	non	oui	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
Deleuze, Forte, Nuti et Piero	1991	France		méthodologie pour le calcul dommages	oui	oui	oui	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
Devaux-Ros (Plan Loire Grandeur Nature)	2000	France	Loire Moyenne	calcul de dommages potentiels	oui	oui	non	oui	non	non	oui	oui	oui	non	non	matériel végétal et pertes de récolte induite
Dunderdale	1997	Angleterre	River Wensum	évaluation projet	oui	oui	oui	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
Dutta et al.	2003	Japon	Ichinomiya	calcul de dommages potentiels	oui	oui	oui	non	non	non	oui	oui	oui	non	non	non
Erdlenbruch et al..	2007	France	Orb	évaluation projet	oui	oui	non	non	non	non	oui	oui	non	non	non	non
Forster	2008	Allemagne	Elbe	évaluation projet	oui	non	oui	non	non	non	oui	non	non	non	non	infrastructures
Goulter et Morgan	1983	Canada	Wilson Creek, Manitoba	évaluation projet	non	oui	oui	non	non	non	oui	non	non	non	non	non

Hess et Morris	1988	Angleterre	Sud-Est	évaluation projet	oui	oui	oui	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
Hoes et Schuurmans	2005	Pays-Bas	Wasteramstel	évaluation projet	non	oui	non	non	non	non	oui	oui	non	non	non	routes
Jonkman	2008	Pays-Bas	Souh Holland	calcul de dommages potentiels	non	oui	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
Lacewell	2006	USA	Willacy County, Texas	évaluation projet	oui	oui	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	coûts de production additionnels
Lacewell et Eidman	1972	USA	Nuyaka Creek floodplain	évaluation projet	oui	oui	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
McDonald	1970	USA	Gladstone - Kinchela	méthodologie pour le calcul dommages	oui	oui	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
Minsitry of Construction	2005	Japon		méthodologie pour le calcul dommages	non	oui	oui	non	oui	non	oui	non	non	non	non	non
Multi Coloured Handbook	2005	Angleterre		méthodologie pour le calcul dommages	oui	non	oui	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
Neubert and Thiel	2004	Allemagne		calcul de dommages potentiels	oui	non	oui	non	non	non	oui	oui	oui	oui	non	évacuation, stocks, expertise
Salamin	1948	Hongrie		seuil de dommages	oui	non	oui	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
Satrapa (in Meyer et al., 2005)	2005	République Tchèque		méthodologie pour le calcul dommages	oui	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
SIEE (méthode EGR)	2003	France	Rhône	calcul de dommages potentiels	oui	oui	non	oui	non	non	oui	oui	oui	non	non	matériel végétal
USACE (AGDAM)	1985	USA		méthodologie pour le calcul dommages	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	non	non	non	non

- *Les dommages induits*

La prise en compte de dommages induits par l'inondation sur le fonctionnement de l'exploitation est très rarement prise en compte. Cependant, Lacewell qui avait développé une méthode d'évaluation des dommages agricoles dans les années 1970 uniquement basée sur la perte de récolte, a proposé en 2006 un réajustement de la méthode intégrant les augmentations de coût de production induits pour les exploitants en réalisant des enquêtes (Lacewell et al., 2006).

Par ailleurs, certains dommages induits et spécifiques aux exploitations d'élevage sont traités par Morris et al. (Morris et al., 1988) en termes de coûts d'alimentation supplémentaire et de relogement du bétail en raison de l'endommagement des prairies et des bâtiments.

3.4.4. Indicateurs de dommages considérés

Généralement, les méthodes d'évaluation des dommages reposent sur deux étapes :

- l'estimation de l'endommagement qui permet d'estimer les pertes de rendement et de construire les fonctions ou matrices d'endommagement ; la notion de matrice d'endommagement faisant référence au fait que plus de deux paramètres de l'aléa sont utilisés pour sa construction.
- l'attribution d'une valeur monétaire aux dommages, qui permet de construire les fonctions ou matrices de dommages.

Nous allons détailler pour chaque catégorie de dommage considérée les indicateurs qui sont utilisés pour estimer et évaluer les dommages.

- *Indicateurs de dommages aux cultures*

Pour déterminer l'endommagement, le plus généralement un pourcentage de perte de production est déterminé en fonction des niveaux de l'aléa. Certaines études que nous avons recensées (Salamin, 1948) s'arrêtent à ce niveau d'analyse et n'ont pour objectif que de déterminer un pourcentage physique d'endommagement de la culture en fonction des paramètres de l'inondation. Ensuite, cette perte de rendement peut être monétarisée en affectant au pourcentage d'endommagement, un rendement et un prix de vente, en fonction des types de culture considérés. Ensuite, plusieurs indicateurs monétaires de dommages sur les productions agricoles peuvent être définis suivant la manière dont les charges de production sont prises en compte. S'il est considéré que le dommage correspond à la perte de production et que toutes les charges de production restent les mêmes, alors, l'indicateur de dommage utilisé correspond simplement à la perte de rendement multipliée par le prix de vente appelé de façon abusive produit brut (PB). En effet, la notion de

produit brut inclut en théorie les revenus liés aux subventions. Or, pour l'évaluation économique, il faut s'assurer que les subventions ne sont pas prises en compte dans les dommages.

En fonction de la période à laquelle arrive l'inondation, certains auteurs proposent de soustraire certains coûts de production qui ne seront pas engagés si la culture est détruite (frais de récolte, frais de stockage). L'indicateur est alors associé à la marge brute[28] (MB) qui équivaut à considérer qu'aucune des charges de production variables i.e. spécifiques à la culture n'est engagée. S'il est considéré qu'aucune charge (variable et structurelle) n'est engagée, l'indicateur est alors la marge nette. Elle intègre encore la rémunération des employés et de l'exploitant. Enfin, le revenu net correspond à la marge nette de laquelle les salaires sont retranchés. Peu d'études (BTE, 2001 ; Lacewell et al., 1972 ; Lacewell et al., 2006) utilisent cet indicateur.

La plupart des méthodes utilisent un seul indicateur de dommages quelle que soit la saison d'occurrence de l'inondation. Dans la plupart des cas, cet indicateur est alors le produit brut qui est une approximation haute du dommage sur la culture (Blanc, 2007 ; Chambre d'Agriculture du Gard, 2010 ; Deleuze et al., 1991 ; Devaux-Ros, 2000 ; Dutta et al., 2003 ; Erdlenbruch et al., 2007 ; Forster et al., 2008 ; Goulter et al., 1983 ; Hoes et al., 2006 ; McDonald, 1970 ; Ministry of Construction, 2005). Les méthodes plus fines (Penning-Roswell et al., 2005 ; SIEE et al., 2003 ; USACE, 1985) proposent d'adapter l'indicateur de dommages en fonction de la période d'occurrence de l'inondation.

Morris et al. (Morris et al., 1988) proposent une approche originale de l'estimation des dommages en considérant l'exploitation agricole comme un système couplant la production de pâturage et l'élevage. Ainsi, le dommage à la culture pâturage n'est pas simplement considéré comme une perte de culture mais provoque un effet induit sur l'alimentation du bétail. Le dommage résultant de la perte de rendement de pâturage est estimé par un surcoût d'alimentation pour le bétail. Cette approche est particulièrement intéressante pour notre travail puisqu'elle met en évidence le lien qui peut exister entre les différentes composantes d'une exploitation agricole ; ici, les productions végétales et animales. Cependant, cette approche est restée limitée au système d'élevage et à ces deux composantes. Le tableau 7 récapitule de manière simplifiée les indicateurs de dommages utilisés pour les cultures et leur fréquence d'utilisation dans les études recensées.

[28] La même remarque que pour le produit brut est valable pour la marge brute qui ne doit pas inclure, pour le calcul des dommages, les subventions.

Tableau 7 : Types d'indicateurs économiques utilisés pour évaluer le dommage aux récoltes

Indicateur de dommage utilisé	Nombre d'études
Perte de rendement	2
Perte de marge brute (MB)	1
Perte de produit brut (PB)	11
PB ou MB	1
Perte de revenu	3
Evolutif (revenu net => PB)	2
Coût de remplacement (élevage)	1
Non précisé[29]	3
Total	24

La majorité des études prend en compte de manière plus ou moins simplifiée le type de culture. Cela implique que des matrices d'endommagement différentes sont utilisées pour les différentes cultures représentées sur la zone (tableau 8). Cependant, trois des études recensées ne donnent pas les matrices d'endommagement utilisées par type de culture d'où l'utilisation de la notation « non déterminé » dans le tableau 8. Par ailleurs, certains auteurs (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010 ; Consuegra, 1992) prennent également en compte le fait que la répartition des cultures sur une même parcelle évolue dans le temps (assolement). Le plus généralement une moyenne des produits bruts des différentes cultures de l'assolement sur la parcelle est utilisée.

Tableau 8 : Nombre d'études considérant différents types de culture pour l'évaluation des dommages aux récoltes

Type culture	Nombre d'études
Non	1
Oui	18
simplifié (2 types)	2
ND	3
Total	24

Enfin, l'analyse des fonctions ou matrices d'endommagement et de dommages proposées dans les études recensées montre que les types de culture les plus fréquemment étudiés sont les céréales et les légumes de plein champ. La plupart des études a été développée sur des terrains à des latitudes élevées et les matrices de dommages sur les cultures méditerranéennes sont plus rares.

[29] Dans trois des études recensées, le type d'indicateur utilisé n'est pas clairement précisé.

Tableau 9 : Nombre d'études utilisant des fonctions d'endommagement spécifiques par type de culture

Type de culture	Nombre d'études utilisant une fonction d'endommagement spécifique par type de culture
céréale et oléo protéagineux	11
maraichage, horticulture et serre	8
Légumes plein champ	10
Arboriculture	7
Viticulture	2
Prairie	4

- *Indicateurs de dommages au sol*

Peu de méthodes proposent une réelle évaluation des dommages au sol sur les zones agricoles. Pourtant, la plupart des guides méthodologiques (BTE, 2001 ; Neubert et al., 2004 ; Penning-Roswell et al., 2005) préconisent de prendre en compte les coûts de remise en état et de nettoyage. Nous avons recensé uniquement une méthode (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010) proposant une évaluation monétaire des dommages au sol. Cette méthode utilise un indicateur agrégé basé sur le retour d'expérience des crues du Gard de 2002 et ne permet pas de rentrer dans les détails d'évaluation du dommage.

- *Indicateurs de dommages au matériel et aux stocks*

Les dommages au matériel et aux stocks sont relativement peu pris en compte. Cependant, ils peuvent être pris en considération dans l'évaluation des dommages au bâtiment en considérant que les stocks et le matériel sont contenus dans le bâtiment. Certaines études utilisent de manière simplifiée les mêmes fonctions de dommage pour le bâti agricole que pour l'habitat domestique. Cette simplification permet une évaluation rapide des dommages avec les fonctions existantes. Cependant, elle n'est pas satisfaisante puisque le contenu des bâtiments agricoles (matériel, stocks) est très différent de celui d'un habitat domestique. L'étude du Plan Loire (Devaux-Ros, 2000) pousse l'évaluation des dommages au bâti agricole plus loin puisqu'une typologie des bâtiments est définie et permet d'évaluer les dommages au bâti et au matériel en fonction du type de production réalisée sur la zone. La récente étude de la chambre d'agriculture du Gard (2010) va également dans ce sens en affinant la typologie des exploitations en raison de l'échelle plus fine à laquelle s'applique leur étude. Les difficultés de monétarisation consistent à déterminer la valeur de matériel qu'il convient de considérer comme dommage (valeur du matériel neuf, amorti…). La Chambre d'Agriculture du Gard a donc affecté un âge à la liste de matériel permettant d'ajuster le montant de dommage en fonction de la vétusté.

3.5 Éléments de retours d'expérience sur deux catastrophes

Selon les estimations des retours d'expérience, les dommages agricoles résultant de la tempête Xynthia (27-28 février2010) s'élèveraient à 71,5 millions d'€ (Léonard, 2010) pour les deux départements (Charente Maritime et Vendée) et, ceux liés aux inondations du Var de Juin 2010 à 50 millions d'euros (La France Agricole, 11 août 2010). Ces dommages estimés correspondent aux pertes de récolte et aux pertes de fonds (verger, troupeau). Ces deux évènements majeurs ont permis également de mettre en évidence la complexité des dommages subis sur les zones agricoles et le besoin d'une meilleure évaluation de ces dommages.

Cet extrait de La France Agricole (publié le 5 juillet 2010) intitulé « Var : les agriculteurs durement touchés par les inondations du 15 juin » suite aux inondations met en évidence plusieurs points occultés par les méthodes classiques d'évaluation des dommages et que nous proposons d'analyser à partir d'extraits.

« « J'étais assuré », reprend Éric Féménia. « Mais j'ignore quand la compagnie d'assurances débloquera les fonds ». Les agneaux devaient être abattus et vendus en novembre, pour la fête de l'Aïd el-Kebir. L'éleveur n'a pas encore chiffré les pertes. Il les estime à l'équivalent d'une année de revenu, voire plus. Il doit, en effet, reconstituer un troupeau. Or, il ne pourra pas racheter de bêtes auprès de ses confrères avant la fin de la période de détention liée à la prime à la brebis, en mai. «Avant que je remonte un troupeau identique à celui que je possédais, il faudra des années », déplore t-il. « J'avais procédé à de la sélection, les bêtes connaissaient les lieux de pâturage... »»

Cet extrait pointe deux problèmes. D'abord, les pertes de fonds peuvent mettre plusieurs années à se reconstituer car pendant la sélection ou la mise en production, l'exploitant ne reçoit pas de bénéfice de sa production. Ensuite, cet extrait met aussi en évidence les difficultés de trésorerie auxquelles les agriculteurs peuvent être confrontés suite à l'inondation surtout lorsqu'elle intervient avant récolte pour remettre en route l'exploitation.

Autre point soulevé par un second extrait du même article : « Les six hectares de vergers, pêchers, abricotiers, pruniers, inondés sous 2,20 mètres d'eau, ont aussi souffert. Les pêches, recouvertes de limon, pourrissent sur les arbres. ». On constate ici que dès que les fruits sont touchés, ils ne peuvent plus être vendus. Nos enquêtes auprès d'agriculteurs ont montré que le temps de nettoyage était important pour reprendre la culture et éviter le développement de maladies les années suivantes.

« « Nous n'avons pas pu traiter car il était impossible d'accéder aux parcelles », ajoute l'agriculteur. En attendant, il a remis en culture des melons et des tomates sur des parcelles non sinistrées. La récolte, prévue à la fin d'août, atténuera les pertes. »

Ainsi, nous pouvons constater que l'accessibilité aux parcelles peut empêcher la réalisation de certaines tâches de production et causer des potentielles baisses de rendement. Il est également nécessaire de pouvoir disposer du matériel pour continuer les travaux ou remettre en culture les parcelles qui n'ont pas été inondées.

Un an après la tempête Xynthia, la presse a également livré des témoignages intéressants sur les effets à moyen et long termes.

« Les deux tracteurs que j'avais ici ont, dans un premier temps, redémarré. Deux mois plus tard, il y en a un, je ne pouvais plus m'en servir parce qu'il n'y avait plus d'embrayage et l'autre qui tournait tous les jours, plus de démarreur. […] Alors on a réinvesti à fond, c'est-à-dire, on a remis la main au portefeuille, on a tout renouvelé le matériel comme... pour repartir. J'avais la chance d'avoir la trésorerie disponible ce qui m'a permis de repartir assez rapidement. Mais d'un investissement terminé, je me retrouve aujourd'hui avec un amortissement matériel… » (Le Monde, 24 février 2011). Cette réflexion d'un ostréiculteur qui montre sa détermination par la phrase suivante « C'est pas à 50 ans que je vais lâcher le morceau pour une tempête ! », soulève les interrogations suivantes : que se serait-il passé pour un conchyliculteur n'ayant pas la capacité de trésorerie dont disposait l'ostréiculteur interviewé ? Que se passerait pour l'ostréiculteur en question si un évènement devait encore venir perturber son activité ? La discussion sur l'hypothèse de la résilience faite dans la méthode des dommages évités prend ici tout son sens et ce propos vient justifier notre souhait de proposer des indicateurs financiers permettant de tester la capacité de retour à l'état initial des exploitations agricoles.

Enfin, dans le même témoignage, cet ostréiculteur soulève la question des effets potentiels de ces évènements sur le comportement des consommateurs qui restent très difficiles à évaluer : « Le manque à gagner serait plus dans la baisse d'activité qu'on a eu suite à la tempête Xynthia. C'est-à-dire que le consommateur est devenu réticent à l'achat de coquillages. Et là est tout le problème de la profession actuellement. »

Source : Le Monde, 17 juin 2010

Figure 32 : Champ de vigne inondé et souillé d'encombrants

3.6 Conclusions et hypothèses de travail retenues

3.6.1. Conclusions

Tout au long de ce chapitre, nous avons montré la nécessité de mieux comprendre les effets de l'évolution du contexte de gestion des inondations sur les exploitations agricoles. L'évolution des moyens de gestion, que ce soit la création de zone de rétention ou la réduction de la vulnérabilité, va particulièrement toucher les zones agricoles qui par ailleurs vivent une phase de transition d'un système d'indemnisation vers un système d'assurance privée.

Le besoin d'une meilleure compréhension est important pour répondre aux trois objectifs suivants :

- évaluer et compenser les sur-dommages potentiellement causés,
- évaluer les effets de ces politiques sur les exploitations agricoles,
- déterminer l'efficience des nouvelles politiques mises en place.

Pour atteindre ces trois objectifs, une évaluation poussée et explicite des dommages sur les exploitations agricoles est requise. Or, la revue de littérature menée met en évidence que les méthodes classiquement utilisées pour évaluer les dommages sur le secteur agricole sont généralement simplifiées. Or, les études qualitatives (Pivot et al., 2002 ; Posthumus et al., 2009) mais aussi les retours d'expérience mettent en évidence que les dommages des inondations sur les exploitations agricoles sont plus complexes que ce que permettent d'évaluer les méthodes existantes. Si la place des enjeux agricoles était négligeable dans le projet à évaluer, alors, utiliser un proxy très frustre ne serait pas problématique. Par contre, dès lors que les enjeux agricoles deviennent centraux comme c'est le cas dans les restaurations ou création de ZEC, ou la réduction de la vulnérabilité, une évaluation plus fine est requise. Nous avons, en effet, montré que les méthodes reposant uniquement sur l'évaluation de la perte de récolte ne permettent pas d'évaluer les projets de réduction de la vulnérabilité qui requièrent que les méthodes d'évaluation tiennent compte des dommages induits sur l'activité puisqu'il s'agit d'un de leurs objectifs principaux.

3.6.2. Hypothèses de travail retenues

Les hypothèses de travail et définitions qui sont retenues suite à ce chapitre sont liées au cadre de l'évaluation économique. Premièrement, notre modèle de vulnérabilité a pour objectif d'améliorer la compréhension de la formation des dommages sur les exploitations agricoles pour répondre, en particulier, au besoin d'évaluer l'efficience et les effets des nouvelles politiques de gestion des inondations par l'évaluation économique.

La méthode d'évaluation économique dans laquelle s'inscrit ce développement est l'Analyse Coût-Bénéfice mobilisant la méthode des dommages évités.

L'étude se place à l'échelle de l'exploitation agricole. Nous considérons donc que les dommages directs sont les dommages qui apparaissent sur les composantes de l'exploitation agricole directement suite à l'inondation. Les composantes de l'exploitation considérées sont les parcelles contenant la récolte, le matériel végétal (verger ou vignoble) ainsi que le sol et les bâtiments agricoles contenant le matériel et les stocks.

Les dommages induits sont définis comme les dommages résultant de la propagation dans le temps des dommages directs à l'échelle de l'exploitation agricole.

Les dommages indirects sont définis comme les dommages résultant de la propagation des dommages directs sur l'exploitation agricole à l'échelle du système économique plus large (filière, région…).

L'estimation des dommages est envisagée selon la méthode classique d'élaboration de fonction d'endommagement. L'évaluation du dommage est envisagée selon l'évaluation du coût du retour à la normale pour toutes les composantes considérées pour les dommages directs.

L'évaluation des dommages induits repose sur le principe de la perte de valeur ajoutée (différence entre la variation des charges et produits) en utilisant la notion de coût d'opportunité[30].

30 Le coût d'opportunité est défini comme le manque à gagner résultant d'une possibilité non exploitée, par exemple une occasion d'investir ou de s'implanter sur un marché.

CONCLUSIONS DE LA PARTIE I

Dans les méthodes actuelles d'évaluation des dommages agricoles dus aux inondations, une partie seulement des effets directs est prise en compte et les effets induits ne sont jamais considérés. Il est donc légitime de s'interroger sur l'intérêt et l'importance relative de ces effets des inondations sur les exploitations agricoles. De plus, dans l'optique d'évaluer des politiques ayant des effets importants et complexes sur les exploitations agricoles comme la restauration ou la création de ZEC ou la réduction de la vulnérabilité, il est nécessaire d'évaluer ces effets jusqu'à présent non pris en compte afin de définir leur importance relative et leur poids dans les dommages évités par la mise en place des projets.

L'évaluation des effets passe par une caractérisation de la vulnérabilité du système étudié car la vulnérabilité se définit comme la propension d'un système à subir des effets suite à une exposition à un aléa. La définition retenue de la vulnérabilité est compatible avec la caractérisation des effets directs et induits puisque nous avons considéré que la propension à subir des effets était liée à deux caractéristiques du système : sa sensibilité qui va déterminer les effets directs et sa capacité de réponse qui va déterminer les effets induits.

Pour caractériser la vulnérabilité selon cette perspective, la modélisation systémique s'avère pertinente puisqu'elle permet de prendre en compte les caractéristiques sommatives (effets directs) et constitutives (effets induits) de la vulnérabilité.

La formalisation UML du modèle conceptuel permet une représentation explicite des processus en œuvre et des interactions entre les différentes composantes de l'exploitation agricole suite à l'inondation. Le choix de cette représentation est notamment lié à la volonté de produire un modèle de dommages favorisant la discussion autour des projets de gestion des inondations durant la phase d'évaluation économique comme préconisé par Shabman et Stephenson (1996). Ce souhait d'explicitation est également motivé par les problèmes d'acceptabilité de certains projets de restauration ou création de ZEC nécessitant la mise en œuvre de protocoles de compensation.

La modélisation de la capacité de remise en route repose sur la théorie des capitaux multiples et la substituabilité de certaines formes de capitaux. Ainsi, nous supposons qu'elle dépend des dotations du système en capital physique, humain, financier, social et institutionnel et, que temporairement, suite à l'exposition à l'aléa, certaines formes de capitaux sont substituables, en particulier le capital physique et humain par du capital financier et social.

La modélisation de la décision retenue est compatible avec le cadre imposé par la méthode des dommages évités. Nous nous positionnons dans le cadre d'une rationalité procédurale. Le modèle de

décision retenu repose sur l'hypothèse que les exploitants cherchent à retrouver le plus rapidement possible leur situation initiale et cherchent à éviter dans la mesure du possible une non réalisation des tâches par rapport à l'itinéraire technique qui définit le fonctionnement optimal. Ce sont également les choix rationalité implicites de la méthode des dommages évités. Ce choix repose sur l'hypothèse implicite de résilience des systèmes, au sens restreint de leur souhait et capacité de retourner à l'état initial et de poursuivre leur activité de production. La période sur laquelle sont évalués les effets subis par le système, s'étend du moment de l'occurrence de l'inondation au retour à une situation d'équilibre qui, dans notre approche, est supposée être une situation équivalente à la situation initiale en termes de dotation en capital physique et humain.

Le modèle laisse la possibilité d'envisager de réaliser des tests sur cette hypothèse de résilience en s'intéressant à la trésorerie des exploitations. Concernant la consommation de capital social, des réflexions plus poussées devraient être engagées afin de comprendre les processus d'accumulation et de consommation de cette forme de capital. Par ailleurs, il est probable que la disponibilité du capital social soit fortement liée à l'intensité de l'évènement et qu'il n'existe pas de relation linéaire entre ces deux variables.

Pour cela, il est nécessaire de mettre en œuvre une modélisation permettant à la fois, une caractérisation exploratoire (modélisation conceptuelle) et la production d'indicateurs quantitatifs (simulation) compatible avec la définition retenue de la vulnérabilité et l'évaluation économique par ACB.

PARTIE II DÉVELOPPEMENT DUNE APPROCHE SYSTÉMIQUE DE MODÉLISATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES EXPLOITATIONS AGRICOLES FACE AUX INONDATIONS

La partie 2 présente l'élaboration et la description du modèle conceptuel de vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations.

Notre modèle a pour objectif de proposer une évaluation quantitative de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations pouvant s'appliquer dans le cadre de l'évaluation économique des projets de gestion des inondations par l'Analyse Coût-Bénéfice. La méthode d'évaluation des bénéfices retenue est celle des dommages évités qui consiste à estimer un différentiel de dommages entre deux situations, i.e. avec et sans la mise en place d'un projet. Les projets envisagés portent sur la modification de l'aléa (restauration de ZEC) comme sur la réduction de la vulnérabilité, il s'agit donc de proposer une méthode d'évaluation des dommages dus aux inondations sur les exploitations agricoles permettant d'appréhender les effets de ces différents projets. Or, comme cela a été présenté au chapitre 3, l'évaluation des effets des projets sur les zones agricoles est souvent limitée à la perte de récolte. Ainsi, les composantes de l'exploitation prises en compte dans l'évaluation sont souvent limitées aux parcelles et les autres composantes, en particulier les bâtiments et leur contenant, sont rarement considérées. De plus, l'évaluation des dommages sur l'activité induite n'est jamais prise en compte. Pour être en mesure de prendre en compte ces effets, l'approche à l'échelle de l'exploitation considérée comme un système est nécessaire.

Cette partie montre la complexité induite par le changement d'échelle de la parcelle à l'exploitation agricole du fait de la prise en compte des différentes dimensions du système et de leurs interactions.

Le chapitre 4 propose une description générale du modèle n'utilisant pas de formalisme particulier. Il précise la conception adoptée du système « exploitation agricole » et de son fonctionnement. Il propose une analyse et une méthode d'évaluation des effets de l'inondation. Un récapitulatif des différentes hypothèses de modélisation est présente à la section 4.7.

Le chapitre 5 propose une description détaillée de la structure du modèle, de ses composantes et des procédures en utilisant le formalisme UML. Il présente ensuite les différentes sorties du modèle avant de donner une description détaillée du calcul des dommages.

Dans sa globalité, cette partie vient répondre à la première question de recherche posée dans cette thèse qui est de modéliser la vulnérabilité aux inondations des exploitations en tant que systèmes. Elle s'attache à décrire de la façon la plus explicite possible la complexité du système envisagé et les hypothèses de modélisation.

CHAPITRE 4. MÉTHODE ET CADRE CONCEPTUEL UTILISÉS POUR LA MODÉLISATION

La vulnérabilité a été définie au chapitre 1, comme la propension d'un système à subir des effets suite à une exposition à un aléa, en fonction de sa sensibilité et de sa capacité de réponse, celles-ci dépendant de l'ensemble des dotations en capitaux physique, humain, financier, social et institutionnel. La phase d'exposition (inondation) repose sur le croisement d'un aléa (la crue) et de la vulnérabilité des exploitations agricoles, chacun caractérisé par une distribution spatiale et temporelle. Les effets de l'inondation s'expriment en fonction de ce croisement que notre modélisation vise à appréhender. Dans ce chapitre, nous présentons la structure et le fonctionnement de l'exploitation en temps normal puis les effets de l'inondation. Notre modélisation vise à rendre compte et à évaluer les effets directs sur les composantes physiques mais aussi la propagation de ces effets sur l'activité.

Le développement du modèle conceptuel a été alimenté par la collecte d'expertise et de données qui sont principalement issues de l'application présentée dans la partie 3.

4.1 Démarche mise en œuvre

Généralement, la modélisation permet d'élaborer un modèle conceptuel servant de base pour l'implémentation sur des cas d'application. Pour développer notre modèle, un processus itératif entre la modélisation et l'implémentation, d'une part, et la collecte de données, d'autre part, a été mis en œuvre (figure 33). Les rétroactions entre la modélisation et l'implémentation permettent ainsi, de préciser le modèle conceptuel au cours de l'implémentation.

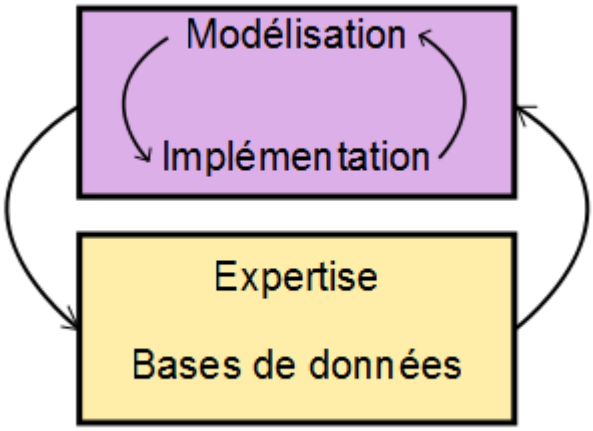


Figure 33 : Étapes mise en œuvre pour la modélisation de la vulnérabilité des exploitations agricoles

L'élaboration d'un modèle conceptuel consiste en la construction d'une série de modèles en constante évolution, alimentés par une réflexion collective et les savoirs experts collectés. Notre démarche a reposé, dans un premier temps, sur l'analyse de la littérature grise principalement développée par l'Equipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature (section 1.8, p 43) ; en particulier, les travaux de Bauduceau (2001 ; 2004a) qui ont montré l'importance d'une approche à l'échelle de l'exploitation agricole pour comprendre la formation des dommages.

La démarche entreprise dans cette thèse se place dans la continuité de cette approche (Bremond et al., 2008 ; Bremond et al., 2009) et y ajoute une évaluation quantitative et monétaire des effets qui permet l'évaluation économique des projets de gestion des inondations. Les données quantitatives étant limitées (cf. section 3.4, p 92), nous avons mis en place une démarche d'enquêtes auprès des experts et exploitants agricoles après avoir élaboré un premier modèle conceptuel.

Le modèle proposé repose sur une représentation systémique de l'exploitation agricole et permet de prendre en compte les interactions entre les différentes composantes définies. Il a été formalisé au sein d'un groupe de travail de chercheurs en utilisant le langage UML[31].

La discussion et la validation du modèle conceptuel ont été menées au sein de comités de pilotage réunissant les représentants des Chambres Départementales d'Agriculture des cinq départements représentés sur la zone (Bouches-du-Rhône, Gard, Drôme, Ardèche, Vaucluse).

Sur la base du modèle conceptuel, alimenté par les données collectées au cours des entretiens, nous avons élaboré un modèle de simulation permettant de calculer les dommages sur des exploitations types en fonction de différents scénarios d'inondation. Les enquêtes et données collectées sont présentées dans la partie 3, chapitre 6. L'implémentation a été réalisée en plusieurs étapes :

- une première implémentation a été réalisée dans le projet réalisé pour le Pan Rhône (Blanc et al., 2010) sous Excel. Seuls quelques scénarios d'inondation pouvaient alors être simulés.
- une seconde implémentation utilisant le langage R a permis une automatisation des calculs et les simulations ont pu être réalisées sur un nombre plus important d'exploitations et de scénarios. C'est à partir de cette deuxième implémentation que les résultats présentés aux chapitres 7 et 8 ont été obtenus.

4.2 Description du système étudié et de son environnement

4.2.1. Structure du système

L'approche systémique retenue implique l'analyse des interactions entre :

- les composantes physiques de l'exploitation ;
- l'agent décisionnel « exploitant » ;
- l'environnement physique, économique et social.

Les effets directs de l'inondation résultent du croisement de la répartition spatiale de l'inondation et de l'exploitation agricole. Une vision structurelle de l'exploitation est donc nécessaire pour appréhender ces effets. La structure de l'exploitation agricole est représentée comme un ensemble de composantes physiques spatialisées (figure 34).Le terme « composante physique » désigne les éléments structurels qui constituent notre système. Une exploitation agricole se

[31] Il est utilisé dans le chapitre 5 pour décrire la structure et les procédures du modèle de façon plus technique.

constitue ainsi de parcelles et bâtiments qui peuvent être touchés ou non par l'inondation en fonction de leur distribution spatiale. Ces composantes physiques contiennent d'autres composantes physiques qui leur sont liées. Le matériel technique, les stocks de produits et d'intrants sont considérés localisés dans les bâtiments. Les parcelles sont constituées d'un type de sol et contiennent la production en cours ainsi que le matériel végétal pérenne (verger, vignoble…).

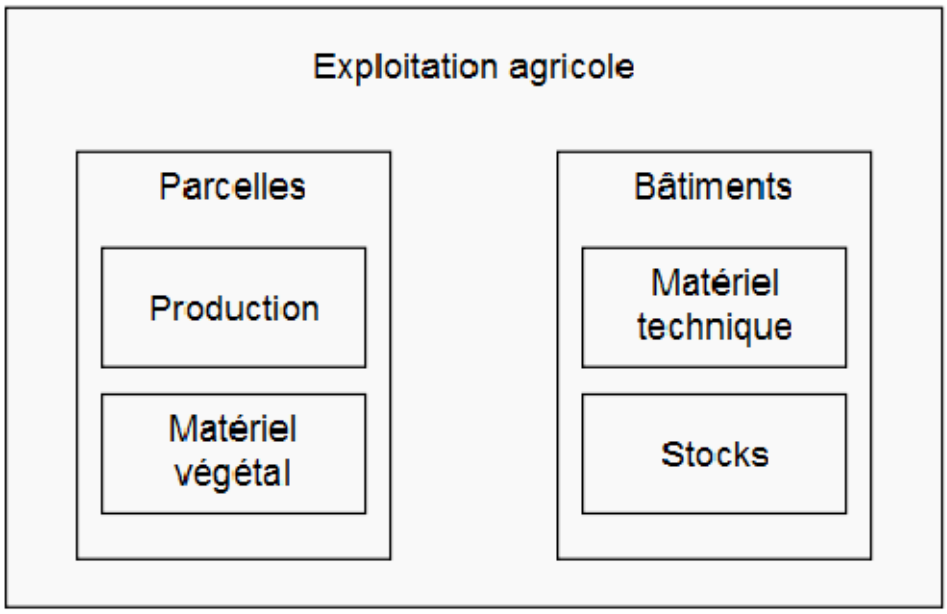


Figure 34 : Structure de l'exploitation agricole dans le modèle

Dans cette représentation structurelle, certaines composantes sont des capitaux fixes :

- les parcelles, constituées d'un type de sol ;
- le matériel végétal pérenne ;
- le matériel technique ;
- les bâtiments.

D'autres correspondent plutôt à des flux :

- la production en cours sur la parcelle ;
- les stocks d'intrants et de produits.

4.2.2. Les différentes formes de capitaux de l'exploitation agricole

Parmi les différentes formes de capitaux présentées au chapitre 1 (sous section 1.4.2, p29), nous conservons dans notre modèle les capitaux physique, humain, financier et social. L'intégration du capital naturel dans l'analyse nécessiterait l'existence d'études sur les effets des inondations en termes d'érosion ou de pollution sur la valeur des terres. Or, elles sont, à l'heure actuelle peu développées. Concernant le capital institutionnel, l'évolution des politiques d'assurance des risques

climatiques, par exemple, pourrait influencer le capital financier des exploitations agricoles mais cette question n'est pas traitée.

A l'échelle de l'exploitation agricole, les formes de capitaux retenues dans l'analyse peuvent être décrites de la manière suivante :

- Le capital physique (K_p) correspond à l'ensemble des biens physiques (parcelles, matériel végétal, bâtiments, matériel et stocks) permettant à l'exploitation agricole de produire à un certain niveau de rendement.
- Le capital humain (K_h) correspond à la quantité et au niveau de spécialisation de la main d'œuvre disponible sur l'exploitation agricole.
- Le capital financier (K_f) correspond aux ressources financières disponibles pour l'exploitant pour élaborer sa stratégie de remise en route. Le capital financier est ici entendu comme la ressource permettant d'accéder à du capital physique ou humain déficitaires après inondation. Ces ressources peuvent être internes à l'exploitation (épargne) ou externe (indemnisations, subventions, prêt…).
- Le capital social (K_s) correspond aux ressources sociales de type familial[32] ou amical et professionnel[33] (famille, groupement de producteurs, filière, coopérative..) que l'exploitant peut solliciter pour élaborer une stratégie de remise en route. Notons que le capital social est entendu par la suite, comme le lien permettant d'accéder au capital physique (prêt de matériel) ou humain (main d'œuvre solidaire) procurés par la solidarité. En réalité, le capital social a, toutefois, une dimension beaucoup plus large (soutien moral, accès à l'information…).

L'objet de cette thèse n'est pas d'évaluer le capital social ou financier de l'exploitation agricole mais d'expliciter les mécanismes de remise en route basés sur une substituabilité entre les formes de capitaux de l'exploitation agricole.

[32] qualifiées de Bonding par Woolcock (1998)

[33] qualifiées de Bridging par Woolcock (1998)

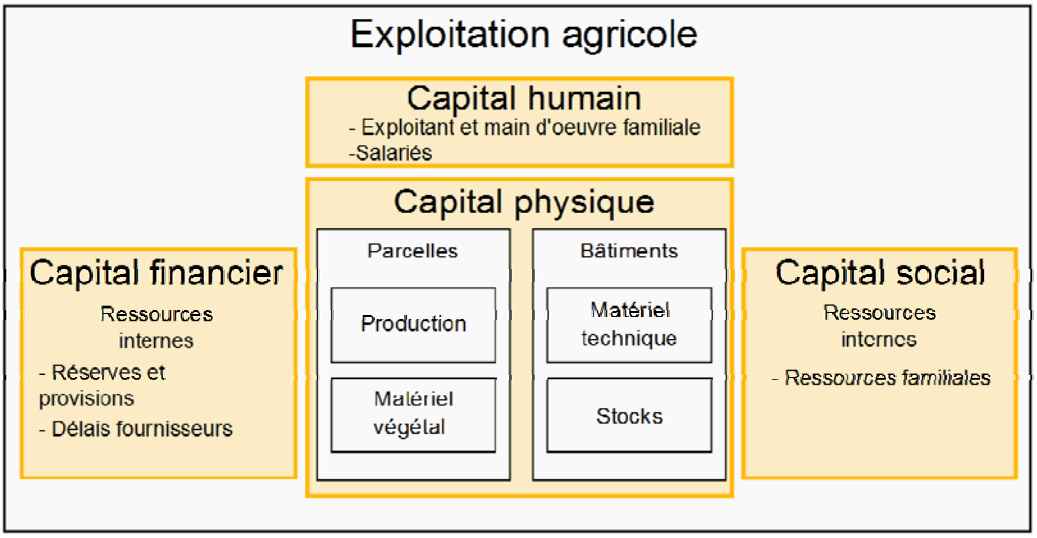


Figure 35 : Capitaux internes à l'exploitation agricole

4.2.3. Environnement du système

Si la modélisation est centrée sur l'exploitation agricole, notre analyse vise à prendre en compte ses interactions avec l'environnement économique et naturel. Nous distinguons deux types d'interactions (figure 36) : celles avec les filières amont et aval et celles avec les ressources externes mobilisables pour la remise en route.

Premièrement, l'exploitation agricole est généralement intégrée dans un système de filières à travers lesquelles circulent les flux d'intrants et de produits. Les filières amont permettent l'approvisionnement en intrants et en matériel. La filière aval participe à la vente et parfois la transformation des produits de l'exploitation. Dans le cas d'une inondation ayant touché un grand nombre d'exploitations agricoles, la demande en termes d'achat d'intrants, de réparation ou de rachat de matériel, peut fortement augmenter. Un problème de saturation du marché d'approvisionnement de la filière amont peut alors apparaître entraînant l'augmentation des délais d'achat et de réparation. On peut se demander quels sont les effets de ces délais sur la remise en route des exploitations. Cette question est abordée dans cette thèse par l'introduction de délais d'indisponibilité des composantes physiques avant leur réparation ou leur rachat (cf. chapitre 5).

Par ailleurs, la filière, elle-même, peut être touchée par l'inondation. Pour illustrer ce cas, l'exemple de la filière aval est particulièrement parlant. Prenons l'exemple d'une coopérative viticole. Elle est liée à des adhérents qui produisent du raisin qui est ensuite transformé en vin et vendu par la coopérative. Si cette coopérative est touchée par les inondations, ce sont tous les adhérents, même ceux qui n'ont pas été physiquement touchés par l'inondation, qui subiront les conséquences de la perte de produit. Si la coopérative n'est pas touchée mais qu'un grand nombre d'adhérents est touché, la coopérative peut également avoir des difficultés à produire les volumes attendus

entraînant un risque de perte de clientèle. Dans l'objectif de se concentrer sur l'exploitation agricole, ces effets n'ont pas été pris en compte dans le modèle mais leur intégration est envisageable par la suite.

Deuxièmement, les ressources mobilisables par l'exploitation conditionnent sa stratégie de remise en route. Nous distinguons, dans ce cadre, les ressources financières et les ressources sociales. La mobilisation et la substitution de ces formes de capitaux dans le processus de remise en route de l'exploitation agricole est explicitée dans la section 4.4.3 (p127). Les capitaux social et financier sont à la fois des ressources internes et externes de l'exploitation agricole (figure 37).

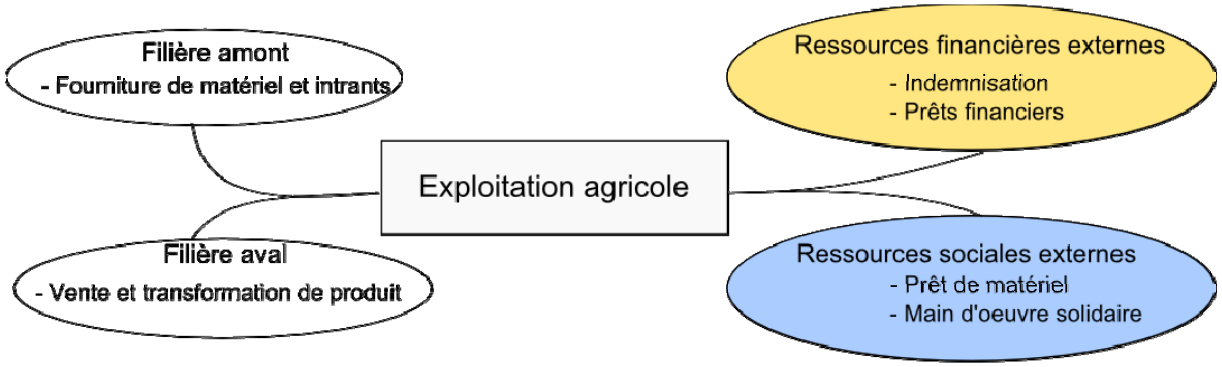


Figure 36 : Interactions du système exploitation agricole avec son environnement économique et social à considérer dans l'analyse de la vulnérabilité

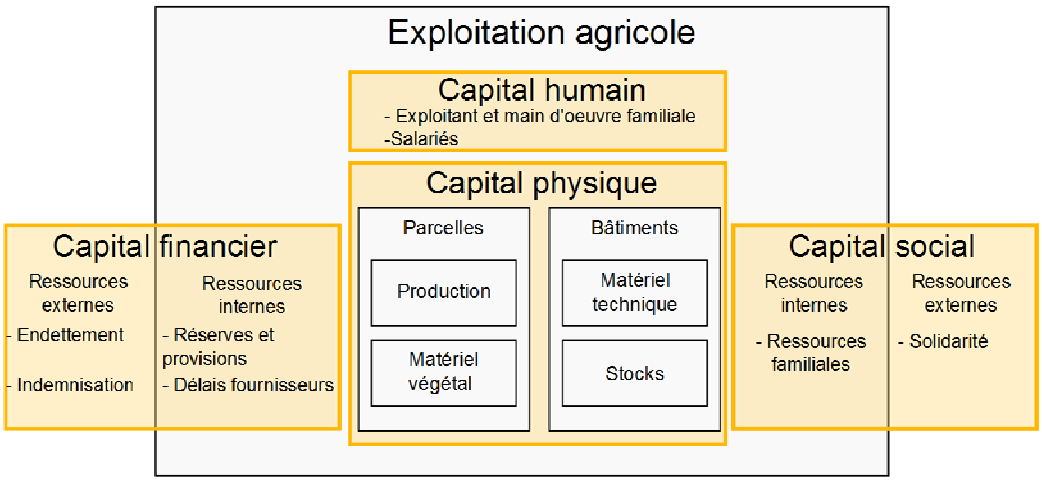


Figure 37 : Capitaux mobilisables par l'exploitation agricole au cours du processus de production

4.3 Modélisation du fonctionnement de l'exploitation agricole

4.3.1. Les dimensions prises en compte

Notre conception du fonctionnement de l'exploitation agricole repose sur quatre dimensions fortement liées entre elles (figure 38).

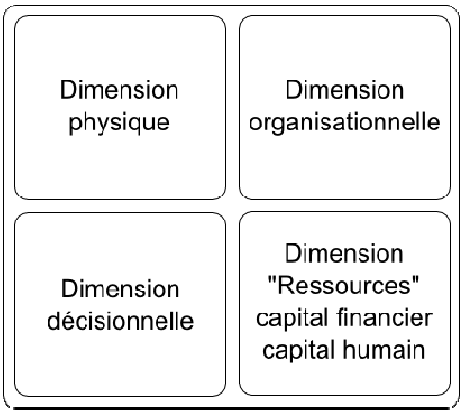


Figure 38: Dimensions de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations

La dimension physique de l'exploitation agricole correspond à l'ensemble des composantes physiques qui constituent le capital physique de l'exploitation. Les composantes physiques sont localisées spatialement. Leur état évolue dans le temps et dépend de l'intensité avec laquelle elles ont été touchées par l'inondation, de leurs caractéristiques propres (fonction d'endommagement) ainsi que des tâches de remise en état ayant pu être initiées.

Deuxièmement, la dimension organisationnelle est liée à l'ensemble des tâches devant être réalisées sur l'exploitation agricole. Notre modélisation de l'organisation du travail hors période d'inondation repose sur la notion d'itinéraire technique (Brossier et al., 1990b, p 23) qui définit la séquence des tâches de production. Suite à l'inondation, les tâches de remise en état des différentes composantes physiques viennent s'ajouter. La réalisation des tâches, tant de production que de remise en route, s'effectue sur une composante donnée, avec un type de matériel et d'intrant donné et mobilise un certain niveau de main d'œuvre.

Concernant la dimension décisionnelle, lorsque des perturbations liées à l'inondation contraignent la réalisation de certaines tâches, nous supposons que l'objectif de l'exploitant est de se rapprocher de la procédure normale qui consiste à réaliser la liste des tâches prévues.

Enfin, les ressources mobilisables (capitaux financier et humain) conditionnent les stratégies de remise en route en venant se substituer aux ressources qui ont pu être endommagées durant l'inondation comme le matériel (capital physique) ou qui sont requises en quantité plus importante comme la main d'œuvre (capital humain).

4.3.2. Modélisation du fonctionnement de l'exploitation agricole en temps normal

- *Organisation du travail autour de l'itinéraire technique*

L'itinéraire technique est au centre de notre représentation temporelle de l'exploitation agricole. Il détermine la liste des tâches de production à réaliser pour chaque culture présente sur l'exploitation agricole. Une culture étant associée à chaque parcelle, l'itinéraire technique est une

donnée liée à la parcelle. Elle permet de déterminer le temps de travail nécessaire par unité de temps et de surface pour réaliser une tâche ainsi que les moyens mobilisés pour la mettre en œuvre. La figure 39 représente l'itinéraire technique d'une culture de pomme pour une exploitation arboricole de 8 ha. Ce graphique indique la répartition du temps de travail en heure par hectare sur l'année en fonction des mois. La main d'œuvre interne disponible sur l'exploitation est définie à l'échelle de l'exploitation (ligne horizontale pleine figure 39). Les différentes tâches de production (récolte, broyage, éclaircissage etc.) sont identifiées par des couleurs différentes. La somme de travail à réaliser par mois est donnée par les histogrammes empilés. Cet exemple montre que, sur l'année, des pics de travail se dégagent et dépassent la main d'œuvre disponible sur l'exploitation agricole. Dans l'exemple de l'exploitation arboricole illustré par la figure 39, il s'agit des périodes de récolte et d'éclaircissage qui nécessitent beaucoup de main d'œuvre. Au moment de ces pics, les exploitations font généralement appel à de la main d'œuvre saisonnière (ressources externes).

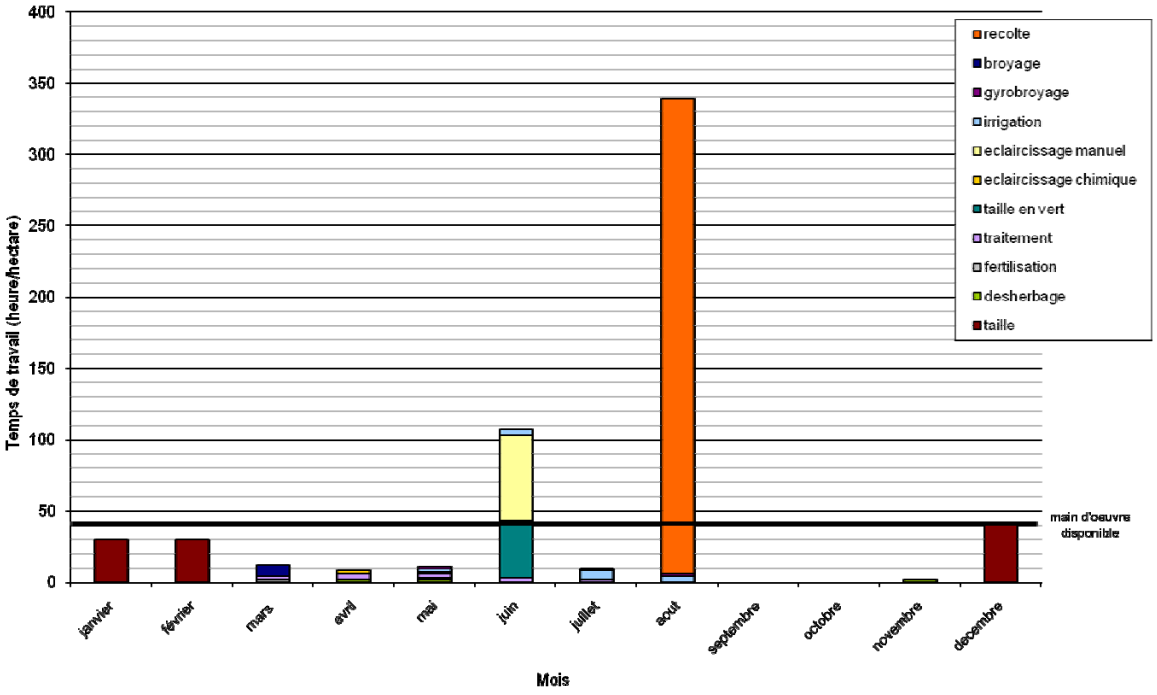


Figure 39 : Représentation temporelle de l'itinéraire technique d'une exploitation type arboricole

(Pomme Royal Gala, 8ha)

- *L'évolution des cultures sur les parcelles*

Une culture est associée à un cycle végétatif qui permet de déterminer les périodes de présence des cultures sur les parcelles. Prenons le cas d'une exploitation produisant des céréales (blé) et du maraichage. Sur les parcelles qui sont plantées en blé, le cycle de présence de la culture est décrit par les histogrammes en jaune sur la figure 40. La culture est présente sur l'intégralité des parcelles concernées, hormis au mois d'août et de septembre. Pour les parcelles en maraichage, nous prenons

le cas d'une rotation entre une culture de salade et de melon. La figure 40 montre que la répartition en termes de surface, des cultures de salade (en vert) et melon (orange) varie au cours de l'année. Si l'intégralité des surfaces est plantée en melon en avril, mai et juin et en salade en novembre et décembre, en dehors de ces mois, les cultures n'occupent pas forcément l'intégralité des surfaces ou l'occupent en mélange.

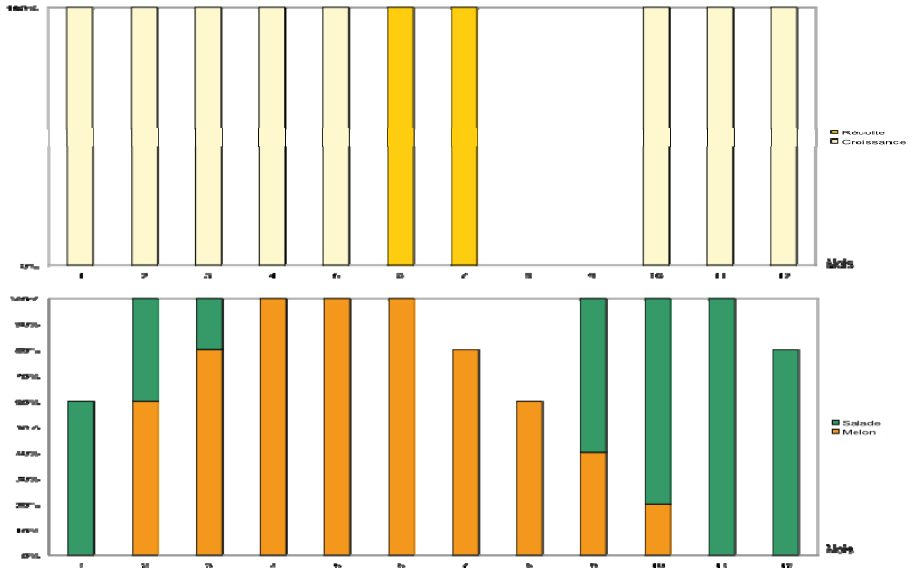


Figure 40 : Exemples de cycles de présence de blé (jaune), de melon (orange) et de salade (vert) sur les parcelles d'une exploitation agricole

- *L'évolution temporelle des stocks*

Deux types de stocks sont définis sur l'exploitation agricole : les intrants et les produits. La variation de leur quantité sur l'exploitation dépend des pratiques des exploitants en termes d'utilisation et d'achat pour les intrants, et en termes de commercialisation pour les produits. Peu de données concernant l'évolution temporelle des stocks existent. Leur évolution est donc définie sur la base de l'itinéraire technique de chaque culture. Pour les flux d'intrants, il est admis que l'exploitant fait l'acquisition de l'intégralité des stocks d'intrants au début du cycle de production. Ensuite, nous avons considéré que la quantité de chaque type d'intrants (désherbant, pesticide…) décroit en fonction de son utilisation qui est définie pour l'itinéraire technique. Pour le flux de produit, un temps de stockage, dans les bâtiments, peut être défini après récolte.

- *Liens entre organisation du travail et composantes physiques*

En temps normal, les composantes physiques sont mobilisées dans le processus de production (flèche 1, figure 41). Chaque tâche de production est définie à travers trois caractéristiques que sont la période de réalisation, le temps de travail nécessaire (flèche 4) et le type de matériel et d'intrants requis (flèche 5). Et, la tâche ne peut être réalisée que si la parcelle est accessible pour réaliser cette

tâche (flèche 6) et si le matériel, les intrants et la main d'œuvre requis sont disponibles au moment de la réalisation.

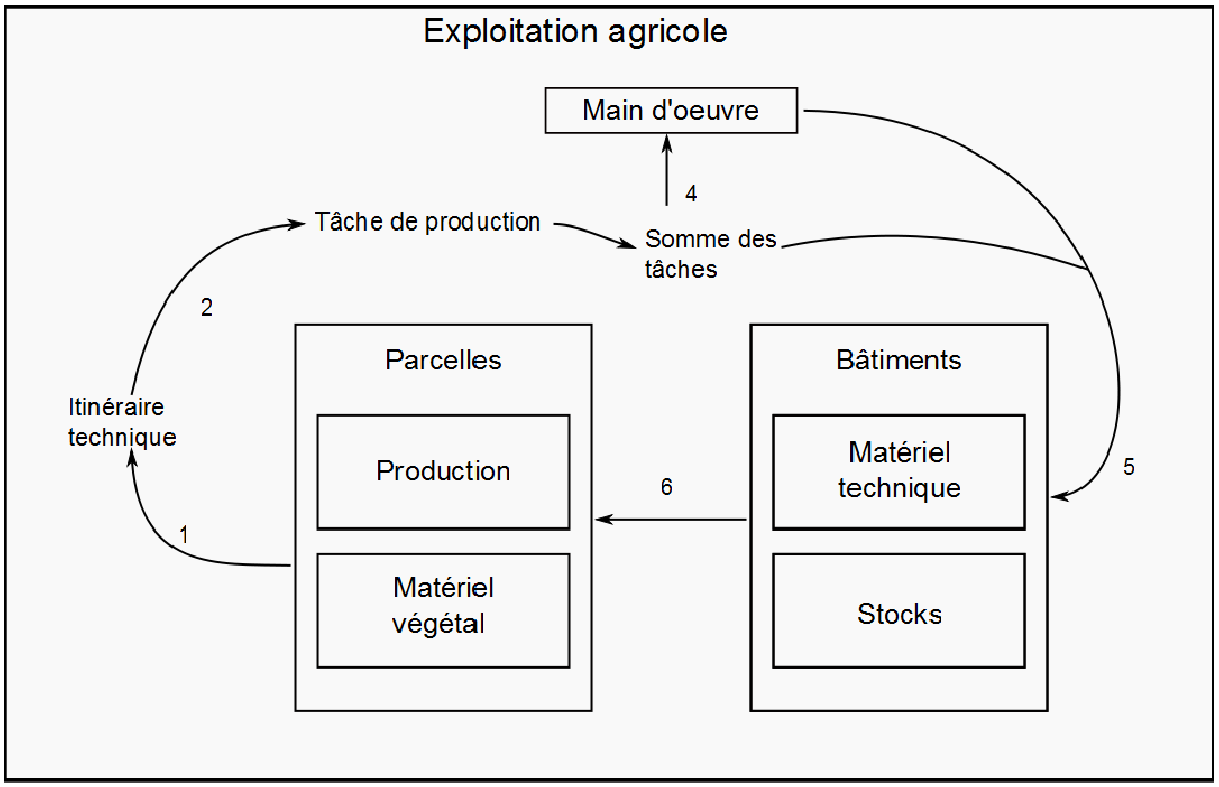


Figure 41 : Modélisation du fonctionnement de l'exploitation agricole en temps normal

4.4 Les effets de l'inondation sur l'exploitation agricole

4.4.1. Echelles spatio-temporelles du modèle

L'exploitation agricole et le phénomène d'inondation ont chacun une dynamique propre dans le temps et l'espace.

La temporalité de l'exploitation, i.e. la manière dont elle s'inscrit dans le temps, est rythmée par les cycles de productions qui coïncident avec l'itinéraire technique et les cycles d'intrants et de produit (figure 42).

La temporalité de l'inondation est marquée par sa date de démarrage et de fin. Les effets de l'inondation sur l'exploitation agricole résultent du croisement de la temporalité de l'inondation et de celle de l'exploitation agricole. On peut noter que la période à laquelle se produit l'inondation joue un rôle important dans les effets produits sur l'exploitation agricole.

Du point de vue temporel, trois types d'effets de l'inondation sur l'exploitation agricole peuvent être distingués :

- les effets directs sur les composantes physiques de l'exploitation,
- les effets induits sur le fonctionnement de l'exploitation à moyen terme, c'est-à-dire la fin du cycle de production durant lequel l'inondation s'est produite,

- les effets induits sur le fonctionnement de l'exploitation à long terme, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'exploitation retrouve un équilibre.

Notre objectif est d'appréhender de façon exhaustive les effets directs et induits à moyen terme. Pour cela, nous faisons l'hypothèse que l'exploitation agricole retrouve son état initial à la fin du cycle de production pour la plupart de ses composantes. Pour certaines composantes, en particulier le matériel végétal, des effets induits a plus long terme sont considérés. En effet, la destruction d'un verger ou d'un vignoble nécessite un arrachage puis une replantation et le retour à une production normale prend plusieurs années.

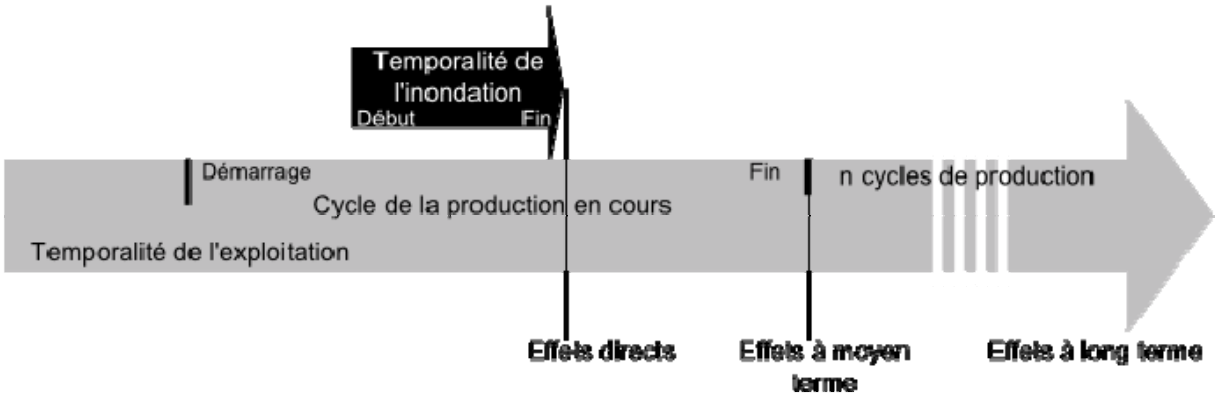


Figure 42 : Intersection des temporalités de l'exploitation agricole et de l'inondation

Concernant la dimension spatiale, la figure 43 met en évidence l'importance des répartitions spatiales de l'inondation et de l'exploitation. La rivière est représentée par la ligne bleue (situation(1)) et suivant l'intensité de l'inondation, les enveloppes de crues touchant le territoire sont de plus en plus étendues[34]. Pour les trois scénarios d'inondation[35] (2) à (4), l'intensité de la crue au sein de chaque enveloppe est indiquée par un gradient de bleu allant du plus clair (moins intense) au plus foncé.

Les effets de scénarios d'inondation sur une exploitation résultent du croisement de ces deux distributions spatiales. Les effets directs sur les composantes physiques sont proportionnels à l'intensité de l'inondation. Pour les effets induits sur l'activité, l'analyse est plus complexe. Par exemple, lorsque le bâtiment contenant le matériel est inondé mais qu'une partie des parcelles ne

[34] Pour une intensité donnée, la répartition des paramètres de l'inondation sur le territoire, dépend de ses caractéristiques en termes de topométrie, de capacité de drainage…. Ces données sont généralement simulées par des modèles hydrauliques.

[35] Un scénario d'inondation correspond à une distribution spatiale donné des paramètres de l'inondation sur le territoire (hauteur, vitesse, durée, période d'occurrence).

l'est pas, il peut y avoir des effets liés à l'indisponibilité de matériel pour réaliser certaines tâches de production (situation 3 pour l'exploitation A de la figure 43).

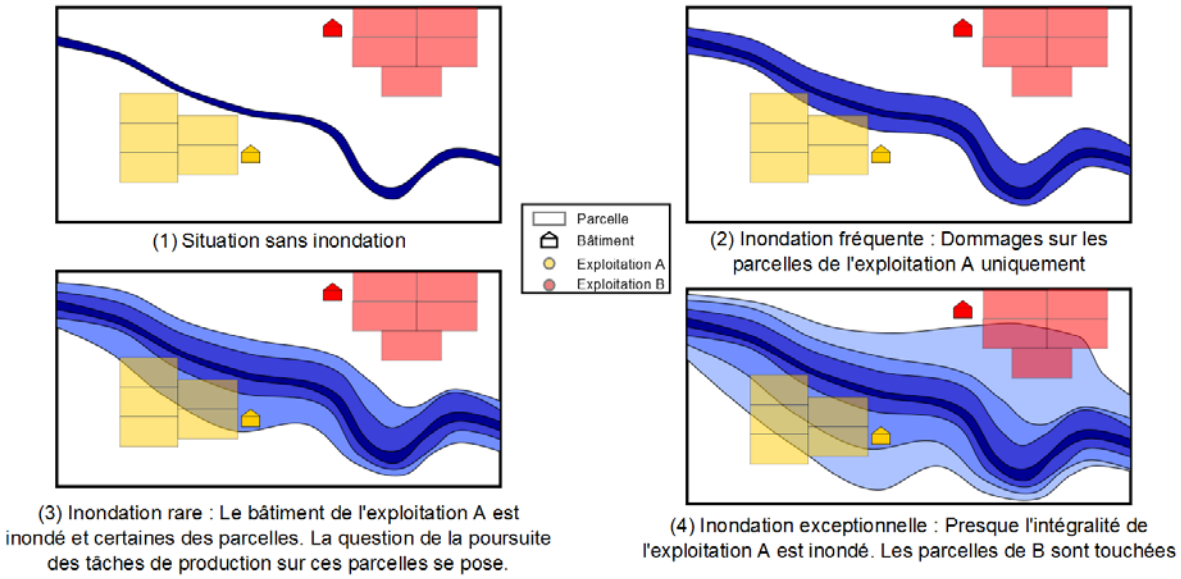


Figure 43 : Intersection des distributions spatiales de l'aléa inondation et de l'exploitation agricole pour l'évaluation de la vulnérabilité

4.4.2. Effets de l'inondation sur la structure et le fonctionnement

Suite à une inondation, les composantes physiques de l'exploitation peuvent être touchées (fond rouge sur figure 44). Chaque composante physique a pour attribut une fonction de dommage caractéristique permettant de déterminer dans quelle mesure la composante est touchée en fonction de l'aléa.

Le changement d'état d'une composante physique a deux conséquences sur le fonctionnement de l'exploitation. Premièrement, il est nécessaire de réaliser une tâche de remise en état pour permettre le retour à l'état initial de la composante physique (flèches rouges, figure 44). Deuxièmement, tant que la composante physique n'a pas retrouvé son état initial, elle peut perturber la réalisation de tâches de production. En conséquence, cette modélisation de la vulnérabilité nous permet de prendre en compte les effets directs de l'inondation sur les composantes physiques ainsi que les effets induits sur l'activité de l'exploitation agricole.

La figure 44 montre que plusieurs types d'effets induits sur l'activité de l'exploitation agricole peuvent être envisagés. Premièrement, tant que les parcelles et bâtiments ne sont pas accessibles, il est impossible d'y réaliser une tâche (flèche 6). Après l'inondation, sur les parcelles qui ont été inondées, les tâches de l'itinéraire technique qui n'ont pas pu être réalisées et peuvent être décalées, s'ajoutent aux tâches de production à réaliser de façon normale (décalage, flèche 1). Deuxièmement, les tâches de remise en état viennent s'ajouter aux tâches de production (flèche rouge 2 bis). La question de la disponibilité de la main d'œuvre présente sur l'exploitation peut alors être une

contrainte à la réalisation des tâches (flèche 4). Ensuite, le matériel et les stocks endommagés qui n'ont pas encore été réparé ou racheté peuvent constituer une contrainte à la réalisation de certaines tâches (flèche 5). Par exemple, si un travail du sol doit être réalisé à une date postérieure à l'inondation et que les parcelles sont accessibles, pour déterminer si la tâche peut être réalisée, il faut d'abord déterminer si le matériel nécessaire pour la réaliser a été endommagé et si oui s'il a été réparé.

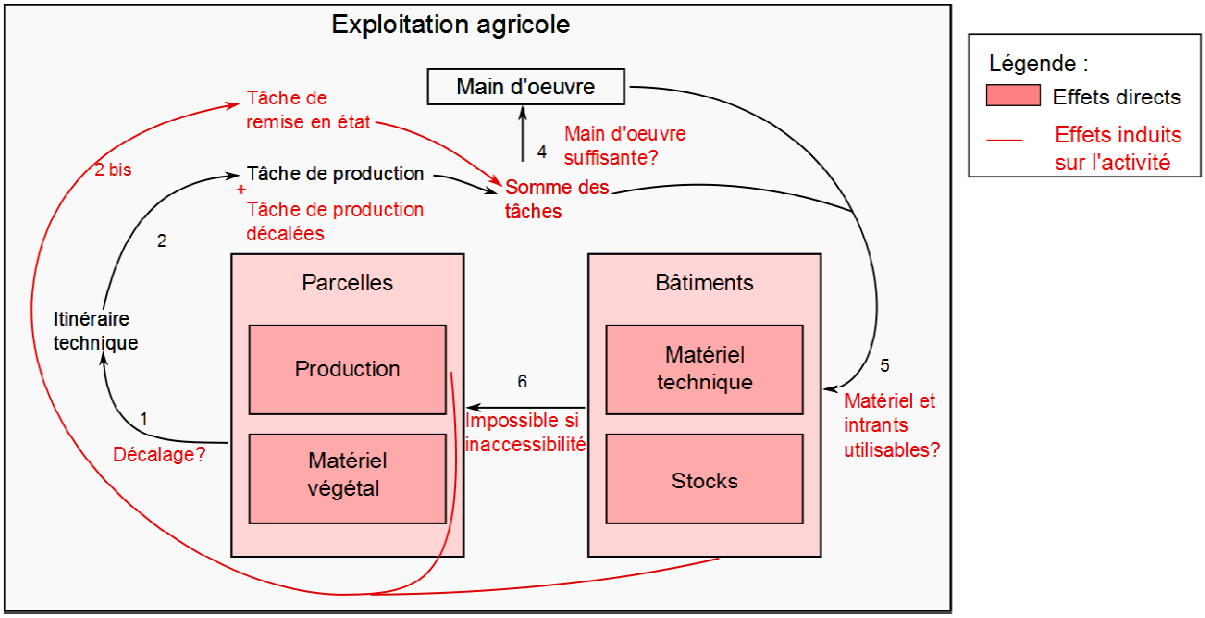


Figure 44 : Effets directs et induits de l'inondation sur l'exploitation agricole

L'inondation a des effets à plusieurs niveaux sur l'exploitation :

- Elle modifie l'état des composantes physiques et initie une chronologie de changement d'états dans le temps ;
- Elle perturbe les conditions de réalisation des tâches sur les parcelles non inondées pendant et après submersion ;
- Elle retarde certaines tâches prévues dans l'itinéraire technique et modifie les conditions de réalisation des tâches sur les parcelles qui ont été submergées.

4.4.3. Profils des exploitants et modes de réalisation

Dans la sous-section précédente, plusieurs catégories d'effets ont été identifiées dont deux résultent d'un déficit en termes de capital physique et de capital humain. Le fonctionnement de l'exploitation peut être perturbé du fait que le matériel et les intrants nécessaires pour la réalisation de certaines tâches ne sont pas disponibles ou que la quantité de travail nécessaire pour réaliser, à la fois les tâches de production et de remise en état, est trop importante par rapport à la main d'œuvre disponible sur l'exploitation. Nous considérons que les capitaux physique et humain déficients suite à l'inondation peuvent être substitués par du capital financier ou du capital social (ressources

externes). En termes concrets, au niveau de l'exploitation, la substitution de capital financier à du capital technique consiste à louer du matériel ou à faire appel à un prestataire de service alors que la substitution par le capital social permet de bénéficier de prêt de matériel. La substitution du capital humain par du capital financier consiste à employer de la main d'œuvre saisonnière quand la substitution par du capital social repose sur la main d'œuvre solidaire.

Nous définissons ainsi trois profils théoriques d'exploitant indiquant le niveau de capital social et financier mobilisable et conditionnant leur stratégie de remise en route[36] :

- faible capital social et financier,
- fort capital financier,
- fort capital social.

Ces profils déterminent les modes de réalisation disponibles en cas de contrainte. Il existe trois modes de réalisation possibles :

- Interne avec les ressources disponibles sur l'exploitation agricole
- Prestation faisant intervenir une ressource externe rémunérée (main d'œuvre saisonnière, location, prestation)
- Solidarité faisant intervenir une ressource externe non rémunérée (main d'œuvre solidaire, prêt de matériel)

4.5 Résultats attendus du modèle

Nous avons souhaité décrire les effets des inondations à travers les indicateurs suivants :

- le coût économique des dommages,
- le coût financier pour l'exploitant,
- le suivi dans le temps de l'état des composantes.

Principalement, le modèle a été développé pour évaluer les dommages évités par la mise en place de projets de gestion des inondations. Le premier indicateur est donc le montant total de dommages subis par une exploitation suite à l'occurrence d'un scénario d'inondation. Le montant total de dommages subis inclut les dommages directs sur les différentes composantes physiques et les dommages induits sur l'activité de l'exploitation.

[36] Le profil fort capital social et fort capital financier n'est pas traité car il dispose de plusieurs stratégies de remise en route et ne permet pas d'illustrer la différence de coût entre les différentes stratégies. Par ailleurs, il correspond à un exploitant qui aurait peu de contraintes pour sa remise en route.

Pour réaliser cette évaluation économique, nous faisons l'hypothèse que l'exploitation agricole est résiliente et revient après un certain temps à une situation comparable à sa situation initiale. Cette hypothèse est acceptable tant que l'exploitation agricole n'atteint pas une situation irréversible de faillite. Il nous est donc apparu important d'être en mesure de proposer, comme second indicateur, le coût financier défini comme le coût du dommage pour l'exploitant agricole. Cependant, cette thèse se limite à la proposition d'un indicateur financier et ne fait pas l'analyse de la faillite des exploitations en termes de trésorerie.

Enfin, le suivi chronologique de l'état des composantes physiques de l'exploitation est également envisagé et permet d'apporter des informations sur le temps mis par les composantes pour revenir à l'état normal.

4.6 Cadre d'évaluation des dommages

4.6.1. Evaluation des dommages directs

Les dommages sur les composantes physiques sont évalués par :

- le coût du retour à l'état initial, c'est-à-dire le coût de l'action mise en œuvre pour retrouver cet état normal (nettoyage, réparation, rachat…) ;
- la perte de valeur ajoutée si le retour à l'état initial est impossible (destruction irréversible) comme c'est le cas pour la production en cours sur la parcelle inondée et pour les stocks de produits conservés sur l'exploitation après récolte.

4.6.2. Evaluation des dommages induits sur l'activité

Les dommages induits sur l'activité sont évalués par la variation de valeur ajoutée liée :

- au coût d'opportunité d'un mode de réalisation alternatif d'une tâche ;
- à la variation du produit et des consommations intermédiaires induits par la non réalisation d'une tâche si aucun mode de réalisation alternatif n'est envisageable.

4.7 Synthèse des principales hypothèses du modèle EVA

Pour conclure ce chapitre, nous proposons, dans le tableau 10, un récapitulatif des principales hypothèses de modélisation.

Tableau 10 : Principales hypothèses du modèle de vulnérabilité

Structure et fonctionnement	L'exploitation est représentée comme un ensemble de composantes physiques en interrelation via l'organisation du travail sur l'exploitation. La planification de l'organisation du travail sur l'exploitation agricole en temps normal (hors inondation) est représentée par l'itinéraire technique de chaque production.
Comportement de l'agent	La rationalité de l'exploitant en phase de remise en route est une rationalité limitée qui vise à identifier en fonction des ressources disponibles (capitaux), une alternative pour revenir au modèle de fonctionnement en temps normal.
Analyse en termes de capitaux et substituabilité	L'analyse de la vulnérabilité de l'exploitation agricole est menée en considérant que l'exploitation dispose de capitaux internes et externes permettant son fonctionnement normal et conditionnant sa remise en route. Le capital financier (K_f) et le capital social (K_s) peuvent se substituer temporairement au capital humain (K_h) et au capital physique (K_p) pendant la phase de remise en route de l'exploitation. $K_f \Leftrightarrow K_p$ et $K_s \Leftrightarrow K_p$ $K_f \Leftrightarrow K_h$ et $K_s \Leftrightarrow K_h$
Profils et mode de réalisation	Trois profils d'exploitants sont définis en fonction de leur niveau de capital social et financier. Trois modes de réalisation sont envisageables pour poursuivre une tâche. La hiérarchie des modes de réalisation possibles pour l'exploitant est conditionnée par son profil.
Liens entre les composantes physiques et l'organisation	L'état des composantes et l'organisation du travail sont interdépendantes. Exemple : si un type de matériel n'est pas disponible (inaccessible, endommagé ou détruit) et requis pour la réalisation d'une tâche, un mode de réalisation alternatif doit être envisagé.
Aspects temporels	La temporalité de l'inondation est caractérisée par la date de début et de fin de l'inondation. La temporalité de l'exploitation agricole est principalement rythmée par les cycles de production qui correspondent dans le modèle à l'itinéraire technique et à la variation des stocks. Le croisement des temporalités de l'inondation et de l'exploitation conditionne la formation des dommages.

	Les dommages sont exprimés comme une fonction de la vulnérabilité V de l'enjeu et dépendent de la temporalité de l'exploitation et de l'inondation. $D = V (t_e, t_i, t_f)$ où D est le dommage total subi, V est la vulnérabilité, t_e correspond à la temporalité de l'exploitation, t_i est le moment de l'occurrence de l'inondation, t_f est le moment de la fin de l'inondation.
Conditions initiales et finales de modélisation	La simulation démarre au début d'un cycle de production pendant lequel un scénario d'inondation est appliqué. À la fin de la modélisation, l'exploitation retrouve une situation comparable à son état initial, c'est-à-dire que toutes les composantes physiques ont retrouvé un état normal comparable à leur état initial avant inondation.
Sorties attendues	Le premier indicateur est le dommage économique total (€) qui se compose des dommages directs sur les composantes de l'exploitation et les dommages induits sur l'activité. Le second indicateur est le dommage financier (€) pour l'exploitant. Le troisième indicateur est le suivi chronologique de l'état des composantes de l'exploitation agricole.
Evaluation des dommages économiques	Le dommage direct est évalué par le coût du retour à l'état initial ou la perte de valeur ajoutée. La perte de valeur ajoutée correspond à la variation de produit à laquelle est retranchée la variation de consommations intermédiaires (consommations engagées – consommations économisées) : Δ Valeur Ajoutée = Δ Produit - Δ Consommations Intermédiaires La valeur de la force de travail de l'exploitant et des employés permanents n'est pas retranchée de la perte de produit car nous faisons l'hypothèse qu'ils ne sont pas employés par un autre type d'activité suite à l'inondation. Concernant la main d'œuvre saisonnière, il est fait l'hypothèse qu'elle n'est également pas employée par ailleurs et ce coût n'est pas retranché à la perte de produit. Cependant, le modèle prévoit de pouvoir modifier cette hypothèse et de tenir compte du réemploi total ou partiel de la main d'œuvre saisonnière en considérant des hypothèses macroéconomiques. Le dommage induit est évalué par la perte de valeur ajoutée : – liée au surcoût induit d'une tâche exécutée selon un mode de réalisation alternatif ; – liée à l'absence d'exécution d'une tâche si aucun mode de réalisation alternatif n'est envisageable.

4.8 Conclusions

Ce chapitre présente notre modèle conceptuel d'évaluation de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations et la démarche adoptée pour atteindre cet objectif.

L'objectif de proposer une méthode d'évaluation des dommages permettant d'évaluer à la fois les projets de modification de l'aléa et de réduction de la vulnérabilité nous a amené à considérer une approche systémique prenant en compte les différentes composantes de l'exploitation et leurs interactions. Afin d'analyser la vulnérabilité, nous mobilisons quatre dimensions :

- la dimension physique qui constitue l'ensemble des composantes physiques ;
- la dimension organisationnelle qui permet d'appréhender l'organisation du travail sur l'exploitation ;
- la décision de l'exploitant, dans la cadre d'une rationalité procédurale, qui vise à se rapprocher du fonctionnement normal en fonction des ressources disponibles ;
- les ressources disponibles qui sont exprimées en termes de capital social ou financier.

Les effets directs résultent de l'endommagement des composantes physiques (dimension physique) et les effets induits résultent d'une perturbation de l'activité faisant intervenir les trois autres dimensions : organisation, décision et capitaux disponibles. D'un point de vue temporel, les effets sont considérés sur une période allant de l'occurrence de l'inondation jusqu'à la remise en route.

Nous supposons que certaines formes de capitaux sont substituables et conditionnent la remise en route. Par exemple, une exploitation ayant un capital social important, bénéficie de solidarité pour compenser les besoins en main d'œuvre ou en matériel.

Notre objectif n'est pas d'évaluer les capitaux social et financier des exploitations agricoles. Mais, l'hypothèse de substituabilité des formes de capitaux soulève plusieurs réflexions. Premièrement, nous supposons que le capital humain est substituable, lors de la remise en route, par du capital financier ou du capital social. Cela implique que le niveau de spécialisation de la main d'œuvre n'est pas pris en compte et que toutes les formes de main d'œuvre (main d'œuvre de l'exploitation, solidarité, main d'œuvre saisonnière) sont alors équivalentes. Or, certaines tâches, notamment les tâches prévues dans l'itinéraire technique, requièrent un certain niveau de qualification. Si cette hypothèse est acceptable sur un temps court comme la période de remise en route, elle ne peut pas être généralisée au fonctionnement en temps normal de l'exploitation.

Deuxièmement, l'utilisation du capital social comme substitut pose la question de l'accumulation et de la régénération de cette forme de capital. Ainsi, pour réellement mesurer l'évolution de ce stock de capital, il faudrait approfondir par exemple, l'investissement fait par l'exploitant pour entretenir son réseau social. On peut également s'interroger sur la capacité à maintenir le même

niveau de capital social en cas de sollicitation plus importante. Si l'exploitant est inondé de manière plus fréquente, par exemple dans le cas de restauration de zones d'expansion de crue ou de sur-inondation, bénéficiera t-il toujours de la même solidarité ?

Troisièmement, le système d'indemnisation des dommages agricoles dus aux inondations est en pleine évolution. Le souhait est de passer du système d'indemnisation « Calamité Agricole »vers l'assurance privée (cf. annexe 1). Le passage de l'indemnisation par le FNGCA à l'assurance privée, se justifie pour ses partisans par une meilleure indemnisation et une plus grande responsabilisation des bénéficiaires. Dans le cas idéal, le capital financier mobilisable par les exploitants suite à l'inondation serait donc plus important et faciliterait la remise en route. Cependant, la question qui reste encore en suspend résulte du taux de pénétration qu'atteindra l'assurance privée. Quelles seront les stratégies de remise en route des exploitants qui ne percevront plus d'indemnisation parce qu'ils n'auront pas souscrit d'assurance ?

Une autre piste de réflexion pour le développement ultérieur du modèle porte sur la prise en compte des interactions de l'exploitation avec les autres acteurs du territoire (filières amont et aval, autres exploitants agricoles). Le formalisme du modèle conceptuel permet d'envisager une modélisation de type SMA pour traiter cette question.

CHAPITRE 5. DESCRIPTION DU MODÈLE DE VULNÉRABILITÉ EVA

Ce chapitre décrit, en utilisant le formalisme Unified Modelling Language[37] :

- l'ensemble des composantes du modèle caractérisées par leurs attributs et les processus dans lesquels elles interviennent ;
- les processus d'ensemble régissant le fonctionnement de l'exploitation suite à l'inondation.

Nous utilisons le style `modele`, dans la suite du texte, pour décrire des éléments du modèle. Le lexique de l'ensemble de ces éléments est donné en annexe 4.

Nous nous attachons à décrire dans un premier temps, les composantes définies dans notre modèle avec leurs caractéristiques principales. Les principes généraux sont présentés avant les cas particuliers. Chaque composante est caractérisé par un état (normal, inondé, endommagé, en réparation…) qui évolue suite à l'inondation et pendant la remise en route de l'exploitation. Les changements d'états et les règles de transition entre ces états sont particulièrement détaillés. Ils jouent un rôle majeur pour évaluer les dommages directs sur les composantes physiques de l'exploitation agricole. La gestion des décisions suite à l'occurrence de l'inondation est assurée par l'entité décisionnelle `Exploitant` en fonction de son profil en termes de capital social et financier. Le coût associé aux modes de réalisation alternatifs après l'inondation est décrit et permet de calculer les dommages induits sur l'activité.

Une démarche d'utilisation du modèle pour l'évaluation de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations est ensuite présentée. Dans la section 5.4, le modèle de données nécessaires pour alimenter le modèle EVA est décrit. Puis, nous présentons les hypothèses de coût retenues pour une valorisation financière et économique des dommages. Enfin, les différentes sorties attendues sont listées.

[37] Bien que le modèle conceptuel utilise le formalise orienté objet, cette terminologie n'est pas utilisée pour qualifier le modèle car elle est souvent associée au langage de programmation et donc à l'implémentation qui est faite du modèle. Or dans notre cas, le langage d'implémentation pour l'application n'est pas un langage orienté objet mais le language fonctionnel R.

5.1 Structure générale du modèle

5.1.1. Liste et définition des objets utilisés dans le modèle de vulnérabilité

Notre modèle de vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations fait intervenir plusieurs objets en interactions. Les objets du modèle sont définis par des attributs et procédures caractéristiques. Les objets définis sont les suivants.

Le **territoire** (`Territoire`) correspond à une zone spatiale, et contient :

- L'**inondation** (`Inondation`), qui est définie par une distribution sur le territoire d'un ensemble de paramètres que sont la hauteur, la date d'occurrence et de fin et la vitesse,
- Les **éléments spatiaux** (`Element_Spatial`) qui correspondent à des zones spatiales où l'aléa d'inondation est homogène.

L'**exploitation agricole** (`Exploitation_Agricole`) est le système étudié et se compose des objets qui suivent dans cette liste :

- Les **composantes physiques** (`Composante_Physique`) constituent la structure de l'exploitation et sont nécessaires à son fonctionnement. Elles sont représentées par les objets suivants :
  - Les **bâtiments** d'exploitation (`Batiment`) autres que les bâtiments d'habitation, où sont localisés :
    - Les **stocks d'intrants** (`Stock_Intrant`) et **de produit** (`Stock_Produit`) de l'exploitation qui sont respectivement utilisés et générés sur l'exploitation agricole au cours du cycle de production ;
    - L'ensemble du **matériel technique agricole** (`Materiel`) spécifique en fonction des cultures pratiquées.
  - Les **parcelles** de l'exploitation (`Parcelle`), correspondant au capital foncier où sont localisés :
    - Le **matériel végétal** (`Materiel_Vegetal`) désignant le capital fixe végétal, support biologique pérenne de certaines cultures, par exemple la vigne ou les vergers ;
    - La **production végétale** (`Production`) en cours qui correspond au produit agricole cultivé sur les parcelles.
- L'**itinéraire technique** (`Itineraire_Technique`) est spécifique à un type de culture et prévoit l'ensemble des **tâches** devant être réalisées au cours du cycle de production pour atteindre un rendement cible.

- Les **tâches** (`Tache`) sont les actions devant être réalisées sur l'exploitation et se décomposent en :
    - **tâches de production** (`Tache_Production`) correspondant à la liste des tâches prévues par l'itinéraire technique ;
    - **tâches de remise en état** (`Tache_Inondation`) qui sont des tâches devant être mise en œuvre suite à l'inondation pour permettre aux composantes physiques, lorsque cela est possible, de retrouver leur état normal[38],
- L'**exploitant** (`Exploitant`) est l'entité décisionnelle qui gère les procédures sur l'exploitation agricole en fonction de l'état des composantes physiques, de l'ensemble des tâches à accomplir et des ressources mobilisables (capital financier ou social).
- Les **ressources externes** mobilisables pour la réalisation d'une tâche (`Ressource_Externe_Tache`) correspondent au réseau de solidarité ou aux prestataires que l'exploitant mobilise pour poursuivre l'activité de l'exploitation.

Ces objets sont liés par des relations de localisation, d'héritage et de composition que nous décrivons dans les sections suivantes.

5.1.2. Relations d'héritage : propriétés communes

Une relation d'héritage permet d'ordonner des classes d'objets ayant des propriétés communes selon un niveau d'abstraction croissante. Les flèches à têtes blanches désignent le sens de la relation d'héritage. La principale relation d'héritage dans le modèle concerne les composantes physiques. La figure 45 montre que les composantes physiques ont toutes des attributs et mode de fonctionnement communs dont héritent les classes : bâtiment, parcelle, matériel, stock, matériel végétal et production.

[38] Les différents états attribués aux composantes physiques et les règles de transition entre ces différents états sont précisément décrits dans les sections 5.2 et 5.3.

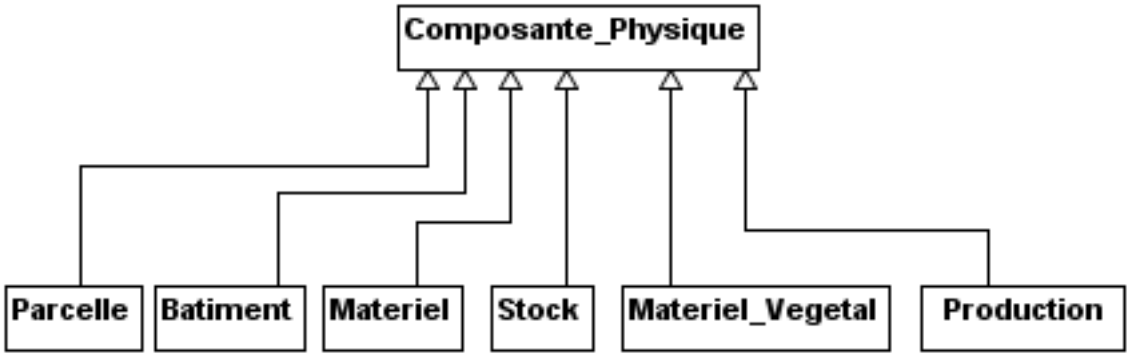


Figure 45 : Relations d'héritage pour les composantes physiques

Une seconde relation d'héritage existe au niveau des tâches (figure 46). Les tâches de production et de remise en état partagent des caractéristiques communes qui sont décrites à la section ? (p146).

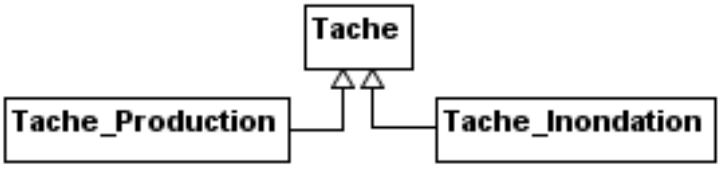


Figure 46 : Relations d'héritage entre les tâches

5.1.3. Relations de composition : construction d'ensemble

Certains objets du modèle sont liés par des relations de composition, c'est-à-dire que certains objets constituent les éléments d'un ensemble plus large.

Trois relations de composition sont présentes dans le modèle. Tout d'abord, d'un point de vue spatial, le territoire est représenté comme une composition d'éléments spatiaux. Ensuite, d'un point de vue structurel et spatial, l'exploitation agricole est un ensemble de composantes physiques. Enfin, d'un point de vue organisationnel, l'itinéraire se définit comme un ensemble de tâches de production.

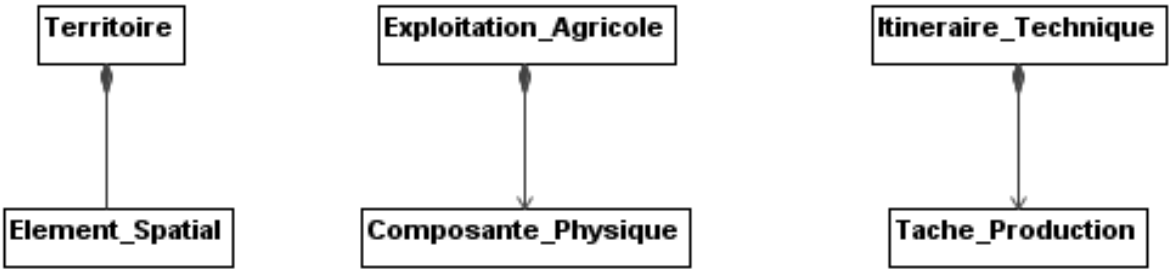


Figure 47 : Relations de composition

5.1.4. Relations d'association : description de la localisation spatiale

Certains objets du modèle sont liés par des relations d'association définissant leur localisation. La figure 48 donne une représentation sous forme de diagramme de classe de ces relations. Les

éléments spatiaux sont localisés sur le territoire, ce qui permet d'envisager le croisement des répartitions spatiales de l'inondation et de l'exploitation agricole.

Ensuite, les différentes composantes physiques de l'exploitation agricole sont organisées selon des liens de localisation. Les bâtiments et parcelles sont localisés sur des éléments spatiaux et contiennent eux-mêmes d'autres composantes physiques. Le matériel et les stocks sont localisés dans les bâtiments. La production et le matériel végétal sont localisés sur les parcelles.

L'objet sur lequel un autre objet est localisé est appelé `localisateur`.

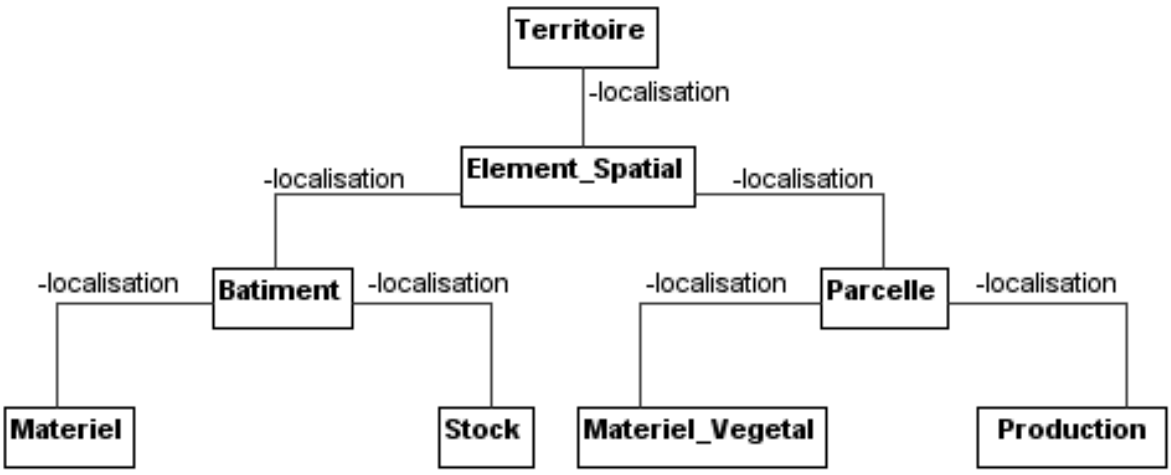


Figure 48 : Diagramme de classe des relations de localisation utilisées dans le modèle EVA

5.1.5. Synthèse de la structure du modèle

Le diagramme de classe présenté à la figure 49 présente les objets définis dans le modèle ainsi que les principaux attributs et procédures qui leur sont associés.

Les relations brunes et vertes sont des relations permanentes. Les liens bruns désignent les relations de localisation. Le lien vert montre que l'itinéraire technique est lié à un type de culture. Les relations bleues mettent en évidence que les tâches de remise en état sont induites par le changement d'état des composantes physiques après inondation.

Les objets présentés dans la figure 49 font l'objet d'une description détaillée dans les sections suivantes.

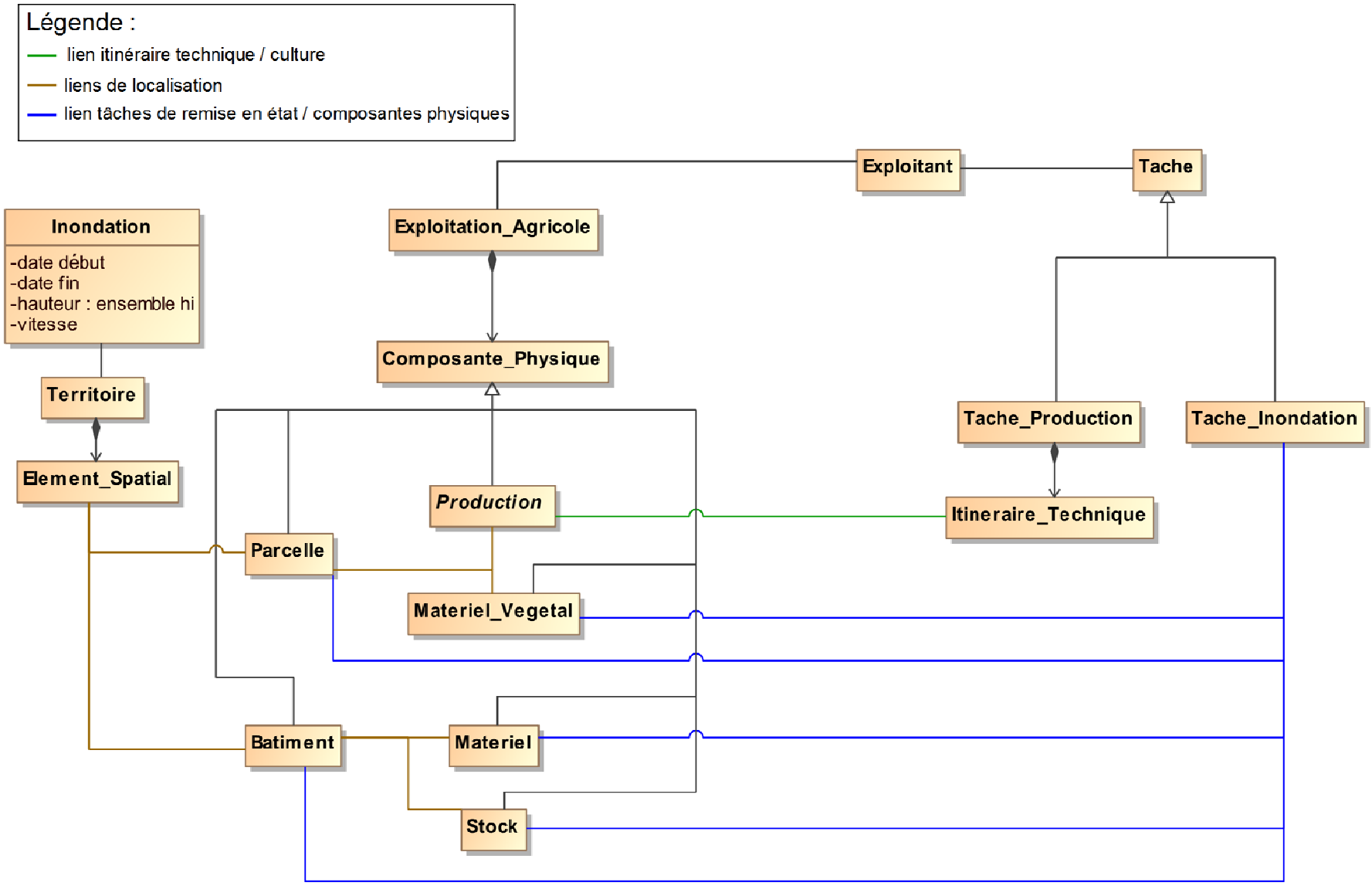


Figure 49 : Diagramme de classe du modèle de vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations

5.2 Territoire, éléments spatiaux et inondation

Le `Territoire` est constitué d'un ensemble d'éléments spatiaux.

5.2.1. Les éléments spatiaux

- *Description*

Les instances de la classe `Element_Spatial` permettent de propager le scénario d'inondation aux composantes physiques de l'exploitation agricole.

- *Localisation*

Le localisateur d'un `Element_Spatial` est le `Territoire`. Le localisateur d'une `Composante_Physique` est un `Element_Spatial`.

- *Etats*

Un `Element_Spatial` ne subit pas d'endommagement suite à l'inondation. Les états atteints se réduisent à `Normal` ou `Inonde` (figure 50). L'état `Inonde` de l'`Element_Spatial` implique son inaccessibilité.

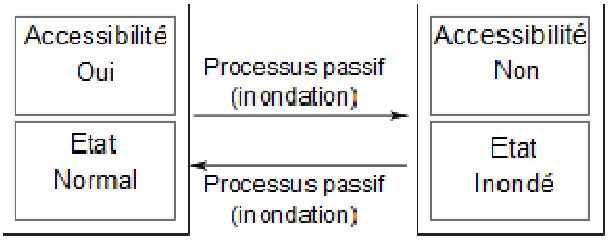


Figure 50 : Diagramme d'état des éléments spatiaux

5.2.2. L'inondation

Les instances de la classe `Inondation` correspondent à des scénarios d'inondation.

L'`Inondation` est caractérisée par quatre attributs que sont :

- Une date de début (`Debut_Inondation`)
- Une date de fin (`Fin_Inondation`)
- Une vitesse (`Vitesse_Inondation`)
- Un ensemble de hauteurs d'eau (`Hauteur_Inondation`)

L'`Inondation` permet d'associer à chaque `Element_Spatial`, un scénario d'inondation qui est homogène sur le territoire en termes de date de démarrage et de fin mais varie en termes de hauteurs d'eau et de vitesse.

5.3 L'exploitation agricole : composantes physiques, tâches, ressources externes et exploitant

5.3.1. Description de la classe `Exploitation_Agricole` et de ses attributs

L'`Exploitation_Agricole` est considérée comme un ensemble de composantes physiques localisées, en interaction à travers l'organisation du travail, induite par l'itinéraire technique des cultures, et gérée par l'Exploitant.

L'`Exploitation_Agricole` a pour attribut :

- sa Surface Agricole Utilisée (SAU) totale (`Surface`),
- une quantité de main d'œuvre disponible (MO_{EA})

La SAU correspond à la somme des surfaces des parcelles de l'exploitation agricole. Les sous-sections suivantes décrivent les objets constitutifs de l'exploitation agricole.

5.3.2. Les composantes physiques

- *Attributs communs*

Les composantes physiques de l'exploitation agricole ont toutes en commun de posséder les cinq attributs caractéristiques suivants :

- leur localisation désignée par le `localisateur` et dont les relations sont précisées à la figure 48 ;
- leur fonction d'endommagement permettant de décrire les changements qualitatifs d'état et l'endommagement quantitatif ;
- leur état[39] ;
- leur accessibilité qui dépend de leur état et de l'accessibilité du `localisateur` (une composante est inaccessible si son `localisateur` est inaccessible);
- leur utilisabilité qui c résulte de la combinaison de l'état (fonctionnalité) et de l'accessibilité. Nous décrivons dans la section ?, les combinaisons d'états et d'accessibilité entraînant une inutilisabilité.

[39] Les différents états et transition sont décrits dans les sous-section suivante (5.3.4 à 5.3.5).

- *Procédures communes*

Trois procédures sont appliquées aux composantes physiques :

- L'endommagement est défini par la fonction d'endommagement suivant les caractéristiques de l'aléa subi. Il permet de définir l'état après inondation.
- Des tâches de remise en état associées au niveau d'endommagement des composantes physiques sont définies et viennent s'ajouter à la liste des tâches à réaliser par l'exploitant.
- Une chronologie des états en fonction du temps est établie en fonction de l'endommagement et des tâches de remise en état.

- *Transitions*

Une composante physique est définie par son état qui évolue dans le temps en fonction de processus passif (inondation) ou actif (tâches).

Les différents états que peut adopter une composante physique sont les suivants[40] :

- `Normal` qui est l'état de référence avant inondation ;
- `Inonde` pendant que la composante physique est inondée ;
- `Sali` qui correspond à un premier niveau d'endommagement ;
- `Endommage` qui correspond à un second niveau d'endommagement ;
- `Detruit` qui correspond à un troisième niveau d'endommagement ;
- `En_Nettoyage` pendant que la tâche de nettoyage est réalisée ;
- `En_Reparation` pendant que la tâche de réparation est réalisée ;
- `En_Rachat` pendant que la tâche de rachat est réalisée.

La transition de l'état normal vers les états dégradés (`Sali, Endommage et Detruit`) est un mécanisme passif qui dépend de la fonction d'endommagement. Par contre, le passage d'un état dégradé à un état normal requiert la mise en œuvre d'un processus actif par les tâches de remise en état (`Tache_Inondation`). Enfin, avant de revenir à un état `Normal`, la composante doit repasser par un état intermédiaire (`En_Nettoyage`, `En_Reparation`, `En_Rachat`) faisant référence à une tâche de remise en état. Le temps pendant lequel la composante reste dans ces états dépend du temps de réalisation de la tâche de remise en état correspondante. Par hypothèse, les actions de réparation et de rachat sont obligatoirement réalisées par des prestataires. Des temps d'indisponibilité sont donc associés aux composantes pour les états `En_Reparation` et `En_Rachat`.

[40] Ces différents états ne sont pas tous atteints par l'ensemble des composantes physiques. Les états caractéristiques de chaque composante sont précisés dans les compléments de description apportés aux composantes physiques.

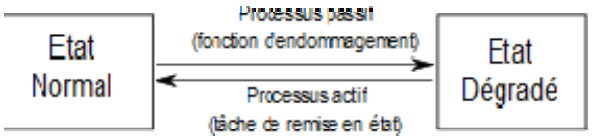


Figure 51 : Conditions des transitions entre les états des composantes physiques

Nous faisons l'hypothèse que le coût du dommage direct associé à une composante physique est évalué par le coût de restauration permettant un retour à l'état normal. Notons que pour certaines composantes (culture et stock de produit), la destruction est un processus irréversible. L'état normal est retrouvé au cycle de production suivant.

- *Définition de l'utilisabilité*

La notion d'utilisabilité, développée en ergonomie, est définie par la norme ISO 9241-11. Elle prévoit qu'« un système est utilisable lorsqu'il permet à l'utilisateur de réaliser sa tâche avec efficacité, efficience et satisfaction dans le contexte d'utilisation spécifié ».

Dans notre approche de modélisation, la notion d'utilisabilité d'une composante physique correspond à la possibilité pour l'exploitant d'accéder et d'utiliser un objet fonctionnel, i.e. qui lui permette de réaliser la tâche souhaitée. Nous adoptons une conception binaire : la composante est utilisable ou inutilisable. L'utilisabilité dépend de l'accessibilité et de l'état des composantes physiques (fonctionnalité) :

- tant que la composante est inaccessible, elle est inutilisable quelque soit sont état (cas (1) figure 52) ;
- la composante n'est pas utilisable si son état est `Endommage`, `Detruit`, `En_Reparation` et `En_Rachat`. Par contre, elle reste utilisable dans l'état `Sali` ou `En_Nettoyage` (cas (2) figure 52).

Une composante physique est donc utilisable si elle est à la fois accessible et dans un état `Normal`, `Sali` ou `En_Nettoyage`. La figure 52 montre les différentes combinaisons d'état et d'accessibilité entraînant une inutilisabilité de la composante physique.

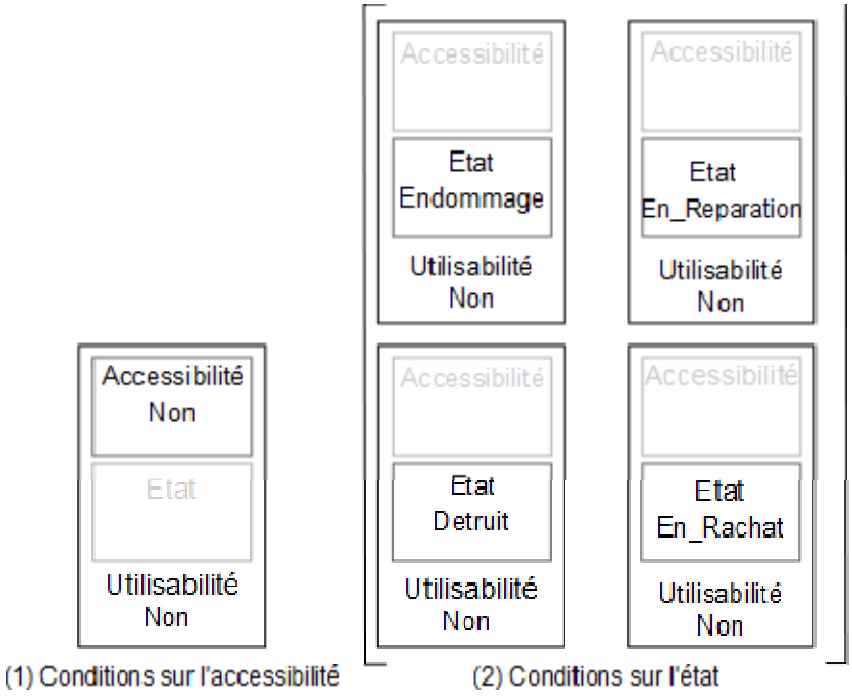


Figure 52 : Conditions déterminant l'utilisabilité des composantes physiques

5.3.3. Les parcelles

- *Description*

Les instances de la classe `Parcelle` correspondent à l'ensemble des parcelles d'une exploitation.

La `Parcelle` a un attribut caractéristique supplémentaire : le temps de ressuyage qui correspond au temps nécessaire pour le drainage des sols en fonction de leur texture. Ce temps de ressuyage vient s'ajouter avant que les parcelles ne redeviennent accessibles. Il est lié principalement au type de sol mais peut également être influencé par des actions humaines (pompage).

- *Localisation*

Le `localisateur` d'une `Parcelle` est une `Element_Spatial`. Elles sont le `localisateur` du `Materiel_Vegetal` et de la `Production` en cours.

- *Etats*

L'introduction du temps de ressuyage nous amène à définir un état supplémentaire pour les parcelles qui est l'état `En_Ressuyage`.

Les états potentiellement atteints par les parcelles dépendent de l'endommagement du sol. La fonction d'endommagement utilisée permet de qualifier qualitativement trois états : `Normal`, `Sali`, `Endommagé`. La liste des états potentiels des parcelles est donc :

- `Normal` ;
- `Inonde` ;

- `En_Ressuyage`, pendant le temps de ressuyage de la parcelle ;
- `Sali` ;
- `Endommage` ;
- `En_Nettoyage` qui correspond au nettoyage (enlèvement dépôts, débris…) ;
- `En_Reparation` qui correspond à la remise en état des sols (travail du sol, nivelage…).

▪ *Utilisabilité*

L'état `En_Ressuyage` implique l'inutilisabilité des parcelles. Par ailleurs, contrairement aux autres composantes, l'état `En_Reparation` n'implique pas l'inutilisabilité. Le diagramme d'utilisabilité des parcelles est donné figure 53.

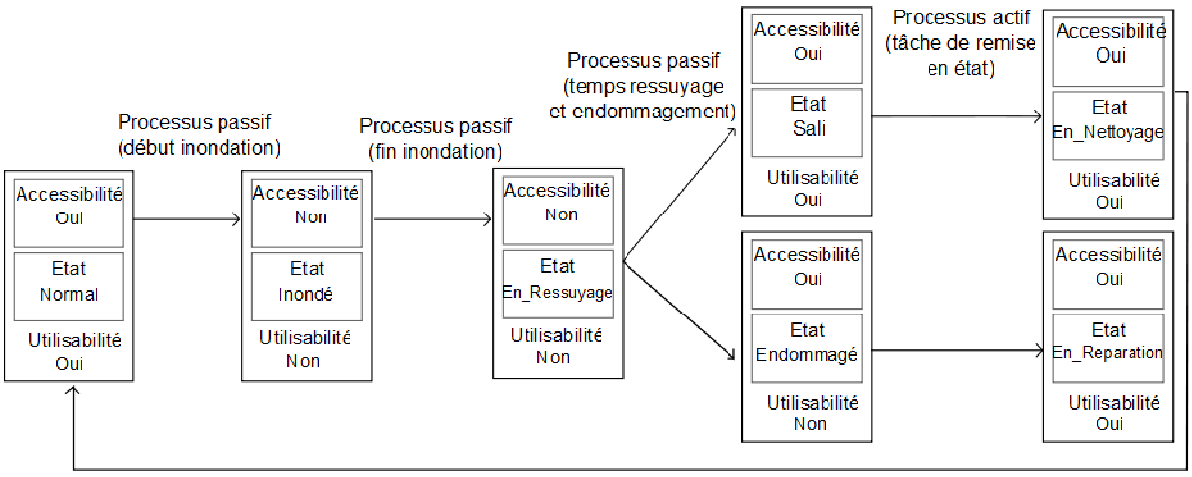


Figure 53 : Diagramme d'état des parcelles

5.3.4. Le matériel végétal

▪ *Description*

Les instances de la classe `Materiel_Vegetal` correspondent aux supports pérennes de la production en cours sur la parcelle. Il s'agit par exemple des arbres constituant un verger ou des vignes constituant un vignoble. Le matériel végétal n'est pas présent dans toutes les exploitations agricoles. Par exemple, dans une exploitation pratiquant uniquement la culture céréalière, il n'y a pas de matériel végétal.

Le `Materiel_Vegetal` présente la caractéristique particulière de ne pas pouvoir être reconstitué en un seul cycle de production s'il est détruit. Les actions d'arrachage et de replantation sont nécessaires. Ensuite, la production n'atteint à nouveau le rendement initial qu'au bout de plusieurs années. Par exemple, pour un verger, le temps de retour à une production normale est d'au moins trois ans après plantation.

- *Localisation*

Le `localisateur` du `Materiel_Vegetal` est la `Parcelle`.

- *Etats*

Les états pouvant être atteints par le `Materiel_Vegetal` sont :

- `Normal` ;
- `Inonde` ;
- `Detruit` ;
- `En_Rachat`, correspondant à la phase allant de la replantation jusqu'au retour à une production normale.

- *Utilisabilité*

Le diagramme d'utilisabilité du `Materiel_Vegetal` est donné figure 54 .

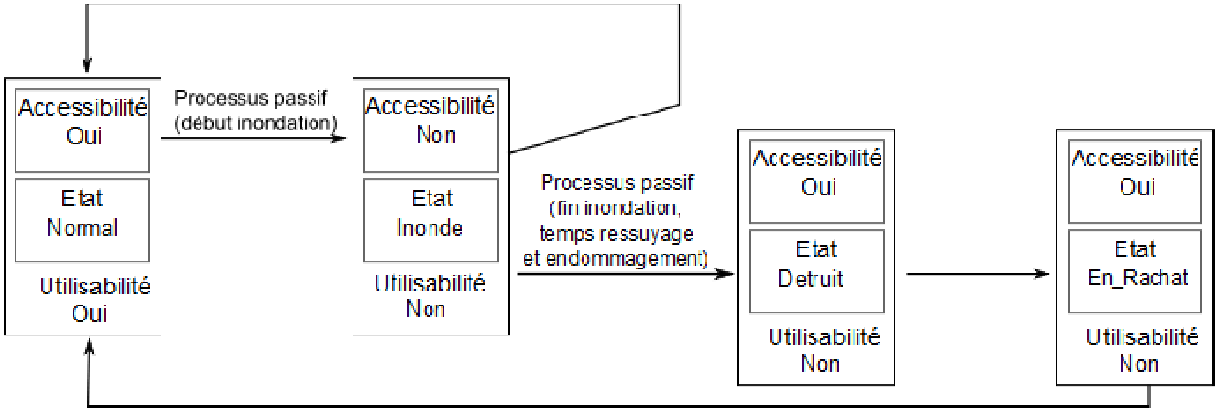


Figure 54 : Diagramme d'état du matériel végétal

5.3.5. Production en cours sur les parcelles

- *Description*

La classe `Production` est constituée des différents types de production présents sur l'exploitation (blé, salade, pomme…).

- *Localisation*

Le `localisateur` de la `Production` est la `Parcelle`.

- *Etats*

Trois états seulement sont potentiellement atteints par la composante production : `Normal`, `Inonde` ou `Detruit` (figure 55). La fonction d'endommagement permet d'associer à un scénario d'inondation un pourcentage de destruction. Lorsque la production est détruite, cet état est irréversible, c'est-à-dire qu'aucune action ne peut être mise en œuvre pour revenir à l'état normal.

Cet état est à nouveau atteint au début du cycle de production suivant. Le dommage est évalué par la perte de valeur ajoutée associée.

- *Utilisabilité*

Le diagramme d'utilisabilité de la `Production` est donné figure 55.

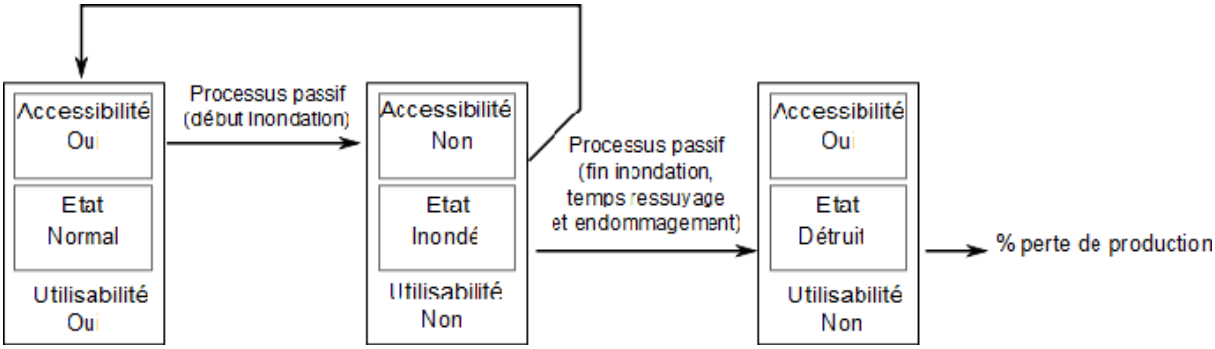


Figure 55 : Diagramme d'état de la production en cours

5.3.6. Les bâtiments

- *Description*

Les instances de la classe `Batiment` correspondent à l'ensemble des bâtiments de l'exploitation autres que les bâtiments d'habitation.

La fonction d'endommagement associée aux bâtiments repose sur l'hypothèse que les inondations n'endommagent pas la structure du bâtiment[41]. Le seul endommagement considéré dans les bâtiments agricoles est le niveau de souillure dû à l'inondation en fonction de la hauteur d'eau.

- *Localisation*

Le `localisateur` d'un `Batiment` et un `Element_Spatial`. Un `Batiment` est le `localisateur` du `Materiel`, du `Stock_Intrant` et du `Stock_Produit`.

- *Etats*

Les bâtiments atteignent potentiellement quatre états : `Normal`, `Inonde`, `Sali`, `En_Nettoyage`.

[41] Cette hypothèse est acceptable, selon les experts consultés, pour les bâtiments agricoles.

- *Utilisabilité*

Le diagramme d'utilisabilité de la composante `Batiment` est donné figure 56. Pour retrouver son état normal, le bâtiment doit être nettoyé. Le temps de nettoyage nécessaire dépend du niveau de souillure. Pendant ce temps de nettoyage, les bâtiments sont toujours utilisables pour venir, par exemple, chercher du matériel ou des stocks avant que le nettoyage n'ait été achevé.

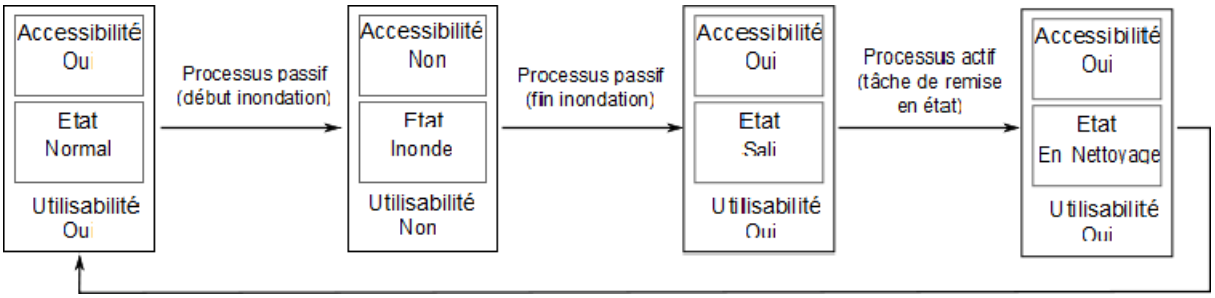


Figure 56 : Diagramme d'état des bâtiments

5.3.7. Le matériel agricole

- *Description*

Les types et nombre de matériels présents sur une exploitation dépendent de la SAU et des cultures pratiquées. Le `Materiel` peut être surélevé à l'intérieur du `Batiment`. La hauteur de surélévation est un attribut de cette composante et permet de calculer la hauteur d'eau qui atteint effectivement le matériel. Celle-ci correspond à la hauteur d'eau dans le bâtiment à laquelle est soustraite la hauteur de surélévation.

Un second attribut supplémentaire est associé à la classe `Materiel`. Il s'agit du coût d'utilisation horaire de chaque type de matériel, noté C_m.

- *Localisation*

Le `Materiel` est localisé dans un `Batiment`.

- *Etats*

Les états potentiellement atteints par la composante « matériel » sont (figure 57) :

- `Normal ;`
- `Inonde ;`
- `Endommage ;`
- `Detruit ;`
- `En_Reparation ;`
- `En_Rachat.`

- *Utilisabilité*

Le diagramme d'utilisabilité de la composante `Materiel` est donné figure 57.

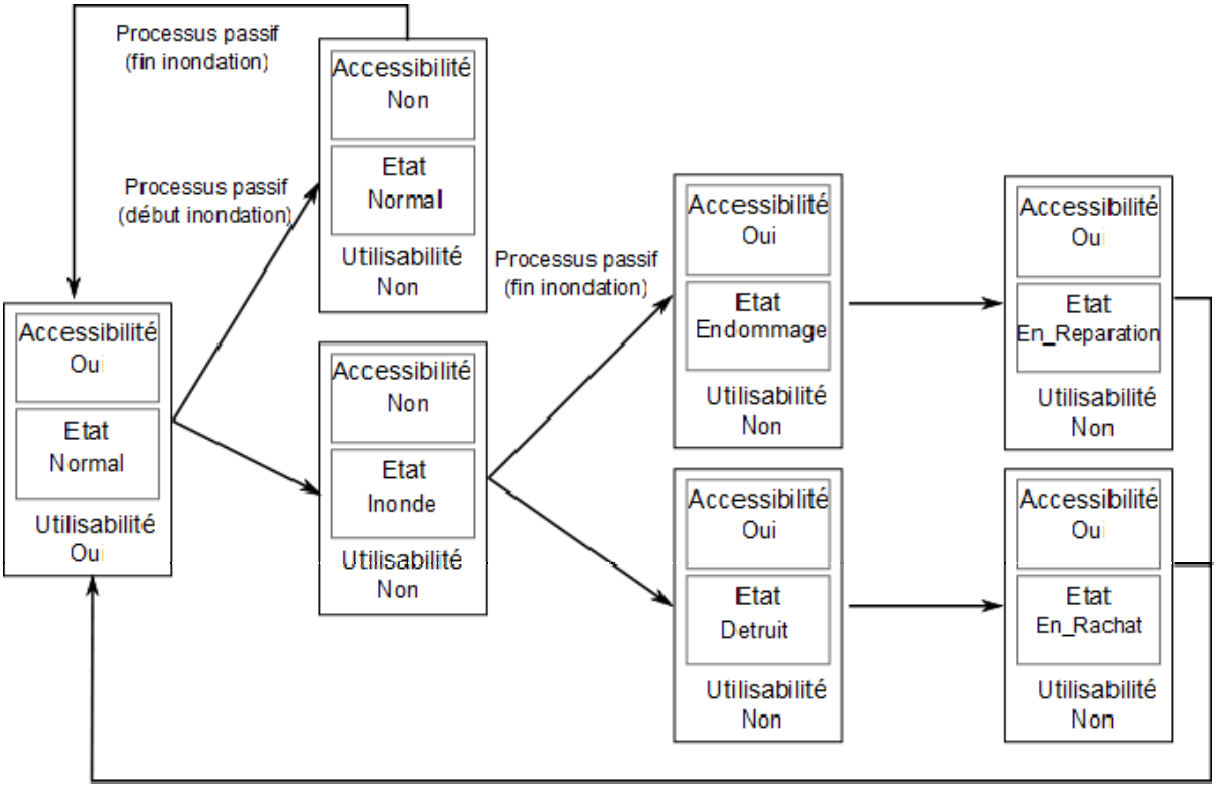


Figure 57 : Diagramme d'état des matériels

5.3.8. Stocks d'intrants et de produits

- *Description*

Les instances de la classe `Stock_Intrant` correspondent aux différents intrants présents sur l'exploitation (engrais, pesticides, herbicides, semences…). Les instances de la classe `Stock_Produit` correspondent aux produits stockés sur l'exploitation (produits bruts ou transformés).

Les stocks d'intrants et de produit possèdent deux attributs spécifiques : une hauteur de surélévation et une quantité, qui varie en fonction du temps.

Pour chaque instance de la classe `Stock_Intrant`, un coût unitaire correspondant au coût d'achat, noté C_s, est associé.

- *Localisation*

Le localisateur de `Stock_Intrant` et `Stock_Produit` est un `Batiment`.

- *Etats*

Les états potentiellement atteints par les stocks d'intrants sont :

- `Normal ;`
- `Inonde ;`
- `Detruit ;`
- `En_Rachat.`

Les stocks d'intrants sont rachetés suite à leur destruction. Le coût du dommage est estimé par le coût de rachat, c_s.

Les états potentiellement atteints par les stocks de produit sont

- `Normal ;`
- `Inonde ;`
- `Detruit.`

Nous considérons la destruction des stocks de produits comme un phénomène irréversible. Le dommage direct est estimé par la perte de valeur ajoutée correspondante.

- *Utilisabilité*

Les diagrammes d'états des stocks d'intrants et de produits sont donnés respectivement figure 58 et figure 59.

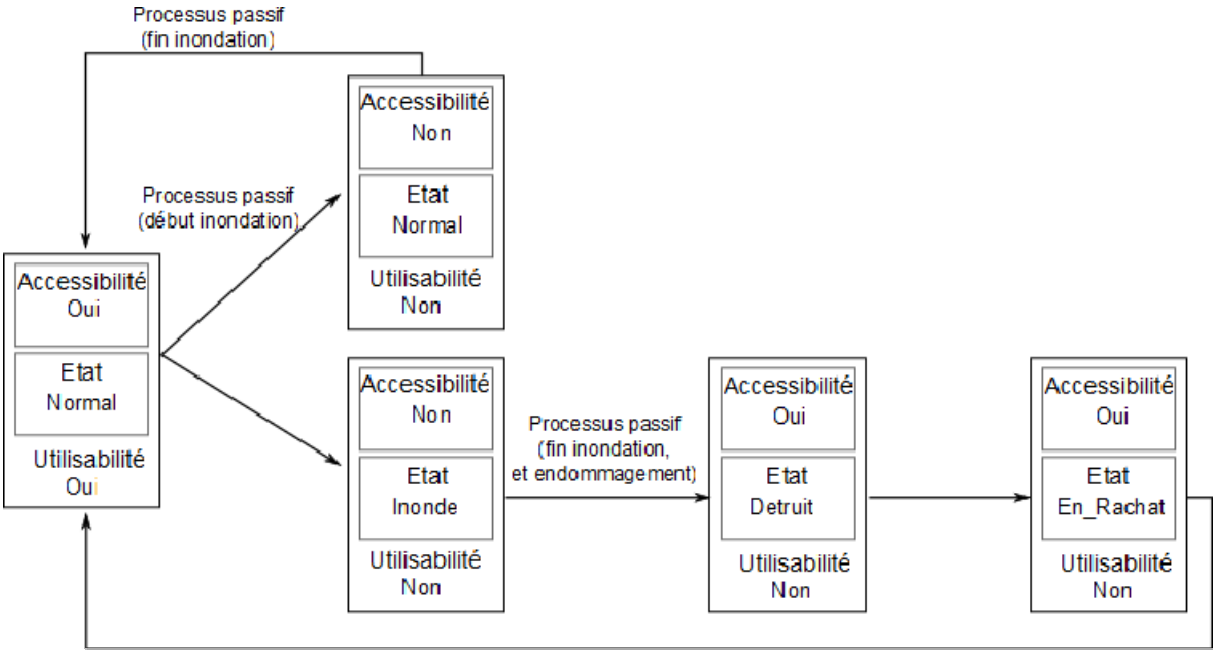


Figure 58 : Diagramme d'état du stock d'intrants

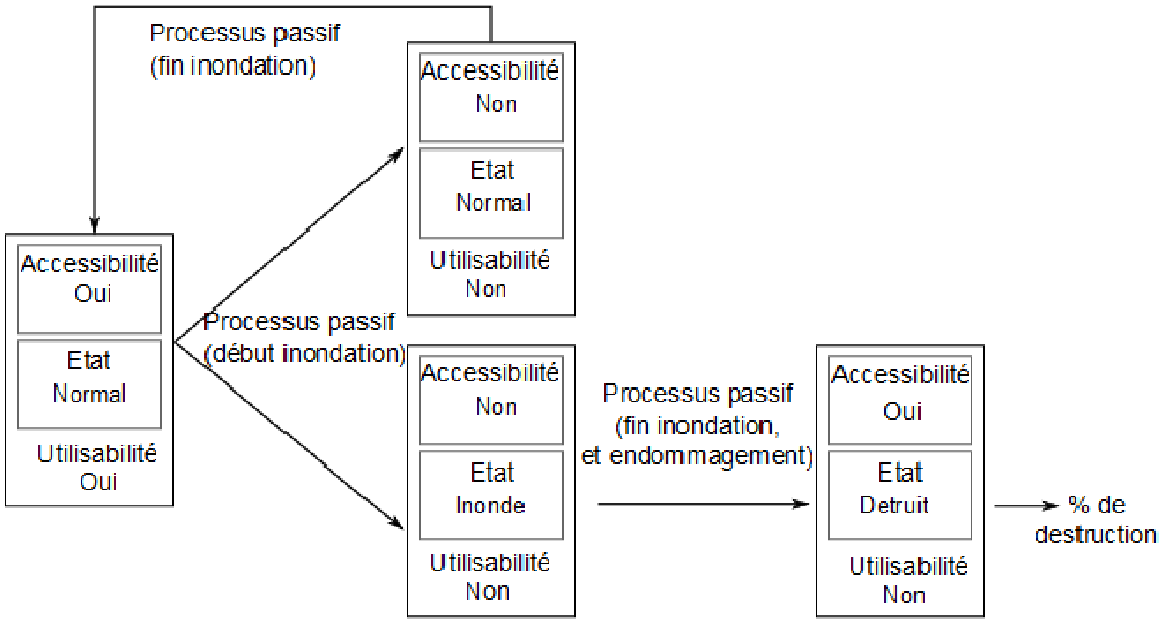


Figure 59 : Diagramme d'état du stock de produits

5.3.9. Tâches

- *Caractéristiques des tâches*

Les tâches se caractérisent par six attributs :

- un `localisateur` qui permet de déterminer le lieu où doit être réalisée la tâche et qui peut être une parcelle ou un bâtiment ;
- la date de démarrage (`Tache_Debut`, notée $t_{d,T}$) désignant la date à partir de laquelle la tâche peut commencer à être réalisée ;
- la date de fin (`Tache_Fin`, notée $t_{f,T}$) désignant la date au-delà de laquelle il n'est plus possible de réaliser la tâche;
- le temps de travail total nécessaire pour réaliser la tâche (`Tache_Travail`, noté d_T), en heure par hectare, qui est réparti entre les dates de démarrage et de fin,
- la liste des matériels nécessaires (`Tache_Materiel`, noté $\mathcal{M}_T$) pour que la tâche puisse être réalisée,
- la liste des intrants nécessaires (`Tache_Intrant`, noté $\mathcal{S}_T$) désignant la liste et la quantité (q_s) de chaque type d'intrant nécessaire à la réalisation de la tâche.

Les attributs permettent non seulement, de connaître les ressources nécessaires pour la réalisation des tâches mais aussi d'y associer un coût.

- *Conditions de réalisation des tâches*

Deux conditions sont nécessaires pour qu'une tâche puisse être réalisée :

(1) la date de fin doit être antérieure à la date à laquelle le `localisateur` devient utilisable ;

(2) un mode de réalisation doit pouvoir être mis en œuvre.

Les modes de réalisation sont définis au niveau de l'exploitant qui est l'objet permettant de faire le bilan de l'ensemble des tâches à réaliser et des ressources disponibles en fonction de son profil (sous-section 5.3.11, p 148).

- *Tâches de production et itinéraire technique*

Les tâches de production ont deux attributs supplémentaires :

- un coefficient de perte de rendement, δ_T, qui détermine la perte de rendement en cas de non réalisation de la tâche ;
- un coefficient de non réalisation θ_T lorsque la tâche n'a pas pu être totalement réalisé. θ_T prend les valeurs suivantes :
- $\theta_T = 0$ si $t_{d,I} > t_{d,T}$ ou si $t_{f,I} < t_{d,T}$ (cas 1, figure 60) ;
- $\theta_T = 1$ si $t_{d,I} < t_{d,T}$ et si $t_{f,I} > t_{f,T}$ (cas 3, figure 60) ;
- $\theta_T = 1 - a/k$ avec a le temps de travail réalisé et k, le temps de travail total nécessaire si $t_{d,I} > t_{d,T}$ et si $t_{f,I} > t_{f,T}$ (cas 3, figure 60) ;
- θ_T dépend des modes de réalisation alternatifs disponibles et de la disponibilité des ressources internes si $t_{f,I} < t_{f,T}$.

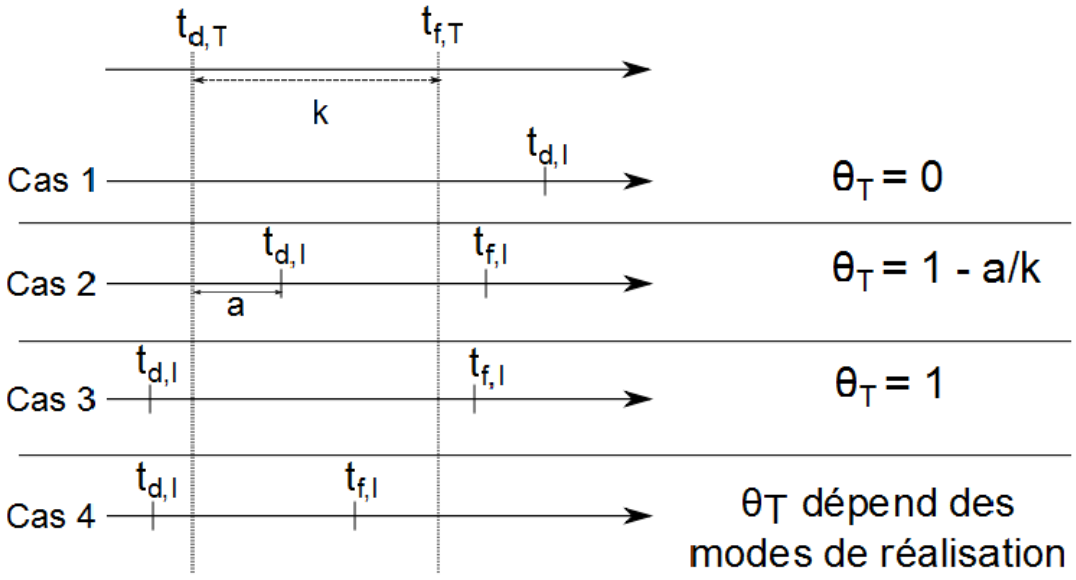


Figure 60 : Détermination du taux de non réalisation des tâches de production

- *Tâches de remise en état*

Les tâches de remise en état sont créées suite à l'inondation en fonction de l'endommagement des composantes physiques. Le tableau 11 présente une description des tâches de remise en état mises en œuvre suite au changement d'état des composantes. La date de démarrage des tâches de remise en état est déterminée par la date à laquelle la composante ciblée est accessible. Certaines tâches dépendent d'un prestataire externe et un délai de réalisation (`Delai_Realisation`) est introduit.

Tableau 11 : Description des tâches de remise en route devant être effectuées en fonction des états atteints par les composantes

Classe	Etat	Tache_Inondation	Tache_Debut
Batiment	Sali	Nettoyage	Accessibilité Batiment
Stock_Intrant	Detruit	Rachat	Accessibilité Batiment
Materiel	Endommage	Reparation	Accessibilité Batiment
Materiel	Detruit	Rachat	Accessibilité Batiment
Parcelle	Sali	Nettoyage	Accessibilité Parcelle
Parcelle	Endommage	Nivelage	Accessibilité Parcelle
Materiel_Vegetal	Detruit	Arrachage	Accessibilité Parcelle
Materiel_Vegetal	Detruit	Replantation	Accessibilité Parcelle

5.3.10. Ressources externes mobilisables

L'`Exploitant` a la possibilité de mobiliser des ressources externes pour la réalisation des tâches. Elles sont caractérisées par :

- leur type : main d'œuvre, le matériel, les intrants ou une combinaison de ces types,
- leur provenance : solidarité (`Solidarite`) ou réalisation d'un service rémunéré (`Prestation`),
- leur coût.

5.3.11. L'Exploitant

- *Attributs de la classe `Exploitant`*

L'`Exploitant`, entité décisionnelle de l'exploitation agricole, possède deux attributs caractéristiques :

- un profil (`Profil`) en termes de capitaux social et financier,
- des modes de réalisation (`Mode_Realisation`).

- *Profils d'`Exploitant`*

Trois profils d'exploitants sont retenus (tableau 12). Nous considérons que les capitaux physique et humain sont temporairement substituables, dans la période de remise en route, par du capital

financier ou du capital social. Suivant le niveau de capitaux financier et social mobilisables par l'exploitant, différentes stratégies de remise en route sont envisagées.

Le profil 1 correspond à un exploitant ne bénéficiant pas de solidarité et ne disposant pas de ressources financières propres ou externes pour financer la poursuite de l'activité.

Le profil 2 correspond à un exploitant disposant de réserves financières propres (provisions, épargne personnelle) ou externes (capacité d'endettement, assurance) lui permettant de financer la poursuite de l'activité[42].

Le profil 3 correspond à un exploitant bénéficiant d'une solidarité en termes de main d'œuvre, du matériel ou des intrants, pouvant être utilisée pendant la remise en route.

Tableau 12 : Définition des profils de capitaux social et financier des exploitations agricoles

Profil	Niveau de capital social	Niveau de capital financier	Conséquences
Profil 1 (P1)	Faible	Faible	Ne bénéficie pas de solidarité Ne dispose pas de trésorerie et de possibilité d'emprunt
Profil 2 (P2)	Faible	Fort	Dispose d'une forte capacité de trésorerie et de possibilité d'emprunt
Profil 3 (P3)	Fort	Faible	Bénéficie de solidarité

- *Modes de réalisation*

Une tâche est réalisée selon un des trois modes suivants :

- la réalisation des tâches avec les ressources disponibles sur l'exploitation en termes de matériel et main d'œuvre, dénommée `Interne` ;
- la réalisation des tâches grâce à des prestations externes (emploi de main d'œuvre, location de matériel, prestation de services), dénommée `Prestation` ;
- la réalisation des tâches utilisant les moyens issus de la solidarité (prêt de matériel et main d'œuvre solidaire), dénommée `Solidarite`.

Un mode de réalisation est affecté à chaque tâche de la liste des tâches à réaliser.

[42] Le coût financier d'une stratégie reposant sur des ressources financières propres ou externes n'est pas identique (intérêt) mais n'est pas traité dans l'application.

- *Lien entre profil et modes de réalisation*

Un ordre de priorité des modes de réalisation est attribué à chaque profil (tableau 13). Si aucun des modes de réalisation n'est possible, alors la tâche n'est pas réalisée (cf. seconde condition de réalisation des tâches, p147).

Tableau 13 : Mode de réalisation et besoin en ressources pour la réalisation

	Mode de réalisation	
Profil	**Choix 1**	**Choix 2**
P1	Interne	-
P2	Interne	Prestation
P3	Interne	Solidarité

Pour que la réalisation puisse être menée en interne, les conditions suivantes doivent être respectées :

(1) La somme de la main d'œuvre nécessaire pour réaliser `Liste_Tache` sur l'intégralité des parcelles et des bâtiments de l'exploitation est inférieure à la main d'œuvre disponible sur l'exploitation.

(2) Le matériel nécessaire (`Tache_Materiel, noté` $\mathcal{M}_T$) est utilisable,

(3) Les intrants nécessaires (`Tache_Intrant, noté` $\mathcal{S}_T$) sont utilisables.

Lorsqu'au moins une des conditions mentionnées ci-dessus n'est pas respectée, le mode de réalisation d'une tâche bascule vers le choix 2 correspondant au profil de l'exploitant (tableau 13) si cela est possible. Sinon, la tâche n'est pas réalisée. Le basculement d'une tâche vers un mode de réalisation alternatif nécessite de connaître le besoin total de main d'œuvre.

Les caractéristiques des modes de réalisation `Interne` et `Prestation` en fonction des types de contraintes (matériel, main d'œuvre et/ou intrants) sont présentées dans le tableau 14.

- *Coût de réalisation des tâches*

Le coût de réalisation d'une tâche dépend du mode de réalisation. Le coût total, C_T, s'exprime de la façon suivante :

$$C_T = d_T \, C_{mo} + \sum_{\mathcal{M}_T} C_m \; d_T + \sum_{\mathcal{S}_T} C_s \, Q_s$$

Tableau 14 : Modalités associées aux modes de réalisation en fonction des contraintes sur les conditions de réalisation

Condition non réalisée	Mode de réalisation	Main d'œuvre	Matériel	Intrants
Condition sur la main d'œuvre (1)	Prestation	Emploi	Exploitation Agricole	Exploitation Agricole
	Solidarite	Aide	Exploitation Agricole	Exploitation Agricole
Condition sur le matériel(2)	Prestation	Exploitation Agricole	Location	Exploitation Agricole
	Solidarite	Exploitation Agricole	Prêt	Exploitation Agricole
Condition sur les intrants (3)	Prestation	Exploitation Agricole	Exploitation Agricole	Achat autre fournisseur
	Solidarite	Exploitation Agricole	Exploitation Agricole	Avance
Conditions sur la main d'œuvre et le matériel (1) et (2)	Prestation	Prestataire	Prestataire	Exploitation Agricole
	Solidarite	Aide	Prêt	Exploitation Agricole
Conditions sur la main d'œuvre et les intrants (1) et (3)	Prestation	Emploi	Exploitation Agricole	Achat autre fournisseur
	Solidarite	Aide	Exploitation Agricole	Avance
Conditions sur le matériel et les intrants (2) et (3)	Prestation	Exploitation Agricole	Location	Prestataire
	Solidarite	Exploitation Agricole	Prêt	Avance
Conditions sur la main d'œuvre, le matériel et les intrants (1), (2) et (3)	Prestation	Prestation	Prestation	Prestation
	Solidarite	Aide	Prêt	Avance

La figure 61 récapitule l'ensemble des conditions de réalisation d'une tâche et les conséquences en fonction des modes de réalisation mis en œuvre.

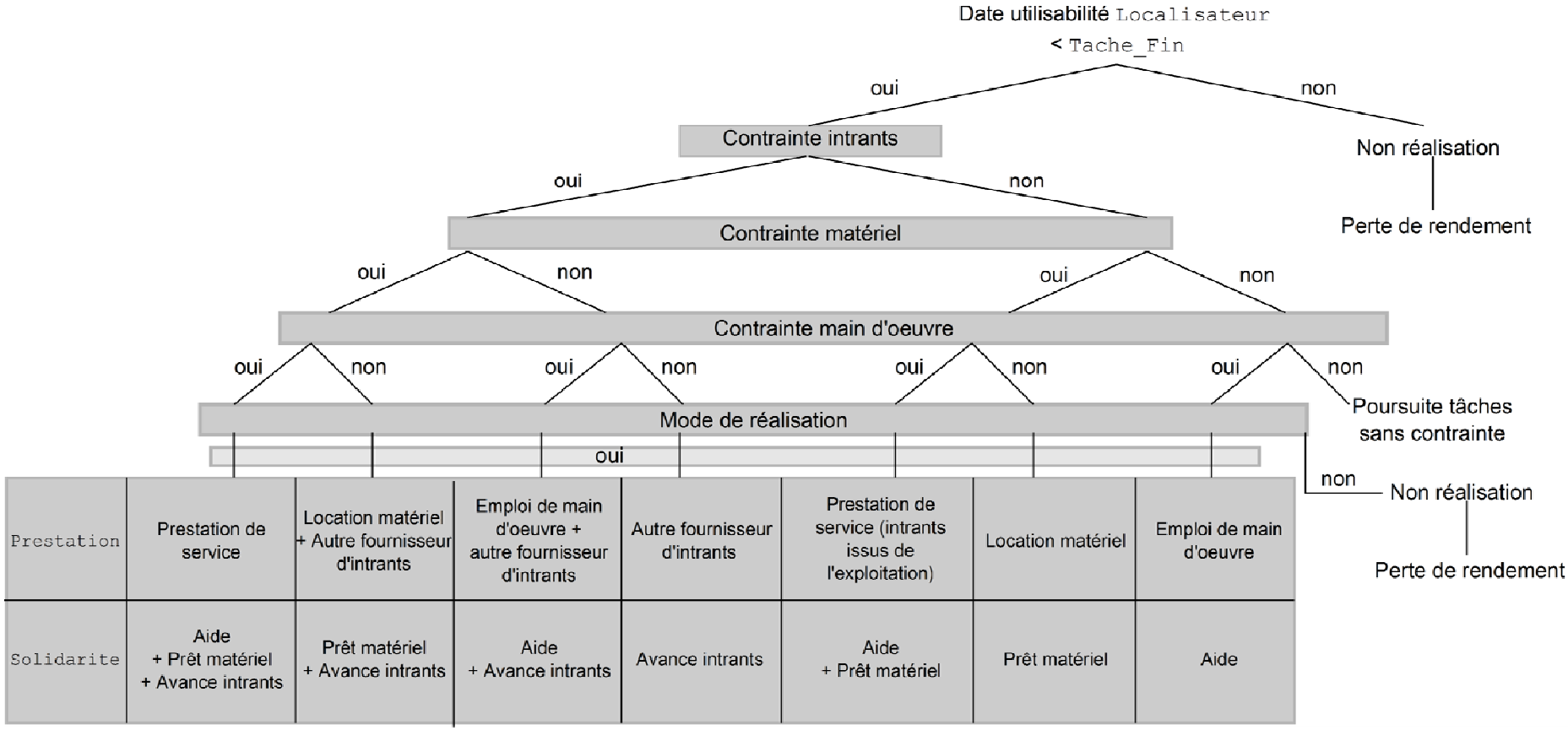


Figure 61 : Contraintes sur la réalisation des tâches, alternatives mises en œuvre par l'Exploitant et conséquences

- *Procédures*

L'`Exploitant` est l'entité décisionnelle qui, avec une vision globale des caractéristiques de l'exploitation à un instant donné, essaie de tendre vers le fonctionnement normal, c'est-à-dire la réalisation de l'itinéraire technique. Cela nécessite la récupération de l'utilisabilité de toutes les composantes physiques (remise en état). La stratégie de remise en route dépend de l'ensemble des tâches à réaliser, de l'état des composantes physiques, de la main d'œuvre disponible et du profil.

Pendant la submersion, si certaines parcelles ne sont pas inondées, les conditions de réalisation doivent être testées.

Sur les parcelles ayant été inondées, durant la période d'inaccessibilité, la réalisation des tâches de production prévues dans l'itinéraire technique est suspendue.

A la fin de la submersion, on teste les conditions de réalisation :

- des tâches qui auraient dû être réalisées pendant la submersion ;
- des tâches qui doivent être réalisées au moment du test.

Pour les tâches qui auraient du être réalisées pendant la submersion, la condition sur la date de réalisation est d'abord testée. Si la réalisation est toujours possible, alors la tâche est décalée et rajoutée dans la liste des tâches à réaliser impliquant une augmentation du temps de travail.

La liste des procédures réalisées par l'`Exploitant` est la suivante:

- Identification des tâches à réaliser (`Tache_Production` et `Tache_Inondation`) sur l'exploitation agricole et établissement d'un bilan (`Liste_Tache`),
- Etablissement d'un bilan de l'utilisabilité des composantes physiques au moment de la réalisation (`Liste_Utilisabilite`),
- Test des conditions de réalisation des tâches,
- Identification d'un mode de réalisation.

A partir de la liste des tâches, il est possible de déterminer la somme de la main d'œuvre nécessaire (somme de `Tache_Travail`).

5.4 Modèle de données d'entrées

La mise en œuvre du modèle EVA requiert un nombre de données important que nous avons mises en forme et organisées, au cours du processus de modélisation et d'implémentation. Les noms attribués aux données sont en anglais car c'est la langue qui a été choisie pour l'implémentation[43].

5.4.1. Description du modèle de données

Nous pouvons distinguer six catégories de données (figure 62).

1. Les données concernant le scénario d'inondation (`Hazard`) permettent de définir les scénarios d'inondation (période d'occurrence, hauteur, durée, vitesse) et d'exposition (parcelles et bâtiments inondés).
2. Les données concernant l'exploitation agricole sont classées dans `Farm`. Les données requises sont les suivantes :
   - Farm_Spatial permet de caractériser la répartition spatiale de l'exploitation (surface des bâtiments et parcelles), la surélévation ainsi que les cultures produites avec leur rendement et prix de vente.
   - Furniture permet de décrire le matériel et les intrants présents sur l'exploitation agricole en termes d'âge, quantité, localisation et surélévation.
   - Farm_Labour décrit la disponibilité de la main d'œuvre sur l'exploitation agricole.
   - Input_Purchase détermine les dates d'achat des intrants.
3. Les données concernant les tâches de production (`Production_Task`) contiennent pour toutes les cultures étudiées sur la zone :
   - l'itinéraire technique de chaque culture (`CMS_Crop`) déterminant les dates de démarrage et de fin de réalisation des tâches, le temps de travail nécessaire ainsi que la perte de rendement éventuelle en cas de non réalisation de la tâche ;
   - Task_Tool_Crop et Task_Input_Crop permet pour chaque culture de déterminer quels types et quantité de matériels et d'intrants sont nécessaires pour la réalisation des tâches de production.
4. Les données concernant la remise en route sont classées dans `Recovery_Task`. Elles permettent de connaitre les tâches nécessaires à la remise en route et leur temps de

[43] La correspondance entre le nom usuel, la terminologie du modèle en français et en anglais est donnée en annexe 4.

réalisation (Task_Flood). Task_Tool_Flood permet de déterminer quels sont les matériels nécessaires à la réalisation de ces tâches.

5. Les fonctions d'endommagement des composantes physiques sont regroupées dans la classe Damaging_Data. Certaines sont indépendantes des cultures : Damaging_Building (endommagement des bâtiments) et Damaging_Furniture (endommagement du matériel et des intrants). Les fonctions d'endommagement des cultures (Damaging_Culture_Crop), des sols (Damaging_Soil_Crop) et du matériel végétal (Damaging_Plant_Material_Crop) sont données pour chaque type de culture.
6. La dernière classe de données (Monetizing_Data) permet d'attribuer une valeur monétaire aux dommages. Elle contient :
   - le coût des intrants ;
   - le coût attribué à la main d'œuvre ;
   - le coût de restauration du matériel végétal ;
   - les paramètres d'ajustement du dommage au matériel en fonction de l'âge ;
   - le coût d'utilisation horaire de chaque type de matériel.

5.4.2. Intérêt et perspectives d'utilisation

La formalisation de ce modèle de données permet la simulation des dommages grâce au modèle EVA avec une valorisation financière ou économique (cf. section 5.5). Dans une démarche de développement de l'évaluation, la réflexion sur les données à collecter de façon systématique, en particulier dans les retours d'expérience post-inondation, est indispensable. Le modèle de données ici présenté faciliterait la collecte de données ex-post.

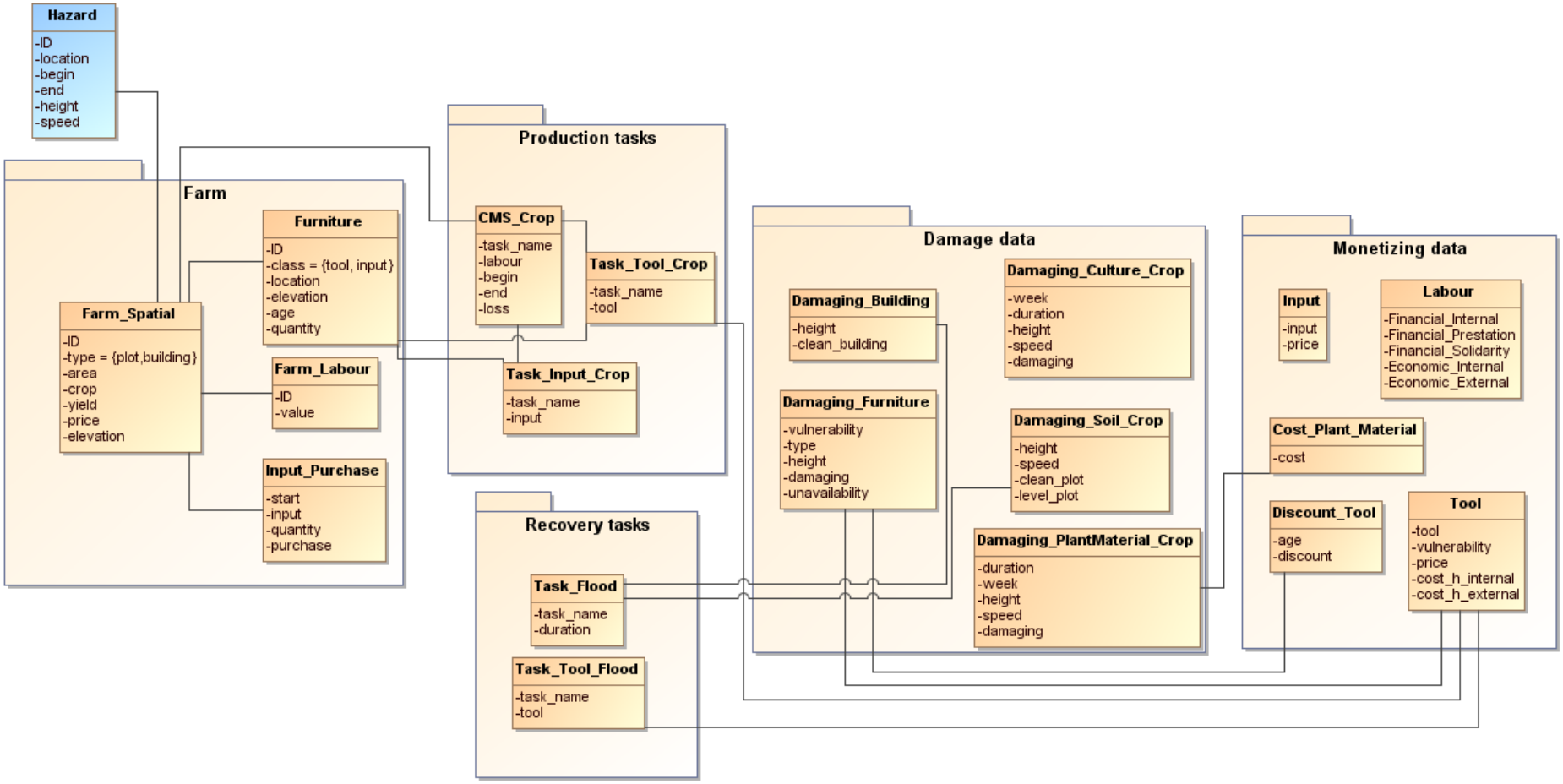


Figure 62 : Modèle de données pour le modèle de vulnérabilité EVA

5.5 Valorisations financière et économique

Le modèle EVA permet d'analyser la vulnérabilité avec une approche financière ou économique. L'approche financière reflète les coûts supportés par l'exploitant et peut intégrer la prise en compte des indemnisations d'assurance. L'approche économique reflète les dommages subis par les enjeux agricoles qui devraient être pris en compte, avec les dommages subis par les autres enjeux, dans une évaluation économique.

L'évaluation des dommages sur l'exploitation agricole est réalisée selon deux modalités:

- l'évaluation des coûts de restauration des composantes physiques (bâtiment, matériel, intrants, sol et matériel végétal sur les parcelles) supportés par l'exploitant (valorisation financière) et par la société (valorisation économique),
- l'évaluation de la variation d'activité mesurée par la variation de marge brute hors primes et subventions[44] (valorisation financière) et de valeur ajoutée[45] (valorisation économique).

Les effets induits sur l'activité sont entendus comme les variations de charges et/ou de produit résultant de la modification de l'état des composantes physiques de l'exploitation agricole.

Les hypothèses prises pour l'évaluation et la valorisation de la restauration des capitaux physiques sont données au tableau 15.

Tableau 15 : Quantification et valorisation du dommage sur les composantes physiques

Composante physique	Quantification	Valorisation
Sol	Temps de nettoyage (h/ha)	Coût de la main d'œuvre (€/h) Cout de mécanisation (€/h)
Matériel végétal	Temps de nettoyage (h/ha) Replantation (€/ha) Entretien pendant la remise en production Perte de récolte pendant la remise en production	Coût de la main d'œuvre (€/h) Coût du matériel végétal (€/ha) Coût d'entretien en fonction du type de matériel végétal (€/ha) Valeur ajoutée : €/ha/an
Bâtiment	Temps de nettoyage (h/ha)	Coût de la main d'œuvre (€/h)
Matériel	Action de réparation ou rachat	% de la valeur neuve du matériel en fonction de son âge (€)
Stocks d'intrants	Action de rachat	Coût des intrants (€)
Stocks de produit	Pourcentage de destruction des stocks	Produit (€)

[44] La variation de marge brute hors primes et subventions est évaluée par la variation de produit diminuée de la variation des charges variables (main d'œuvre, intrants et matériel).

[45] La variation de valeur ajoutée est évaluée par la variation de produit diminuée de la variation des consommations intermédiaires (intrants et matériel).

Le tableau 16 distingue les hypothèses de coût utilisées pour les valorisations financière et économique.

Tableau 16 : Hypothèses de valorisation financière et économique

	Type de coût	Valorisation financière	Valorisation économique
Restauration	Rachat	Coût du marché	Coût du marché
	Réparation	Coût du marché	Coût du marché
	Main d'œuvre interne	Si inférieur à temps normal = 0 Si supérieur à temps normal = heures supplémentaires	Valeur du travail
	Main d'œuvre externe	Coût du marché	Valeur du travail
	Matériel interne	Coût d'utilisation hors amortissement	Coût d'opportunité
	Matériel externe	Coût de location	Coût d'opportunité
	Intrant interne	Coût d'achat	Coût d'opportunité
	Intrant externe	Coût d'achat	Coût d'opportunité
Effet sur l'activité	Δ produit	Prix du marché $*$ Rendement	Prix du marché $*$ Rendement
	Δ charges	Charges variables = coût d'utilisation du matériel + coût des intrants + coût de la main d'œuvre externe	Consommations intermédiaires = coût d'opportunité du matériel + coût d'opportunité des intrants

La prise en compte de l'assurance et des indemnisations « Calamité Agricole » concernent :

- la perte de produit résultant de l'endommagement direct
- les coûts de restauration des sols et du matériel végétal
- les coûts de restauration des matériels, des intrants et du bâtiment.

- *Discussions sur l'évaluation du dommage induit sur l'activité en fonction des profils*

Les dommages induits sur l'activité sont différents pour les trois profils d'exploitants. Le détail des hypothèses est donné tableau 17.

Tableau 17 : Coûts associés aux alternatives de réalisation des tâches

Type de contrainte	Condition non réalisée	Mode de réalisation	Alternative	Valorisation financière	Valorisation économique
Non réalisation de la tâche	Date de report ultérieure à la plage possible de réalisation	-	-	Perte de marge brute hors subvention	Perte de valeur ajoutée
	Aucun mode de réalisation	-	-	Perte de marge brute hors subvention	Perte de valeur ajoutée
Conditions sur les modes de réalisation	Condition sur la main d'œuvre (1)	Prestation	Emploi	Coût d'emploi de la main d'œuvre	Coût d'opportunité de la main d'œuvre
		Solidarite	Aide	Nul	Coût d'opportunité de la main d'œuvre
	Condition sur le matériel(2)	Prestation	Location	Coût de location du matériel	Coût d'opportunité de la location
		Solidarite	Prêt	Nul	Coût d'opportunité du prêt de matériel
	Condition sur les intrants (3)	Prestation	Autre fournisseur	Coût additionnel de l'intrant (coût de transport)	Coût d'opportunité de l'intrant
		Solidarite	Avance	Nul	Coût d'opportunité de l'intrant
	Conditions sur la main d'œuvre (1) et le matériel (2)	Prestation	Prestation sans intrant	Coût de prestation –coût des intrants	Coût d'opportunité de la prestation sans intrant
		Solidarite	Aide et prêt matériel	Nul	Coûts d'opportunité de la main d'œuvre et du matériel
	Conditions sur la main d'œuvre (1) et les intrants (3)	Prestation	Emploi et autre fournisseur intrants	Coût d'emploi de la main d'œuvre et coût additionnel des intrants	Coûts d'opportunité de la main d'œuvre et des intrants
		Solidarite	Aide et prêt intrants	Nul	Coûts d'opportunité de la main d'œuvre et des intrants
	Conditions sur le matériel (2) et les intrants (3)	Prestation	Location matériel et autre fournisseur intrants	Coût de location du matériel et coût additionnel des intrants	Coûts d'opportunité de la location de matériel et des intrants
		Solidarite	Prêt matériel et intrant	Nul	Coûts d'opportunité du prêt de matériel et des intrants
	Conditions sur la main d'œuvre (1), le matériel (2) et les intrants (3)	Prestation	Prestation	Coût de la prestation	Coût d'opportunité de la prestation
		Solidarite	Aide, prêt matériel et intrants	Aucun	Coût d'opportunité de la réalisation par la solidarité

- *Discussion sur l'estimation des coûts d'opportunité en fonction du contexte*

Les coûts d'opportunité utilisés pour exprimer le coût économique des effets d'une inondation dépendent de la disponibilité des différentes ressources nécessaires (main d'œuvre, intrants, matériel) sur le marché.

Nous pouvons, par exemple identifier, deux facteurs qui peuvent jouer un rôle sur le coût d'opportunité des ressources supplémentaires nécessaires suite à l'inondation. Le coût d'opportunité du matériel et de la main d'œuvre peut être considéré comme une fonction croissante de l'intensité de l'agriculture[46] et de la demande.

Concernant la main d'œuvre, le coût d'opportunité pour une zone d'activité agricole intense en période de forte utilisation de la main d'œuvre saisonnière (taille, récolte), serait plus élevé que le taux horaire moyen d'emploi de la main d'œuvre agricole. Par contre, dans une zone d'activité agricole peu intense et en période de faible besoin de main d'œuvre saisonnière, le coût d'opportunité pourra être inférieur au taux horaire d'emploi de la main d'œuvre agricole.

Par ailleurs, la question de la qualification de la main d'œuvre peut être envisagée.

Soit l'employé E_1, avec un coût d'opportunité C_1 et une productivité P_1.

Soit l'employé E_2, avec un coût d'opportunité C_2 et une productivité P_2.

Si C_1 est inférieur à C_2 et P_1.inférieur à P_2, il faut déterminer quel choix entraîne la moindre perte de valeur ajoutée.

Dans l'implémentation, ces variations des coûts d'opportunité n'ont pas été considérées par manque de données. Les hypothèses utilisées pour les simulations sont fixées à la section 6.3.1.

[46] En cas de déclin complet de l'activité agricole, le coût d'opportunité des facteurs de production peut également être élevé du fait de la déstructuration des filières.

5.6 Sorties du modèle : indicateurs de vulnérabilité

5.6.1. Indicateurs non monétaires

- *Premier type de sorties : chronologie de l'utilisabilité*

Un des enjeux de la modélisation est de déterminer, à un temps donné, l'utilisabilité des composantes physiques afin de montrer l'impact sur la réalisation des tâches. Les chronologies d'état des composantes physiques sont établies en parallèle. Un exemple de chronologie qui pourrait être obtenue est donné à la figure 63[47].

Figure 63 : Exemple de chronologie d'utilisabilité des composantes physiques d'une exploitation

[47] Les temps de remise en état sont donnés dans cet exemple à titre indicatif

- *Deuxième type de sorties : perturbation de l'organisation du travail*

Les effets directs sur les composantes physiques induisent le décalage de certaines tâches de production et une augmentation des besoins de main d'œuvre liés à la remise en état. A titre d'exemple, la figure 64 montre les besoins mensuels en main d'œuvre pour réaliser les tâches de production (itinéraire technique décalé) et les tâches de remise en état, en particulier le nettoyage des parcelles et bâtiments sur une exploitation spécialisée en arboriculture intégralement inondée pendant une semaine en décembre[48]. Les besoins en main d'œuvre dépassent la main d'œuvre disponible sur l'exploitation agricole en décembre, janvier et février.

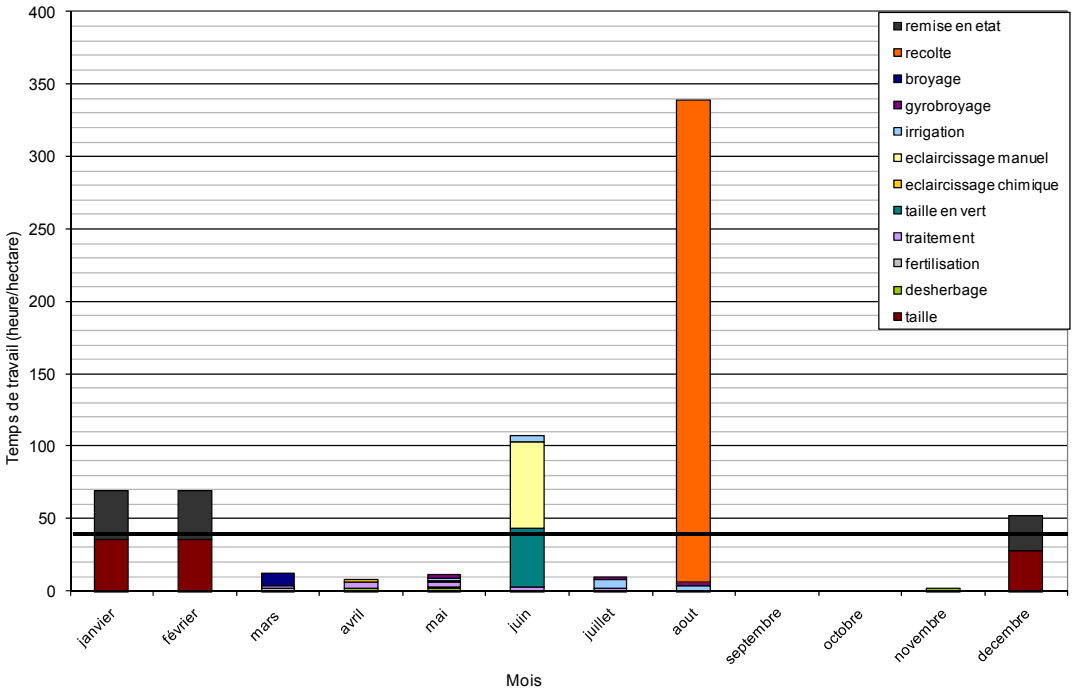


Figure 64 : Représentation temporelle des tâches de production et de remise en état sur une exploitation type arboricole (Pomme Royal Gala, 8ha) suite à une inondation de 7 jours en Décembre

D'autres sorties peuvent être envisagées comme, par exemple, la liste des tâches de production décalées ou la liste des tâches de remise en état et le temps de travail correspondant.

[48] A titre de comparaison, cette répartition du temps de travail pour la même exploitation dans une situation sans inondation est donnée figure 39 (p 123).

5.6.2. Indicateurs de dommages monétaires

Le modèle EVA permet l'évaluation des dommages directs et induits. Une mise en équation de ces calculs est proposée en annexe 5.

- *Troisième type de sorties : dommages directs sur les composantes physiques*

Le dommage direct est estimé par le coût du retour à l'état normal d'une composante physique (coût de restauration) sauf dans les cas où le changement d'état est irréversible (production et stock de production). Dans ce cas, le dommage est évalué par la perte de valeur ajoutée (valorisation économique) ou la perte de marge brute (valorisation financière).

- *Quatrième sortie : dommages induits sur l'activité*

Les dommages induits résultent de la perturbation de la réalisation des tâches. Les dommages résultent soit d'une non réalisation, soit d'une réalisation par un mode de réalisation alternatif (`Prestation`, `Solidarite`).

- *Cinquième sortie : dommages totaux*

Le modèle permet de calculer la somme des dommages aux composantes physiques et des dommages induits sur l'activité pour obtenir les dommages totaux en distinguant une valorisation financière ou économique.

5.6.3. Synthèse

La figure 65 propose une synthèse des règles de décision et calculs utilisés dans le modèle de vulnérabilité.

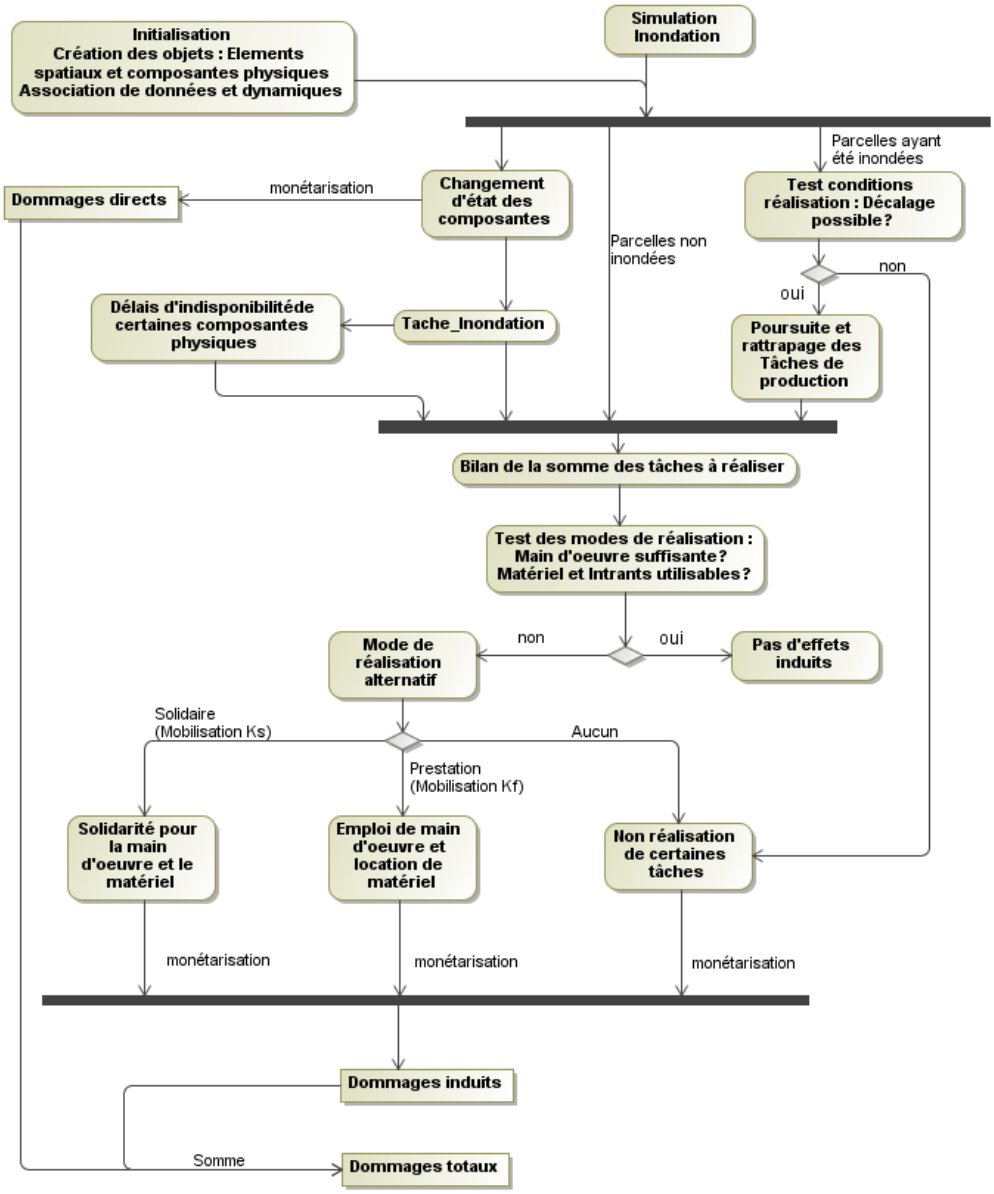


Figure 65 : Description du modèle d'évaluation de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations et des variables d'entrée et de sortie

5.7 Conclusion

Le modèle EVA présenté dans ce chapitre permet principalement d'identifier et d'estimer les dommages directs sur les composantes physiques et les dommages induits sur l'activité de l'exploitation agricole. Dans la littérature (section 3.4, p 92), nous avions constaté que l'évaluation des dommages agricoles se limitait souvent à l'évaluation des seuls dommages aux cultures. Lorsque les dommages aux autres composantes de l'exploitation sont pris en compte, les dommages aux bâtis, matériel et intrants sont souvent agrégés. Dans notre approche, nous distinguons l'endommagement de chacune des composantes afin d'en comprendre l'effet sur leur utilisabilité et donc sur l'activité de l'exploitation agricole.

La planification de l'organisation du travail après inondation repose sur la substituabilité de certaines formes de capitaux introduite en économie du développement. Les enquêtes de terrain ont motivé ce choix en soulevant la question des ressources disponibles pour la remise en route et du rôle de la solidarité. Il était également envisageable de modéliser ces décisions par optimisation et cette possibilité reste envisageable dans de futurs développement du modèle. Le choix de mobiliser la théorie des capitaux pour expliquer l'arbitrage entre les modes alternatifs de réalisation des tâches, en cas de contrainte, permet d'illustrer la diversité des situations rencontrées parmi les exploitants. Cette thèse ne vise pas à une évaluation du capital social et financier des exploitations agricoles. La diversité des profils est beaucoup plus complexe que les trois cas utilisés dans le modèle. Notre objectif est de montrer la substituabilité de certaines formes de capitaux et l'importance que cette hypothèse a sur l'évaluation des dommages.

Dans le modèle, nous faisons l'hypothèse d'une résilience des exploitations agricoles au sens où elles retrouvent leur état initial suite à l'inondation :

- grâce à des prestations externes ;
- grâce à la solidarité ;
- en ne réalisant par certaines tâches de production (entraînant une perte de produit).

Cette hypothèse permet d'atteindre l'objectif recherché de proposer une évaluation monétaire des dommages directs et induits par ce retour à l'état normal.

Cependant, des réflexions sur les hypothèses implicites formulées sont nécessaires.

Premièrement, en termes d'analyse financière à l'échelle de l'exploitant :

- Pour les prestations, il est supposé d'une part, que la trésorerie est suffisante pour assumer les charges additionnelles de production et d'autre part, qu'elles sont disponibles.
- Pour la mobilisation de la solidarité, il est supposé qu'elle est toujours disponible.

- Pour la non réalisation de tâche de production, il est supposé que l'exploitant peut supporter une année moins productive et donc, reprendre un cycle de production normal avec une trésorerie moindre.

Afin de permettre une analyse financière globale, qui n'est pas l'objet de cette thèse, la valorisation financière des dommages peut être utilisée. Un travail supplémentaire de définition du cycle complet de trésorerie de l'exploitation est nécessaire.

Deuxièmement, nous faisons l'hypothèse implicite que les ressources nécessaires pour la mise en œuvre des modes de réalisation alternatifs seront disponibles au moment de la remise en route. Concernant la solidarité, nous avons discuté en conclusion du chapitre 4, de la difficulté d'évaluer le capital social mobilisable par les exploitants en fonction notamment de l'intensité de l'évènement d'inondation.

Concernant les prestations externes, nous considérons que les prestataires sont effectivement disponibles et permettent la réalisation alternative de la tâche. Cependant, des effets de rareté peuvent résulter d'une forte augmentation de la demande. Dans le modèle, ces effets de rareté peuvent être, en partie, pris en compte par l'intermédiaire des temps d'indisponibilité pendant la réalisation des prestations.

CONCLUSIONS DE LA PARTIE II

La partie 2 permet de répondre à la seconde question de recherche qui est de développer un modèle de vulnérabilité à l'échelle des exploitations agricoles permettant à la fois d'appréhender le processus de vulnérabilité dans sa complexité et d'en proposer une évaluation quantitative. L'intérêt de la démarche est de montrer l'intégralité du processus de modélisation depuis la définition du cadre conceptuel jusqu'à la formalisation des sorties opérationnelles du modèle, en particulier le calcul des dommages à l'échelle de l'exploitation agricole.

Dans un premier temps, nous montrons comment les dimensions spatiales et temporelles jouent un rôle majeur dans le phénomène de vulnérabilité :

- Le croisement entre la répartition spatiale de l'inondation et celle de l'exploitation agricole détermine quelles sont les composantes touchées par une certaine intensité et, donc d'une part les dommages directs subis mais aussi les perturbations de l'activité liées aux contraintes d'utilisabilité des composantes physiques.
- Le croisement entre la temporalité de l'inondation et celle de l'exploitation agricole qui contribue à expliquer l'impact du phénomène sur l'activité en conditionnant le dommage sur les composantes ayant une variabilité saisonnière et en perturbant la réalisation de l'itinéraire technique.

Nous modélisons ensuite les processus en œuvre en développant particulièrement :

- l'endommagement des composantes physiques,
- les interactions entre les composantes de l'exploitation agricole et son organisation,
- les stratégies mises en œuvre pour la remise en route.

Dans le cadre de l'évaluation économique mobilisant l'approche des dommages évités, cette démarche de modélisation peut apparaitre complexe. Cependant, elle présente l'intérêt majeur de permettre de formaliser explicitement les hypothèses formulées sur le retour à l'état normal des différentes composantes et de les discuter. Cette discussion se situe à plusieurs niveaux :

- Le choix des modèles d'endommagement est important et l'approche mobilisée permet d'utiliser, dans la mesure où ils existent, différents modèles d'endommagement pour les composantes physiques.
- L'hypothèse de substituabilité de certaines formes de capitaux est une condition préalable et admise dans la démarche ; toutefois, il est envisageable de tester la réalisabilité de cette hypothèse en approfondissant la question de la disponibilité des capitaux financier et social.
- Le modèle de décision utilisé est, à ce stade, très simplificateur mais permet d'introduire deux facteurs qui nous paraissent déterminant de la décision de gestion post inondation, à savoir,

l'objectif de poursuivre l'activité normale et les contraintes en termes de disponibilité des facteurs de production. Ce modèle de décision pourrait bénéficier d'amélioration notamment en intégrant les capacités d'adaptation et d'apprentissage des exploitants.

Par ailleurs, le développement du orienté objet permet d'envisager d'autres enrichissements du modèle concernant les interactions concernant les interactions entre exploitants ou entre exploitants et filière.

Une des sorties du modèle développé permet le calcul des dommages sur une exploitation agricole prenant en compte les dommages directs et induits. La formalisation mathématique de ce calcul met en évidence quelques premiers éléments concernant la vulnérabilité et la répartition des dommages induits. Principalement, nous pouvons constater que si la perte de rendement ou de matériel végétal sont élevés, l'exploitant a intérêt à stopper l'itinéraire technique pour économiser les charges variables. Il convient donc d'analyser la répartition des différentes catégories des dommages en fonction de différents scénarios d'inondation. Cette application est proposée dans la partie suivante sur trois exploitations types de la base vallée du Rhône.

PARTIE III APPLICATION DU MODÈLE EVA SUR LA ZONE RHÔNE AVAL

Après avoir décrit le modèle et ses sorties, nous proposons sa mise en application dans le contexte de la basse vallée du Rhône.

Dans le chapitre 6, nous montrons comment les problématiques de recherche et les besoins opérationnels ont été liés sur la zone du Rhône. Nous décrivons les exploitations types retenues et les moyens mis en œuvre pour la collecte des données, organisées selon le modèle présenté au chapitre 5 (section 5.4, Partie II5.4).

Le chapitre 7 propose une analyse complète de la vulnérabilité des trois exploitations en insistant sur les différents niveaux pouvant être pris en compte. Le modèle permet à la fois des analyses qualitatives (effets de l'inondation sur l'utilisabilité des composantes, sur l'organisation du travail) et quantitatives. Nous proposons ensuite une analyse des dommages totaux valorisés d'un point de vue financier (avec et sans prise en compte de l'assurance) et d'un point de vue économique.

Dans le chapitre 8, nous illustrons les capacités du modèle à permettre l'évaluation économique des politiques de réduction de la vulnérabilité pour l'aide à la décision. Nous distinguons les différents groupes de mesures de réduction de la vulnérabilité et proposons une évaluation économique de ces mesures pour les trois exploitations types.

CHAPITRE 6. CADRE ET HYPOTHÈSES DE L'APPLICATION

L'application du modèle de vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations a été réalisée sur la zone aval du Rhône. Le volet inondation du Plan Rhône est particulièrement représentatif des nouvelles politiques de gestion promues au niveau de l'État français et de l'Europe : d'une part, la restauration et la conservation des zones d'expansion de crue, et d'autre part, la réduction de la vulnérabilité des enjeux exposés. La zone aval du Rhône, en particulier, est emblématique de notre problématique de recherche puisque les activités agricoles y tiennent une place importante et sont souvent localisées sur des zones d'expansion de crue qui bénéficient des terres fertiles. Or, l'endiguement du Rhône a entraîné une transformation des systèmes de production, en particulier en termes de type de cultures pratiquées et de localisation des bâtiments d'exploitation. Protégées par les digues, les exploitations agricoles se sont orientées vers des productions à forte valeur ajoutée et la construction de bâtiments peu adaptés au risque d'inondation. La réduction de la vulnérabilité de ces activités devient alors un enjeu pour le Plan Rhône qui a choisi de mettre en place un programme d'actions. Ce programme est particulièrement innovant à l'échelle nationale car peu d'actions de réduction de la vulnérabilité des activités agricoles n'ont, par ailleurs, été mises en œuvre en France. Une des attentes des gestionnaires opérationnels est alors de pouvoir évaluer les effets d'un tel programme en termes financiers pour les exploitations agricoles et d'un point de vue économique pour justifier de l'efficience du programme. Or, ceci n'est pas envisageable avec les méthodes actuelles d'évaluation des dommages agricoles. La rencontre entre cette problématique opérationnelle et notre problématique de recherche s'est faite autour du projet « Évaluation de la Vulnérabilité Agricole ».

Nous proposons dans le chapitre 6, une description de l'articulation de ce projet avec le travail de thèse. Puis, nous décrivons la démarche que nous avons utilisée pour compléter le modèle de données nécessaires à l'utilisation du modèle EVA. Les sources de chacune des données utilisées dans l'application sont ici précisées.

6.1 Liaison d'une problématique de recherche et des besoins opérationnels

6.1.1. Des préoccupations au cœur de notre problématique

En introduction, nous avons discuté des questions opérationnelles soulevées par la mise en place du programme de réduction de la vulnérabilité sur le Rhône aval[49].

Après un premier diagnostic qualitatif et un état des lieux des types d'exploitations concernées sur la zone, mené par la mission de réduction de la vulnérabilité agricole en zone inondable (Chambres d'Agriculture Rhône Méditerranée, 2006 ; 2007 ; 2008), les décideurs se sont trouvés confrontés à l'évaluation de l'efficacité et de l'efficience de la réduction de la vulnérabilité en fonction des types d'exploitation et de leur exposition.

Le budget destiné à la réduction de la vulnérabilité est fixé à 15 M€ sur la période de 2007 à 2013, dans le Contrat de Projets Interrégional État du Plan Rhône (CPIER) signé le 21 mars 2007 par les financeurs suivants :

- l'Union Européenne (FEDER) ;
- les conseils régionaux (Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Languedoc Roussillon) ;
- l'État (Ministère en charge de l'Environnement) ;
- l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse.

Pour l'ensemble des projets prévus dans le volet Inondation du Plan Rhône, les financeurs incitent les maitres d'ouvrage à engager une évaluation économique. Ils ont d'ailleurs développé un guide méthodologique de réalisation d'une ACB à destination des maîtres d'ouvrage (Plan Rhône, 2010). L'évaluation économique du programme de réduction de la vulnérabilité n'était pas réalisable avec les méthodes actuelles d'évaluation des dommages agricoles et les financeurs ont souhaité engager une réflexion approfondie sur la vulnérabilité, en particulier la DREAL Rhône Alpes, qui était en charge de la mise en œuvre du programme. C'est dans ce cadre que nous avons initié le projet « Évaluation de la Vulnérabilité Agricole » qui s'inscrivait parfaitement dans notre problématique de thèse et apportait un ancrage opérationnel. Nous décrivons dans les sous-sections suivantes l'articulation qui s'est opérée entre le projet opérationnel et le travail de thèse.

[49] La zone du Rhône aval localisée sur cinq départements : l'Ardèche (07), les Bouches-du-Rhône (13), la Drôme (26), le Gard (30) et le Vaucluse (84).

6.1.2. Articulation du projet « Évaluation de la Vulnérabilité Agricole » et de la thèse

- *Description du déroulement du projet (Blanc et al., 2010)*

Le projet « Évaluation de la Vulnérabilité Agricole »[50] a commencé en juillet 2008 et s'est poursuivi jusqu'en octobre 2009.

Une première phase (juillet 2008 à mars 2009) a porté sur la modélisation conceptuelle des exploitations agricoles et la proposition d'une méthodologie pour l'évaluation des dommages directs et induits. La réalisation d'entretiens auprès d'experts a permis de concevoir une modélisation « générique » pour les différents types d'exploitation rencontrés sur la zone aval. Un comité de pilotage constitué des représentants des Chambres Départementales d'Agriculture des cinq départements concernés (Ardèche, Bouches-du-Rhône, Drôme, Gard, Vaucluse) a suivi et validé l'élaboration du modèle conceptuel puis du modèle de simulation des dommages. Il a également validé la définition des deux exploitations types pour le Rhône aval :

- une exploitation arboricole de petite taille (< 15 ha) ;
- une exploitation mixte « céréales / maraîchage ».

Dans une deuxième phase (mars à juillet 2009), une première implémentation sous Excel a été réalisée pour la simulation des dommages directs et induits. Cette évaluation n'a pas été réalisée pour des cas réels, nous avons donc travaillé à partir de 108 scénarios d'inondation en combinant les paramètres suivants :

- trois périodes d'occurrence (semaine 18 en mai, semaine 36 en septembre, semaine 49 en décembre) ;
- trois niveaux qualitatifs de vitesse (0, 1, 2) ;
- quatre classes de hauteurs d'eau en cm (] 0 , 20[; [20, 50[; [50, 100[; [100, ∞[ );
- trois durées (1 jour, 7 jours, 30 jours).

L'implémentation sous Excel nécessitait une adaptation importante pour modifier la période d'occurrence, ce qui justifie que nous ne considérions que trois période d'occurrence. Le pas de temps utilisé était mensuel, ce qui ne permettait pas d'appréhender finement les effets induits pour les durées de submersion faibles. Par ailleurs, la définition d'exploitations types supplémentaires nécessitait également une adaptation très importante limitant les possibilités de simulations.

Cette implémentation a nécessité la collecte de données technico-économiques et la réalisation d'enquêtes auprès d'exploitants agricoles.

[50] Le nom attribué au modèle de vulnérabilité est hérité du nom de ce projet.

Enfin, de juillet à octobre 2009, les mesures de réduction de la vulnérabilité ont été évaluées, lorsque cela était possible, pour les deux exploitations types[51]. Pour chaque mesure, trois niveaux d'analyse ont été définis :

1. L'évaluation de la mesure a pu être réalisée et le ratio coût-bénéfice a été déterminé.
2. L'évaluation de la mesure est réalisable mais n'a pas pu être finalisée. Pour cela, deux raisons sont possibles : soit l'évaluation des bénéfices nécessite un complément de données, soit l'évaluation des bénéfices a été réalisée mais nous ne disposons pas des coûts de mise en place de la mesure.
3. L'évaluation n'est pas réalisable car les effets de la mesure sur l'exploitation ne sont pas identifiables ou quantifiables.

Dans un premier temps, les effets de la mesure sur l'exploitation agricole au sens large ont été décrits pour toutes les mesures à évaluer (29). Cette étape nous a permis de pointer les mesures ne pouvant pas être évaluées du fait de l'impossibilité d'identifier ou de quantifier les effets sur l'exploitation. Dans le cadre de l'appui à la décision, la phase d'analyse qualitative a créé un espace propice pour mettre en discussion, entre les décideurs et les représentants des acteurs concernés (techniciens de chambre d'agriculture), les effets attendus des mesures et les scénarios prévus de mise en œuvre avant de passer à la phase de quantification. Ces échanges ont porté notamment sur l'efficacité et les indicateurs de suivi des mesures permettant, à ce stade, d'en préciser ou d'en écarter certaines.

Pour les mesures considérées comme évaluables, nous avons calculé les bénéfices attendus (dommages évités) par leur mise en place pour les deux exploitations types. Pour certaines mesures, les coûts de mise en place n'étaient pas disponibles et nous nous sommes donc arrêtés à ce niveau d'analyse (11 mesures).

Enfin, lorsque cela était possible nous avons réalisé l'évaluation par analyse coût-bénéfice théorique de chaque mesure pour les deux exploitations types en comparant des exploitations fréquemment et rarement exposées (7 mesures).

- *Articulation avec le travail de thèse*

Le projet a abouti sur la zone Rhône aval à :

- l'élaboration d'un modèle conceptuel avec les experts locaux ;

[51] La liste des mesures ainsi qu'une synthèse des analyses menées dans le cadre du projet est donnée en annexe 6.

- la définition d'exploitations types ;
- la collecte de données nécessaires à la simulation ;
- une première implémentation (Excel) pour la simulation des dommages directs et induits ;
- une application de la méthode pour l'évaluation de l'efficacité des mesures de réduction de la vulnérabilité sur deux exploitations types pour 108 scénarios d'inondation théoriques.

Le travail de thèse hérite, en partie, des réalisations du projet. Cependant, des travaux complémentaires (tableau 18) ont été apportés, en particulier :

- la révision et la consolidation du modèle conceptuel ;
- la définition d'une troisième exploitation type et l'introduction des trois profils d'exploitants (Interne, Prestation, Solidarité)[52] ;
- l'affinement de la distinction entre valorisation financière et valorisation économique (cf. section 6.3.4, p 185) ;
- l'implémentation utilisant le langage R, permettant la simulation d'indicateurs non monétaires et des dommages directs et induits pour un nombre beaucoup plus importants de scénarios d'inondation sur trois exploitations types avec les trois profils (plus de 1 000) ;
- la possibilité de simuler les dommages évités par les mesures de réduction de la vulnérabilité pour un nombre important de scénarios.

L'utilisation d'un programme en langage R et du modèle de données décrit au chapitre 5 (0, p 154) a permis :

- le passage au pas de temps hebdomadaire ;
- la simulation des dommages sur l'ensemble des semaines de l'année ;
- l'intégration rapide de nouvelles exploitations types ;
- la simulation des dommages pour trois profils d'exploitants.

[52] Cf. sous section 4.4.3, p 125.

Tableau 18 : Articulation du projet « Évaluation de la vulnérabilité agricole » et du travail de thèse

Étapes	Projet « Évaluation de la vulnérabilité agricole »	Travail de thèse
1. Modèle conceptuel	Développement d'un premier modèle conceptuel avec les experts locaux	Révision et consolidation du modèle conceptuel Confrontation aux modèles existants Formalisation du modèle (littérale et UML)
2. Définition d'exploitations types	Définition de deux exploitations types	Définition de trois exploitations types Introduction des profils d'exploitants
3. Collecte de données	Données technico-économiques Données d'endommagement Données de monétarisation	Complément sur les données technico-économiques Affinement des hypothèses de coûts (distinction entre valorisation financière et économique)
4. Implémentation	Utilisation d'Excel	Utilisation du langage R
5. Évaluation de la vulnérabilité	Calcul des dommages directs et induits pour quelques scénarios d'inondation	Simulation d'indicateurs non monétaires Simulation des dommages directs et induits pour les trois exploitations types, trois profils d'exploitants et un nombre plus important de scénarios d'inondation
6. Application à l'évaluation économique des mesures de réduction de la vulnérabilité	Évaluation des mesures pour les deux exploitations types et quelques scénarios	Évaluation des mesures pour les trois exploitations types et un nombre plus important de scénarios

6.1.3. Modalités de réalisation des enquêtes

Des données de deux types ont été collectées :

- des données expertes sur les processus de la vulnérabilité des exploitations pour l'élaboration du modèle conceptuel ;
- des données quantitatives pour simuler les dommages à partir du modèle conceptuel.

- *Enquêtes réalisées auprès des experts*

Quinze entretiens ont été menés auprès d'experts spécialistes des productions représentées sur la zone et issus d'institutions diverses. La liste des personnes enquêtées est donnée en annexe 7.

Les entretiens ont été menés sous un format semi-directif et organisés autour de cinq thèmes :

1. la typologie des exploitations sur la zone et leurs caractéristiques technico-économiques ;
2. les données techniques de la production à savoir l'itinéraire technique de la production concernée, le temps de travail et le matériel nécessaire pour la réalisation de chaque tâche, ainsi que le pourcentage de perte de récolte en cas de non réalisation d'une tâche ;
3. les conséquences d'une inondation sur les exploitations pour trois périodes d'occurrence d'inondation ayant été observées sur le Rhône (mai, septembre et décembre) ;
4. les modalités de remise en route des exploitations.
5. la propagation des effets sur les filières.

- *Enquêtes auprès des exploitants agricoles*

Quatorze enquêtes auprès d'exploitants ont également été réalisées afin de compléter les retours d'expérience sur le terrain. La description des exploitations enquêtées est donnée en annexe 8. Ces enquêtes visaient principalement à collecter des données sur les conséquences et la remise en route des exploitations suite à l'inondation.

La première section du questionnaire correspond à une description générale de l'exploitation (structure, historique, productions). Ces informations sont venues compléter les bases de données techniques. La seconde section aborde la réaction de l'exploitation agricole face à l'inondation. Nous avons tout d'abord déterminé le nombre et le type de crues subies en termes d'intensité et de période d'occurrence. Nous avons ensuite listé, avec les exploitants, les dommages directs subis sur les différentes composantes de l'exploitation ainsi que les tâches nécessaires à la remise en état de ces composantes. Les effets que ces dommages directs avaient pu induire sur le fonctionnement de l'exploitation et les stratégies qui avaient été mises en œuvre par les exploitants pour la remise en route, ont été décrits. Un volet de l'enquête portait également sur l'analyse des conséquences sur la trésorerie des exploitations. Enfin, nous avons déterminé les conséquences à moyen et long termes sur les ventes (pertes de clients ou de contrats).

6.2 Exploitations types sur le Rhône aval

6.2.1. Introduction

La description détaillée des caractéristiques des exploitations types est donnée en annexe 9. Dans cette section, seuls les arguments concernant la représentativité des exploitations types et la synthèse de leurs caractéristiques technico-économiques sont présentées. A l'échelle de l'exploitation, le modèle EVA requiert le renseignement de la classe Farm (modèle de données présenté à la section 5.4, p 154). La démarche suivie est la suivante :

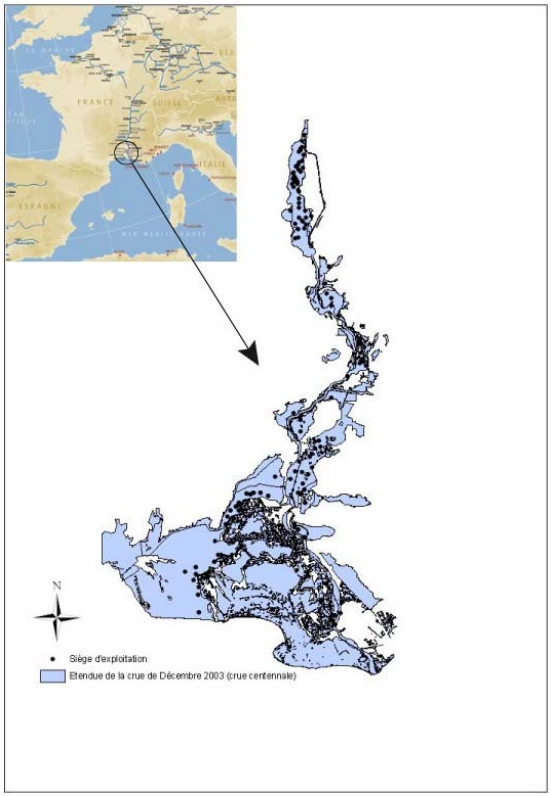
- La définition des types de production repose sur l'analyse des données collectées par la mission de réduction de la vulnérabilité agricole du Rhône aval et sur les enquêtes réalisées auprès d'experts.
- La description des surfaces et de la main d'œuvre disponible sur l'exploitation à temps plein, décrite par le nombre d'Unité de Travail Annuel, est issue de l'analyse des données départementales du RGA 2000.
- L'attribution d'un type de production, d'un itinéraire technique et des caractéristiques technico-économiques, reposent sur les entretiens et données collectées par entretiens auprès des experts des différents organismes techniques (chambre d'agriculture, CTIFL, CER).

- La surface moyenne du bâtiment d'exploitation, a été fixée, d'après les enquêtes réalisées, à 200 m² pour toutes les exploitations types.
- Une liste de matériels, associés à leur quantité et âge moyens a été dressée sur la base travaux de la Chambre d'Agriculture du Gard (2010) et des entretiens menés auprès des exploitants.
- La nature et l'évolution de la quantité des stocks d'intrants sont définies d'après l'itinéraire technique en supposant un achat des intrants deux mois avant le démarrage du cycle de production.
- La caractérisation de la gestion des stocks de produits résulte des entretiens avec les experts et exploitants.

6.2.2. Représentativité des exploitations types

Les données de l'enquête réalisée par la mission de réduction de la vulnérabilité agricole en zone inondable (Chambres d'Agriculture Rhône Méditerranée, 2006) sont utilisées dans cette section pour montrer la représentativité des exploitations types retenues sur la zone d'application.

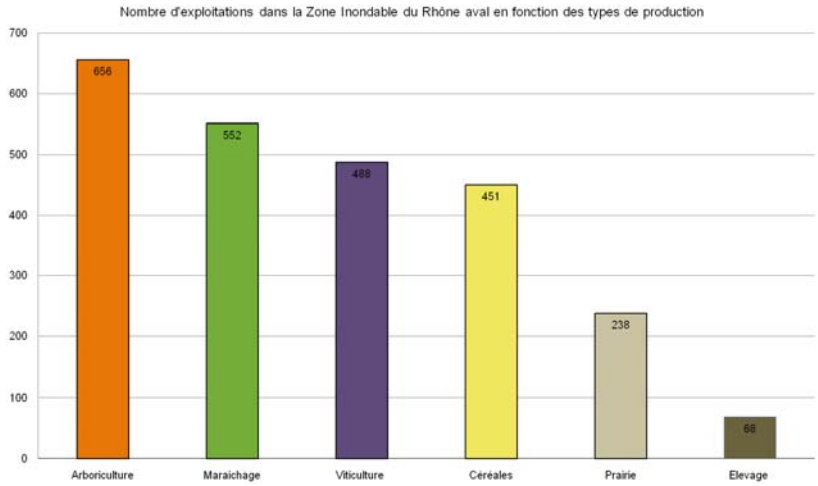
Près de 3 000 exploitations agricoles sont potentiellement concernées par le risque inondation dans cette zone. La figure 66 donne la localisation de certains sièges d'exploitation dans la zone d'expansion de la crue de 2003 d'après des données collectées lors de l'Étude Globale sur le Rhône (SIEE et al., 2003). L'enveloppe correspondant à cette crue est par la suite qualifiée de zone inondable sur le Rhône aval.



Source : données Plan Rhône

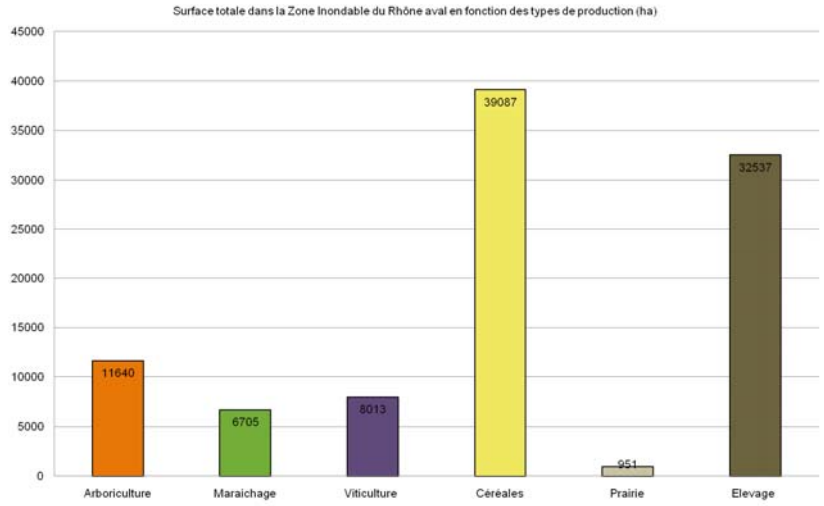
Figure 66 : Répartitions des sièges d'exploitations recensés dans l'enveloppe de la crue de Décembre 2003 sur le Rhône

Les exploitations de la zone aval du Rhône peuvent être classées en cinq groupes selon leur orientation technico-économique : céréales, arboriculture, maraîchage, viticulture et élevage (principalement manade). Les figure 67 et figure 68 montrent respectivement les répartitions en nombre et en surface des différents types de production de cette zone.



Source : d'après données CARM

Figure 67 : Répartition en nombre des exploitations recensées dans l'enveloppe de crue de Décembre 2003 par type de production



Source : d'après données CARM

Figure 68 : Répartition en surface des exploitations recensées dans l'enveloppe de crue du Rhône de décembre 2003 par type de production

Une majorité des exploitations est orientée vers l'arboriculture et le maraîchage. Les exploitations viticoles représentent le troisième groupe. En termes de surfaces, les céréales et l'élevage constituent les principales productions. Ceci est principalement lié à la production rizicole et à la pratique de la manade, élevage de taureaux et chevaux en Camargue qui sont réalisées sur des exploitations de très grande taille. Les enquêtes ont révélé que les processus de vulnérabilité des élevages de la zone étaient très particuliers au regard des autres exploitations. Ce type d'exploitation n'a pas été intégré dans le modèle générique de vulnérabilité.

Nous avons retenu pour réaliser les simulations trois exploitations types :

- deux exploitations en monoculture (arboriculture et viticulture) ;
- une exploitation pratiquant plusieurs cultures (céréales et maraichage).

6.2.3. Exploitation arboricole

- *Choix de l'exploitation type*

Le premier type d'exploitation retenu est une exploitation spécialisée en arboriculture. Ces exploitations sont les plus représentées en effectif sur la zone inondable (27% des exploitations en zone inondable) et représentent 12 % des surfaces.

- *Synthèse de ses caractéristiques technico-économiques*

Les caractéristiques de la culture pratiquée sont données au tableau 19 et celles de l'exploitation type dans le tableau 20. Cette exploitation type est dénommée par la suite A_8 (arboriculture, 8 ha).

Sur la base des entretiens réalisés avec les experts, la culture retenue pour A_8 est celle de la pomme (fruit à pépins). La variété Royal Gala a été choisie car elle est la plus cultivée sur le Rhône aval. Notons que les fruits à noyaux (pêche, abricot, cerise) sont beaucoup plus sensibles aux inondations que les fruits à pépins.

Tableau 19 : Synthèse des caractéristiques de la culture de la pomme Royal Gala

Variété	Rendement (kg/ha)	Prix (€/kg)	Produit (€/ha/an)	Charges totales (€/ha/an)	Charges de main d'œuvre (€/ha/an)	Marge Brute hors prime(€/ha/an)	Valeur ajoutée (€/ha/an)
Royal Gala	43 000	0,45	19 400	12 400	7 200	7 000	14 200

Tableau 20 : Synthèse des caractéristiques de l'exploitation type arboriculture fruit à pépin de moins de 15 ha

Exploitation type	SAU moyenne (ha)	UTA* moyenne	Variété	Produit (€/an)	Marge Brute hors prime (€/an)	Valeur ajoutée (€/an)
A_8	8	2	Royal Gala	155 200	56 000	113 600

* UTA : Unité de Travail Annuel

6.2.4. Exploitation viticole

- *Choix de l'exploitation type*

Selon les données de la mission réduction de la vulnérabilité agricole, les exploitations viticoles représentent avec 488 exploitations, 20 % des effectifs et une surface totale de 8 000 hectares soit 8 % des surfaces en zone inondable.

Les données du RGA 2000 indiquent que, sur les cinq départements de la zone d'étude, les exploitations viticoles sont majoritairement des exploitations approvisionnant des caves coopératives (5 495 exploitations) plutôt que des caves particulières (1 071 exploitations). Par ailleurs, les experts rencontrés nous ont confirmé que les exploitations situées en zone inondable étaient plus fréquemment des exploitations approvisionnant les coopératives (qualité des terroirs).

L'exploitation type retenue est donc une exploitation viticole fonctionnant en coopérative.

- *Synthèse de ses caractéristiques technico-économiques*

Les caractéristiques de la culture pratiquée sont données au tableau 21 et celle de l'exploitation type au tableau 22. Cette exploitation type est dénommée par la suite V_22 (Viticulture, 22 hectares).

Tableau 21 : Synthèse des caractéristiques de la vigne retenue (cépage rouge palissé)

Variété	Rendement (HL/ha)	Prix (€/HL)	Produit (€/ha/an)	Charges totales (€/ha/an)	Charges de main d'œuvre (€/ha/an)	Marge Brute hors prime (€/ha/an)	Valeur ajoutée (€/ha/an)
Cépage rouge / palissé	80	70	5 600	2 300	1 300	3 300	4 600

Tableau 22 : Synthèse des caractéristiques de l'exploitation type viticole

Exploitation type	SAU moyenne (ha)	UTA moyenne	Variété	Produit (€/an)	Charges totales (€/ha/an)	Charges de main d'œuvre (€/ha/an)	Marge Brute hors prime (€/ha/an)	Valeur ajoutée (€/ha/an)
V_22	22	2	Cépage rouge / palissé	123 200	50 600	28 600	72 600	101 200

6.2.1. Exploitation spécialisée en céréales et maraîchage

- *Choix de l'exploitation type*

En effectif, les exploitations en maraîchage représentent la deuxième catégorie la plus importante après l'arboriculture. En surface, ce sont les céréales qui se classent en première position sur la zone d'étude. Lors de nos entretiens avec les techniciens et les exploitants, nous avons identifié un type d'exploitation présent sur le secteur d'étude en zone inondable et cohérent avec les deux tendances citées précédemment. Il s'agit des exploitations mixtes spécialisées en maraîchage et céréales. Elles disposent d'une surface faible en céréales par rapport aux exploitations céréalières pures et réalise la majorité de leur valeur ajoutée en maraîchage. La culture alternée de melon et de blé dur y est fréquemment pratiquée. Pour compléter l'activité maraichère sur l'année, la salade est cultivée en rotation avec le melon.

- *Synthèse de ses caractéristiques technico-économique*

Les caractéristiques des cultures pratiquées sont présentées dans le tableau 23 et celle de l'exploitation type dans le tableau 24. Celle-ci est dénommée par la suite MC_15 (Maraîchage/Céréale, 15 ha).

Tableau 23 : Synthèse des caractéristiques des cultures de l'exploitation type « maraîchage/céréales » de 15 ha

Cultures	Produit (€/ha/an)	Primes (€/ha/an)	Charges totales (€/ha/an)	Charges de main d'œuvre (€/ha/an)	Marge Brute hors prime (€/ha/an)	Valeur ajoutée (€/ha/an)
Melon	24 000	0	17 400	9 400	6 600	16 000
Salade	25 500	0	17 300	10 700	8 200	18 900
Blé Dur	1 050	120	550	0	500	500

Tableau 24 : Synthèse des caractéristiques de l'exploitation type « maraîchage/céréales » de 15 ha

Exploitation type	SAU (ha)	UTA	Cultures	Produit (€/an)	Primes (€/an)	Charges totales (€/an)	Charges de main d'œuvre (€/ha /an)	Marge Brute hors prime (€/ha/an)	Valeur ajoutée (€/ha/an)
MC-15	15	1	Melon/salade et Blé dur	161 100	1 440	110 700	60 300	50 400	110 700

6.2.2. Bilan des caractéristiques des exploitations types

Les caractéristiques des trois exploitations types retenues sont récapitulées au tableau 25.

Tableau 25 : Rappel des caractéristiques retenues pour les exploitations types

Exploitation type	SAU totale (ha)	UTA	Culture	Surface par type de culture (ha)	Produit (k€/an)	MB hors primes (k€/an)	VA (k€/an)
A_8	8	2	Pomme (Royal Gala)	8	155	56	114
V_22	22	2	Vigne de cépage rouge palissé	22	123	73	101
MC_15	15	1	Melon	3	161	50	111
			Salade				
			Blé dur	12			

6.3 Données collectées et hypothèses de simulation

Nous utilisons l'organisation proposée au chapitre 5 (section 5.4, p 154) pour présenter les données utilisées dans l'application et leur source. Nous rappelons que les classes de données sont en anglais car il s'agit du langage retenu pour l'implémentation informatique.

6.3.1. Données techniques de production (`Production tasks`)

Les données techniques suivantes ont été collectées pour les cinq productions retenues dans les exploitations types (pomme, vigne, blé, melon, salade) auprès d'experts et sur la base de documents techniques :

- les itinéraires techniques (`CMS_Crop`) des différentes productions fournissent une liste des tâches à réaliser (`task_name`) et leur plage de réalisation (`begin`, `end`) (cf. exemples en annexe 10).
- à chaque tâche est associé
    - un temps de réalisation et sa répartition en fonction des périodes de l'année (`labour`) (cf. exemples en annexe 11) ;
    - un pourcentage de perte de production (`loss`) qui permet de déterminer la perte de produit lorsque la tâche n'est pas réalisée ;
    - une liste et une quantité de matériel (`Task_Tool_Crop`) et d'intrants (`Task_Input_Crop`) (cf. exemples annexe 12) ;

Toutes les données collectées ont été complétées et confrontées aux ouvrages techniques existants comme « Les bases de la production végétale » (Soltner, 2005) et les références sur les productions légumières (Péron, 2006). La donnée la plus difficile à collecter est le pourcentage de perte de production car elle fait l'objet de peu d'études techniques.

6.3.2. Données d'endommagement (Damaging_Data)

À chaque composante physique de l'exploitation est associée une fonction d'endommagement permettant d'en estimer le changement d'état suite à différents scénarios d'inondation ainsi que le coefficient d'endommagement.

Dans le cadre de l'application, nous utilisons :

- une fonction d'endommagement spécifique à
    - chaque type de matériel végétal (verger, vigne) ;
    - chaque matériel technique ;
    - chaque type de culture ;
- une fonction d'endommagement identique pour
    - tous les bâtiments ;
    - tous les stocks.

Remarques sur les données individuelles du système « Calamité Agricole »

La base de données du système « Calamité Agricole » contient des données individuelles (montant de dommages indemnisables et indemnisés par type de culture). L'utilisation de ces données a été envisagée pour deux usages :

- la construction de fonctions de dommages pour les cultures ;
- la comparaison avec les dommages simulés par EVA.

Les deux utilisations se sont révélées impossibles avec les données actuelles car elles auraient nécessité des traitements supplémentaires importants. En effet, la corrélation entre le dommage et les paramètres de l'aléa subi n'est pas directement disponible. Il faudrait, pour cela, établir un croisement entre la localisation des exploitations et des cartes de modélisation de l'aléa. Ce travail ne nous est pas apparu pertinent à réaliser car les données de dommages présentent également d'autres caractéristiques qui limitent leur fiabilité pour les utilisations souhaitées :

- Premièrement, elles ne font apparaître que les exploitations ayant été indemnisées, c'est-à-dire celles dont les montants de dommages subis sont supérieurs aux seuils d'éligibilité, laissant de côté une proportion significative des exploitations ayant subi l'inondation.
- Deuxièmement, les dommages sont estimés par le biais des déclarations des exploitants sans contrôle systématique d'expert.

6.3.3. Données sur la remise en état (`Recovery tasks`)

Principalement collectées auprès des exploitants, ces données concernent. :

- les tâches à mettre en œuvre (`Task_Flood`) pour remettre en état les composantes caractérisées par leur durée (`duration`) ;
- les matériels nécessaires pour la réalisation de ces tâches (`Task_Tool_Flood`).

Pour le matériel, les durées suivantes de remise en état ont été fixées, sur la base des entretiens[53], à :

- 3 semaines de délais pour une réparation ;
- 8 semaines de délais pour un rachat.

6.3.4. Hypothèses de valorisation (`Monetizing data`)

- *Valorisation financière*

Les hypothèses mobilisées concernant les coûts de main d'œuvre et d'utilisation du matériel pour la valorisation financière sont récapitulés au tableau 26.

Le coût du matériel est défini à partir du coût d'utilisation établi chaque année par le Bureau de Coordination du Machinisme Agricole. Ce coût constitue une référence nationale utilisée dans le cadre d'échanges de services entre agriculteurs. Il inclut une partie de coûts fixes liés au matériel. C'est pourquoi pour l'analyse financière, les charges de matériel sont fixées à 50 % du coût d'utilisation.

Le coût d'emploi de la main d'œuvre est fixé à 12 €/h et correspond au salaire (SMIC agricole de 9 €/h) et aux charges salariales et patronales (Rapport Reyniès, 2011).

Tableau 26 : Hypothèses de valorisation de main d'œuvre et d'utilisation du matériel utilisés pour l'évaluation financière

	C^{i}_{mo}	C^{e}_{mo}	C^{i}_{mat}	C^{e}_{mat}
Interne	0	-	$0.5*C^{ut}_{mat}$	-
Solidarité	0	0	$0.5* C^{ut}_{mat}$	$0.5* C^{ut}_{mat}$
Prestation	0	C_{mo}	$0.5* C^{ut}_{mat}$	C^{ut}_{mat}

C^{i}_{mo} : coût de la main d'œuvre interne (exploitant et employé temps plein)
C^{e}_{mo} : coût de la main d'œuvre externe (emploi ou solidarité)
C^{i}_{mat} : coût du matériel interne à l'exploitation
C^{e}_{mat} : coût du matériel externe à l'exploitation (location ou prêt)
C_{mo} : coût d'emploi de la main d'œuvre
C^{ut}_{mat} : coût d'utilisation du matériel

[53] Ces durées pourraient dans de futurs développements tenir compte des effets macroscopiques de rareté des ressources en fonction de l'ampleur du phénomène d'inondation.

- *Valorisation économique*

Concernant la restauration des capitaux physiques, le dommage est évalué par le coût de restauration sur la base des deux hypothèses suivantes :

- la valeur attribuée au travail est la valeur d'emploi de la main d'œuvre (12 €/h).
- la valeur attribuée à l'utilisation du matériel est égale au coût d'utilisation du matériel.

Dans l'évaluation des pertes de valeur ajoutée, les coûts de main d'œuvre et d'utilisation du matériel sont identiques quelle que soit l'origine (interne, prestation, solidarité) :

- $C^{i}_{mo} = C^{e}_{mo} = C_{mo} = 12$ €/h
- $C^{i}_{mat} = C^{e}_{mat} = C^{ut}_{mat}$

6.3.5. Bilan de l'ensemble des données utilisées pour la simulation

Sur la base du modèle de données présenté à la section 5.4 (p 154), une synthèse des types de données mobilisées dans le modèle EVA et de leur source est proposée :

- tableau 27 pour les données concernant l'exploitation ;
- tableau 28 pour les tâches de production ;
- tableau 29 pour les fonctions d'endommagement ;
- tableau 30 pour les tâches de remise en état ;
- tableau 31 pour la valorisation.

Tableau 27 : Données sur les exploitations (Farm)

Classe	Attribut	A_8	V_22	MC_15
Farm_Spatial	Area Crop	RGA 2000 Entretiens experts	RGA 2000 Entretiens experts	RGA 2000 Entretiens experts
	Yield Price	Références technico-économiques de la pomme. (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2005) Références technico économiques de la variété de pomme Royal Gala en Languedoc Roussillon (CER, 2009b)	Références technico-économiques d'une vigne palissée en Languedoc Roussillon. (CER, 2009a)	Références technico-économiques du melon (CER du Gard, 2007) Références technico-économiques du melon (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2006b) Références technico-économiques de la salade (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2006a) Références technico-économiques du blé dur. (Chambre d'Agriculture de la Drôme, 2007)
Furniture	ID (name) Age Quantity	Etude des Enjeux Agricoles Plaine de Bellegarde/Fourques (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010) Entretiens experts	Etude des Enjeux Agricoles Plaine de Bellegarde/Fourques (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010) Entretiens experts	Etude des Enjeux Agricoles Plaine de Bellegarde/Fourques (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010) Entretiens experts
Farm_Labour	Value	RGA 2000 Entretiens experts	RGA 2000 Entretiens experts	RGA 2000 Entretiens experts
Input_Purchase	Input Quantity Purchase	Références technico-économiques de la pomme. (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2005) Entretiens experts	Références technico-économiques d'une vigne palissée en Languedoc Roussillon. (CER, 2009a) Entretiens experts	Références technico-économiques du melon (CER du Gard, 2007) Références technico-économiques du melon (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2006b) Références technico-économiques de la salade (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2006a) Références technico-économiques du blé dur. (Chambre d'Agriculture de la Drôme, 2007) Entretiens experts

Tableau 28 : Données sur les tâches de production (Production tasks)

Classe	Attribut	Pomme	Vigne	Melon	Salade	Blé
CMS_Crop	Task_name Labour Begin End	Références technico-économiques de la pomme (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2005) Entretiens experts	Références technico-économiques d'une vigne palissée en Languedoc Roussillon (CER, 2009a) Entretiens experts	Références technico-économiques du melon (CER du Gard, 2007) Références technico-économiques du melon (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2006b) Entretiens experts	Références technico-économiques de la salade (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2006a) Entretiens experts	Références technico-économiques du blé dur (Chambre d'Agriculture de la Drôme, 2007) Entretiens experts
	Loss	Entretiens experts	Entretiens experts	Entretiens experts	Entretiens experts	Entretiens experts
Task_Tool_Crop	Task_name /	Entretiens experts et	Entretiens experts et	Entretiens experts et	Entretiens experts et	Entretiens experts et

	tool	exploitants	exploitants	exploitants	exploitants	exploitants
Task_Input_Crop	Task_name / input	Entretiens experts	Entretiens experts	Entretiens experts	Entretiens experts	Entretiens experts

Tableau 29 : Données sur l'endommagement (Damaging Data)

Classe de données	Source
Damaging_Building	Entretiens experts et exploitants
Damaging_Furniture	Etude des Enjeux Agricoles Plaine de Bellegarde/Fourques (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010) Entretiens expert
Damaging_Culture_Crop	Etude des Enjeux Agricoles Plaine de Bellegarde/Fourques (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010) Entretiens expert
Damaging_Soil_Crop	Barème des inondations du Gard de Septembre 2002. DDAF du Gard (2002) Entretiens expert
Damaging_Plant_Material_Crop	Etude des Enjeux Agricoles Plaine de Bellegarde/Fourques (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010) Entretiens expert

Tableau 30 : Données sur les tâches de remise en état (Recovery tasks)

Classe de données	Source
Task_Flood	Entretiens experts et exploitants
Task_Tool_Flood	Entretiens experts et exploitants

Tableau 31 : Données sur la valorisation monétaire (Monetizing Data)

Classe de données	Source
Labour	Etude et propositions concernant les enjeux du coût de la main d'œuvre dans le secteur de la production agricole (Reyniès, 2011)
Tool	Le coût d'utilisation du matériel agricole - Barème d'entraide.(BCMA, 2008)
Cost_Plant_Material	Références technico-économiques de la pomme. (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2005) Références technico-économiques d'une vigne palissée en Languedoc Roussillon. (CER, 2009a) Entretiens experts
Discount_Tool	Etude des Enjeux Agricoles Plaine de Bellegarde/Fourques (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010)
Input	Références technico-économiques de la pomme (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2005) Références technico-économiques d'une vigne palissée en Languedoc Roussillon (CER, 2009a) Références technico-économiques du melon (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2006b) Références technico-économiques de la salade (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2006a) Références technico-économiques du blé dur (Chambre d'Agriculture de la Drôme, 2007)

6.4 Scénarios d'inondations simulés

6.4.1. Scénarios d'exposition des exploitations

La représentation spatiale des exploitations types, utilisée pour les applications dans les chapitres 7 et 8, correspond à deux parcelles de même surface pour chaque culture et un bâtiment (figure 69).

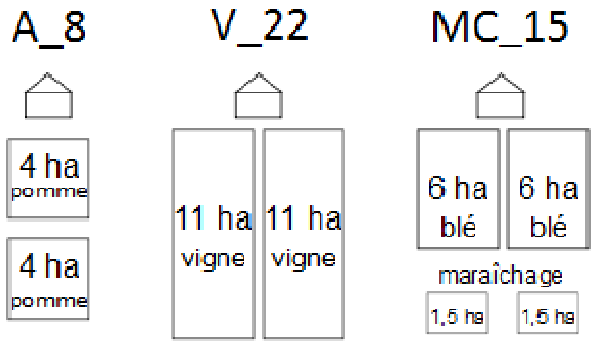


Figure 69: Représentation spatiale des exploitations types

En termes d'exposition, trois cas de figues sont considérés (figure 70) :

- pour le groupe de scénarios 1, l'ensemble des parcelles est inondé mais pas le bâtiment ;
- pour le groupe de scénarios 2, 50 % des parcelles et le bâtiment sont inondés ;
- pour le groupe de scénarios 3, l'ensemble des parcelles et le bâtiment sont inondés.

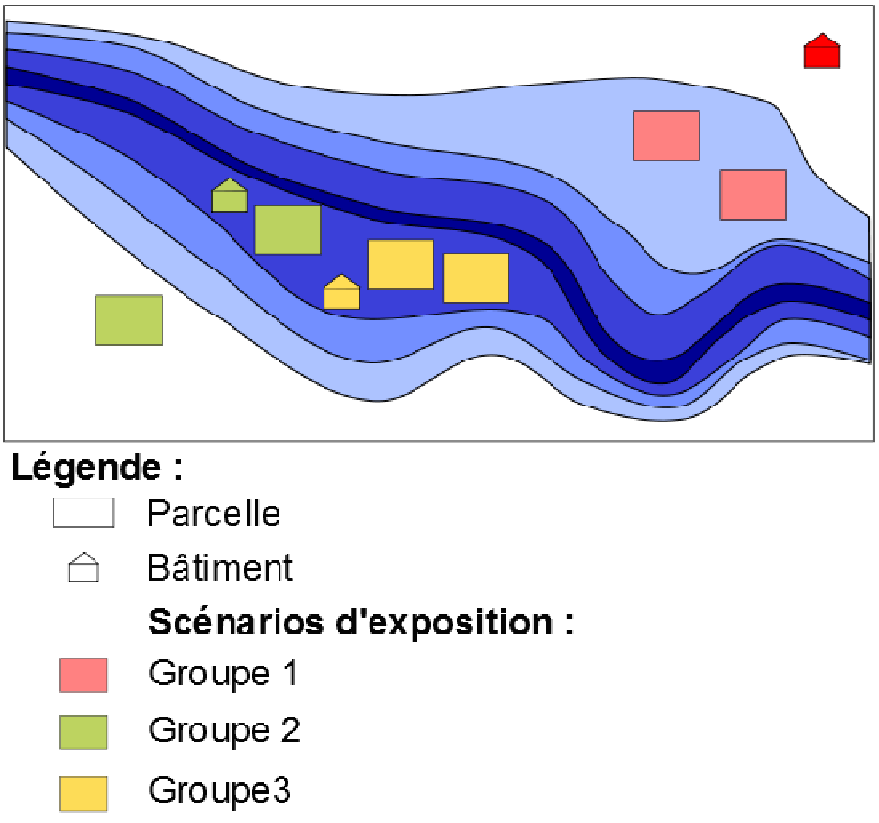


Figure 70: Scénarios d'exposition des exploitations types

6.4.2. Scénarios d'inondation

- *Combinaisons de paramètres possibles*

Pour chaque parcelle et chaque bâtiment, les paramètres suivants de l'inondation peuvent être définis :

- la période d'occurrence qui peut varier entre 1 et 52 correspondant au début de l'inondation (numéro de semaine d'une année) ;
- la hauteur d'eau peut varier entre 1 cm et l'infini[54] ;
- la durée de l'inondation définie au pas de temps hebdomadaire ;
- les vitesses peuvent être définies selon trois niveaux qualitatifs (faible = 0, moyen = 1, fort = 2).

- *Combinaisons de paramètres retenues pour la simulation*

Dans l'application, l'inondation touche de façon homogène les composantes inondées. Les simulations ont, dans la plupart des cas présentés, étaient réalisées pour :

- l'ensemble des semaines 1 à 52 de l'année ;
- quatre niveaux de hauteurs d'eau (20 cm, 50 cm, 100 cm et 150 cm) ;
- quatre durées allant de 1 à 4 semaines ;
- deux niveaux de vitesse (0 ou 2).

Concernant la période d'occurrence, des zooms peuvent être proposés autour de trois périodes d'occurrence importantes d'après l'étude hydrologique du Rhône aval (ISL, 2009) et les évènements exceptionnels (mai 1856, septembre 2002, décembre 2003) :

- les crues d'automne (semaines 32 à 40) ;
- les crues d'hiver (semaines 44 à 52) ;
- les crues de printemps (semaines 14 à 22).

Concernant les vitesses, la majorité des simulations est réalisée avec une vitesse faible (niveau 0). Le niveau 2 est utilisé pour illustrer la répartition des dommages liée à un évènement extrême.

[54] Sachant que les fonctions d'endommagement donnent un montant maximal de dommages à partir de 150 cm, il n'est pas nécessaire d'aller au-delà de ce seuil.

6.5 Conclusions

La problématique de thèse trouve un ancrage opérationnel fort dans les questions posées par la mise en place du programme de réduction de la vulnérabilité des exploitations agricoles sur le Rhône aval. Pour les financeurs et maîtres d'œuvre de ce programme, il s'agit de pouvoir déterminer les conditions de son efficacité (types d'exploitation, niveau d'exposition…). En termes de recherche, il s'agissait d'implémenter notre modèle pour simuler des dommages avec et sans mise en place de ces mesures. Cependant, aucune application n'a été menée sur des cas réels car les zones et les types d'exploitation sur lesquelles les mesures allaient être mises en place n'étaient pas encore définis. Nous avons donc réalisé un travail exploratoire sur des exploitations types et en définissant des scénarios d'inondation théoriques.

Dans le cadre du projet opérationnel, une première implémentation avait été réalisée sous Excel permettant la simulation une centaine de scénarios sur deux exploitations types.

Dans le temps de la thèse, une seconde implémentation utilisant le langage R a permis une automatisation des calculs. L'automatisation a permis d'envisager la simulation sur l'ensemble des périodes de l'année et la prise en compte des profils d'exploitants, ce qui n'était pas réalisable sous Excel. Elle a permis de simuler les dommages pour un nombre plus important de scénarios d'inondation (plus de 1 000). L'intégration de nouvelles exploitations types est rendu beaucoup plus facile et nécessite le remplissage du modèle de données.

Le nombre de combinaisons entre les différents paramètres du modèle étant très importants, nous avons défini au chapitre 6 :

- les trois exploitations types retenues ;
- leur représentation spatiale et leur exposition à l'inondation ;
- les niveaux des paramètres de l'inondation utilisés dans les scénarios.

Le chapitre 6 montre le nombre important de données à collecter pour utiliser le modèle EVA. Retenons que deux types de données peuvent être distingués :

- les données spécifiques aux exploitations types doivent être définies chaque fois que le modèle doit être utilisé sur une nouvelle exploitation ;
- les données génériques (endommagement, valorisation, tâches de production et de remise en état) sont applicables à toutes les exploitations[55].

55 Chaque fois qu'une nouvelle culture est introduite, les données relatives (endommagement, valorisation, tâches de production) doivent être définie.

CHAPITRE 7. CARACTÉRISATION ET ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DE TROIS EXPLOITATIONS TYPES

Dans ce chapitre, nous proposons une analyse exploratoire de la vulnérabilité, utilisant le modèle EVA, des trois exploitations types retenues sur la zone Rhône aval :

1. A_8 (arboriculture, 8 ha) ;
2. V_22 (viticulture, 22 ha) ;
3. MC_15 (maraîchage / céréale, 15 ha).

Notre objectif est de montrer quel éclairage sur la vulnérabilité permet une approche à l'échelle de l'exploitation agricole.

Les paramètres retenus pour les simulations réalisées sont d'abord présentés. Ensuite, les axes d'analyse suivent la logique proposée au chapitre 5 (section 5.4, p 154) :

- indicateurs non monétaires ;
- évaluation des dommages avec une valorisation financière ;
- évaluation des dommages avec une valorisation économique.

Dans un premier temps, nous illustrons l'évolution de l'utilisabilité des différentes composantes de l'exploitation agricole, en particulier, le matériel agricole qui génère des effets induits sur l'activité en cas d'indisponibilité.

Ensuite, nous analysons les dommages totaux avec une valorisation financière puis économique. Dans les deux cas, les dommages totaux résultent d'une évaluation préalable des dommages directs dont la méthodologie et les calculs sont donnés en annexe 13.

Dans l'approche financière, la répartition entre dommages directs et induits fait l'objet d'une analyse détaillée. En particulier, la variation du revenu et sa composition est analysée pour les différents profils d'exploitants.

Nous intégrons également une analyse financière prenant en compte les indemnisations d'assurance et « Calamité Agricole » perçues par les exploitants afin d'identifier les scénarios d'inondation les plus pénalisants pour l'exploitation.

Dans l'approche économique, l'influence des profils sur les dommages économiques est d'abord étudiée. Puis, nous réalisons des tests de sensibilité des dommages totaux à différents paramètres de l'aléa : hauteur, durée et période d'occurrence.

Un nombre important de résultats graphiques est présenté dans ce chapitre dans un souci d'illustration des simulations sur les différentes exploitations types. La présentation de ces résultats est réalisée de façon linéaire mais une synthèse transversale détaillée est proposée en conclusion.

7.1 Plan d'expérience retenu

Concernant l'exposition et les paramètres d'aléa, les scénarios d'inondation suivants ont été retenus (tableau 32).

Tableau 32 : Paramètres des scénarios d'exposition et d'aléa retenus pour les simulations du chapitre 7

Exposition			Aléa				Nombre de simulations
Groupe	Parcelles	Bâtiment	Hauteur (cm)	Durée (semaines)	Vitesse (niveau)	Occurrence (semaine)	
Groupe 1	100 %	Non inondé	20	1 à 4	0	1 à 52	208
Groupe 2	50 %	Inondé	150	1 à 4	0	1 à 52	208
Groupe 3	100 %	Inondé	{20 ; 50 ; 100 ; 150}	1 à 4	0	1 à 52	832
			150	1	2	1 à 52	52
						Total	1 300

Ces différents scénarios ont été appliqués sur les trois exploitations types pour les trois profils d'exploitants, représentant un total de 11 700 sorties.

7.2 Indicateurs de vulnérabilité non monétaires

7.2.1. Utilisabilité des composantes physiques

L'évolution de l'utilisabilité des matériels agricoles est représentée sous forme de diagrammes indiquant, pour les semaines suivant une inondation, l'état normal, endommagé, en réparation ou en rachat du matériel. Nous illustrons cette sous-section avec les résultats obtenus pour l'exploitation type A_8.

Pour les scénarios du groupe 1, l'inondation n'affecte pas l'état du matériel puisque le bâtiment n'est pas inondé, permettant d'anticiper que si des effets induits sont observés, ils ne proviennent pas d'une contrainte sur le matériel.

Pour les scénarios du groupe 2 (figure 71), l'inondation (semaine 49) du bâtiment par une hauteur de 150 cm touche l'ensemble des matériels entraînant leur indisponibilité pendant l'inondation (1 semaine) puis la réparation (3 semaines) ou le rachat (8 semaines)[56].

[56] Notons qu'une seule année est représentée sur les chronologies d'utilisabilité. La semaine 1 correspond, par exemple pour la figure 71, à l'année suivant l'inondation.

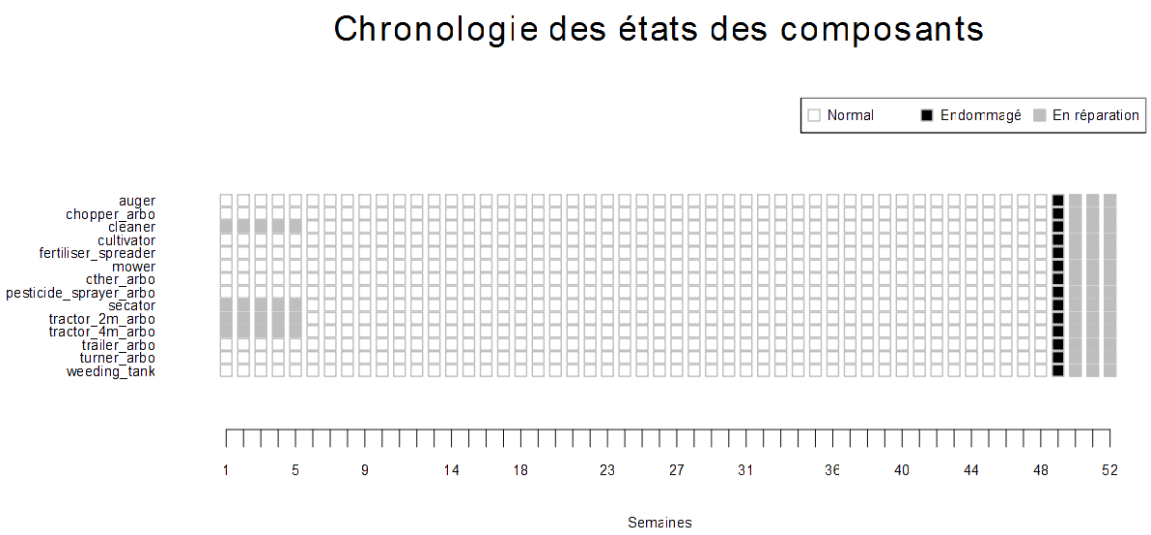


Figure 71 : Chronologie de l'utilisabilité du matériel de l'exploitation type A_8 après une inondation du groupe 2 (semaine 49, durée 1 semaine)

7.2.2. Effets sur l'organisation du travail à l'échelle de l'exploitation agricole

Les effets sur l'organisation du travail sont de trois ordres :

- la non réalisation partielle ou totale de la tâche si la date de fin de réalisation est comprise entre la date de début et de fin de l'inondation (cas de la tâche de désherbage « weeding_3 », figure 72) ;
- l'augmentation du temps de travail hebdomadaire pour une tâche lié au report du temps de travail pendant la période d'inondation (exemple de la taille « pruning » , figure 72) ;
- l'augmentation globale du temps de travail lié à la réalisation des tâches de remise en état.

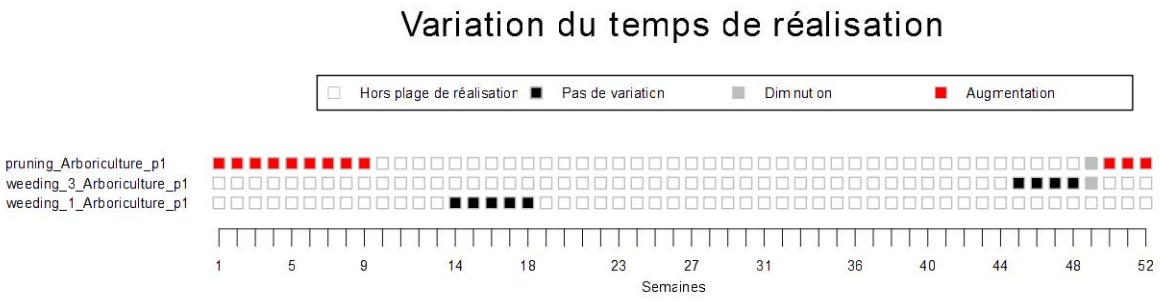


Figure 72 : Perturbations de la réalisation d'une liste de tâches de l'exploitation type A_8 après une inondation du groupe 2 (semaine 49, durée 1 semaine)

La figure 73 montre la variation des besoins en main d'œuvre pour l'ensemble des tâches à réaliser, par rapport aux besoins en temps normal, de l'exploitation A_8 avec un profil Prestation, ayant subi une inondation du groupe 1 d'une semaine se produisant, respectivement, aux semaines 18, 36 et 49.

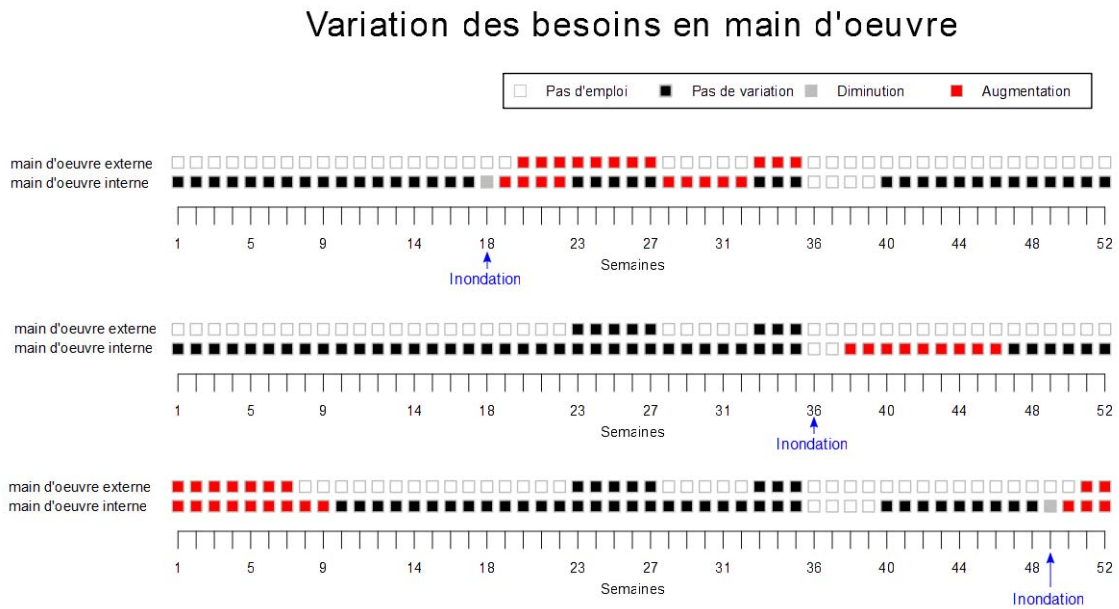


Figure 73 : Variation des besoins en main d'œuvre de l'exploitation type A_8 (Profil Prestation) après une inondation du groupe 1 (semaine 18, 36 ou 49 et d'une durée d'une semaine)

Suivant la période d'occurrence de l'inondation, l'impact des tâches de remise en état est variable. La culture de la pomme étant peu sensible à une inondation, l'itinéraire technique est dans les trois cas ci-dessous poursuivi suite à l'inondation et entraîne une augmentation du temps de travail en interne et nécessite pour les inondations de décembre et mai l'emploi de main d'œuvre externe.

Pour l'exploitation type V_22, les crues de mai et de décembre ont des effets importants en termes de main d'œuvre. La crue de septembre implique la perte de la récolte et donc une forte diminution des besoins à cette période. Toutefois, la remise en état associée à la reprise d'un nouveau cycle de production entraîne des besoins accrus en main d'œuvre à partir de la semaine 45.

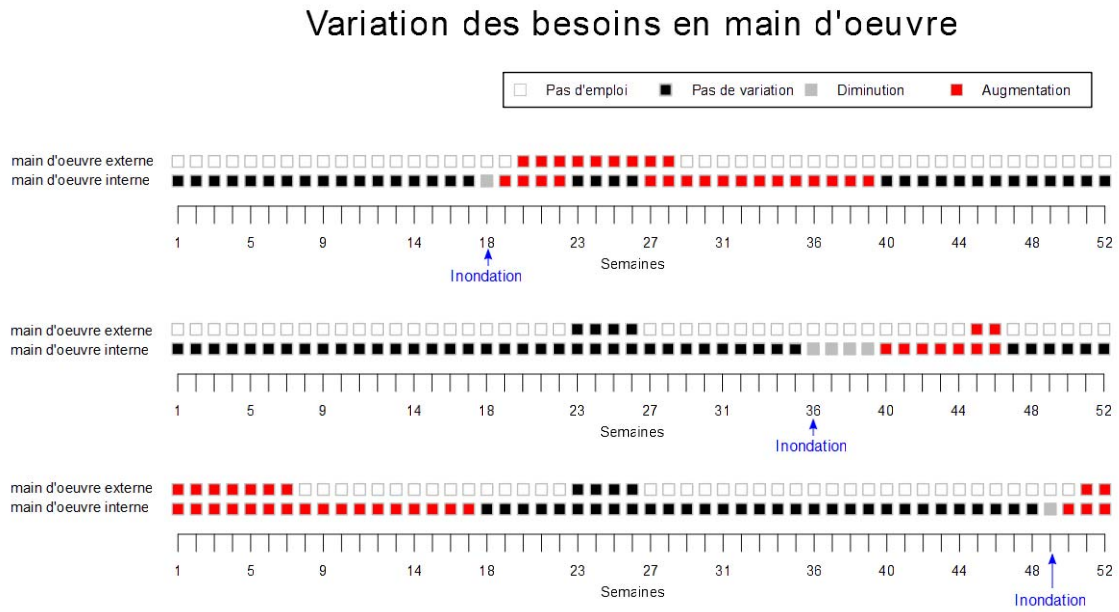


Figure 74 : Variation des besoins en main d'œuvre de l'exploitation type V_22 (Profil Prestation) après une inondation du groupe 1 (semaine 18, 36 ou 49 et d'une durée d'une semaine)

L'exploitation MC_15 fonctionne en temps normal avec beaucoup de main d'œuvre externe. Trois itinéraires techniques sont réalisés en parallèle sur cette exploitation. Pour les crues de mai et décembre, les besoins de main d'œuvre diminuent (perte de récolte) avant d'augmenter (remise en état et poursuite des itinéraires techniques).

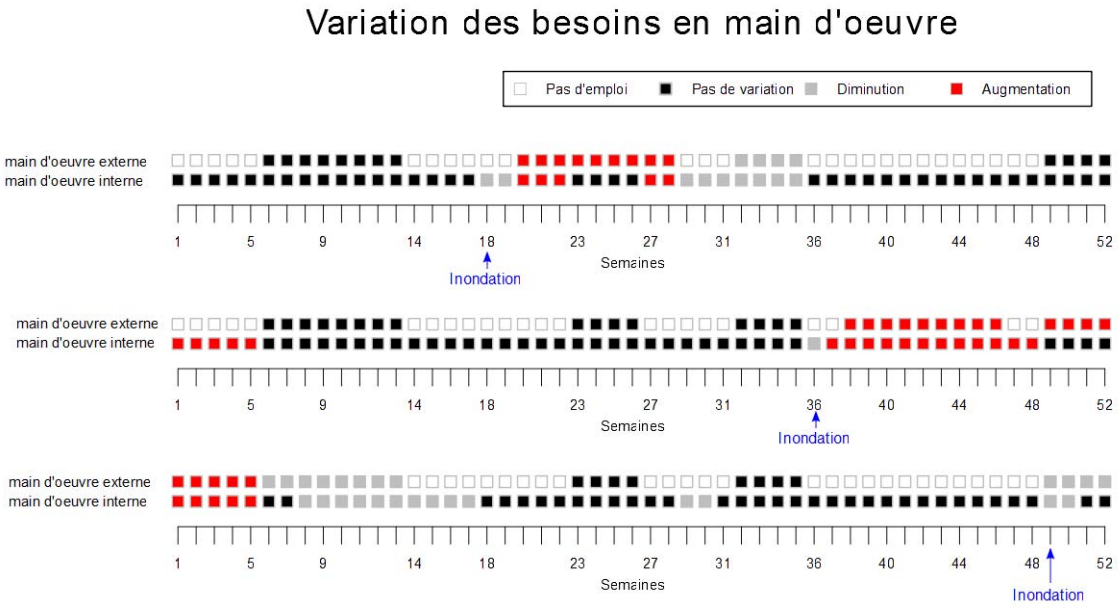


Figure 75 : Variation des besoins en main d'œuvre de l'exploitation type MC_15 (Profil Prestation) après une inondation du groupe 1 (semaine 18, 36 et 49 ou d'une durée d'une semaine)

7.3 Dommages directs

Nous présentons la méthodologie et les résultats de simulation des dommages directs en annexe 13. Nous illustrons ici la répartition des dommages directs par le cas de l'exploitation A_8 pour les trois groupes de scénarios. Le montant de dommages est donné en k€/exploitation pour trois périodes d'occurrence (décembre, mai et septembre) et pour quatre hauteurs d'eau (20, 50, 100 cm). Cette première approche montre que la prise en compte des seuls dommages aux cultures (en jaune dans les figures suivantes) dans l'évaluation des dommages directs n'est pas représentative des dommages directs subis par les exploitations. Pour les scénarios du groupe 1 (figure 76), les coûts de restauration des sols représentent une proportion significative des dommages directs.

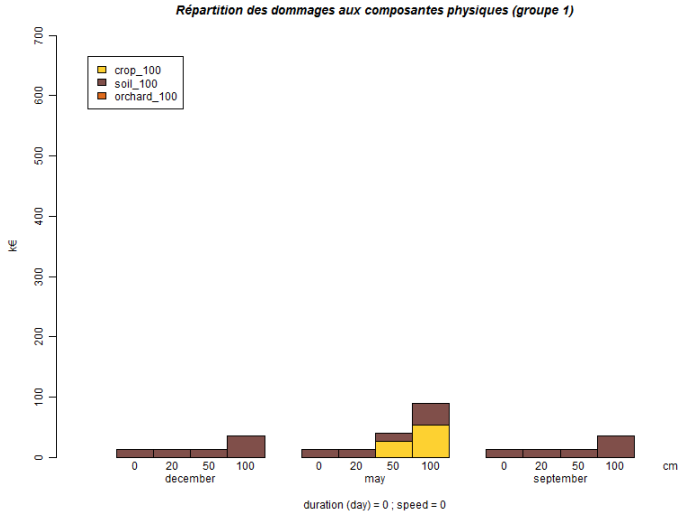


Figure 76 : Dommages directs pour l'exploitation A_8 (scénario du groupe 1)

Pour les scénarios du groupe 2 (figure 77), les dommages au matériel (bleu foncé) constituent la part de dommages la plus importante.

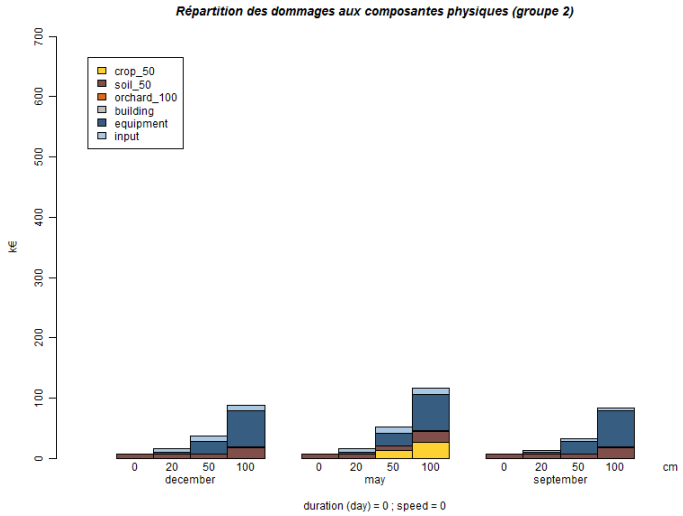


Figure 77 : Dommages directs pour l'exploitation A_8 (scénario du groupe 2)

Pour le groupe 3 (figure 78), les dommages directs sont principalement liés à la perte de matériel végétal et à l'intégralité de la récolte.

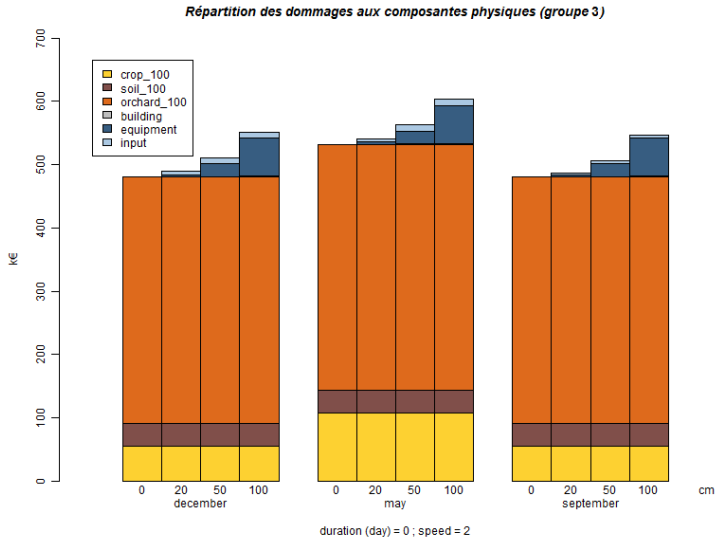


Figure 78 : Dommages directs pour l'exploitation A_8 (scénario du groupe 3)

Globalement, on peut distinguer par l'analyse des dommages directs deux catégories de vulnérabilité :

- la vulnérabilité aux évènements extrêmes touchant l'intégralité d'une exploitation où les coûts de restauration et la perte directe de récolte dominent le montant total de dommage ;
- la vulnérabilité aux évènements faibles à moyens touchant l'intégralité de l'exploitation ou fort mais ne touchant qu'une partie de l'exploitation pour lesquels tant les coûts de restauration que les pertes directes de récolte peuvent être faibles.

Les effets induits ne sont attendus que dans le deuxième cas de figure car pour les évènements directs, la perte directe de récolte est généralement très élevée impliquant l'arrêt des tâches de production. Nous proposons une analyse approfondie de ces cas de figures d'un point de vue financier (avec et sans assurance) puis d'un point de vue économique en intégrant les dommages induits sur l'activité.

7.4 Approche financière des dommages à l'exploitation

Nous proposons dans cette section une analyse des dommages sans prise en compte de l'assurance[57]. Les dommages sont valorisés avec les hypothèses de coûts financiers (cf. 6.3.4, p 185) et simulés principalement pour les groupes de scénario 1 et 2. Pour les scénarios du groupe 3, l'intégralité des parcelles et des bâtiments étant inondés les effets induits attendus sont moins importants.

Si des effets induits sont observés, il est attendu qu'ils soient principalement liés :

- à la main d'œuvre pour les scénarios du groupe 1 ;
- au matériel pour les scénarios du groupe 2.

Les graphiques utilisés par la suite représentent :

- le montant de dommages en k€/exploitation type en ordonnée ;
- la semaine d'occurrence (1 à 52) de l'inondation en abscisse.

7.4.1. Analyse du dommage total en fonction des différents profils d'exploitants

Les figures de cette section représentent le montant de dommages total en fonction de la période d'occurrence de l'inondation pour les trois profils.

Pour les trois exploitations types, la comparaison du profil Interne et des profils Prestation et Solidarité, nous permet d'identifier le poids des effets induits sur le montant total de dommage. S'il n'y a pas d'effet induit, le montant de dommage total pour les trois profils devrait être identique.

- *Scénario 1 : faible hauteur sur 100 % des parcelles et bâtiment non inondé*

Quelle que soit la période de l'année et l'exploitation type, les dommages pour le profil Solidarité sont les plus faibles (figure 79, figure 80 et figure 81).

Pour l'exploitation type A_8, la figure 79 représente pour les trois profils d'exploitants, les dommages financiers simulés pour un scénario du groupe 1 (20 cm d'inondation sur les parcelles) en fonction de la période d'occurrence comprise entre 1 et 52.

Deux périodes peuvent être distinguées. De la semaine 8 à la semaine 34, les dommages financiers sont plus élevés pour le profil Interne que pour les profils Prestation et Solidarité. Le dommage supplémentaire est donc lié aux effets induits.

Des semaines 41 à 5, les dommages pour le profil Prestation sont supérieurs. Cela signifie que, selon les données utilisées pour la simulation, la perte de produit induite par la non réalisation d'une

[57] Ce point est abordé à la section 9.

tâche est inférieure à son coût de réalisation. Ceci signifierait que certaines actions devraient, pour un agent économiquement rationnel, ne pas être réalisées. Ce point peut être amélioré dans le modèle en intégrant d'autres pénalités que la perte de rendement en cas de non réalisation de tâche (augmentation du temps de travail pour la poursuite de l'itinéraire technique, diminution de la qualité…).

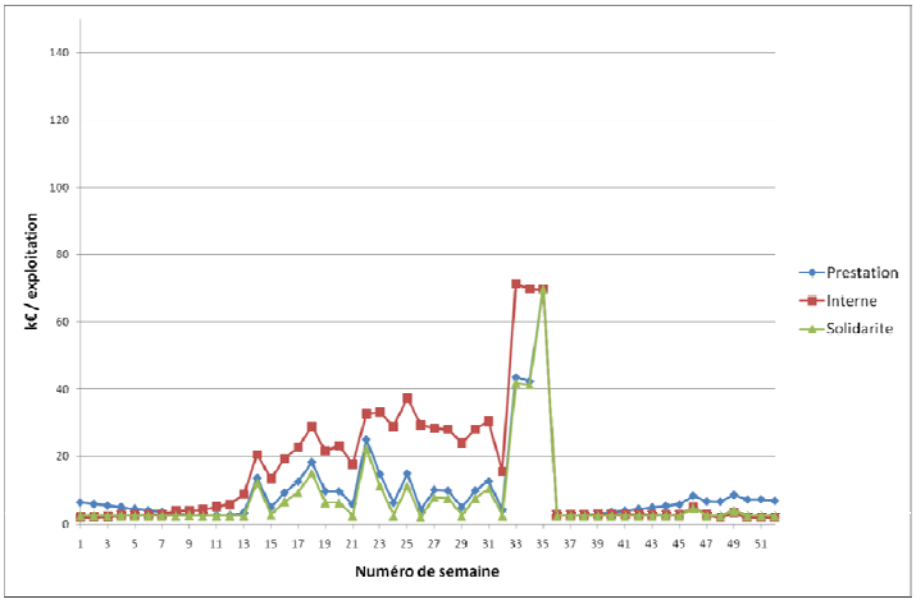


Figure 79 : Montant de dommages financiers pour A_8 (scénario du groupe 1, durée d'une semaine)

Pour l'exploitation type V_22 (figure 80), l'analyse est un peu différente. En effet, sur la période allant des semaines 40 à 9 (période végétative), les effets induits de l'inondation sont notables puisque le profil Interne subit toujours les dommages les plus importants. Par contre, hors période végétative (semaine 10 à 39), les dommages pour les trois profils sont proches. Or, nous avons pu constater, pour une crue se produisant au mois de mai, qu'il y avait une augmentation des besoins de main d'œuvre (figure 74) pour le profil Prestation. En réalité, la perte de rendement directe est importante, sur cette période, même pour les faibles hauteurs et les pertes de rendements supplémentaires liées aux effets induits deviennent négligeables. Cet exemple montre l'intérêt d'une analyse détaillée de cet indicateur global de dommages pour caractériser la vulnérabilité.

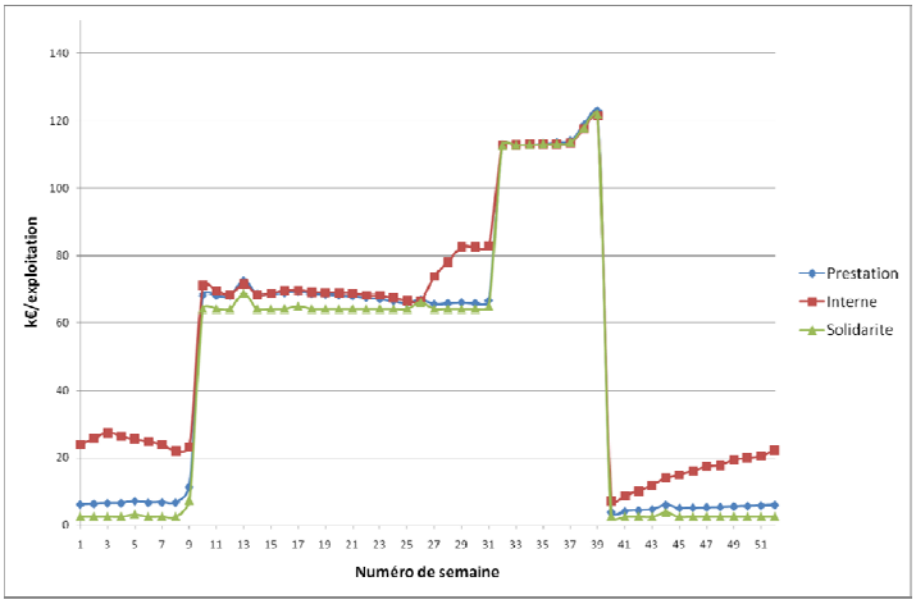


Figure 80 : Montant de dommages financiers pour V_22 (scénario du groupe 1, durée d'une semaine)

Pour l'exploitation type MC_15 (figure 81), la sensibilité des cultures est très forte même avec de faibles hauteurs d'eau. Le scénario du groupe 1 touchant l'ensemble des parcelles, le dommage financier pour les trois profils est presque toujours identique sauf sur la période allant de la semaine 32 à 35 (récolte du melon) puis 36 à 40 (préparation du sol pour la culture suivante).

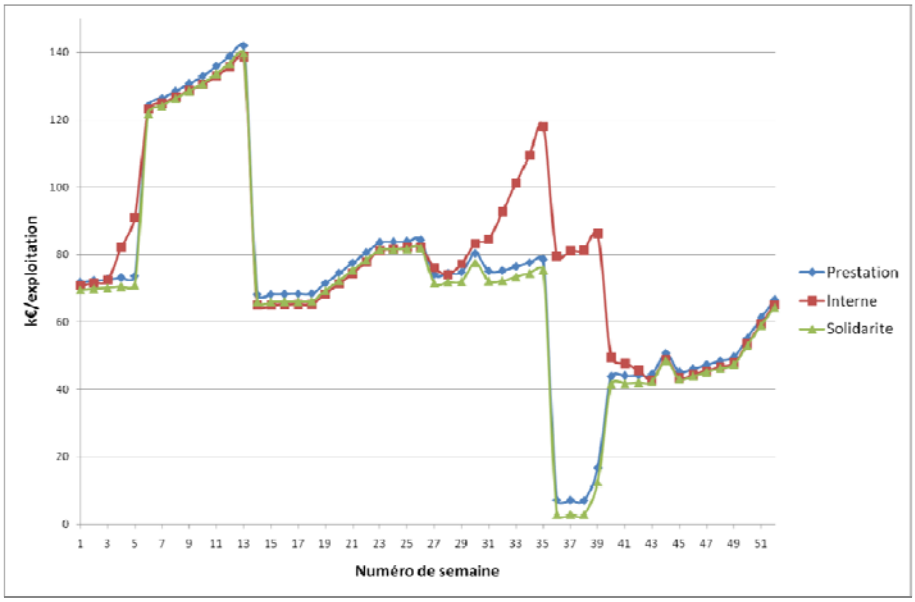


Figure 81 : Montant de dommages financiers pour MC_15 (scénario du groupe 1, durée d'une semaine)

- *Scénario 2 : forte hauteur sur 50 % des parcelles et bâtiment inondé*

Pour les scénarios du groupe 2, le montant minimal de dommage est plus élevé que pour les scénarios du groupe 1, car l'inondation du bâtiment et de 50 % des parcelles avec de fortes hauteurs, induit des coûts de restauration.

Pour l'exploitation A_8 (figure 82), les dommages simulés avec le Profil Interne sont beaucoup plus élevés qu'avec les profils Prestation et Solidarité. Les effets induits peuvent être liés, dans ce cas, à deux contraintes : l'indisponibilité du matériel ou l'indisponibilité de la main d'œuvre. En effet, dans le cas de l'arboriculture, malgré les fortes hauteurs d'eau sur les parcelles touchées, l'itinéraire technique peut continuer (perte de rendement inférieure à 100 %) mais la remise en état sur les parcelles et bâtiment nécessite une main d'œuvre abondante. Nous détaillons ce point dans l'analyse de la perte de revenu (sous section 7.4.3, p 209).

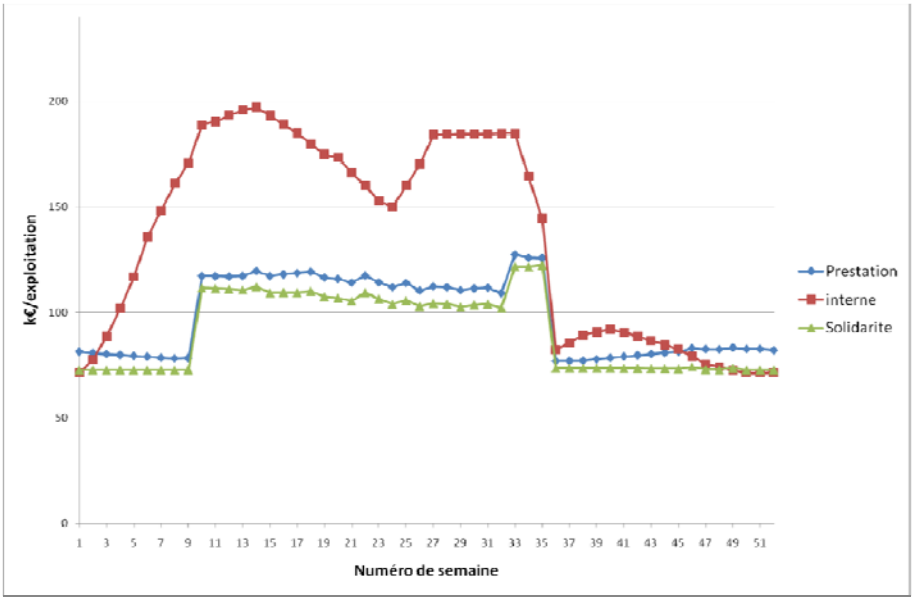


Figure 82 : Montant de dommages financiers pour A_8 (scénario du groupe 2, durée d'une semaine)

Pour l'exploitation V_22 (figure 83), les écarts entre les montants de dommages simulés avec les profils Interne et Prestation sont moindres mais restent notables. Contrairement à l'exploitation type A_8, la récolte ne nécessite pas de matériel interne à l'exploitation dans notre application. La récolte est faite, en situation de référence, par un prestataire. On constate donc que les effets induits par l'indisponibilité de matériel au moment de la récolte (semaine 32 à 35 pour A_8 et semaine 37 à 39 pour V_22) sont moins importants pour V_22 que pour A_8.

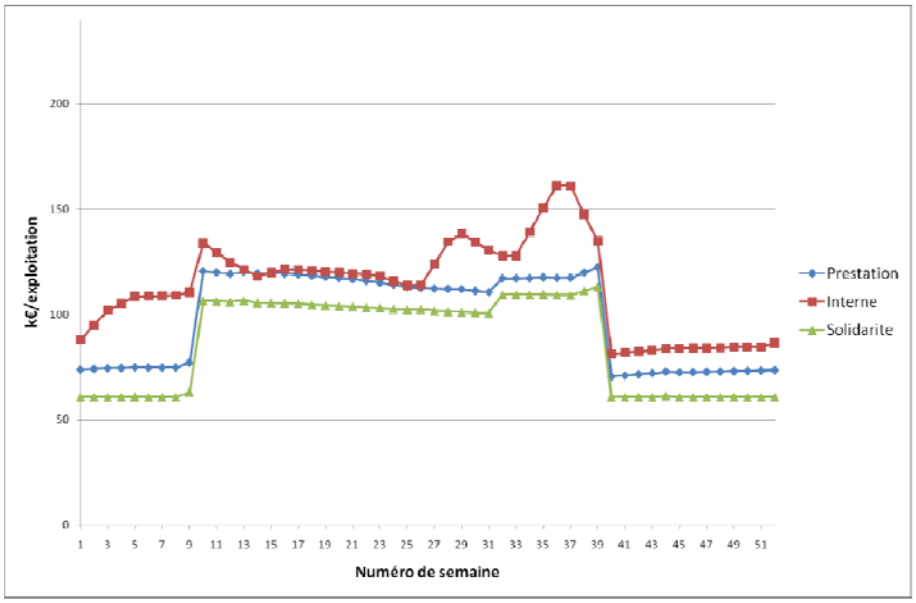


Figure 83 : Montant de dommages financiers pour V_22 (scénario du groupe 2, durée d'une semaine)

Pour l'exploitation type MC_15, les effets induits par ce type de scénario sont beaucoup plus importants. En effet, bien que les récoltes soient détruites sur 50 % des parcelles et donc que l'itinéraire technique soit stoppé sur celles-ci, il doit être poursuivi sur les 50 % de parcelles non touchées. Les contraintes sont a priori principalement liées à l'indisponibilité de matériel pour le profil Interne.

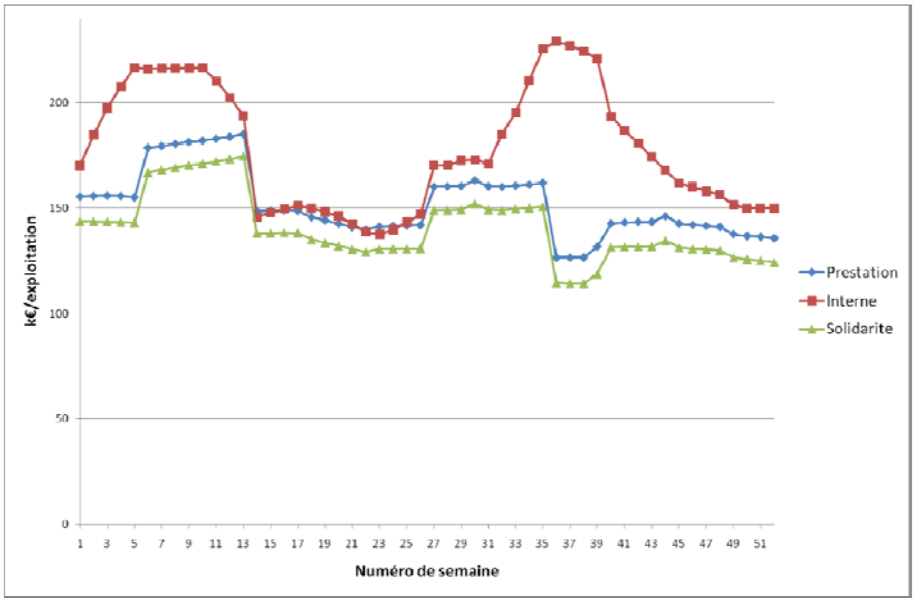


Figure 84 : Montant de dommages financiers pour MC_15 (scénario du groupe 2, durée d'une semaine)

- *Bilan*

Le tableau 33 propose une synthèse des résultats présentés dans cette section. Pour chaque exploitation type, il indique, pour chaque scénario et profil, le montant des dommages minimum, maximum et moyen ainsi que l'écart-type qui peut être observé en fonction de la période d'occurrence.

Il montre que quels que soient les scénarios d'inondation (groupe 1 ou 2), en moyenne sur une année, les dommages financiers supportés par les exploitations avec un profil Interne, sont plus élevés que pour les deux autres profils. L'écart-type est également plus élevé pour le profil Interne indiquant une dispersion plus importante des montants de dommages par rapport aux deux autres profils.

Tableau 33 : Montants de dommages financiers (k€) pour les exploitations types

Scénario	Exploitation	Profil	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-Type
Groupe 1 (hauteur de 20 cm sur 100 % des parcelles, bâtiment non inondé, vitesse faible et durée d'une semaine)	A_8	Interne	2,0	71,4	15,2	17,8
		Prestation	2,6	69,8	9,6	11,9
		Solidarité	2,1	69,8	7,4	12,0
	V_22	Interne	7,2	121,5	55,9	35,4
		Prestation	3,9	122,9	48,9	40,5
		Solidarité	2,6	121,9	46,2	41,1
	MC_15	Interne	42,7	138,7	80,0	27,3
		Prestation	7,0	142,0	72,6	32,3
		Solidarité	2,9	139,7	70,1	32,6
Groupe 2 (hauteur de 150 cm sur 50 % des parcelles, bâtiment inondé, vitesse faible et durée d'une semaine)	A_8	Interne	71,3	197,2	136,2	47,6
		Prestation	77,0	127,5	98,2	18,6
		Solidarité	72,9	122,4	91,1	18,4
	V_22	Interne	81,3	161,2	113,3	21,9
		Prestation	70,6	122,4	98,5	21,7
		Solidarité	60,7	113,3	86,6	22,4
	MC_15	Interne	137,5	229,3	178,3	29,4
		Prestation	126,5	185,3	152,0	15,9
		Solidarité	114,3	174,8	140,8	16,1

7.4.2. Analyse de la répartition entre coûts de restauration et pertes de revenu

- *Quels sont les scénarios pertinents à analyser ?*

À travers l'analyse des dommages pour les scénarios d'inondation du groupe 2, nous constatons que les effets induits apparaissent souvent importants. Cependant, les coûts de restauration ont également un poids important pour les évènements de forte intensité, en particulier pour les exploitations agricoles disposant de capital végétal pérenne (arboriculture, viticulture).

La figure 85 représente la répartition des dommages financiers pour une exploitation type en arboriculture (Profil Prestation) pour des inondations du groupe 3 (forte intensité sur l'ensemble des parcelles et du bâtiment) en fonction de la période d'occurrence d'inondation comprise entre 1 et 52.

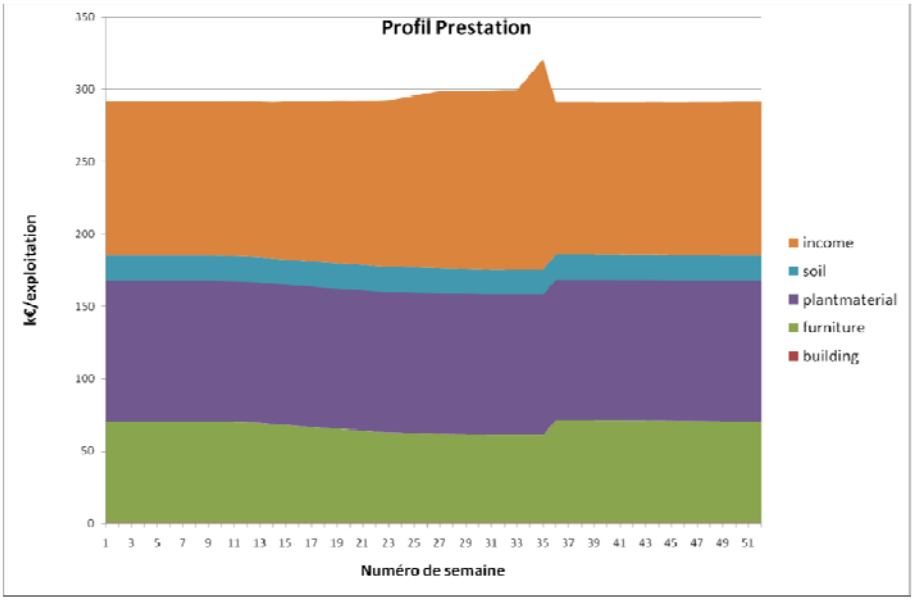


Figure 85 : Montant de dommages financiers pour A_8 (scénario du groupe 3, une semaine)

La perte de revenu (« income » en orange) est identique pour tous les profils et maximale. Elle correspond à la perte totale de la récolte en cours. Dans ce cas de figure, la perte de revenu provient intégralement de l'endommagement direct et il n'y a pas d'effets induits sur l'activité.

Les coûts de restauration sont également élevés. Nous distinguons quatre types de coûts de restauration :

- le sol (« soil », en bleu),
- le matériel végétal (« plant_material », en violet),
- les matériels et intrants (« furniture », en vert),
- le bâtiment (« building », en rouge)[58].

[58] Le coût financier de nettoyage du bâtiment est généralement très faible car il représente un montant peu élevé par rapport aux autres dommages et qu'une partie du temps de nettoyage est effectué en interne (Pour rappel, le coût de la main d'œuvre interne est nul pour l'analyse financière).

Pour analyser la répartition des dommages financiers liés à la perte de revenu et aux coûts de restauration, nous mobilisons quelques simulations réalisées avec les scénarios du groupe 1 et 2 sur trois périodes d'occurrence probables sur le Rhône aval :

- autour de la semaine 18 (crues de printemps) ;
- autour de la semaine 36 (crues de fin d'été) ;
- autour de la semaine 48 (crues d'hiver).

- *Crues de printemps*

Pour la crue de printemps, nous illustrons les résultats par le cas de l'exploitation A_8 pour le scénario du groupe 2.

La figure 86 montre que la perte de revenu (en orange) pour le profil Interne est jusqu'à trois fois plus importante que pour le profil Prestation sur la période allant de la semaine 14 à 22. La perte de revenu du profil Prestation représentant à peu près la perte de revenu due à l'endommagement direct de la récolte, on peut en déduire que les pertes de rendement induites par la non réalisation pour le profil Interne augmente considérablement sa perte de revenu.

Malgré des coûts de restauration importants[59], la perte de revenu induite constitue pour le profil Interne la part la plus importante du dommage total.

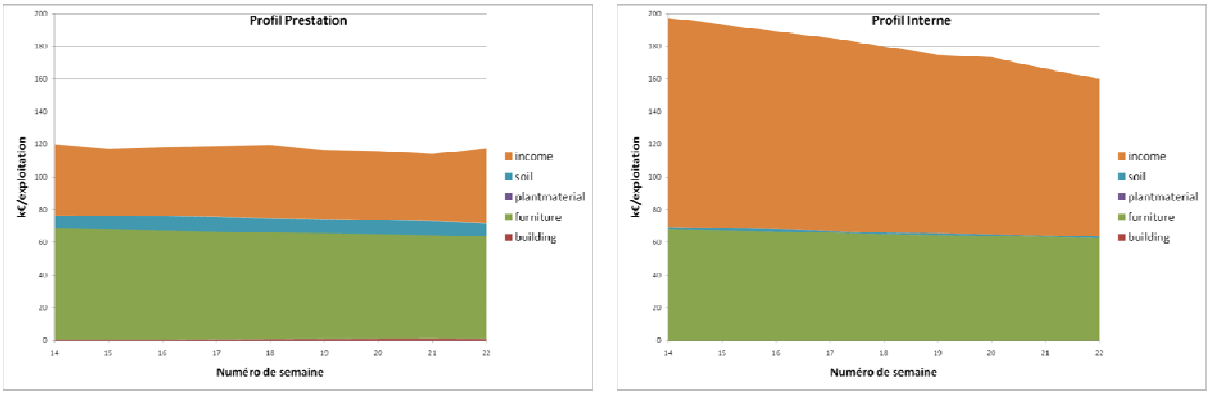


Figure 86 : Comparaison de la répartition des dommages financiers pour les profils Prestation et Interne pour A_8 (scénario du groupe 2, durée 1 semaine)

[59] Les coûts financiers de restauration du sol sont plus faibles pour le Profil Interne car par construction, pour ce profil, si la main d'œuvre est insuffisante ou le matériel inutilisable, la tâche n'est pas entièrement réalisée. Or aucune pénalité sur le rendement n'est affectée à la non réalisation des tâches de remise en état. Les coûts de restauration sont corrigés dans la valorisation économique.

- *Crues de fin d'été*

Pour l'exploitation MC_15, l'analyse est complexe car les causes des dommages peuvent provenir des différentes cultures pratiquées (blé, melon, salade).

La figure 87 montre que la perte de revenu augmente progressivement[60] entre les semaines 32 et 35 pour le profil Prestation avant de diminuer fortement. Cette période correspond à la récolte du melon et une partie de la préparation des sols. Après la semaine 35, le profil Prestation subit de très faibles pertes de revenu alors qu'elles sont élevées pour le profil Interne. Il s'agit de la perte de rendement induite par l'impossibilité de réaliser les tâches de préparation des sols. L'analyse est similaire sur la période allant des semaines 36 à 39.

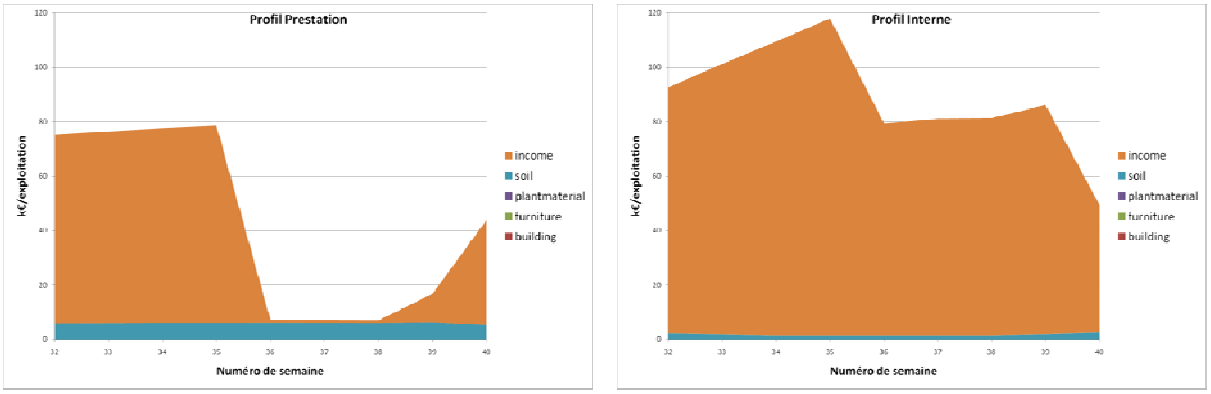


Figure 87 : Comparaison de la répartition des dommages financiers pour les profils Prestation et Interne pour MC_15 (scénario du groupe 1, durée 1 semaine)

- *Crues d'hiver*

Sur la période végétative, les pertes de produit liées à l'endommagement direct pour les cultures pérennes sont relativement faibles. Ainsi, comme le montre la figure 88, le profil Prestation perd peu revenu pour si l'inondation se produit entre les semaines 45 et 52. Les coûts de restauration des matériels et intrants représentent une partie importante des dommages (57 k€). Cependant, pour le profil Prestation, les pertes de revenu ne représentent que 5 % du dommage total alors que pour le Profil Interne, les pertes de revenu induites représentent près de 30 %.

[60] La perte de revenu augmente progressivement car si l'inondation apparait avant récolte, les frais de main d'œuvre associés à cette tâche ne sont pas engagés.

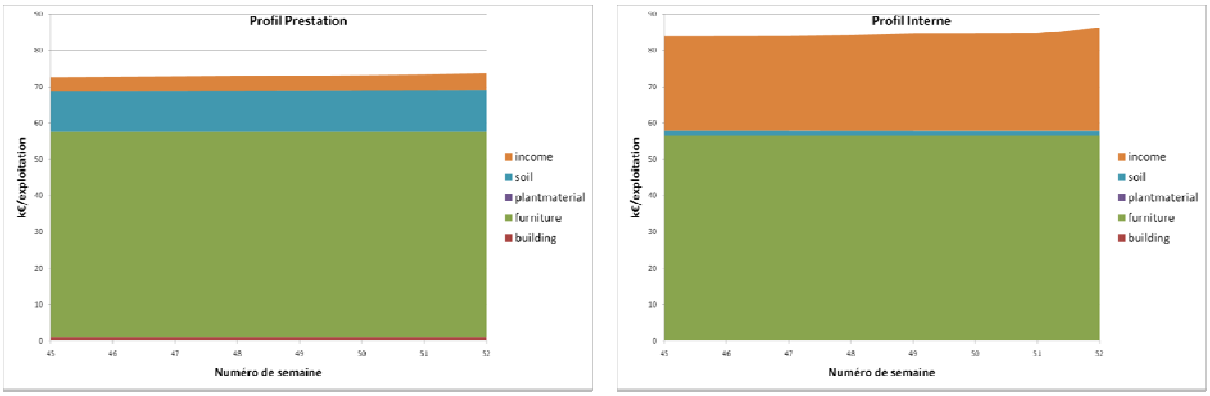


Figure 88 : Comparaison de la répartition des dommages financiers pour les profils Prestation et Interne pour V_22 (scénario du groupe 2, durée 1 semaine)

7.4.3. Analyse de la perte de revenu en fonction du profil

Pour les cas présentés dans la sous-section précédente, nous analysons la composition détaillée de la variation du revenu financier (k€). Les variations positives sont des charges supplémentaires ou des pertes de produits, les variations négatives sont des charges économisées (non engagées).

Nous ventilons la variation du revenu selon quatre catégories :

- la variation de produit (« product » en rouge) ;
- la variation de charges d'utilisation du matériel (« tool » en violet) ;
- la variation de charges d'intrants (« input » en vert) ;
- la variation de charges de main d'œuvre (« labour » en bleu).

- *Crues de printemps*

La figure 89 montre que le profil Prestation de l'exploitation A_8 est soumis à deux contraintes lorsque l'inondation du groupe 2 se produit entre les semaines 12 à 20 :

- il doit employer de la main d'œuvre externe ;
- il doit louer du matériel provenant de prestataires.

Les montants sont faibles comparativement aux pertes de produit induites pour le profil Interne[61]. Pour le profil Interne, les pertes de revenu sont trois fois plus élevées en raison de la non réalisation de certaines tâches. Les charges associées à ces tâches (intrants, matériel et main d'œuvre) apparaissent en montant négatifs puisqu'elles n'ont pas été engagées.

[61]Il faut cependant noter que le profil Prestation emploie également de la main d'œuvre pour la réalisation des tâches de remise en état. Ces dommages sont pris en compte dans les coûts de restauration du sol et du bâtiment. La main d'œuvre ici employée correspond uniquement à celle nécessaire pour la réalisation des tâches de production.

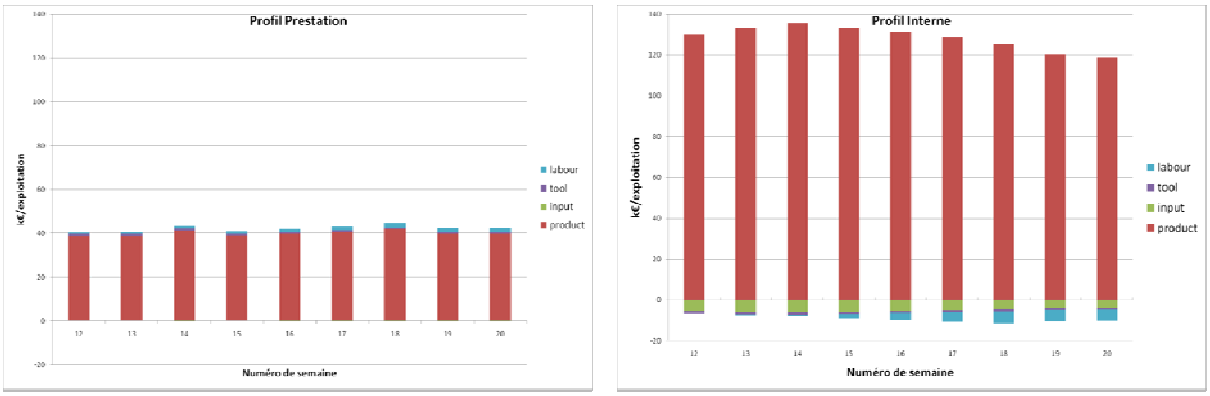


Figure 89 : Comparaison de la perte de revenu pour les profils Prestation et Interne pour A_8 (scénarios du groupe 2, durée 1 semaine)

- *Crues de fin d'été*

La figure 90 montre que lorsque l'exploitation type MC_15 subit une inondation du groupe 1 sur la période allant des semaines 32 à 35, la variation de revenu du profil Prestation résulte intégralement de l'endommagement direct de la culture. Le profil Interne génère une perte supplémentaire de produit du fait de la non réalisation des tâches de préparation du sol de la culture suivante en raison de la contrainte sur la main d'œuvre. Entre les semaines 36 et 40, il n'y a pas de perte directe de produit, cependant si les tâches de production (préparation des sols) ne peuvent pas être réalisées (Profil Interne), une perte de produit est générée.

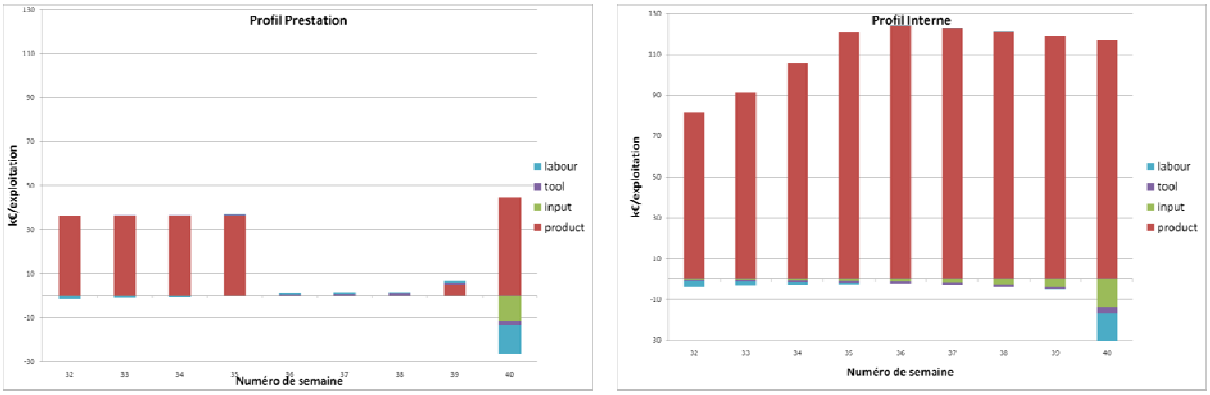


Figure 90 : Comparaison de la perte de revenu pour les profils Prestation et Interne pour MC_15 (scénario du groupe 1, durée 1 semaine)

- *Crues d'hiver*

La figure 91 montre qu'aucune perte de produit n'est subie par l'exploitation type V_22 ayant un profil Prestation sur les semaines 45 à 52 pour les scénarios du groupe 2. La culture de la vigne n'est pas sensible à l'inondation de faible vitesse et de durée faible à moyenne sur cette période. Cependant, les scénarios d'inondation du groupe 2 induisent l'endommagement d'une grande partie du matériel et une remise en état importante des parcelles ayant été inondées. Ainsi, on constate que pour poursuivre l'itinéraire technique, l'exploitant de profil Prestation doit employer de la main d'œuvre saisonnière et louer du matériel (charges supplémentaires sur la figure 91). La perte de

produit induite par l'impossibilité d'accéder à ces ressources externes, pour le profil Interne, est considérable. Étant dans l'impossibilité d'utiliser le matériel, les charges sont cependant économisées (représentées en négatif sur la figure 91).

La tâche de production qui pose ici le problème majeur est la réalisation de la taille qui nécessite une main d'œuvre importante et pour laquelle la main d'œuvre interne en temps normal est déjà presque employée à temps complet.

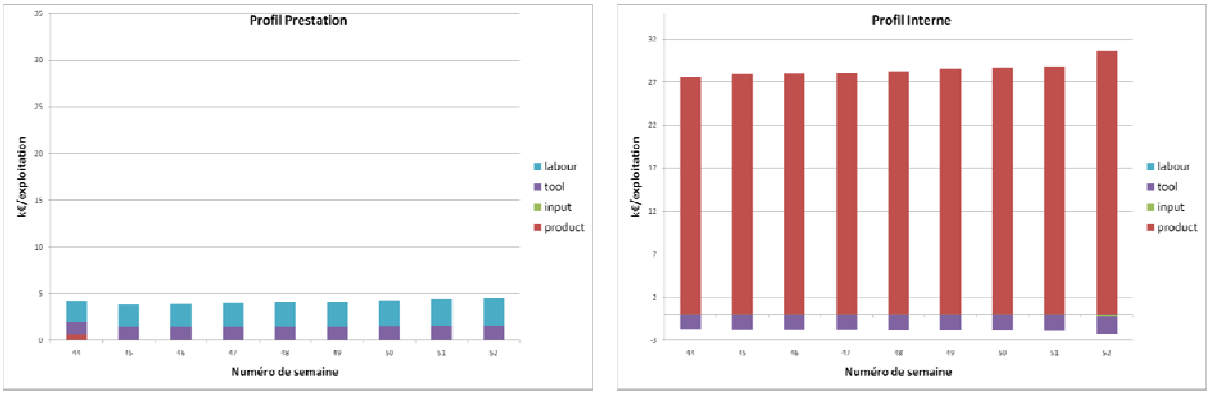


Figure 91 : Comparaison de la perte de revenu pour les profils Prestation et Interne pour V_22 (scénario du groupe 2, durée 1 semaine)

7.5 Prise en compte de l'assurance dans l'approche financière

7.5.1. Catégories de dommages indemnisés et hypothèses de calcul

En France, les exploitants agricoles bénéficient de deux systèmes d'indemnisation résultant d'une collaboration public-privé. Tout d'abord, comme toutes les activités domestiques et économiques, les activités agricoles bénéficient pour la majorité des biens matériels d'une assurance privée reposant sur le système « CatNat » lorsque le sinistre est une catastrophe naturelle. Deuxièmement, depuis 1964, le Fond National de Garantie des Calamités Agricoles (FNGCA) a été spécifiquement créé pour le secteur agricole. Il indemnise une partie des pertes de récolte et de fonds (sol, matériel végétal…). Le tableau 34 indique la répartition des systèmes d'indemnisation s'appliquant aux composantes de l'exploitation[62].

[62] Pour plus de détails sur les systèmes d'assurance, consulter l'annexe 1.

Tableau 34 : Source d'indemnisation des dommages par type de composante de l'exploitation agricole

Composante de l'exploitation	Possibilité d'assurance
Produit sur parcelle (Récolte)	Calamité Agricole ou assurance privée (assurance multirisques récolte)
Matériel végétal (vigne, verger)	Calamité Agricole ou assurance privée (assurance multirisques récolte)
Sol	Calamité Agricole
Bâtiment	Assurance privée (système « CatNat »)
Matériel	Assurance privée (système « CatNat »)
Stock intrants	Assurance privée (système « CatNat »)
Stock de produit	Assurance privée (système « CatNat »)

- *Dommages indemnisés selon le régime « Calamité Agricole »*

Deux conditions s'appliquent aux exploitations pour bénéficier des indemnisations du FNGCA. Concernant les pertes de récoltes, la somme des dommages aux récoltes rapportée à la valeur totale du produit brut théorique[63] de l'exploitation doit être au moins égale à 13 %. De plus, pour chaque culture, le montant de dommage doit atteindre au moins 30 % du produit brut théorique de la culture pour les cultures non primées par la PAC et 42 % pour les cultures primées. L'indemnisation est en moyenne de 30 % du dommage total pour les pertes de récolte et les pertes de fonds[64].

- *Dommages indemnisés selon le régime « CatNat »*

Les dommages aux bâtiments et contenus (matériel et intrants) sont considérés indemnisés dans leur intégralité avec application d'une franchise fixée par l'arrêté du 10 août 1982, à 10 % du montant des dommages avec un minimum de 1 140 euros pour les biens à usage professionnel (entreprise, commerce, ...).

- *Illustration des montants indemnisés*

Nous illustrons ici la prise en compte de l'indemnisation des dommages dans le modèle EVA pour l'exploitation type V_22 pour les trois groupes de scénarios et trois périodes d'occurrence (tableau 35).

[63] Le calcul du produit brut théorique repose sur le prix et le rendement des cultures fournis par le barème d'indemnisation des calamités agricoles établi dans chaque département par les DDT et chambre d'agriculture.

[64] Calcul du taux moyen d'indemnisation sur la base des données du système « Calamité Agricole » de 2001 à 2007 fournie par le CERIT.

Tableau 35 : Scénarios d'inondation utilisés pour simuler les dommages et leur indemnisation

Nom du scénario	Exposition des parcelles	Exposition du bâtiment	Période d'occurrence	Durée (semaine)	Hauteur (cm)	Vitesse (niveau)
Groupe 1	100 %	Non inondé	Mai (18)	1	20	0
	100 %	Non inondé	Septembre (36)	1	20	0
	100 %	Non inondé	Décembre (49)	1	20	0
Groupe 2	50 %	Inondé	Mai (18)	1	150	0
	50 %	Inondé	Septembre (36)	1	150	0
	50 %	Inondé	Décembre (49)	1	150	0
Groupe 3	100 %	Inondé	Mai (18)	1	150	2
	100 %	Inondé	Septembre (36)	1	150	2
	100 %	Inondé	Décembre (49)	1	150	2

Les tableaux ci-après donnent pour l'exploitation type V_22 et les scénarios présentés ci-dessus :

- le montant des dommages financiers bruts ;
- les indemnisations ;
- le montant des dommages financiers nets.

Le tableau 36 concerne le profil Prestation ; le tableau 37 le profil Interne[65].

[65] Pour le Profil Interne, la restauration des sols et des bâtiments peut parfois n'être que partiellement ou pas réalisé en raison de l'indisponibilité de main d'œuvre ou de matériel. Dans ce cas, l'indemnisation n'est calculée que sur les tâches réellement effectuées.

Tableau 36 : Montants (k€) des dommages financiers bruts, d'indemnisation et de dommages nets pour l'exploitation type V_22 (Profil Prestation)

	Période d'occurrence	Type	Dommage total	Dommages aux capitaux physiques :				ΔProduit (1)	Δ Charges variables (2)			Δ Revenu (1-2)
				bâtiment	matériel et intrants	matériel végétal	sol		intrants	matériel	travail	
Groupe 1	Décembre	brut	5,6	0,0	0,0	0,0	4,1	0,0	0,0	0,0	1,5	1,5
		- indemnisation	1,2	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		net	4,3	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	1,5	1,5
	Mai	brut	68,6	0,0	0,0	0,0	4,5	61,6	0,0	0,0	2,5	64,1
		- indemnisation	19,8	0,0	0,0	0,0	1,4	18,5	0,0	0,0	0,0	18,5
		net	48,8	0,0	0,0	0,0	3,2	43,1	0,0	0,0	2,5	45,6
	Septembre	brut	113,5	0,0	0,0	0,0	2,8	123,2	-0,7	-12,0	0,2	110,7
		- indemnisation	37,8	0,0	0,0	0,0	0,8	37,0	0,0	0,0	0,0	37,0
		net	75,7	0,0	0,0	0,0	2,0	86,2	-0,7	-12,0	0,2	73,7
Groupe 2	Décembre	brut	73,1	1,0	56,7	0,0	11,3	0,0	0,0	1,4	2,7	4,1
		- indemnisation	55,3	0,9	51,0	0,0	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		net	17,8	0,1	5,7	0,0	7,9	0,0	0,0	1,4	2,7	4,1
	Mai	brut	118,4	1,0	54,4	0,0	11,6	46,2	0,0	1,5	3,6	51,4
		- indemnisation	67,2	0,9	48,9	0,0	3,5	13,9	0,0	0,0	0,0	13,9
		net	51,2	0,1	5,4	0,0	8,1	32,3	0,0	1,5	3,6	37,5
	Septembre	brut	117,3	0,8	49,9	0,0	10,1	61,6	-0,4	-5,6	0,9	56,5
		- indemnisation	67,1	0,7	44,9	0,0	3,0	18,5	0,0	0,0	0,0	18,5
		net	50,2	0,1	5,0	0,0	7,1	43,1	-0,4	-5,6	0,9	38,1
Groupe 3	Décembre	brut	228,7	1,1	56,7	49,5	25,1	123,2	-7,1	-19,5	-0,1	96,4
		- indemnisation	111,3	1,0	51,0	14,9	7,5	37,0	0,0	0,0	0,0	37,0
		net	117,4	0,1	5,7	34,7	17,5	86,2	-7,1	-19,5	-0,1	59,4
	Mai	brut	233,2	1,1	54,4	49,5	25,1	123,2	-5,2	-14,8	-0,1	103,1
		- indemnisation	109,3	1,0	48,9	14,9	7,5	37,0	0,0	0,0	0,0	37,0
		net	123,9	0,1	5,4	34,7	17,5	86,2	-5,2	-14,8	-0,1	66,1
	Septembre	brut	238,0	1,1	49,9	49,5	25,6	123,2	-0,7	-11,7	1,0	111,8
		- indemnisation	105,4	1,0	44,9	14,9	7,7	37,0	0,0	0,0	0,0	37,0
		net	132,5	0,1	5,0	34,7	17,9	86,2	-0,7	-11,7	1,0	74,8

Tableau 37 : Montants (k€) de dommages financiers bruts, d'indemnisation et de dommages nets pour l'exploitation type V_22 (Profil Interne)

	Période d'occurrence	Type	Dommage total	Dommages aux capitaux physiques :				ΔProduit (1)	Δ Charges variables (2)			Δ Revenu (1-2)
				bâtiment	matériel et intrants	matériel végétal	sol		intrants	matériel	travail	
Groupe 1	Décembre	brut	19,4	0,0	0,0	0,0	1,9	17,9	0,0	-0,5	0,0	17,4
		- indemnisation	0,6	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		net	18,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Mai	brut	69,2	0,0	0,0	0,0	1,8	68,9	-1,0	-0,6	-0,1	67,3
		- indemnisation	21,2	0,0	0,0	0,0	0,5	20,7	0,0	0,0	0,0	20,7
		net	47,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Septembre	brut	113,0	0,0	0,0	0,0	2,5	123,2	-0,7	-12,0	0,0	110,4
		- indemnisation	37,7	0,0	0,0	0,0	0,8	37,0	0,0	0,0	0,0	37,0
		net	75,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Groupe 2	Décembre	brut	84,7	0,0	56,7	0,0	1,2	28,7	0,0	-1,8	0,0	26,8
		- indemnisation	51,4	0,0	51,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		net	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Mai	brut	120,9	0,0	54,4	0,0	1,3	70,1	-3,1	-1,7	-0,1	65,3
		- indemnisation	70,4	0,0	48,9	0,0	0,4	21,0	0,0	0,0	0,0	21,0
		net	50,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Septembre	brut	161,2	0,0	49,9	0,0	1,3	123,2	-0,7	-12,4	0,0	110,1
		- indemnisation	82,2	0,0	44,9	0,0	0,4	37,0	0,0	0,0	0,0	37,0
		net	79,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Groupe 3	Décembre	brut	204,8	0,0	56,7	49,5	2,2	123,2	-7,1	-19,5	-0,1	96,4
		- indemnisation	103,5	0,0	51,0	14,9	0,7	37,0	0,0	0,0	0,0	37,0
		net	101,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Mai	brut	209,2	0,0	54,4	49,5	2,2	123,2	-5,2	-14,8	-0,1	103,1
		- indemnisation	101,4	0,0	48,9	14,9	0,7	37,0	0,0	0,0	0,0	37,0
		net	107,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Septembre	brut	211,5	0,0	49,9	49,5	2,1	123,2	-0,7	-12,5	0,0	110,0
		- indemnisation	97,3	0,0	44,9	14,9	0,6	37,0	0,0	0,0	0,0	37,0
		net	19,4	0,0	0,0	0,0	1,9	17,9	0,0	-0,5	0,0	17,4

7.5.2. Comparaison des dommages financiers bruts et indemnisés

Dans l'analyse financière proposée, rappelons que le temps de travail supplémentaire fourni en interne n'est pas valorisé (C^{i}_{mo}=0). Ce dommage est supporté en interne par l'exploitation.

Le tableau 38 montre que le taux d'indemnisation varie pour les deux profils entre 3 % et 76 %. Globalement, les dommages au bâtiment et ses contenants sont bien indemnisés. Par contre, la perte de produit n'est indemnisée qu'à hauteur de 30 %. On peut alors constater pour une inondation de faible intensité ne touchant pas les bâtiments (groupe 1, occurrence en Décembre) que le taux d'indemnisation est faible (22 % pour le profil Prestation).De plus, pour le profil Interne, seules les pertes de produit directes sont indemnisées et non les pertes de produit induites, ce qui ramène le taux d'indemnisation à 3 % pour une occurrence en décembre.

Tableau 38 : Comparaison du taux d'indemnisation (montant brut des dommages financiers/indemnisation) pour les profils Prestation et Interne de l'exploitation type V_22

		Pourcentage d'indemnisation du dommage brut	
Scénario		**Prestation**	**Interne**
Groupe 1	Décembre	22 %	3 %
	Mai	29 %	31 %
	Septembre	33 %	33 %
Groupe 2	Décembre	76 %	61 %
	Mai	57 %	58 %
	Septembre	57 %	51 %
Groupe 3	Décembre	49 %	51 %
	Mai	47 %	48 %
	Septembre	44 %	46 %

7.6 Approche économique des dommages

Nous proposons dans les sous-sections suivantes, une analyse des dommages valorisés avec les hypothèses de coûts économiques. Pour une évaluation économique sur une zone donnée, l'utilisation du modèle EVA nécessiterait, en plus des données classiques concernant l'aléa, un travail de collecte de données de localisation très important, comprenant :

- la répartition spatiale des exploitations (localisation et détermination de la surface des parcelles et bâtiments) ;
- le type de production sur chaque parcelle ;
- les matériels et intrants contenus dans les bâtiments.

Notre objectif est donc, avant que ce type de démarche ne soit engagé, de déterminer l'intérêt de l'utilisation du modèle EVA sur les 1 300 scénarios présentés à la section 7.1.

7.6.1. Prise en compte de la stratégie de remise en route dans l'évaluation économique

Dans cette section, nous comparons pour les profils Prestation[66] et Interne des trois exploitations types :

- le montant des dommages générés pour une durée de submersion d'une semaine ;
- le rapport entre les dommages du profil Interne et ceux du profil Prestation pour quatre durées de submersion.

Ces analyses sont réalisées pour les scénarios des groupes 1 et 2 (416 scénarios). Les graphiques présentés donnent le montant des dommages ou le rapport (ordonnée) en fonction de la période d'occurrence allant de 1 à 52 (abscisse).

- *Exploitation type en arboriculture (A_8)*

Concernant les scénarios d'inondation du groupe 1 (figure 92), durant la période de repos végétatif (semaine 36 à 10), les dommages entre profil Interne et Prestation sont peu différents. Par contre, en dehors de cette période, les dommages économiques simulés avec le profil Interne sont toujours supérieurs à ceux du profil Prestation. La figure 93 présente les rapports entre les dommages du profil Interne et ceux du profil Prestation pour quatre durée. Elle montre que les dommages du profil Interne peuvent être jusqu'à plus de cinq fois supérieurs pour une durée de deux semaines (carrés rouges, figure 93). Lorsque la durée dépasse trois semaines, les différences

[66] Le montant de dommages économiques générés par les profils Prestation et Solidarité sont similaires selon les hypothèses formulées dans le chapitre 6, sous-section 6.3.4 (p 199).

entre les dommages simulés avec les profils Interne et Prestation diminuent en raison de l'augmentation de l'endommagement direct de la récolte et du matériel végétal (figure 93).

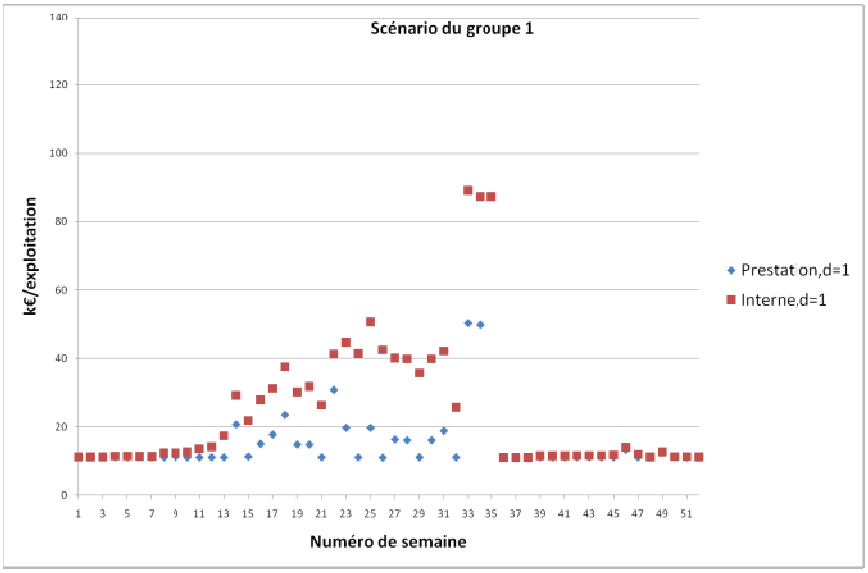


Figure 92 : Montant des dommages économiques pour les profils Prestation et Interne d'A_8 (scénario d'inondation du groupe 1, durée d'une semaine)

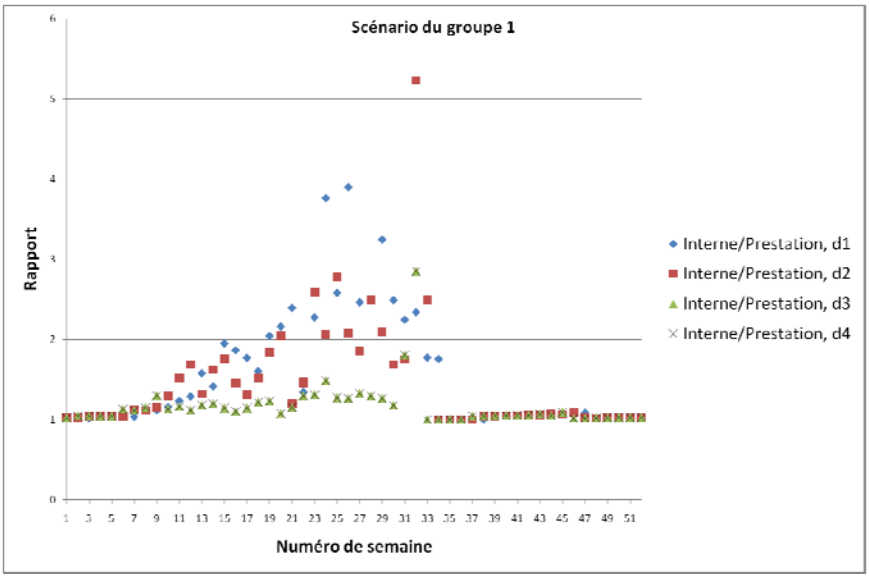


Figure 93 : Rapport entre les dommages économiques pour les profils Interne et Prestation d'A_8 (scénarios d'inondation du groupe 1, pour quatre durées de submersion)

Pour les scénarios du groupe 2 (figure 94), les dommages sont plus élevés pour les deux profils. Le profil Interne subit des dommages plus de deux fois plus importants (figure 95). Le rapport des dommages économiques du profil Interne sur ceux du profil Prestation augmente en fonction de la durée et diminue légèrement en dehors de cette période.

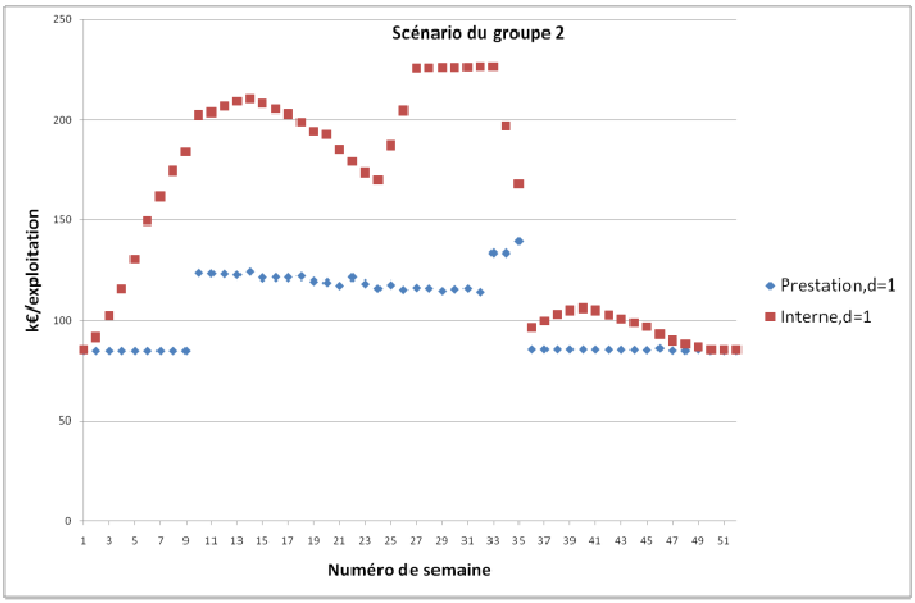


Figure 94 : Montant des dommages économiques (k€/exploitation) pour les profils Prestation et Interne d'A_8 (scénarios d'inondation du groupe 2, durée d'une semaine)

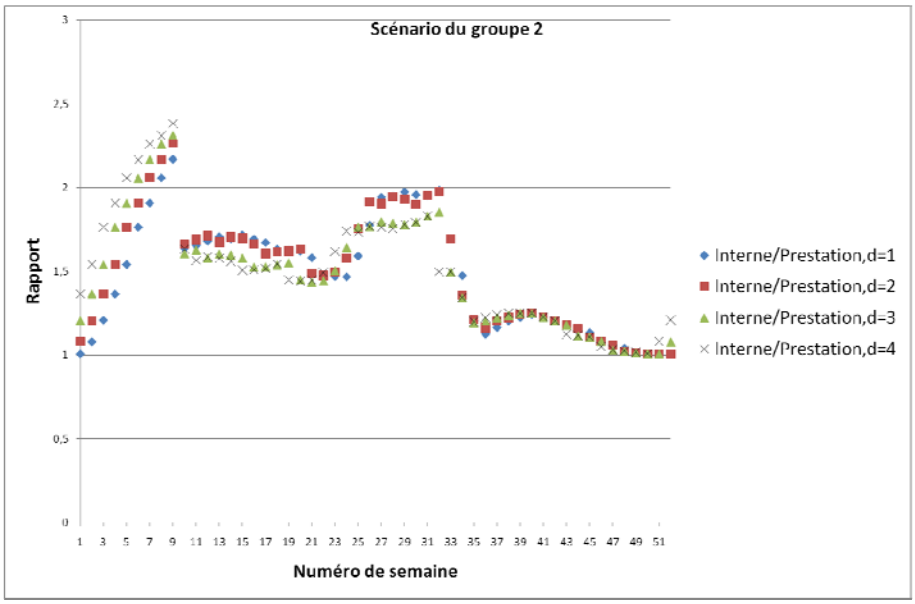


Figure 95 : Rapport entre les dommages économiques pour les profils Interne et Prestation d'A_8 (scénarios d'inondation du groupe 2, quatre durées de submersion)

- *Exploitation type en viticulture (V_22)*

Pour les scénarios du groupe 1 (figure 96), les dommages sont globalement plus élevés pour le profil Interne avec un rapport allant jusqu'à 3,5 par rapport au profil Prestation. Cette différence est particulièrement marquée sur la période végétative (semaine 39 à 9) et pour une durée inférieure à deux semaines. En dehors de cette période, quelle que soit la durée, les différences de dommages entre les profils Interne et Prestation sont nulles.

Pour une durée d'inondation de deux semaines (b), les dommages économiques pour les deux profils sont similaires car la perte de produit par endommagement direct atteint 100 %.

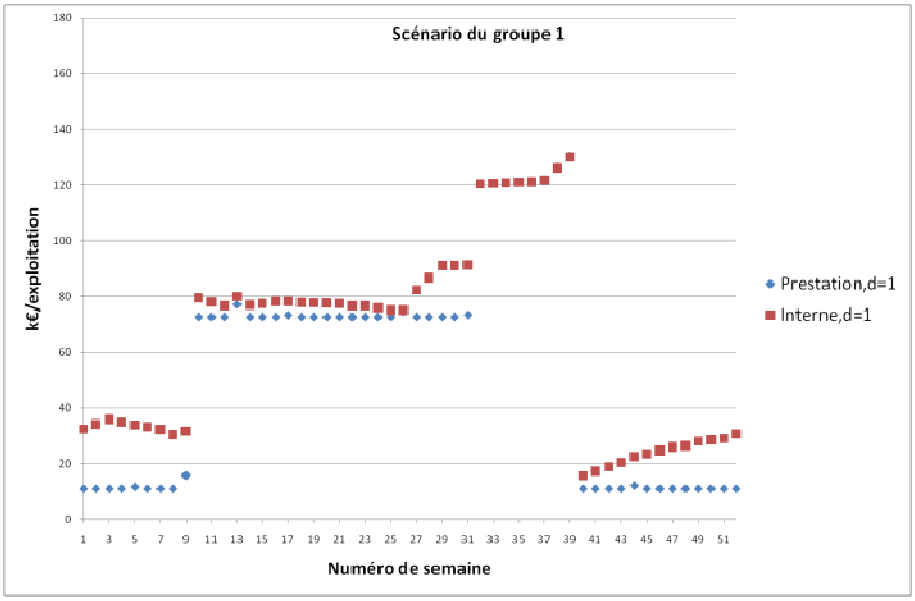


Figure 96 : Montant des dommages économiques (k€/exploitation) pour les profils Prestation et Interne de V_22 (scénarios d'inondation du groupe 1, durée d'une semaine)

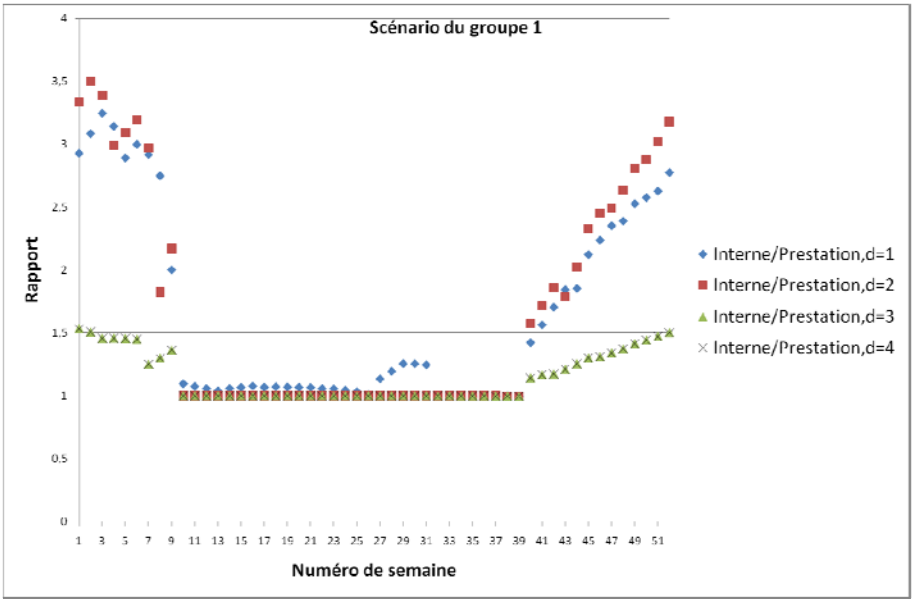


Figure 97 : Rapport entre les dommages économiques pour les profils Interne et Prestation de V_22 (scénarios d'inondation du groupe 1, quatre durées de submersion)

Pour les scénarios du groupe 2, les dommages économiques obtenus avec le profil Interne sont également supérieurs (figure 98) avec un facteur allant jusqu'à 1,5 par rapport aux dommages obtenus avec le profil Prestation (figure 99).

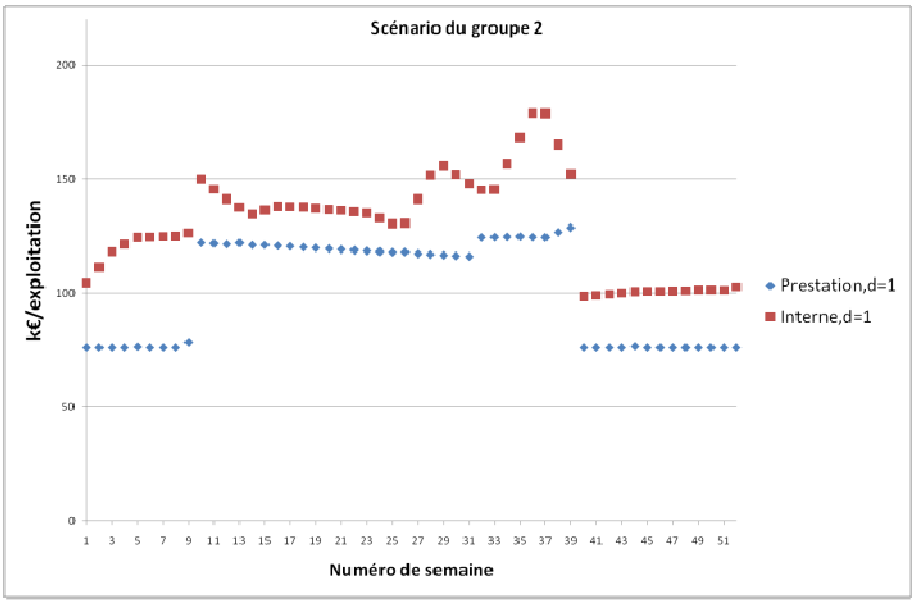


Figure 98 : Montant de dommages économiques (k€/exploitation) pour les profils Prestation et Interne de V_22 (scénarios d'inondation du groupe 2, durée d'une semaine)

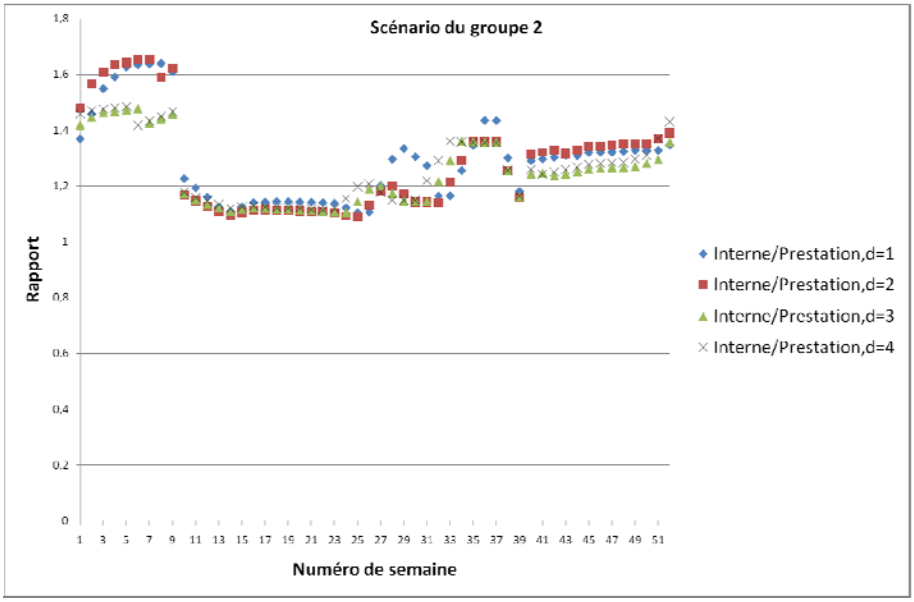


Figure 99 : Rapport entre les dommages économiques pour les profils Interne et Prestation de V_22 (scénarios d'inondation du groupe 2, quatre durées de submersion)

- *Exploitation type en maraichage/céréale (MC_15)*

Pour la plupart des périodes d'occurrence, les scénarios du groupe 1 (figure 100) entraînent peu de différence entre les dommages économiques simulés pour les profils Interne et Prestation quelle que soit la durée de submersion, car l'endommagement direct est très important sur l'ensemble des parcelles. Notons cependant, qu'un rapport de 7 est constaté pour certaines périodes (semaines 36 à 38), pendant lesquelles il n'y a pas de cultures sur les parcelles et où des tâches de préparation des sols essentielles pour la culture suivante doivent être réalisées.

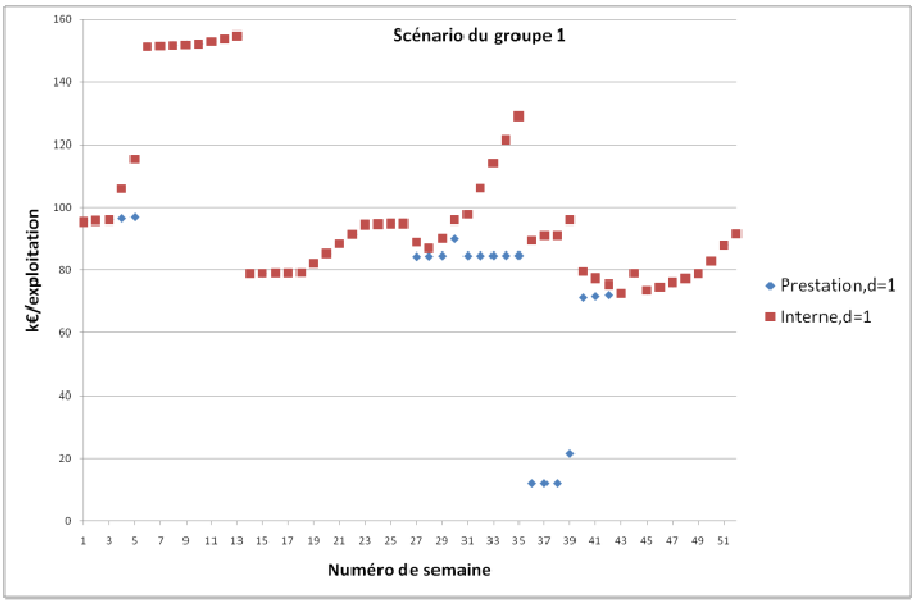


Figure 100 : Montant des dommages économiques (k€/exploitation) pour les profils Prestation et Interne de MC_15 (scénario d'inondation du groupe 1, durée d'une semaine)

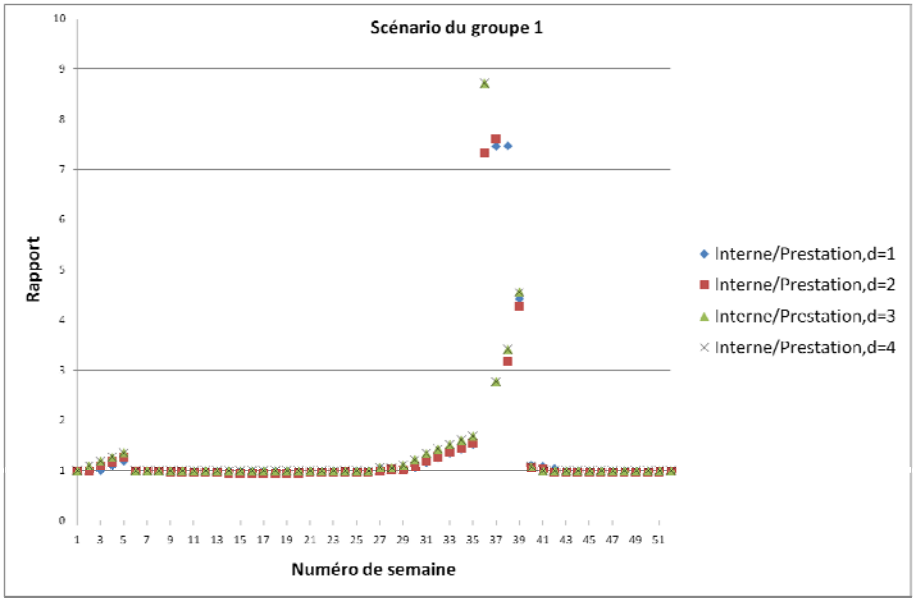


Figure 101 : Rapport entre les dommages économiques pour les profils Interne et Prestation de MC_15 (scénarios d'inondation du groupe 1, quatre durées de submersion)

Pour les scénarios du groupe 2 (figure 102), une différence importante de l'ordre d'un facteur 2 est constatée entre les dommages simulés pour les deux profils. Globalement, cette différence augmente légèrement avec la durée d'inondation.

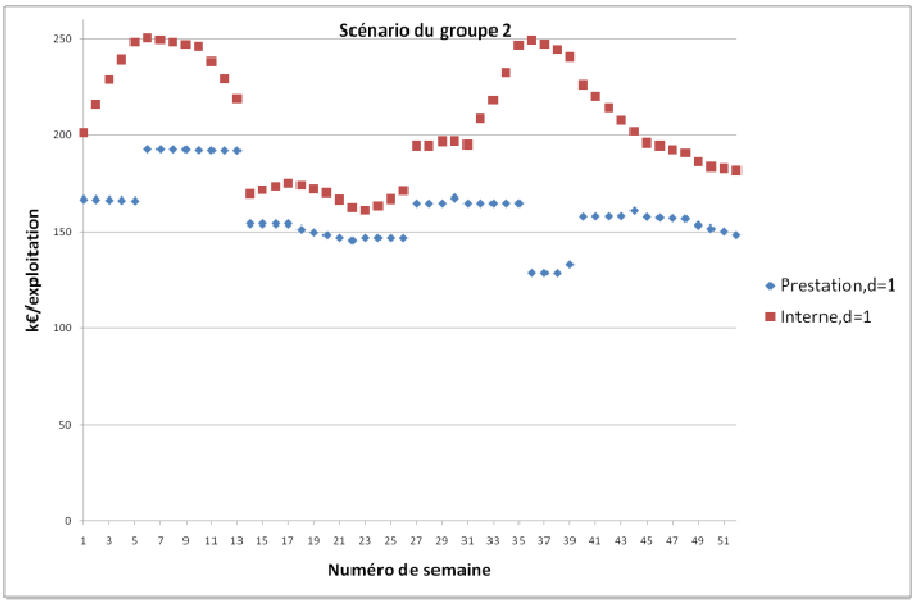


Figure 102 : Montant de dommages économiques (k€/exploitation) pour les profils Prestation et Interne de MC_15 pour les scénarios d'inondation du groupe 2 et pour une durée d'une semaine

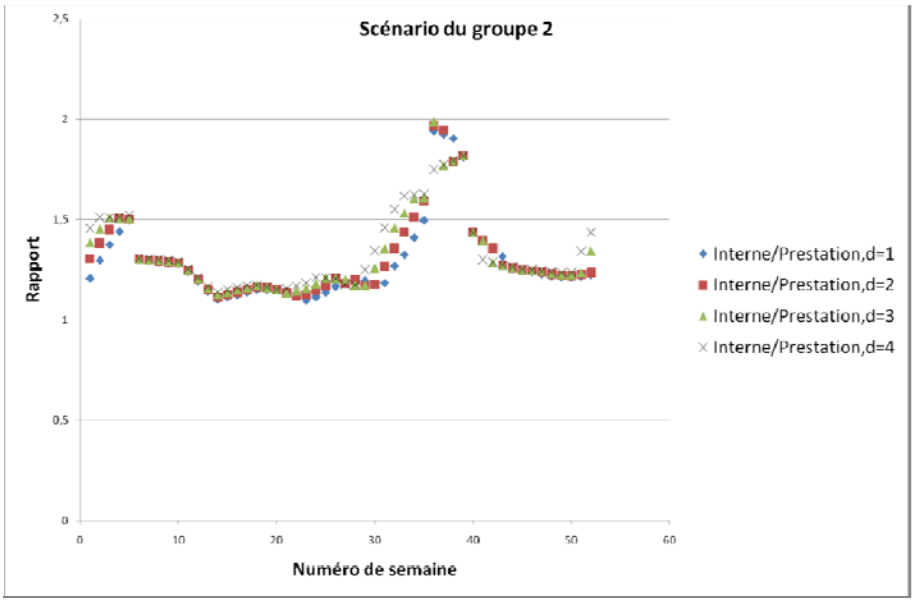


Figure 103 : Rapport entre les dommages économiques pour les profils Interne et Prestation de MC_15 (scénarios d'inondation du groupe 1 et pour quatre durées de submersion)

- *Synthèse*

Globalement, les dommages obtenus pour les scénarios du groupe 1 et 2 sont différents pour les profils Interne et Prestation ; les dommages du profil Interne étant globalement supérieurs aux dommages du profil Prestation. Le rapport entre ces dommages peut être supérieur à cinq et cette différence est d'autant plus importante que la perte directe de récolte est faible.

7.6.2. Sensibilité à la hauteur d'inondation

Les dommages économiques totaux pour les trois exploitations types sont analysés en fonction des hauteurs d'eau, pour les scénarios du groupe 3 pour le profil Prestation (figure 104 pour A_8, figure 105 pour V_22, figure 106 pour MC_15). Au-delà d'une hauteur de 1m, on constate que les dommages atteignent leur valeur maximale pour toutes les exploitations types. Ceci est principalement lié à la construction des fonctions d'endommagement utilisées pour l'application.

De plus, les dommages augmentent globalement proportionnellement à la hauteur d'eau, hormis pour l'arboriculture où les faibles hauteurs d'eau entraînent peu de dommages. Pour les deux exploitations types en monoculture (A_8 et V_22), les dommages sont les moins élevés si l'inondation se produit durant la période de repos végétatif. La période de récolte est celle où les dommages sont les plus élevés.

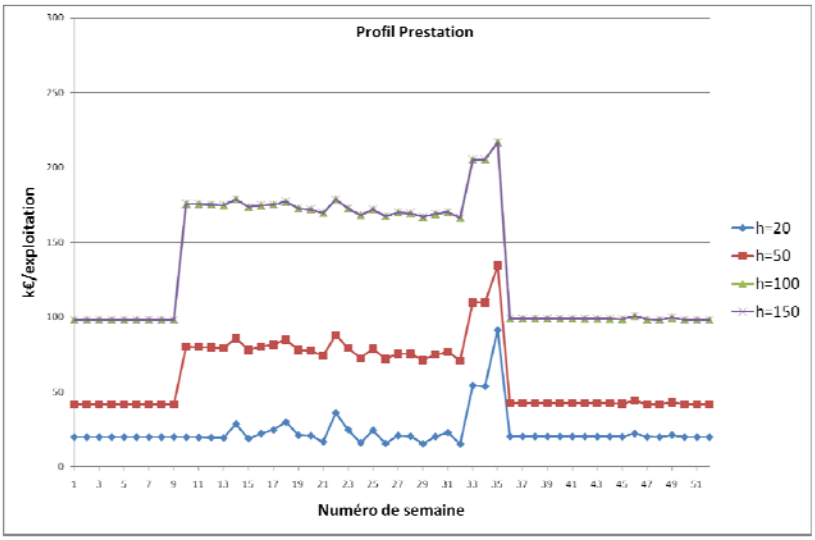


Figure 104 : Montant des dommages économiques pour l'exploitation type A_8 (Profil Prestation) pour quatre hauteurs d'eau (durée d'une semaine, vitesse faible)

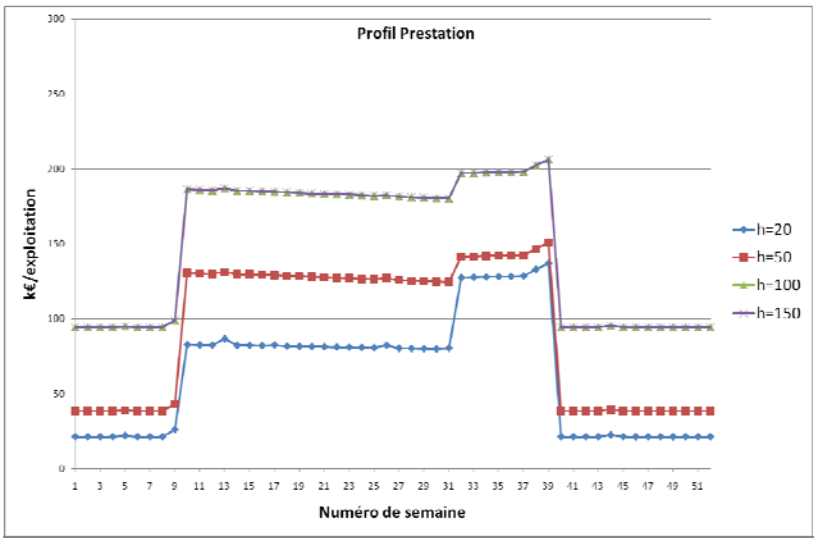


Figure 105 : Montant de dommages économiques pour l'exploitation type V_22 (Profil Prestation) pour quatre hauteurs d'eau (durée d'une semaine, vitesse faible)

Pour l'exploitation type MC_15 (figure 106), les cultures s'étalent sur l'ensemble de l'année. Certaines périodes se détachent comme générant des dommages plus importants (janvier à mars) car, si l'inondation se produit à cette période, les dommages à la culture du blé et de la salade sont cumulés.

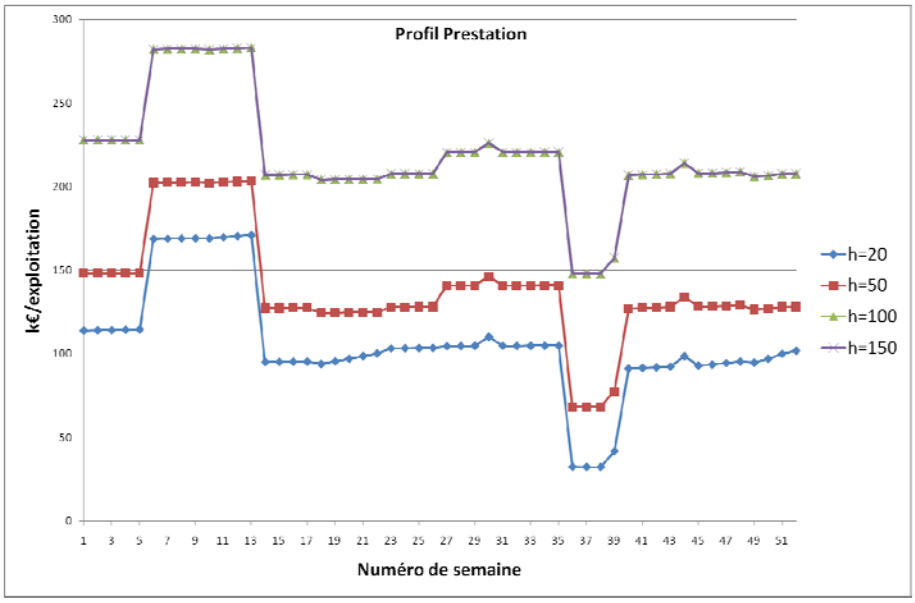


Figure 106 : Montant de dommages économiques pour l'exploitation type MC_15 (Profil Prestation, scénario du groupe 3, durée d'une semaine, vitesse faible)

Le tableau 39 propose un bilan des montants de dommages économiques minimum, maximum et moyens pour les trois exploitations pour les quatre hauteurs d'eau (20, 50, 100, 150 cm) et les 52 périodes d'occurrence.

Les dommages minimaux varient de 15 k€ (A_8) à 32 k€ (MC_15). Les montants maximaux se situent autour de 200 k€ pour V_22 et A_8 et 280 k€ pour MC_15.

Tableau 39 : Bilan des montants des dommages économiques pour les trois exploitations types pour les quatre hauteurs d'eau (Profil Prestation, durée d'une semaine, vitesse faible)

	Montant de dommages économiques (k€)		
	A_8	**V_22**	**MC_15**
Minimum	15,1	21,3	32,3
Maximum	216,9	206,4	283,1
Moyenne	90,3	113,3	170,8
Ecart type	58,4	58,0	59,3

7.6.3. Sensibilité à la période d'occurrence

Pour une hauteur d'eau donnée (50 cm), les montants de dommages économiques sont analysés sur des fenêtres plus réduite que les 52 périodes d'occurrence. La probabilité d'occurrence des inondations est difficilement prédictible sur un pas de temps hebdomadaire. Il s'agit donc ici d'analyser la sensibilité des dommages économiques sur les trois périodes (mai, septembre, décembre). Pour les crues de printemps (semaines 14 à 22, figure 107) et les crues d'hiver (semaines 44 à 52, figure 107), les dommages économiques sont constants pour les trois exploitations types. Par contre, concernant la crue fin d'été et d'automne (semaines 32 à 40, figure 107), les montants de dommages économiques peuvent varier très fortement, jusqu'à un facteur 3, d'une semaine à l'autre en raison des récoltes.

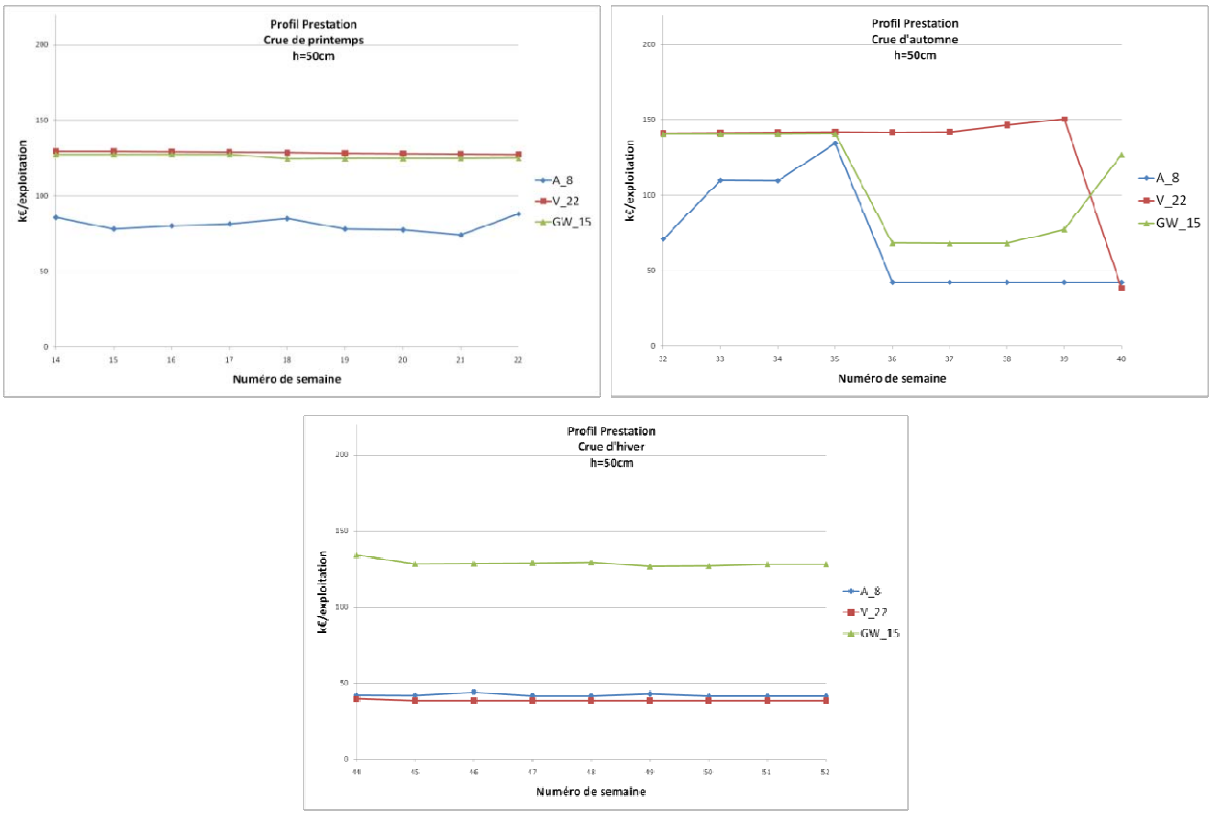


Figure 107 : Dommages économiques pour les trois exploitations types avec le profil Prestation pour une crue de printemps, d'automne et d'hiver (scénario du groupe 3, hauteur= 50 cm, durée d'une semaine, vitesse faible)

7.6.4. Sensibilité à la durée

Pour les trois exploitations types, le montant des dommages économiques est analysé en fonction de la durée de la submersion et de la période d'occurrence pour deux hauteurs d'eau (20 cm et 150 cm).

Quatre durées sont testées :

- une semaine (losanges bleus) ;
- deux semaines (carrés rouges) ;
- trois semaines (triangles verts) ;
- quatre semaines (croix violettes).

- *Exploitation type en arboriculture*

Les dommages économiques pour A_8 (figure 108) sont relativement peu sensibles à la durée pendant la période végétative. En dehors de cette période, la sensibilité à la durée dépend de la hauteur d'eau. Pour des faibles hauteurs d'eau, les montants de dommages économiques peuvent varier d'un facteur 5 pour une durée d'une à quatre semaines. Pour les fortes hauteurs d'eau, ce facteur est réduit à 1,5 ; montrant que la durée de submersion a moins d'influence sur le montant de dommages.

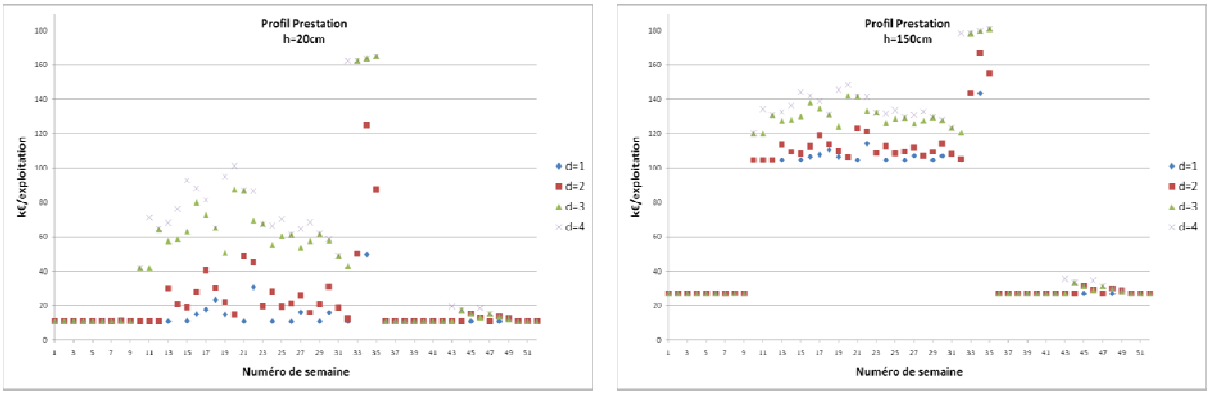


Figure 108 : Montant des dommages économiques pour A_8 (Profil Prestation) pour quatre durées d'inondation (vitesse faible) et d'une hauteur de 20 cm et 150 cm

- *Exploitation type en viticulture*

Les dommages économiques de V_22 (figure 109) se répartissent en deux groupes différents, quelle que soit la hauteur d'eau, en fonction de la période d'occurrence.

Sur la période de repos végétatif (semaine 40 à 9), les dommages économiques sont :

- similaires et minimaux pour une durée d'une à deux semaines ;
- similaires et maximaux pour une durée de trois à quatre semaines.

En dehors de la période végétative, les dommages économiques sont :

- minimaux pour une durée d'une semaine,
- similaires et maximaux pour des durées supérieures à une semaine.

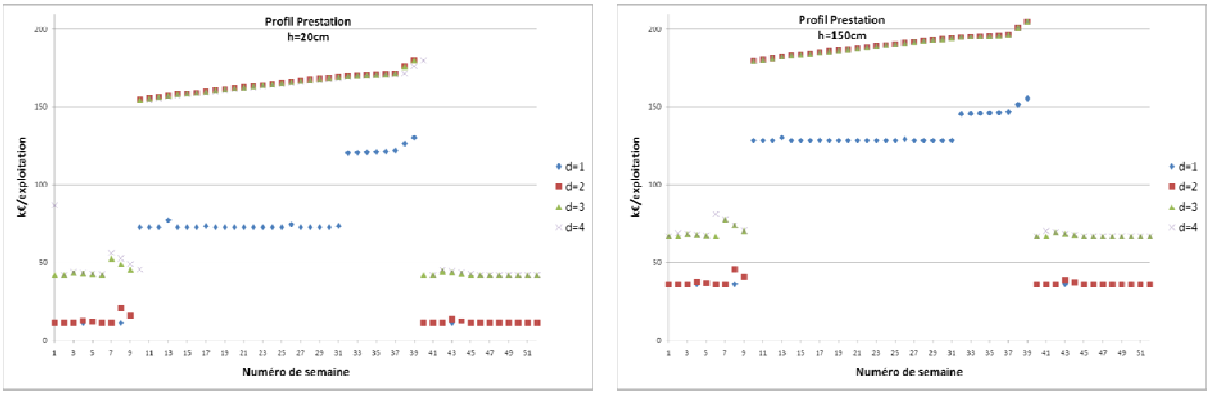


Figure 109 : Montant des dommages économiques pour V_22 (Profil Prestation) pour quatre durées d'inondation (vitesse faible) et d'une hauteur de 20 cm et 150 cm

- *Exploitation type en maraichage/céréale*

Les montants de dommages économiques pour l'exploitation type MC_15 ne sont pas sensibles à la durée de submersion (figure 110) car dès la première semaine, l'ensemble des récoltes est détruite.

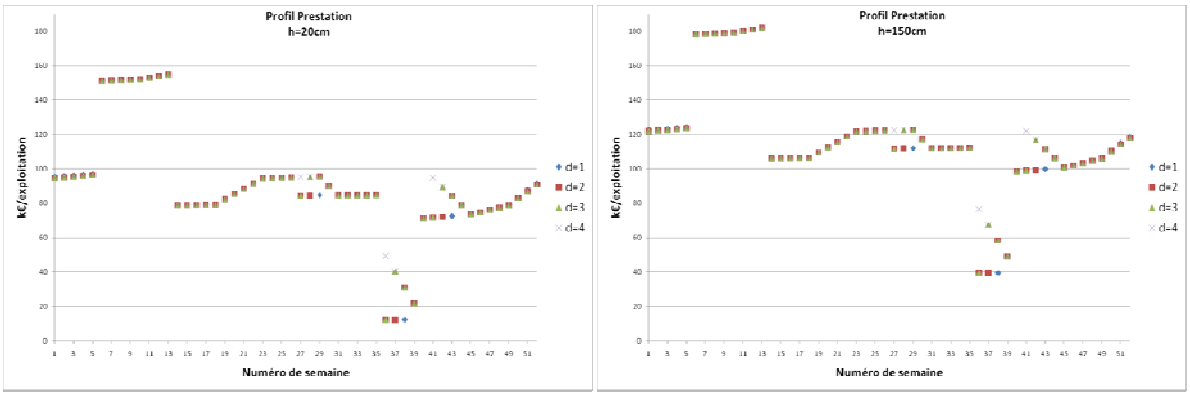


Figure 110 : Montant des dommages économiques pour MC_15 (Profil Prestation) pour quatre durées d'inondation (vitesse faible) et d'une hauteur de 20 cm (1) et 150 cm (2)

7.7 Conclusions

7.7.1. Description des potentialités du modèle

Nous illustrons dans ce chapitre les différentes approches de caractérisation de la vulnérabilité possibles avec le modèle EVA.

D'un point de vue non monétaire, il permet de réaliser un suivi de l'utilisabilité de l'ensemble des composantes suite à l'occurrence d'une inondation (utilisabilité dans le temps, taux d'utilisation). Il permet également de réaliser un suivi des besoins en main d'œuvre sur l'exploitation.

Il permet d'évaluer les dommages à l'échelle de l'exploitation :

- avec une valorisation financière ;
- avec la prise en compte de l'assurance ;
- avec une valorisation économique.

Dans l'annexe 13, nous détaillons la méthode développée pour l'évaluation des dommages directs, en particulier coûts de restauration des capitaux physiques qui sont, jusqu'à présent, encore relativement peu pris en compte, hormis la perte de récolte, dans les évaluations économiques.

Ce chapitre apporte plusieurs résultats :

- d'un point de vue recherche, il met en évidence la capacité du modèle EVA à caractériser et évaluer de façon exploratoire la vulnérabilité des exploitations agricoles à travers les différents indicateurs envisagés au chapitre 5 ;
- d'un point de vue opérationnel, les résultats produits montrent que le modèle EVA pourrait être utilisé pour la réalisation de diagnostics de vulnérabilité produisant des indicateurs monétaires financiers et économiques.

7.7.2. Principaux résultats

- *Dommages économiques directs*

En termes de vulnérabilité, l'analyse des dommages économiques directs montre que la prise en compte des seuls dommages aux cultures n'est pas représentative des dommages sur les exploitations, en particulier pour les cultures pérennes (arboriculture et viticulture). En effet, pour les évènements extrêmes (forte vitesse et forte hauteur), les dommages principaux sont liés aux coûts de restauration du matériel végétal et des sols. Dans ce cas, si l'ensemble de l'exploitation est touchée, il y a peu d'effets induits sur l'activité puisque l'activité est stoppée suite à l'inondation.

Les dommages directs aux cultures ont un effet déterminant sur les dommages induits. En effet, si la perte de récolte est supérieure à un certain seuil (100 % dans l'application), l'activité est stoppée et il n'y a donc pas d'effets induits associés.

Globalement, on peut distinguer par l'analyse des dommages économiques directs deux catégories de vulnérabilité :

- la vulnérabilité aux évènements extrêmes touchant l'intégralité d'une exploitation où les coûts de restauration et la perte directe de récolte dominent le montant total de dommage ;
- la vulnérabilité aux évènements faibles à moyens touchant l'intégralité de l'exploitation ou forts, mais ne touchant qu'une partie de l'exploitation, pour lesquels les dommages induits sont significatifs.

- *Évaluation financière*

Concernant l'évaluation financière, nous analysons la vulnérabilité aux évènements faibles à moyens pour l'intégralité de l'exploitation (scénarios du groupe 1) et les évènements forts sur la moitié des parcelles et le bâtiment (scénarios du groupe 2). Les dommages sont globalement plus élevés sur les scénarios du groupe 2 en raison des coûts de restauration ; en particulier le matériel qui représente une part importante des dommages. La comparaison des dommages financiers supportés par les trois profils (Interne, Prestation, Solidarité) pour les trois exploitations types met en évidence que le profil Interne subi globalement plus de dommages en raison de l'impossibilité de réaliser un certain nombre de tâches, qui induisent une perte supplémentaire de rendement.

Nous proposons alors d'approfondir l'analyse de la variation de revenu[67] pour les exploitations afin de déterminer si la perte de produit est principalement liée à l'endommagement direct ou si elle est due à des effets induits.

En comparant les profils Interne et Prestation, nous montrons clairement que l'impact sur le revenu lié aux effets induits peut, dans certains cas de figure, être beaucoup plus important que la perte de revenu directe liée à l'endommagement de la récolte.

Pour l'analyse de la vulnérabilité financière de l'exploitation, ce résultat est important car même si les dommages au matériel sont élevés, ils sont globalement bien indemnisés par les assurances alors que les dommages induits ne le sont pas.

Nous montrons ensuite, en poursuivant la comparaison entre profils Interne et Prestation, que dans certains cas, la perte de produit induite par la non réalisation de tâches est beaucoup plus importante que les charges supplémentaires de main d'œuvre et de matériel nécessaires pour la réalisation des mêmes tâches avec le profil Prestation. Toutefois, pour la main d'œuvre, il n'est pas

[67] La variation de revenu est entendue comme la variation de produit agricole diminuée de la variation des charges variables (main d'œuvre incluse).

possible de comparer directement les fonctionnements normal et en cas d'inondation car une grande partie de la main d'œuvre est employée pour la restauration des capitaux physiques (sol et bâtiment).

- *Évaluation économique*

Les dommages obtenus pour les scénarios du groupe 1 et 2 sont différents pour les profils Interne et Prestation ; les dommages du profil Interne étant globalement supérieurs aux dommages du profil Prestation. Le rapport entre ces dommages peut être supérieur à cinq, selon la période considérée. Cette différence d'autant plus importante que la perte directe de récolte est faible.

Pour l'évaluation économique, la distinction entre les profils Interne et Prestation est donc importante à considérer dans les cas de figures suivants :

- les pertes de récolte directes sur le bassin versant sont faibles pour les crues les plus fréquentes, cela dépend des cultures présentes sur le bassin versant et de l'hydrologie du bassin versant ;
- les exploitations ont une exposition inférieure à 100 % de leurs parcelles et leur bâtiment est exposé ;
- les projets ont des conséquences potentielles sur les profils des exploitants (modification de la disponibilité de la solidarité, modification du contexte institutionnel d'indemnisation des dommages…) ;
- les projets portent sur la diminution de la dépendance par rapport aux ressources externes pour la remise en route comme c'est le cas des mesures de réduction de la vulnérabilité.

Nous avons ensuite réalisé une sommaire analyse de la sensibilité des dommages économiques à différents paramètres : la hauteur, la période d'occurrence et la durée.

Premièrement, nous montrons que les dommages augmentent avec la hauteur d'eau jusqu'à atteindre un seuil maximum, variable en fonction de l'exploitation type considérée.

Deuxièmement, l'analyse de la sensibilité à la période d'occurrence est particulièrement importante. En effet, si les dommages sont simulés au pas de temps hebdomadaire, les probabilités d'occurrence des crues sont difficilement prévisibles à ce pas de temps. Les focus proposés sur les périodes d'inondation probables sur le Rhône aval montrent que les dommages varient peu pour les trois exploitations types pour les crues de printemps ou d'hiver. Par contre, les dommages varient très fortement sur la période de fin d'été, début d'automne en raison de la récolte d'une partie des productions.

Troisièmement, l'analyse de la sensibilité à la durée montre que les seuils d'atteinte du dommage maximal doivent être analysés conjointement à la hauteur. En effet, pour les faibles hauteurs, la durée est discriminante alors qu'elle l'est moins pour les fortes hauteurs.

7.7.3. Perspectives d'utilisation du modèle

L'utilisation du modèle EVA pourrait être envisagé en deux phases.

Dans un premier temps, la réalisation d'évaluations individuelles sur des exploitations agricoles d'une zone permettrait de compléter la base de données sur les exploitations types tout en fournissant des éléments d'analyse pertinents tant pour les exploitants (approche financière) que pour les gestionnaires du Plan Rhône (approches financière et économique) sur la vulnérabilité des exploitations. Ce travail peut être réalisé sous forme d'enquêtes en face à face avec les exploitants en complétant le modèle de données que nous avons déjà enrichi des données sur les exploitations types (sous-section 6.3.5, p 186).

Ce travail préparatoire faciliterait l'application du modèle EVA pour une évaluation économique à une plus grande échelle qui nécessite des données alimentant un SIG[68] concernant:

- la répartition spatiale des scénarios d'inondation modélisés pour différentes périodes d'occurrence de crue qui doit être compatible avec l'échelle de représentation des enjeux ;
- l'occupation du sol en termes de localisation et détermination des surfaces des parcelles et des bâtiments de chaque exploitation du territoire concerné.

Le travail d'enquête et de localisation géographique nécessaire pour la mise en œuvre du modèle EVA représente un temps et donc un coût qu'il convient de considérer avant l'utilisation du modèle. Ainsi, le modèle est approprié pour l'évaluation des politiques de gestion des inondations portant principalement sur les enjeux agricoles mais a priori pas, avec les données existantes, pour les autres types de politiques.

7.7.4. Perspectives d'amélioration du modèle

- *Consolidation de l'évaluation des dommages directs*

Les dommages directs, en particulier aux récoltes et au matériel, ont un effet déterminant sur les dommages induits sur l'activité. Les courbes d'endommagement utilisées ont été développées principalement dans le contexte de la zone Rhône aval. Une consolidation des méthodes et des

[68] Système d'Information Géographique

données utilisées pour l'évaluation de ces dommages devrait être envisagée par une consultation plus large d'experts e pour permettre une utilisation plus large du modèle EVA.

- *Développer l'analyse de la vulnérabilité financière*

L'évaluation financière s'arrête, à ce stade, à l'évaluation des dommages supportés par l'exploitant avec et sans assurance. Pour approfondir l'analyse financière, il est nécessaire de croiser les temporalités de plusieurs évènements :

- les dommages sur l'exploitation en fonction de la période d'occurrence ;
- les délais de remboursement des systèmes assurantiels ;
- les modes de perception du produit agricole en fonction des pratiques de vente (système coopératif, vente en Grandes et Moyennes Surfaces, circuit court…).

- *Approfondir la rationalité des exploitants pour la réalisation des actions*

Pour l'instant, les profils Prestation et Solidarité réalisent l'ensemble des tâches de production et de remise en état sans priorisation et sans contrainte (hormis lorsque les parcelles sont inaccessibles). Pour le profil Interne, dès qu'une contrainte est rencontrée, la tâche ne peut pas être réalisée et implique, si la donnée existe, une perte de rendement. Deux types de difficultés ont été rencontrés à ce niveau :

- premièrement, pour les tâches de remise en état, nous n'avons pas affecté de pénalité de perte de rendement en cas de non réalisation et le dommage simulé peut ainsi être sous estimé[69]
- deuxièmement, dans la collecte de données, les pénalités attribuées à la non réalisation des tâches de production sont celles dont la fiabilité est la plus soumises à caution[70].

Ainsi, il semble que l'indicateur de perte de rendement soit peu pertinent pour les tâches de remise en état ou certaines tâches de l'itinéraire technique, comme la taille en arboriculture, qui sont pourtant réalisées par les exploitants.

[69] Notons que nous avons toutefois, considéré dans l'évaluation économique pour corriger ce biais que les coûts de restauration sont intégralement réalisés et identiques quel que soit le profil.

[70] Les experts ont généralement eu des difficultés à projeter ces hypothèses et nous n'avons pas identifié d'expérimentations nous permettant de consolider ces données.

Afin d'améliorer cet aspect du modèle, il serait pertinent de définir d'autres indicateurs de pénalités que la perte de rendement comme par exemple, l'augmentation du temps de réalisation d'autres tâches, la perte de qualité…

Enfin, il est envisageable d'affecter des priorités sur la réalisation des tâches ou des conditions de priorité obligatoire de réalisation.

- *Prise en compte des rotations (aspects pluri annuel)*

Pour l'instant, le modèle n'envisage la prise en compte d'aspects pluriannuels que dans le calcul des coûts de restauration du matériel végétal. Cependant, pour de futurs développements, il serait intéressant d'intégrer la pluri-annualité des rotations de cultures. En particulier, les effets liés à l'impossibilité de l'implantation de la culture suivante et des alternatives choisies par l'exploitant sont peu développées dans le modèle, à ce stade.

- *Affiner les profils et les hypothèses limites*

Les profils d'exploitants retenus sont archétypiques et ne se veulent pas le reflet de la réalité. Ainsi, l'impossibilité de récolter en raison de l'absence d'un tracteur peut paraître aberrante. Cependant, l'objectif est ici d'identifier les points de vulnérabilité qui peuvent être masqués par une solidarité plus ou moins organisée. En effet, le profil Solidarité permet à l'exploitant qui ne dispose pas de la trésorerie suffisante d'éviter les contraintes sur l'activité que subit le profil Interne. Toutefois, si la solidarité ne s'organise pas autour de l'exploitation touchée, l'exploitant bascule vers le profil Interne. Ce basculement est important tant du point de vue de l'évaluation financière que du point de vue de l'évaluation économique. Ainsi, connaître le type de profil de l'exploitant est important autant pour analyser la vulnérabilité et la résilience à l'échelle de l'exploitation que pour déterminer la vulnérabilité d'un territoire pour une évaluation économique.

Pour approfondir cet aspect, il est important de déterminer quelles sont les limites à la disponibilité du matériel et de la main d'œuvre pour la réalisation des prestations ou de la mise en œuvre de la solidarité.

- *Prises en compte des interactions entre exploitants et avec la filière*

Les profils Prestation et Solidarité reposent sur des interactions avec d'autres agents. Pour l'instant dans le modèle EVA, nous avons simplement attribué aux exploitants un niveau de capital social ou financier leur permettant de poursuivre la remise en route. Un premier niveau d'interaction serait donc à considérer :

- Dans le profil Prestation, ce sont surtout les relations avec la filière amont (prestataires de service, fournisseurs de matériel, d'intrants) ainsi que la disponibilité de la main d'œuvre qui devront être approfondies.
- Pour le profil Solidarité, les interactions se font entre les exploitants (locaux ou plus éloignés suivant les réseaux), avec les familles, avec les services de sécurité civile…

Enfin, on peut également envisager les effets indirects de l'inondation en considérant les interactions avec les filières aval en étudiant :

- l'impact indirect des dommages aux exploitations agricoles sur les filières agroalimentaires de transformation des produits ;
- l'impact des dommages sur les filières de transformation et distribution touchées par les inondations sur les exploitations y compris celles qui n'ont pas été touchées directement.

CHAPITRE 8. ÉVALUATION DES MESURES DE RÉDUCTION DE LA VULNÉRABILITÉ POUR TROIS EXPLOITATIONS TYPES

La réduction de la vulnérabilité des exploitations agricoles vise, en modifiant certaines caractéristiques de l'exploitation, à diminuer les dommages subis suite à l'occurrence d'une inondation. L'objectif des mesures est, à la fois de limiter les dommages directs, mais surtout de permettre la poursuite de l'activité suite à l'inondation.

Dans ce chapitre, le modèle EVA est utilisé pour évaluer les bénéfices de la mise en œuvre des mesures de réduction de la vulnérabilité sur les trois exploitations types A_8 (Arboriculture, 8 ha), V_22 (Viticulture, 22 ha) et MC_15 (Maraîchage/Céréales, 15 ha) pour un ensemble de scénarios d'inondation. Les bénéfices sont évalués par les dommages évités, valorisés avec une perspective économique.

Dans un premier temps, les simulations réalisées sont décrites en expliquant les choix des différents paramètres. Les résultats présentés par la suite reposent sur plus de 27 000 simulations. Le nombre de simulations résulte du choix du plan d'expérience des scénarios d'inondation appliqués aux trois exploitations types en différentes configurations de vulnérabilité selon les profils et l'exposition.

Nous proposons ensuite une analyse de huit mesures de réduction de la vulnérabilité en analysant

- les dommages évités non pondérés et leur répartition en fonction de la période d'occurrence sur l'année ;
- les dommages évités moyens annuels (DEMA), indicateur synthétique représentatif des dommages évités dans le contexte de la zone aval du Rhône sur les exploitations types ;
- le coût maximal acceptable de chacune des mesures au regard des DEMA générés.

Puis, une synthèse des résultats est proposée, en analysant l'efficacité des mesures en fonction de la fréquence d'exposition et du profil des exploitants. Nous réalisons ensuite une analyse comparative de ces mesures pour chaque exploitation type.

Enfin, les conclusions quant à l'utilisation en termes de recherche et d'appui à la décision et les perspectives d'utilisation du modèle EVA, sont dégagées.

8.1 Plan d'expérience

8.1.1. Paramètres

- *Aléa*

Différents niveaux des quatre paramètres d'aléa ont été retenus pour l'évaluation des mesures de réduction de la vulnérabilité (tableau 40) :

- quatre niveaux de hauteurs ;
- trois durées ;
- une vitesse faible ;
- 52 périodes d'occurrence.

En comparaison des scénarios retenus pour les simulations réalisées au chapitre 7, la durée de 3 semaines n'a pas été retenue car les dommages sont relativement identiques à ceux obtenus pour la durée de 4 semaines. Ce faisant, étant donné le choix retenu pour pondérer les scénarios, cela permet de ne pas accorder un poids trop important aux inondations de longue durée.

Au total, la combinaison des paramètres de l'aléa représente 624 scénarios d'aléa.

Tableau 40 : Paramètres d'aléa

Hauteur (cm)	Durée (semaines)	Vitesse (niveau)	Occurrence (semaine)	Nombre de scénarios
{20 ; 50 ; 100 ; 150}	{1 ; 2 ; 4}	0	1 à 52	624

- *Les exploitations*

Concernant les exploitations, les paramètres pour définir la configuration de vulnérabilité retenus sont les suivants (tableau 41) :

- trois exploitations types ;
- deux profils (Prestation est équivalent à Solidarité pour une valorisation économique);
- l'exposition spatiale du groupe 2 définie au chapitre 6 (sous-section 6.4.1, p 189) ;
- deux fréquences d'exposition (rare ou fréquente).

Nous distinguons l'exposition spatiale de la fréquence d'exposition :

- l'exposition spatiale correspond aux modalités d'exposition des parcelles (50% ou 100%) et des bâtiments (inondé, non inondé) ;
- la fréquence d'exposition correspond aux périodes de retour des inondations subies par l'exploitation.

Aucune simulation supplémentaire n'est réalisée pour la prise en compte de la fréquence d'exposition. Ce paramètre est pris en compte dans la pondération des scénarios (cf. sous-section

8.1.2, p 240). La combinaison des paramètres des exploitations représente six configurations de vulnérabilité pour l'ensemble des exploitations types.

Tableau 41 : Paramètres des exploitations

Type	Profils	Exposition spatiale	Fréquence d'exposition	Nombre de configurations
{A_8 ; V_22 ; MC_15}	{Prestation ; Interne}	Groupe 2 (50 % des parcelles et bâtiment inondé)	{rare ; fréquente}	6

- *Mesures à évaluer*

Huit mesures de réduction de la vulnérabilité sont analysées (tableau 42). Pour l'évaluation des mesures s'appliquant à toutes les exploitations types, six simulations pour chaque scénario d'inondation doivent être réalisées, correspondant au nombre de configurations annoncé au tableau 41.

La mesure 4 (surélévation des plantations) ne concerne que l'exploitation A_8 et ne nécessite que deux simulations.

La mesure 8 correspond à un changement de profil (Interne vers Solidarité). Les simulations réalisées pour cette mesure servent également à définir l'état de référence (sans mesure de réduction de vulnérabilité) pour les autres mesures.

Au total, l'évaluation des mesures de réduction de la vulnérabilité pour les exploitations types requiert la réalisation de 44 simulations pour chaque scénario d'aléa.

Tableau 42 : Mesures à évaluer

Mesures	Intitulé	Exploitations concernées	Nombre de simulations par scénario d'aléa
M1	surélévation d'un bâtiment d'une hauteur de 40 cm	A_8 ; V_22 ; MC_15	6
M2	surélévation du petit matériel mobile d'une hauteur de 2m	A_8 ; V_22 ; MC_15	6
M3	surélévation d'une liste d'intrants d'une hauteur de 50 cm	A_8 ; V_22 ; MC_15	6
M4	surélévation des plantations d'une hauteur de 50 cm	A_8	2
M5	relocalisation définitive d'un bâtiment	A_8 ; V_22 ; MC_15	6
M6	évacuation des deux tracteurs de l'exploitation	A_8 ; V_22 ; MC_15	6
M7	gestion des stocks en flux tendu	A_8 ; V_22 ; MC_15	6
M8	Rechercher une association avec des exploitants situés en dehors de la zone inondable	A_8 ; V_22 ; MC_15	6
			44

- *Nombre total de simulations*

Au total, 27 456 simulations ont été réalisées pour l'évaluation des mesures de réduction de la vulnérabilité. À titre indicatif, cela a représenté un temps de calcul d'une heure (tableau 43).

Tableau 43 : Nombre de simulations et temps de calcul associés

	Nombre de simulations	Temps total de calcul	Temps de calcul par simulation
A_8	9 984	29 min 47,9 s	0,179 s
V_22	8 736	18 min 3,5 s	0,124 s
MC_15	8 736	35 min 40,9 s	0,245 s
TOTAL	27 456	1h 0 min 0 s	0,131 s

8.1.2. Pondération des simulations

Pour le calcul des Dommages Moyens Annuels (DMA) et des Dommages Évités Moyens Annuels (DEMA) pour chaque mesure, des poids ont été affectés aux scénarios d'inondation en fonction des deux catégories de fréquence d'exposition (rare et fréquente).

- *Définition d'une période de retour pour les hauteurs d'eau*

La définition d'une période de retour est basée sur les hauteurs d'eau (tableau 44). Bien qu'inspiré des données observées sur le Rhône, le choix d'affectation d'une hauteur d'eau à une période de retour est arbitraire. Nous avons souhaité illustrer deux situations typiques sur le Rhône. Dans le cas d'une exposition fréquente, le siège et les parcelles qui sont inondés, se situent dans le couloir non endigué du Rhône. Une exposition rare correspond à une exploitation dont le bâtiment et les parcelles sont protégés par des digues. Toutefois, la crue débordante c'est-à-dire la première crue provoquant une inondation a été fixée à 40 ans alors que la plupart des digues du Rhône sont dimensionnées pour une protection plus importante.

Tableau 44 : périodes de retour associées aux hauteurs d'eau

Hauteur d'eau (cm)	Période de retour associée pour une exposition fréquente	Période de retour associée pour une exposition rare
0	5 ans	40 ans
20	10 ans	50 ans
50	50 ans	100 ans
100	100 ans	150 ans
150	150 ans	300 ans

- *Pondération des durées*

Un poids équivalent est attribué à chaque durée de submersion (1/3).

- *Pondération de la période d'occurrence*

Le poids attribué à chaque période d'occurrence est basé sur une étude hydrologique de la basse vallée du Rhône (ISL, 2009). Cette pondération ne nécessite pas de simulation supplémentaire. Le temps de calcul est négligeable.

- *Poids total affecté à chaque scénario*

Le poids total associé à chaque scénario résulte de la combinaison des poids associés à chaque paramètre de l'aléa.

8.1.3. Modalité de l'évaluation

Dans les sections 8.2 à 8.5, nous proposons une illustration des différents types de mesures pouvant être évaluées en utilisant le modèle EVA. L'analyse proposée suit la démarche suivante.

- *Présentation de la mesure et des hypothèses*

Les mesures sont classées en quatre groupes de mesures selon le type de modification engendrée sur l'exploitation :

- modification de la hauteur d'élévation des composantes ;
- modification de la localisation d'un bâtiment et/ou de ses contenants ;
- modification de la gestion des stocks ;
- modification du profil de l'exploitant.

Pour chaque mesure, nous montrons comment les modifications sont prises en compte dans le modèle et permettent l'évaluation des dommages après mise en place de la mesure.

- *Dommages évités (non pondérés)*

Les dommages pour les situations avec et sans mise en place de la mesure sont comparés pour les différents scénarios permettant de calculer les dommages évités. À ce stade, les dommages évités ne sont pas pondérés mais associés à un scénario.

Une illustration des dommages évités pour quelques scénarios est proposée pour les trois exploitations types[71]. Les dommages évités par la mise en place des mesures sont représentés sur l'année (semaine 1 à 52) pour les trois exploitations types de la manière suivante :

- losanges bleus pour A_8 ;
- carrés rouges pour V_22 ;
- triangles verts pour MC_15.

Nous proposons une analyse des dommages évités mettant en évidence le fonctionnement du modèle EVA et parfois ses limites. Ces analyses ont une visée explicative et ne permettent pas de

[71] L'ensemble des figures représentant les dommages évités pour les trois exploitations types pour trois hauteurs d'eau (20, 50 et 100 cm) est donné en annexe 14.

conclure sur l'efficacité des mesures qui est traitée par le calcul d'indicateurs synthétiques : les DEMA et le coût maximal acceptable de la mesure.

- *Dommages évités moyens annuels (DEMA) et coût maximal acceptable*

Le calcul des DMA correspond à la somme des dommages associés aux différents scénarios d'inondation pondérés par la probabilité d'occurrence de ces scénarios. Dans le calcul des DMA intervient donc le scénario où aucune inondation n'affecte l'exploitation. Le DEMA se définit ensuite comme la différence entre le DMA sans et avec mesure de réduction de la vulnérabilité[72].

L'efficacité des mesures de réduction de la vulnérabilité sur les exploitations types dans le contexte du Rhône est analysée en utilisant l'indicateur synthétique des DEMA pour chaque mesure en distinguant :

- les deux profils (Prestation/Solidarité et Interne) ;
- les deux fréquences d'exposition (Rare, Fréquente).

Nous présentons :

- le DEMA qui correspond à la moyenne des dommages évités pondérés et tenant compte du scénario n'entraînant pas de dommages ;
- l'écart type entre les dommages évités pondérés ;
- les dommages évités minimum et maximum hormis le cas où l'exploitation n'est pas inondée.

Le calcul du coût maximal déterminant le seuil maximal d'investissement et d'entretien acceptable pour que la Valeur Actuelle Nette (VAN) reste positive, nous permet d'aborder la question de l'efficience.

Deux hypothèses sont faites pour le calcul de ce coût :

- l'horizon temporel considéré est de 15 ans ;
- le taux d'actualisation est fixé à 4 % selon les recommandations du commissariat général du plan (2005).

[72] Pour plus de détail sur le calcul des DMA et DEMA dans le cadre d'une ACB de projet de gestion des inondations voir sous section 3.3.3, p 83 et Erdlenbruch et al. (2008a).

8.2 Modification de la hauteur d'élévation des composantes de l'exploitation

8.2.1. Surélévation d'un bâtiment (M1)

- *Présentation de la mesure et hypothèses*

Le modèle EVA prévoit de pouvoir modifier la hauteur d'élévation de l'ensemble des bâtiments d'une exploitation (tableau 45). La hauteur de surélévation du bâtiment après mise en place de la mesure est de 40 cm.

Tableau 45 : Exemple de table de données définissant l'organisation spatiale de l'exploitation dans EVA

ID	class	area	crop	yield	price	elevation
p1	plot	4	Arboriculture	42500	0,5	0
p2	plot	4	Arboriculture	42500	0,5	0
b1	building	0	NA	NA	NA	**40**

- *Dommages évités : analyse de quelques scénarios*

La surélévation du bâtiment permet de réduire la hauteur d'inondation sur :

- le bâtiment ;
- les matériels agricoles ;
- les intrants.

Le bâtiment étant surélevé, il reste inaccessible pendant la durée de l'inondation pouvant engendrer des effets induits du fait que le matériel agricole contenu dans le bâtiment est inutilisable.

Pour les profils Prestation/Solidarité, les dommages évités correspondent principalement aux coûts de restauration évités pour le bâtiment, les matériels et les intrants[73].

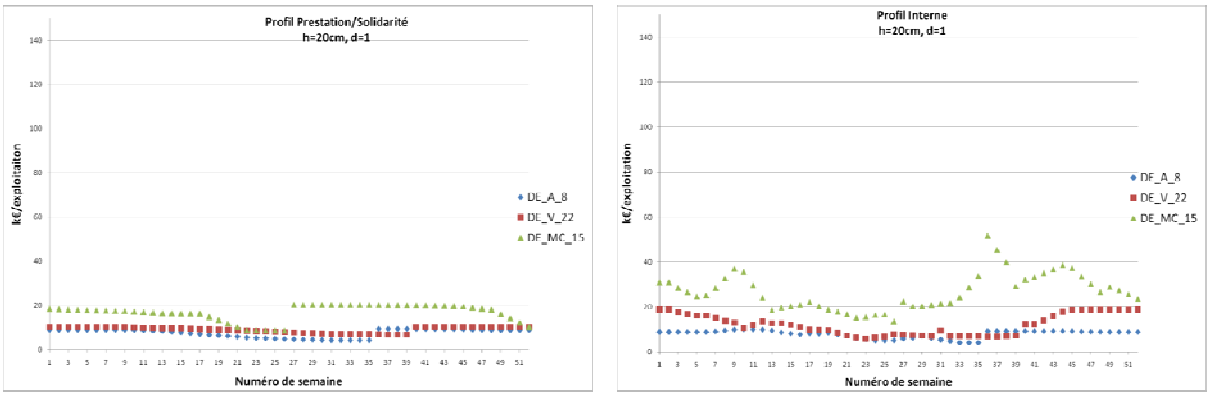
Pour le profil Interne, les dommages évités correspondent aux coûts de restauration et aux pertes de valeur ajoutée induites après l'inondation.

Pour une hauteur de 20 cm, les dommages évités sont compris entre 4 et 20 k€/exploitation pour les trois exploitations types avec un profil Prestation (figure 111, a). La variation de dommages évités observée au cours de l'année est liée à la variation des quantités de stock d'intrants sur les exploitations.

Les dommages évités pour la même hauteur d'eau pour le profil Interne varie entre 4 et 60 k€ /exploitation pour les trois exploitations types (figure 111, b). Les effets induits sur l'activité sont relativement peu importants pour A_8. Par contre, pour V_22, la mesure permet de poursuivre

[73] Le coût d'utilisation du matériel pour la prestation ou l'entraide est généralement négligeable.

normalement la réalisation de la taille (semaines 45 à 5). De même, pour MC_15, les dommages évités sont importants en particulier autour de la semaine 9 et de la semaine 37.

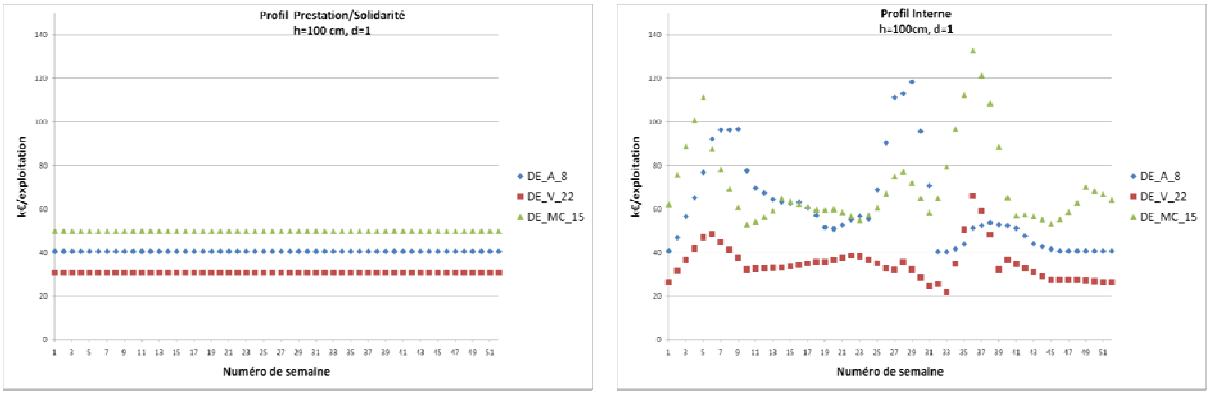


(a) (b)

Figure 111 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20 cm et d'une durée d'une semaine

Pour une hauteur d'eau de 100 cm, les dommages évités augmentent pour toutes les exploitations types avec le profil Prestation/Solidarité (figure 112, a).

Pour le profil Interne, les dommages évités sur A_8 augmentent fortement notamment sur la période des traitements (semaine 11 à 21) et au moment de la récolte (semaine 32 à 35). En effet, la mesure de réduction de vulnérabilité permet la mise en sécurité des tracteurs pour cette hauteur d'eau. Or, ces matériels sont essentiels pour la réalisation de nombreuses tâches de production, en particulier la récolte.



(a) (b)

Figure 112 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 50 cm et d'une durée d'une semaine

Pour une hauteur d'eau de 150 cm, la mesure n'entraîne plus de dommages évités car malgré la surélévation le montant de dommages maximal est atteint.

- *DEMA et coût maximal*

Tableau 46 : Bilan des DEMA et du coût maximal (k€/exploitation) pour la surélévation du bâtiment

	Prestation / Solidarité					Interne				
	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût
A_8										
Fréquente	2,4	7,2	0,0	40,7	26,7	3,1	10,7	0,0	149,2	34,3
Rare	0,4	3,4	0,0	40,7	4,5	0,5	5,2	0,0	149,2	6,0
V_22										
Fréquente	2,3	6,4	0,0	30,9	25,4	3,1	8,4	0,0	66,0	34,1
Rare	0,4	2,9	0,0	30,9	3,9	0,4	3,6	0,0	66,0	4,9
MC_15										
Fréquente	4,2	12,1	0,0	57,0	46,7	5,9	16,7	0,0	132,9	66,1
Rare	0,6	5,3	0,0	57,0	7,1	0,9	7,2	0,0	132,9	9,8

Le tableau 46 propose une analyse des DEMA engendrés par la surélévation du bâtiment. Pour toutes les exploitations types, en moyenne, le DEMA est supérieur pour l'exposition fréquente et pour le profil Interne.

Pour une exposition fréquente, le coût maximal permettant d'atteindre l'efficience de la mesure pour A_8 et V_22 est de l'ordre de :

- 25 k€ /exploitation avec un profil Prestation / Solidarité ;
- 34 k€ /exploitation avec un profil Interne.

Ce coût est plus élevé pour MC_15 avec 47 k€ /exploitation pour le profil Prestation/ Solidarité et 66 k€ /exploitation pour le profil Interne.

Selon les données techniques dont nous disposons (Chambres d'Agriculture Rhône Méditerranée, 2008), le coût d'une surélévation d'un bâtiment de 40 cm est de l'ordre de 30 k€[74].

Cette mesure s'avère donc efficiente pour l'ensemble des exploitations, en particulier pour MC_15 où le coût maximal laisse envisager la possibilité d'une surélévation plus importante.

Par contre, cette mesure ne serait efficiente pour aucune des exploitations types rarement exposées.

Pour la mise en œuvre concrète de cette mesure, il faut s'assurer que les contraintes en termes de réglementation de l'occupation du sol sont compatibles.

[74] Cette hypothèse est basée sur une estimation de la surface du bâtiment d'exploitation de 200 m².

8.2.2. Surélévation d'une liste de matériel (M2)

- *Présentation de la mesure et hypothèses*

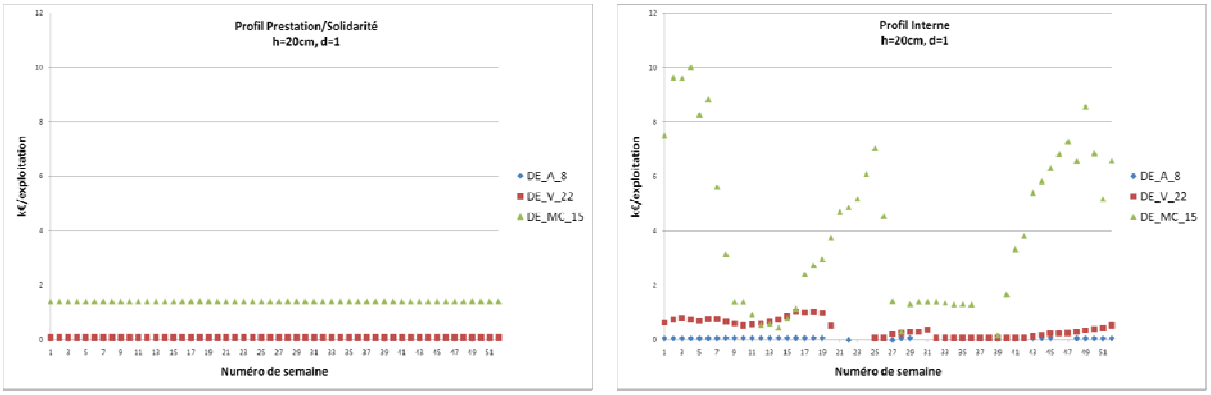
Le modèle EVA prévoit de pouvoir modifier la hauteur d'élévation des composantes localisées dans les bâtiments, en particulier, les matériels (tableau 47). Seuls les matériels mobiles légers sont surélevés. La hauteur maximale de surélévation est de 2 m. La surélévation est envisagée par un rangement, au moment de l'alerte de ces matériels sur des étagères ou leur suspension à des câbles.

Tableau 47 : Exemple de table de données définissant les caractéristiques des composantes localisées dans un bâtiment

	class	location	elevation	age	quantity
auger	tool	b1	0	10	1
chopper_arbo	tool	b1	0	5	1
cleaner	tool	b1	**200**	10	1
cultivator	tool	b1	0	5	1
fertiliser_spreader	tool	b1	**200**	10	1
mower	tool	b1	0	10	1
other_arbo	tool	b1	0	15	1
pesticide_sprayer_arbo	tool	b1	**200**	5	1
secator	tool	b1	**200**	5	3
tractor_2m_arbo	tool	b1	0	10	1
tractor_4m_arbo	tool	b1	0	5	1
trailer_arbo	tool	b1	0	5	2
turner_arbo	tool	b1	0	10	1
weeding_tank	tool	b1	0	10	1

Dans notre modèle, il n'y a pas de pénalité (perte de rendement) induite par la non réalisation des tâches de remise en état (nettoyage et travail des sols des bâtiments et des parcelles). Avec le profil Interne, cela signifie que si un matériel nécessaire à la réalisation est inutilisable ou si la main d'œuvre est insuffisante, l'exploitant ne réalise pas entièrement la tâche sans pénalité. Les coûts de restauration du bâtiment et des parcelles ont été corrigés pour ne pas sous-estimer les dommages économiques du profil Interne. Cependant, ce problème entraîne une modification de la répartition du temps de travail dans le modèle et peut entraîner des incohérences pour l'évaluation des dommages évités. En particulier, dans le cas de la mesure ici évaluée, le nettoyeur haute pression étant mis hors d'eau, il permet de réaliser entièrement la tâche de nettoyage des sols du bâtiment alors que celle-ci ne pouvait l'être que partiellement lorsque le nettoyeur est endommagé. Pour les périodes où les contraintes de disponibilité de main d'œuvre sont importantes, le modèle peut alors proposer des dommages évités négatifs. Ces valeurs ne doivent pas être prises en compte et une amélioration du modèle doit être envisagée pour permettre cette évaluation pour le profil Interne.

- *Dommages évités : analyse de quelques scénarios*



(a) (b)

Figure 113 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation du petit matériel pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20 cm et d'une durée d'une semaine

Pour une hauteur d'eau de 20 cm, les dommages évités pour les profils Prestation/Solidarité (figure 113, a), correspondant aux coûts de restauration évités par la mise en place de la mesure sont faibles (inférieurs à 2 k€/exploitation).

Pour les profils Interne, les dommages évités pour l'exploitation type A_8 sont également faibles. Par contre, pour les exploitations types V_22 et MC_15, les dommages évités sont plus élevés tout en restant inférieurs à 10 k€/exploitation (figure 113, b). Pour la vigne par exemple, sur la période hivernale, la mise hors d'eau des sécateurs qui permet d'éviter les dommages sur la production.

- *DEMA et coût maximal*

Tableau 48 : Bilan des DEMA (k€/exploitation) et du coût maximal (k€/exploitation) pour la surélévation du petit matériel mobile

	Prestation / Solidarité					Interne				
	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût
A_8										
Fréquente	0,2	1,1	0,1	9,7	2,4	0,2	1,1	~~-0,9~~	9,7	2,4
Rare	0,1	0,8	0,1	9,7	0,9	0,1	0,8	~~-0,9~~	9,7	0,9
V_22										
Fréquente	0,2	0,7	0,1	4,7	1,8	0,1	0,6	~~-1,6~~	10,3	0,8
Rare	0,0	0,4	0,1	4,7	0,5	0,0	0,4	~~-1,6~~	10,3	0,4
MC_15										
Fréquente	0,3	1,0	1,4	3,9	3,8	0,7	2,1	~~-11,4~~	11,0	7,8
Rare	0,1	0,4	1,4	3,9	0,7	0,1	0,9	~~-11,4~~	11,0	1,2

Les DEMA évités en k€ /exploitation, sont relativement faibles (tableau 48) :

- 0,1 à 0,7 pour les exploitations fréquemment exposées ;
- inférieurs à 0,1 pour les exploitations rarement exposées.

Le coût maximal en k€ /exploitation acceptable est compris entre :

- 0,8 et 7,8 pour les exploitations fréquemment exposées ;
- 0,4 et 1,2 pour les exploitations rarement exposées.

Selon les données techniques dont nous disposons (Chambres d'Agriculture Rhône Méditerranée, 2008), le coût d'investissement pour la mise en place de cette mesure est de 0,5 k€ /exploitation. Si on ne prend en compte que le coût d'investissement, cette mesure serait alors efficace pour presque toutes les exploitations, quelle que soit l'exposition. Cependant, le coût maximal donné au tableau 48 doit intégrer les coûts d'investissement mais également tous les autres coûts du projet (en tenant compte de l'actualisation suivant leur temporalité). Si le matériel est surélevé de façon permanente, il faudrait envisager de définir les coûts supplémentaires de manutention quotidienne liés à la surélévation. Si le matériel n'est pas surélevé de façon permanente, il faudrait déterminer une probabilité associée à la possibilité de réaliser la surélévation dans le temps d'alerte[75].

8.2.3. Surélévation d'une liste d'intrants (M3)

- *Présentation de la mesure et hypothèses*

Le modèle EVA prévoit de pouvoir modifier la hauteur d'élévation des composantes localisées dans les bâtiments, en particulier, les intrants. Tous les intrants sont surélevés d'une hauteur de 50 cm par rangement dans des armoires spécifiques.

- *Dommages évités : analyse de quelques scénarios*

Les dommages évités pour les trois profils sont, pour cette mesure, identiques puisque le modèle EVA n'intègre pas, à ce stade, de contraintes sur l'activité liée à une indisponibilité d'intrants. L'analyse des dommages évités est donc illustrée uniquement avec le Profil Prestation.

[75] En suivant le principe proposé par le FHRC concernant l'évacuation des personnes (cf. 3.3.4, p 86).

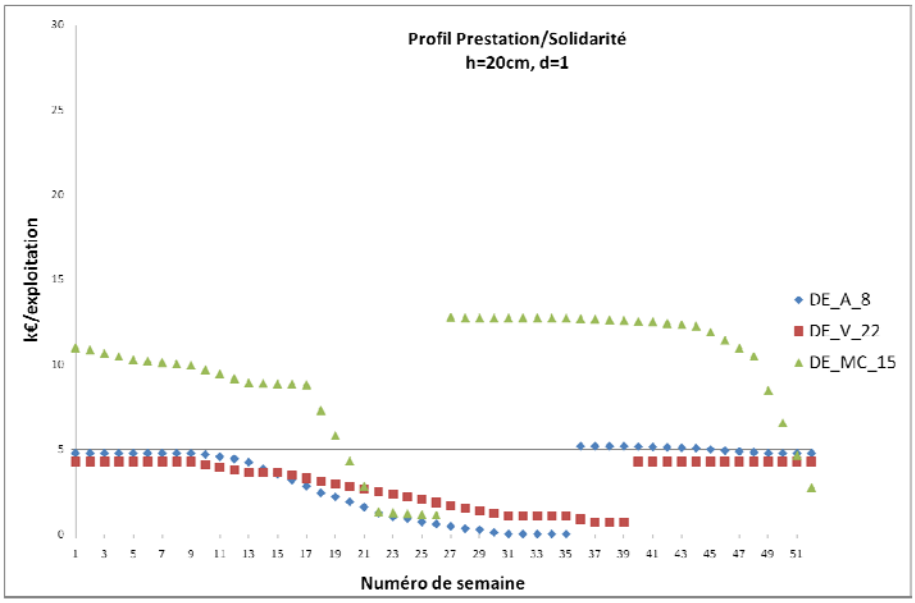


Figure 114 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation des intrants pour une inondation de 20 cm et d'une durée d'une semaine

Les dommages évités sont compris entre 0 et 12 k€ /exploitation pour une hauteur de 20 cm (figure 114) et 0 et 25 k€ /exploitation pour 50 cm. La variation au cours de l'année est liée à la variation de la quantité de stock d'intrants. Les dommages évités sont globalement les plus élevés pour l'exploitation type MC_15.

Pour une hauteur d'eau de 100 cm, l'intégralité des stocks d'intrants sont détruits malgré la surélévation et il n'y a donc aucun dommage évité quelle que soit l'exploitation type (figure 115).

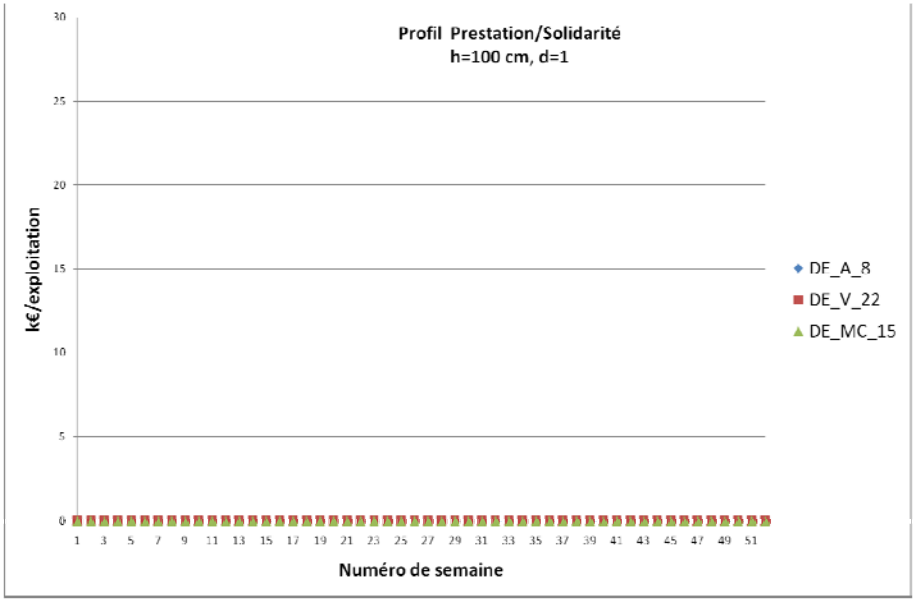


Figure 115 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation des intrants pour une inondation de 100 cm et d'une durée d'une semaine

- *DEMA et coût maximal*

Tableau 49 : Bilan des DEMA (k€/exploitation) et du coût maximal (k€/exploitation) pour la surélévation des intrants

	Prestation / Solidarité / Interne				
	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût
A_8					
Fréquente	0,8	2,3	0,0	10,4	9,4
Rare	0,1	0,9	0,0	10,4	1,1
V_22					
Fréquente	0,7	2,0	0,0	8,6	8,1
Rare	0,1	0,8	0,0	8,6	0,9
MC_15					
Fréquente	1,8	5,0	0,0	25,6	19,8
Rare	0,2	1,9	0,0	25,6	2,3

Le DEMA maximum se situe entre 10 à 26 k€ /exploitation. Ce montant est peu élevé relativement à d'autres mesures. Toutefois, la mesure de surélévation des intrants s'avère efficace pour toutes les exploitations types avec un DEMA moyen, en k€ /exploitation, compris entre :

- 0,7 et 1,8 pour les inondations fréquentes ;
- 0,1 et 0,2 pour les inondations rares.

Le coût maximal envisageable pour la réalisation de la mesure est compris entre :

- 8 et 20 k€ /exploitation pour les inondations fréquentes ;
- 1 et 2 k€ /exploitation pour les inondations rares.

Selon les éléments techniques des chambres d'agriculture dont nous disposons (2003), le coût de la mise en place est de l'ordre de :

- 0,5 à 0,8 k€ pour une armoire fermée avec étagère ;
- 0,4 € pour de simples étagères ;
- 3,6 k€ pour un local complètement aux normes comprenant des étagères.

Ainsi, la mise en place d'étagères, à minima, est efficiente tant pour les exploitations fréquemment que rarement exposées. La mesure est évidemment d'autant plus efficiente que l'exploitation est fréquemment exposée.

Par ailleurs, nous considérons, dans cette analyse, uniquement les dommages évités sur l'exploitation agricole. Or, dans le cas des produits phytosanitaires, les dommages évités sont également d'ordre environnemental (limitation des pollutions).

D'ailleurs, le stockage des produits phytosanitaires sur les exploitations est réglementé par le code de la santé publique dont l'article R5162 préconise la mise en place d'armoires ou locaux fermés pour le stockage. Dans le plan Ecophyto[76] lancé par le Ministère en charge de l'Agriculture suite au Grenelle de l'Environnement, il est également question de la mise aux normes des locaux.

Le couplage des politiques de gestion des pollutions agricoles et de gestion des inondations serait donc ici efficient.

8.2.4. Surélévation des plantations (M4)

- *Présentation de la mesure et hypothèses*

Le modèle EVA prévoit de pouvoir modifier la hauteur d'élévation du matériel végétal localisé sur les parcelles. Cette surélévation a des effets sur la perte de matériel végétal et de culture en cours sur le matériel végétal. Elle consiste en un plantage sur butte de 50 cm de hauteur et ne s'applique qu'aux exploitations pratiquant l'arboriculture. Cette mesure ne peut être mise en place qu'au moment de l'implantation du verger. Nous comparons donc deux situations : une exploitation qui aurait implanté son verger sur butte, et l'autre non.

- *Dommages évités : analyse de quelques scénarios*

La perte d'activité induite par la perte du matériel végétal est intégrée et actualisée dans le coût de restauration du matériel végétal qui s'étale sur trois ans (cf. annexe 13). Étant donné qu'aucun autre effet induit n'est attendu sur l'activité, nous présentons uniquement les dommages évités par cette mesure pour les profils Prestation/Solidarité.

La figure 116 montre que les dommages évités pour une hauteur de 50 cm varie entre 0 et 40 k€ par exploitation. Les dommages évités (non pondérés) sont importants sur les semaines 10 à 35.

[76] http://agriculture.gouv.fr/ecophyto-2018

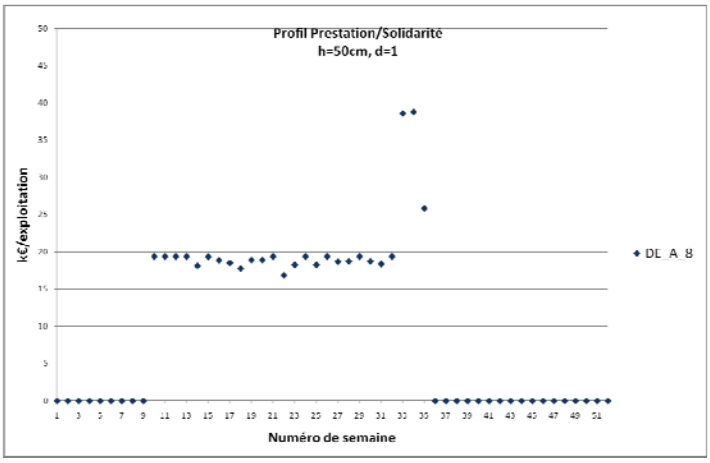


Figure 116 : Dommages évités (k€/exploitation) par la plantation su buttes pour une inondation de 50 cm et d'une durée d'une semaine

- *DEMA et coût maximal*

Tableau 50 : Bilan des DEMA (k€/exploitation) et du coût maximal (k€/exploitation) pour la plantation sur butte

	Prestation / Solidarité				
	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût
A_8					
Fréquente	0,2	2,0	0,0	51,7	2,2
Rare	0,0	0,8	0,0	51,7	0,3

Les DEMA moyen sont supérieurs pour l'exploitation A_8 fréquemment inondée. Le coût maximal acceptable est de :

- 2 k€ /exploitation pour une exposition fréquente ;
- 0,3 k€ /exploitation pour une exposition rare.

Les données sur les coûts de mise en œuvre de cette mesure (Blanc et al., 2010) indiquent que le buttage représente un montant de l'ordre de 4 k€ pour A_8 au moment de l'implantation du verger. Cette mesure n'est donc pas efficiente, sous ces hypothèses concernant les scénarios d'inondation et les fonctions d'endommagement.

Cette conclusion est surprenante car le plantage sur butte est fréquemment réalisé sur les parcelles ayant un sol mal drainé. Cependant, notons que la culture de l'exploitation type A_8 est la pomme dont le matériel végétal est relativement peu sensible à l'asphyxie racinaire. Pour les cultures de type fruits à noyaux (pêche, abricot…), il est probable que cette mesure serait plus efficace.

Par ailleurs, si des coûts supplémentaires (augmentation des temps de travail, de la récolte…) liés au plantage sur butte sont à considérer, le coût total doit rester inférieur au coût maximal.

8.3 Modification de la localisation des composantes

8.3.1. Relocalisation définitive d'un bâtiment (M5)

- *Présentation de la mesure et hypothèses*

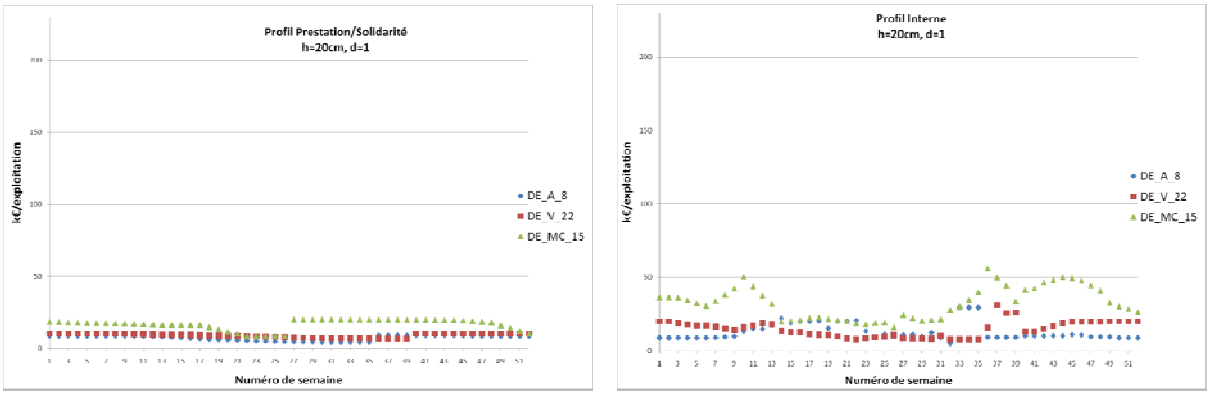
Le modèle EVA prévoit de pouvoir modifier la localisation du matériel et des intrants. Il s'agit donc de comparer deux situations : l'une dans laquelle le bâtiment est inondé, l'autre non.

Le nouveau bâtiment est localisé hors de la zone inondable. Il est considéré ici que la distance entre les parcelles et le nouveau bâtiment n'est pas modifiée[77].

- *Dommages évités : analyse de quelques scénarios*

Pour les exploitations avec un profil Prestation ou Solidarité (figure 117, a), les dommages évités par la relocalisation du bâtiment pour une inondation de hauteur 20 cm sont équivalents aux dommages évités par la surélévation du bâtiment de 40cm (sous-section 8.2.1, p 243) et varient entre 4 et 20 k€/exploitation.

Pour le profil Interne (figure 117, b), les dommages évités sont supérieurs dans le cas d'une relocalisation du bâtiment (5 à 60 k€/exploitation) car contrairement au cas de la surélévation, le bâtiment est accessible pendant la semaine d'inondation.



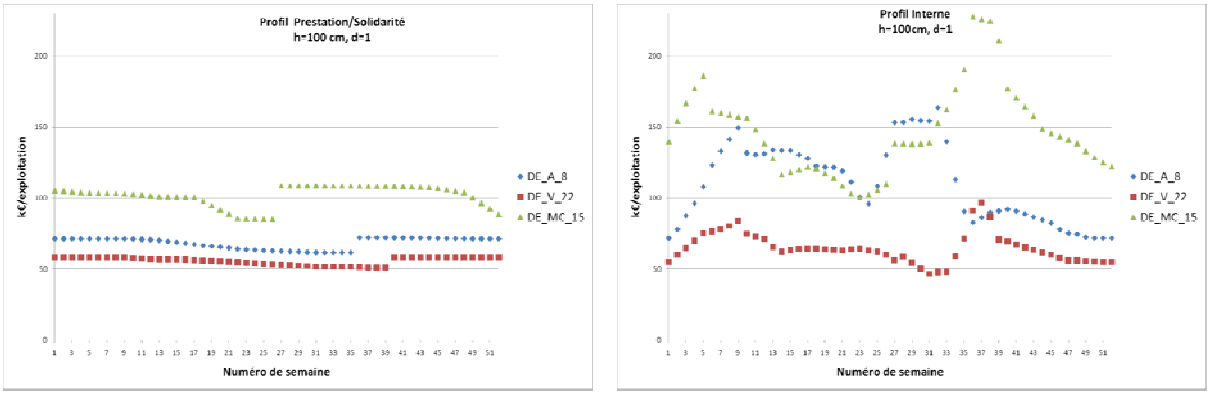
(a) (b)

Figure 117 : Dommages évités (k€/exploitation) par la relocalisation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20 cm et d'une durée d'une semaine

[77] Si la relocalisation entraîne des déplacements supplémentaires, ces coûts doivent être pris en compte dans l'ACB.

Pour une hauteur de 100 cm, pour les profils Prestation et Solidarité (figure 118, a), les dommages évités augmentent et sont compris entre 50 et 110 k€/exploitation. Ils sont les plus élevés pour l'exploitation type MC_15 qui dispose du parc de matériel et des stocks d'intrants les plus importants.

Pour le profil interne (figure 118, b), les dommages évités sont très élevés (50 à 230 k€/exploitation), notamment pour les exploitations types A_8 (semaine 32 à 35) et MC_15 (semaines 1 à 15 et 32 à 45).



(a) (b)

Figure 118 : Dommages évités (k€/exploitation) par la relocalisation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 100 cm et d'une durée d'une semaine

- *DEMA et coût maximal*

Tableau 51 : Bilan des DEMA (k€/exploitation) et du coût maximal (k€/exploitation) pour la relocalisation d'un bâtiment

	Prestation / Solidarité					Interne				
	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût
A_8										
Fréquente	3,0	10,0	4,1	72,2	33,4	4,4	15,5	5,2	163,5	48,7
Rare	0,7	6,3	4,1	72,2	8,3	1,1	9,5	5,2	163,5	12,0
V_22										
Fréquente	2,8	8,5	6,7	58,3	31,0	4,4	12,2	7,7	102,7	48,5
Rare	0,6	5,2	6,7	58,3	7,1	0,9	6,7	7,7	102,7	9,6
MC_15										
Fréquente	5,2	15,9	8,6	108,9	57,3	9,7	27,1	14,7	229,8	108,0
Rare	1,2	9,5	8,6	108,9	13,0	2,0	15,2	14,7	229,8	21,7

Nous ne disposons pas d'éléments de coût correspondant réellement à cette mesure. Cependant, la construction de zones refuges permettant l'évacuation du matériel et des intrants est évaluée à 100 k€ /exploitation par les CRAM (2008). Le coût de construction d'un bâtiment individuel d'exploitation hors zone inondable serait donc, a priori, plus élevé que celui d'une plate-forme. Pour un coût de 100 k€, la mesure serait seulement efficiente pour MC_15 fréquemment inondée en profil Interne.

Par ailleurs, la délocalisation des bâtiments agricoles nécessite la prise en compte d'autres paramètres comme :

- la définition de l'usage destiné aux bâtiments localisés en zone inondable ;
- le mode d'acquisition et la négociation de terrains hors zone inondable ;
- le temps nécessaire à la mise en place du projet.

À titre d'exemple, la commune de Pierrelatte (Drôme) a engagé une action de délocalisation de sièges d'exploitation situés en zone inondable (Serre, 2011). L'achat des terres a été géré par la Société d'Aménagement Foncier et d'Établissement Rural (SAFER). Les terres ont été vendues aux agriculteurs ayant des bâtiments en zone inondable. L'action a démarré en 2004 et seulement six sièges ont été effectivement délocalisés en 2011. Il faudrait donc tenir compte de ce décalage entre les premiers coûts et bénéfices du projet dans une évaluation.

8.3.2. Évacuation temporaire d'une liste de matériels (M6)

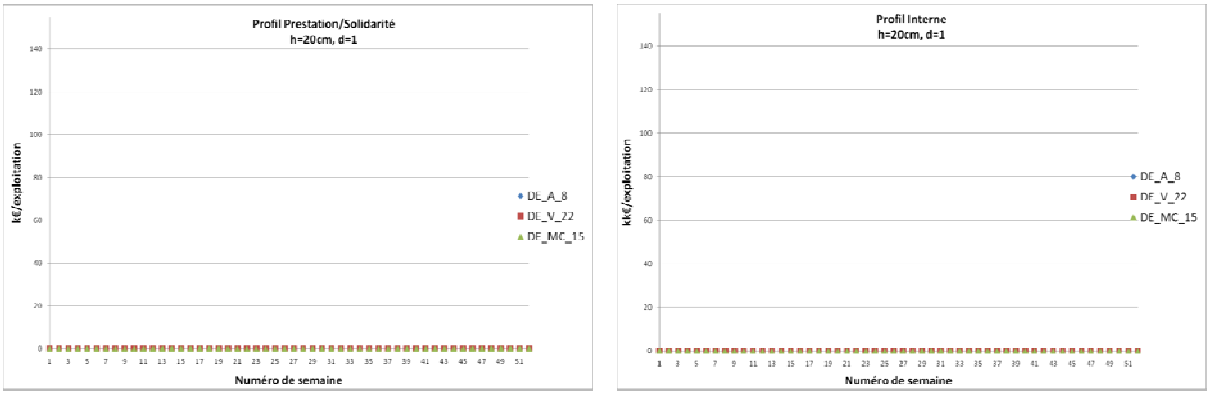
- *Présentation de la mesure et hypothèses*

Le modèle EVA prévoit de pouvoir modifier la localisation des matériels. Cette application peut être utilisée pour définir quelle est l'efficacité d'un plan d'évacuation par rapport à un autre. Il s'agit de définir le nombre de matériel pouvant être évacué sur une durée d'alerte.

Nous considérons dans l'application que la durée d'alerte permet d'évacuer deux éléments et sur la base des enquêtes menées, nous considérons qu'il s'agit des tracteurs.

- *Dommages évités : analyse de quelques scénarios*

Les dommages évités sont nuls pour l'ensemble des exploitations types quel que soit leur profil (figure 119) car les tracteurs ne sont pas endommagés par une hauteur d'eau de 20 cm.

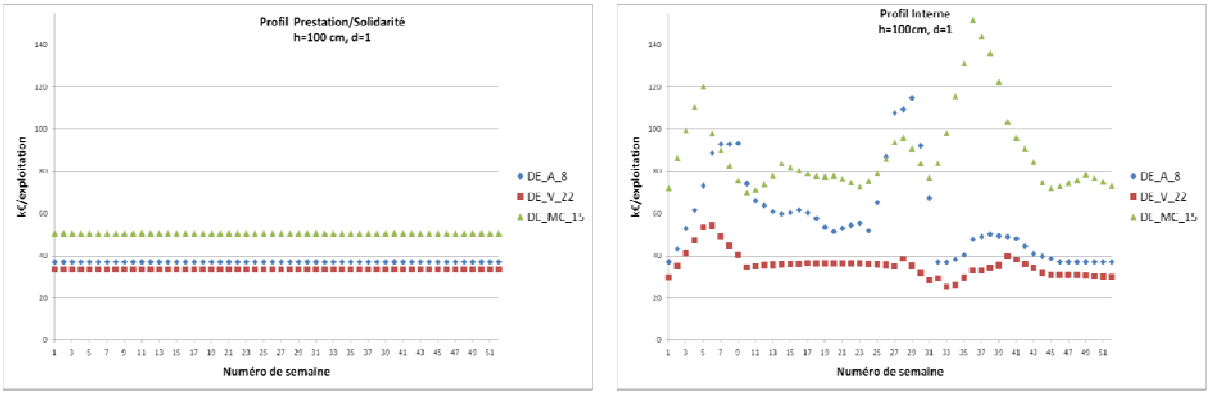


(a) (b)

Figure 119 : Dommages évités (k€/exploitation) par l'évacuation de matériels (tracteurs) pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20 cm et d'une durée d'une semaine

Pour une hauteur de 100 cm, les dommages évités pour les profils Prestation et Solidarité (figure 120, a) correspondent aux coûts de restauration (rachat) des tracteurs et varient de 33 à 51 k€/exploitation.

Pour le profil Interne (figure 120, b), la destruction des tracteurs provoque, en situation de référence, une indisponibilité de 3 semaines pour une inondation de 50 cm et 8 semaines pour 100 cm. Le dommage évité par l'évacuation est donc lié à l'ensemble des tâches pouvant être réalisées grâce à la mise en place de cette mesure. Pour une hauteur de 50 cm (annexe 14), les dommages évités sont très importants autour de la période de récolte. Pour une hauteur de 100 cm, les dommages évités sur cette période sont plus faibles car d'autres matériels nécessaires à la récolte (remorque arboricole) sont endommagés à partir d'une hauteur de 100 cm et la récolte a été détruite sur la parcelle inondée (50 %).



(a) (b)

Figure 120 : Dommages évités (k€/exploitation) par l'évacuation de matériels (tracteurs) pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 100 cm et d'une durée d'une semaine

- *DEMA et coût maximal*

Tableau 52 : Bilan des DEMA (k€/exploitation) et du coût maximal (k€/exploitation) pour l'évacuation des tracteurs

	Prestation / Solidarité					Interne				
	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût
A_8										
Fréquente	0,7	4,2	0,0	37,0	8,3	1,0	6,6	0,0	135,2	10,9
Rare	0,3	3,1	0,0	37,0	3,3	0,4	4,9	0,0	135,2	4,7
V_22										
Fréquente	0,7	3,9	0,0	33,5	7,9	0,8	4,3	0,0	54,3	8,6
Rare	0,3	2,8	0,0	33,5	3,0	0,3	3,1	0,0	54,3	3,3
MC_15										
Fréquente	1,0	5,7	0,0	50,7	11,3	1,4	8,0	0,0	133,9	15,1
Rare	0,4	4,2	0,0	50,7	4,5	0,5	5,7	0,0	133,9	5,9

Pour toutes les exploitations, le DEMA minimum est nul. Cela montre que l'évacuation n'est pas nécessaire pour toutes les hauteurs de submersion. Cependant, cette information est difficilement prévisible au moment de l'alerte.

Les DEMA moyens pour les exploitations fréquemment inondées sont toujours au moins deux fois plus importants que pour une exposition rare (tableau 52).

Pour une exposition fréquente, ils sont compris entre :

- 0,7 et 1 k€ /exploitation pour les profils Prestation/Solidarité ;
- 0,8 et 1,4 k€ /exploitation pour les profils Interne.

La faible différence entre les DEMA obtenus pour les Profils Prestation/Solidarité et Interne indique qu'une grande partie des dommages évités provient des coûts de restauration même si les effets induits existent. Cependant, cela peut permettre de conclure que l'évacuation des tracteurs uniquement ne permet pas d'éviter tous les effets induits. Il devrait donc être envisagé de :

- tester l'efficacité de la mesure en évacuant d'autres matériels agricoles importants pour la réalisation des tâches ;
- tester l'efficacité d'un couplage entre la mesure d'évacuation des matériels agricoles mobiles (tracteurs) et de surélévation du petit matériel (M2).

Le coût maximal acceptable pour les exploitations fréquemment inondées est compris entre :

- 7,8 et 11,3 k€ /exploitation pour les profils Prestation/Solidarité ;
- 8,6 et 15,1 k€ /exploitation pour les profils Interne.

Peu de données sur le coût d'évacuation des matériels existent. A minima, il doit être prévu la construction d'une plateforme de stockage de ce matériel. Selon les données recueillies (Blanc et al., 2010 ; Chambres d'Agriculture Rhône Méditerranée, 2008), la coût de construction d'une plateforme de stockage des matériels et intrants serait compris entre 38 et 100 k€ suivant la surface et la hauteur de surélévation. Nous pouvons dès lors conclure que la mesure ne serait pas efficiente à l'échelle individuelle. Par contre, la construction d'une plateforme collective pourrait être envisagée et permettrait de mutualiser les coûts.

8.4 Modification de la gestion des stocks (M7)

8.4.1. Principes Présentation de la mesure et hypothèses

Le modèle EVA prévoit de pouvoir modifier les périodes d'achat des différents intrants utilisés sur l'exploitation comme indiqué au tableau 53.

Tableau 53 : Exemple de table de données de la gestion des périodes d'achat des intrants sous EVA

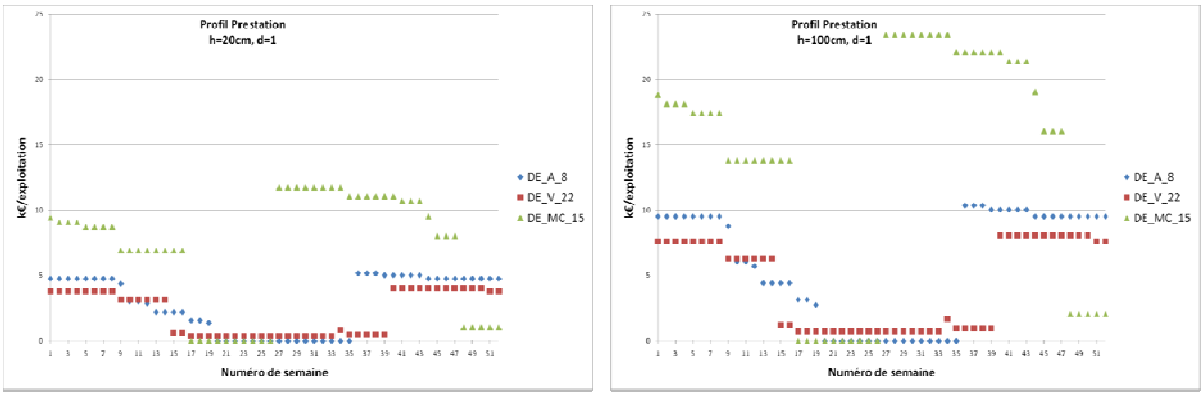
start	input	quantity	week
T	herbicide	516	13
F	herbicide	514	17
F	herbicide	514	44
T	fertiliser	768	9
F	fertiliser	768	17
T	pesticide	2748	10
F	pesticide	2748	20
T	thinning	784	13
F	thinning	392	19
T	raticide	308	12
T	raticide	308	39

Nous supposons dans cette application, qu'en situation de référence, c'est-à-dire sans la mise en place d'une mesure de gestion, le stock d'intrants est acheté en intégralité au début de l'itinéraire technique de chaque culture. La mesure de réduction de vulnérabilité ici analysée consiste à planifier les achats d'intrants en fonction de chaque passage afin d'assurer une gestion en flux tendu.

Étant donné qu'aucune contrainte sur la poursuite de l'activité liée aux intrants n'est, dans cette application, prise en compte, nous ne présentons que les résultats de simulation sur les exploitations types de profil Prestation / Solidarité qui sont équivalents à ceux du profil Interne.

8.4.2. Dommages évités : analyse de quelques scénarios

La figure 121 montre que les dommages évités par la mise en place d'une mesure de gestion des stocks d'intrants varie, en fonction de la période d'occurrence de l'inondation, entre 0 et 12 k€ /exploitation pour une hauteur d'inondation inférieure à 50 cm (a) puis entre 0 et 25 k€ /exploitation pour une hauteur supérieure (b). Cette mesure présente un intérêt pour les crues d'automne et d'hiver mais n'est pas efficace pour les crues de printemps, période à laquelle, quel que soit le mode de gestion, les stocks sont importants car la majorité des traitements y sont réalisés.



(a) (b)

Figure 121 : Dommages évités par la mise en place d'une mesure de gestion des stocks d'intrants sur les trois exploitations types pour un scénario d'inondation de 20 cm (a) et 100 cm (b) pendant une durée d'une semaine

8.4.3. DEMA et coût maximal

Les DEMA minimum sont nuls pour A_8 et MC_15. Cela signifie que la mesure n'est pas efficace pour certains scénarios (tableau 54).

Les DEMA moyens sont compris entre 0,7 et 1,4 k€ /exploitation pour une exposition fréquente et au moins quatre fois supérieurs à ceux obtenus pour une exposition rare.

Tableau 54 : Bilan des DEMA (k€/exploitation) et du coût maximal (k€/exploitation) pour l'évacuation des tracteurs

	Prestation / Solidarité					Interne				
	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût
A_8										
Fréquente	0,9	2,4	0,0	10,3	10,0	0,9	2,4	0,0	10,3	10,0
Rare	0,2	1,1	0,0	10,3	1,7	0,2	1,1	0,0	10,3	1,7
V_22										
Fréquente	0,7	1,9	0,4	8,1	7,9	0,7	1,9	0,4	8,1	7,9
Rare	0,1	0,9	0,4	8,1	1,3	0,1	0,9	0,4	8,1	1,3
MC_15										
Fréquente	1,4	4,2	0,0	23,5	15,9	1,4	4,2	0,0	23,5	15,9
Rare	0,2	1,9	0,0	23,5	2,7	0,2	1,9	0,0	23,5	2,7

Le coût maximal acceptable est compris entre :

- 7,9 et 15,9 k€ /exploitation pour une exposition fréquente ;
- 1,3 et 2,7 k€ /exploitation pour une exposition rare.

Aucune information sur les coûts de la gestion des intrants n'a pu être recueillie. Toutefois, nous proposons quelques pistes de réflexions à analyser pour envisager de les estimer :

- il est probable que le coût des intrants varie en fonction de la période de l'année en fonction de la demande.

- il peut y avoir un risque de rareté des intrants sur certaines périodes entraînant des délais et donc des retards pour la réalisation des tâches
- cette gestion peut entraîner des contraintes supplémentaires en termes de temps de travail et déplacements.

Par ailleurs, afin d'évaluer complètement l'efficacité de cette mesure, il faudrait être en mesure de déterminer l'exposition de la zone d'achat des intrants En effet, si la filière d'approvisionnement d'intrants est exposée aux inondations, la mesure de gestion des stocks ne constitue qu'un transfert de risque et il n'y a alors aucun dommage évité en termes économiques, seulement d'un point de vue financier pour l'exploitant.

8.5 Modification du profil (M8)

8.5.1. Présentation de la mesure et hypothèses

Le modèle EVA prévoit de pouvoir spécifier le profil de l'exploitant qui détermine les ressources mobilisables pour la remise en route. En termes concrets, la modification du profil consiste principalement à organiser la solidarité afin de permettre à l'exploitant de profils Interne de basculer vers un profil Solidarité.

8.5.2. Dommages évités : analyse de quelques scénarios

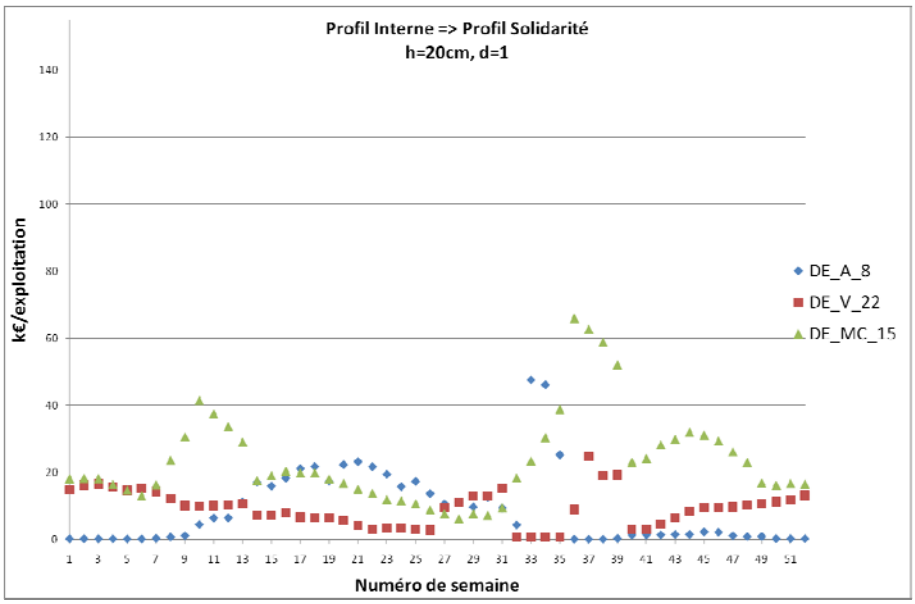


Figure 122 : Dommages évités (k€/exploitation) par la modification du profil des exploitants pour une inondation de 20 cm et d'une durée d'une semaine

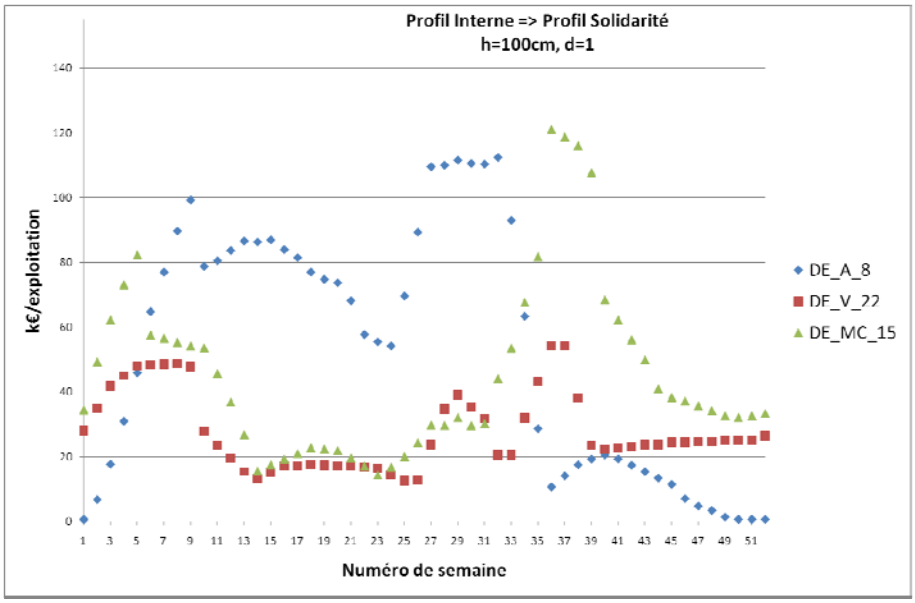


Figure 123 : Dommages évités (k€/exploitation) par la modification du profil des exploitants pour une inondation de 100 cm et d'une durée d'une semaine

Les dommages évités par le changement du profil de l'exploitation sont compris entre 0 et 70 k€ /exploitation (figure 122, a) pour une inondation de 20 cm. Pour V_22, cette mesure est particulièrement efficace sur la période de repos végétatif (crues d'hiver) car en dehors de cette période l'endommagement direct de la récolte est prépondérant. Pour A_8, cette mesure est efficace en dehors de la période de repos végétatif (crues de printemps et de fin d'été à automne). Pour MC_15, cette mesure est efficace quelle que soit la période de l'année, particulièrement pour les inondations de fin d'été à automne et les crues d'hiver.

Pour une inondation de 100 cm, les dommages évités sont compris entre 1 et 120 k€/exploitation. La mesure est particulièrement efficace pour A_8, avec notamment le pic de dommages évités autour des semaines 32 à 35 en raison de la récolte. Cependant, on peut noter que les dommages évités sont également importants au printemps.

8.5.3. DEMA et coût maximal

Les DEMA sont entre 4 et 6 fois plus élevés pour les exploitations fréquemment inondées et varient pour cette exposition entre 1,6 et 5 k€ /exploitation.

Les coûts maximaux, en k€ /exploitation, sont assez élevés :

- de 17,3 à 55,9 pour les exploitations fréquemment inondées ;
- de 4,4 à 9,2 pour les exploitations rarement inondées.

Les coûts de cette mesure sont très difficiles à évaluer et nous ne disposons d'aucune information technique les concernant.

Tableau 55 : Bilan des DEMA (k€/exploitation) et du coût maximal (k€/exploitation) pour l'évacuation des tracteurs

	Interne				
	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût
A_8					
Fréquente	1,6	8,5	0,0	131,9	17,3
Rare	0,4	4,9	0,0	131,9	4,4
V_22					
Fréquente	2,4	6,8	0,7	55,3	26,6
Rare	0,4	3,5	0,7	55,3	4,8
MC_15					
Fréquente	5,0	13,6	4,3	124,2	55,9
Rare	0,8	6,3	4,3	124,2	9,2

Cependant, pour analyser ces coûts, une réflexion sur les types de coûts suivants devrait être engagée :

- coûts de mise en place des structures physiques (bâtiments, matériel…) ;
- coûts de mise en œuvre et de fonctionnement des institutions ;
- coûts individuels pour les exploitants de participation à l'institution.

De plus, la typologie de ces coûts requiert une réflexion sur la répartition des coûts entre les acteurs du projet (exploitants agricoles et gestionnaires).

Il faut également envisager les bénéfices autres que ceux liés aux inondations :

- diminution des frais de structure et d'entretien ;
- diminution des risques d'indisponibilité de matériel et de main d'œuvre.

8.6 Synthèse de l'analyse des mesures[78]

8.6.1. Analyse en termes d'exposition

Les DEMA sont globalement toujours plus élevés pour les exploitations fréquemment inondées. Le cas des exploitations rarement inondées est toutefois intéressant dans le contexte du Rhône car un certain nombre d'exploitations sont protégées par des digues. Les hypothèses retenues pour pondérer les dommages en termes de période de retour sont faibles. Nous avons attribué à une exploitation rarement inondée une crue débordante d'une période de retour de quarante ans alors que la plupart des digues du Rhône sont dimensionnées pour une protection plus importante (crue

[78] L'ensemble des résultats des DEMA pour l'ensemble des mesures pour les trois exploitations est donné en annexe 15.

centennale). Dans ce cas, les DEMA seraient encore plus faibles. Le cas des ruptures de digues n'est pas ici considéré.

Avec les analyses actuelles, très peu de mesures pourraient être mises en œuvre sur les exploitations rarement inondées avec les données de coûts disponibles. Par ailleurs, dans ce cas, on peut se poser la question des mesures portant sur la modification de la gestion (surélévation, fractionnement de l'achat des stocks…) dont les coûts supplémentaires pour l'exploitation (augmentation du temps de travail) pourraient être un frein important. Par ailleurs, pour les mesures de type évacuation, la mise en place d'un plan d'urgence avec des exercices réguliers pour maintenir la culture du risque, devrait être envisagée. Ces coûts devraient être intégrés dans l'évaluation de la mesure de type évacuation.

Concernant l'exposition spatiale, rappelons que nous avons fait l'hypothèse d'une exposition de 50 % des parcelles et du bâtiment qui favorise les dommages évités par les mesures portant sur la mise en sécurité du matériel. Pour une réelle évaluation économique, la détermination de la localisation des parcelles et des bâtiments de l'exploitation et les scénarios d'inondation associés devraient être déterminés.

8.6.2. Analyse en termes de profils

Sans tenir compte des mesures portant sur les intrants pour lesquelles nous n'avons pas considéré dans l'application d'effets induits sur l'activité, les DEMA obtenus pour les profils Interne sont généralement 1,3 à 1,6 fois plus élevés que pour les profils Prestation/Solidarité.

En pratique, la caractérisation du profil de l'exploitant nécessiterait la réalisation d'enquêtes. D'un point de vue de la gestion collective, il apparait plus pertinent de cibler les exploitations de type profil Interne pour la réduction de la vulnérabilité pour deux raisons :

- ce sont celles qui auront le moins de capacité à mettre en œuvre de manière autonome ces mesures ;
- la mise en place de la même mesure sur ces exploitations permet d'obtenir des DEMA plus élevés.

8.6.3. Classement des mesures par exploitations types

Nous réalisons ce classement uniquement pour les exploitations de profil Interne fréquemment inondées qui génèrent le plus de DEMA :

- tableau 56 pour A_8 ;
- tableau 57 pour V_22 ;
- tableau 58 pour MC_15.

- *Pour l'exploitation type A_8 (arboriculture, 8 ha)*

Tableau 56 : Classement des mesures en fonction des DEMA pour A_8

Classement	Mesure	Intitulé	DEMA (k€)	Coût maximal (k€)	Informations sur les coûts (k€)
1	M5	relocalisation définitive d'un bâtiment	4,4	48,7	< 100
2	M1	surélévation d'un bâtiment d'une hauteur de 40 cm	3,1	34,3	30
3	M8	rechercher une association avec des exploitants situés en dehors de la zone inondable	1,6	17,3	?
4	M6	évacuation des deux tracteurs de l'exploitation	1,0	10,9	?
5	M7	gestion des stocks en flux tendu	0,9	10,0	?
6	M3	surélévation d'une liste d'intrants d'une hauteur de 50 cm	0,8	9,4	0,5 à 3,6
7	M2	surélévation du petit matériel mobile d'une hauteur de 2m	0,2	2,4	0,5
8	M4	surélévation des plantations d'une hauteur de 50 cm	0,1	1,4	4

- *Pour l'exploitation type V_22 (viticulture, 22 ha)*

Tableau 57 : Classement des mesures en fonction des DEMA pour V_22

Classement	Mesure	Intitulé	DEMA (k€)	Coût maximal (k€)	Informations sur les coûts (k€)
1	M5	relocalisation définitive d'un bâtiment	4,4	48,5	< 100
2	M1	surélévation d'un bâtiment d'une hauteur de 40 cm	3,1	34,1	30
3	M8	rechercher une association avec des exploitants situés en dehors de la zone inondable	2,4	26,6	?
4	M6	évacuation des deux tracteurs de l'exploitation	0,8	8,6	?
5	M3	surélévation d'une liste d'intrants d'une hauteur de 50 cm	0,7	8,1	0,5 à 3,6
6	M7	gestion des stocks en flux tendu	0,7	7,9	?
7	M2	surélévation du petit matériel mobile d'une hauteur de 2m	0,1	0,8	0,5

- *Pour l'exploitation type MC_15 (Maraîchage/Céréales, 15 ha)*

Tableau 58 : Classement des mesures en fonction des DEMA pour MC_15

Classement	Mesure	Intitulé	DEMA (k€)	Coût maximal (k€)	Informations sur les coûts (k€)
1	M5	relocalisation définitive d'un bâtiment	9,7	108,0	< 100
2	M1	surélévation d'un bâtiment d'une hauteur de 40 cm	5,9	66,1	?
3	M8	rechercher une association avec des exploitants situés en dehors de la zone inondable	5,0	55,9	?
4	M3	surélévation d'une liste d'intrants d'une hauteur de 50 cm	1,8	19,8	0,5 à 3,6
5	M7	gestion des stocks en flux tendu	1,4	15,9	?
6	M6	évacuation des deux tracteurs de l'exploitation	1,4	15,1	?
7	M2	surélévation du petit matériel mobile d'une hauteur de 2m	0,7	7,8	0,5

- *Synthèse*

Pour les trois exploitations types, les trois mesures qui permettent d'obtenir le plus de DEMA sont :

- la relocalisation définitive du bâtiment ;
- la surélévation du bâtiment ;
- la mise en place d'un réseau de solidarité.

Ensuite, les mesures permettant d'obtenir le plus de DEMA sont :

- l'évacuation du matériel roulant et ensuite les mesures de gestion des stocks pour A_8 et V_22 ;
- inversement pour MC_15, les mesures de gestion des stocks puis l'évacuation du matériel roulant.

La mesure de surélévation du matériel mobile permet d'obtenir le moins de DEMA. Cependant, ce classement doit être également analysé au vu du coût maximal acceptable de ces mesures. En particulier, la mesure de relocalisation même si elle génère le plus de DEMA semble difficile à mettre en œuvre en conservant une VAN positive.

La mesure de surélévation du bâtiment apparaît possible à mettre en œuvre car les éléments de coûts dont nous disposons sont inférieurs au coût maximal acceptable. Au cours des enquêtes réalisées, certaines exploitations avaient déjà mis en place, par elles-mêmes, cette mesure. Il faudrait analyser pourquoi certaines exploitations ne mettent pas en œuvre cette mesure : manque de

trésorerie, attribution au risque d'inondation de probabilités subjectives divergentes par rapport aux données d'expert, exposition réelle des bâtiments inférieure aux scénarios simulés…

Par ailleurs, pour les territoires localisés en zone inondable, la mise en place d'un Plan de Prévention du Risque Inondation (PPRI) est obligatoire. Une des préconisations des PPRI peut porter sur la construction d'un vide sanitaire, en particulier pour les constructions nouvelles. Dans ce cas, on peut s'interroger sur la cohérence entre la politique de réglementation et d'incitation à limiter les dommages.

La troisième mesure porte sur la mise en place de la solidarité. On ne dispose pas d'élément de coût sur cette mesure. Si la mise en œuvre d'une solidarité requiert l'implication individuelle, elle repose également sur la mise en place d'une structure de gouvernance et d'infrastructure. Ici, le rôle du gestionnaire public apparaît pertinent pour permettre cette structuration.

Ensuite, nous constatons que les mesures d'évacuation du matériel roulant apparaissent pertinentes. Cependant, leur mise en œuvre ne seraient envisageable qu'en créant des zones collectives de mise en sécurité des matériels permettant de mutualiser les coûts, trop élevé à l'échelle individuelle. Par ailleurs, le couplage de cette mesure avec une surélévation des autres matériels semble pertinent.

Enfin, les mesures portant sur les stocks d'intrants permettent également de générer des DEMA importants. La surélévation des intrants pourrait être intégrée dans la mise aux normes des locaux phytosanitaires permettant la mutualisation des coûts entre les politiques de gestion des risques de pollution et d'inondation. Du point de vue du gestionnaire public, la mise en œuvre d'une gestion en flux tendu des stocks semble difficile à mettre en œuvre et à contrôler.

8.7 Conclusions

8.7.1. Résultats principaux

Nous montrons, dans ce chapitre, que le modèle EVA permet d'évaluer les mesures de réduction de la vulnérabilité en intégrant la possibilité de modifier les caractéristiques des exploitations types.

Nous avons réalisé une analyse exploratoire visant d'une part à déterminer et classer les mesures de réduction de la vulnérabilité en fonction de leur efficacité pour les exploitations types et analyser la possibilité de leur mise en œuvre en respectant le critère économique de la VAN. Cette analyse rejoint les besoins opérationnels du Plan Rhône qui avait besoin dans un premier temps d'éléments sur l'efficacité des mesures.

Les résultats montrent que les mesures de réduction de la vulnérabilité génèrent davantage de DEMA pour les exploitations fréquemment exposées aux inondations et avec un profil Interne.

8.7.2. Apport du modèle EVA pour l'aide à la décision

Certaines mesures se dégagent comme plus efficaces pour l'ensemble des exploitations types :

- la délocalisation des bâtiments ;
- la surélévation des bâtiments ;
- la mise en place d'une solidarité.

Cependant, l'analyse doit également tenir compte du coût de ces mesures. La confrontation du coût maximal acceptable avec les éléments de coût dont nous disposons permet d'éliminer certaines mesures selon le critère purement économique. Ainsi la délocalisation des bâtiments individuels ne semble pas pouvoir remplir le critère de la VAN si elle est appliquée de façon individuelle aux exploitants.

L'organisation de la solidarité est une mesure qui se classe en troisième position pour l'ensemble des exploitations types. Par contre, nous ne disposons d'aucun élément de coût sur celle-ci. Une des façons d'envisager l'organisation de la solidarité peut passer par une délocalisation collective des bâtiments qui permet de mutualiser les coûts par rapport à la délocalisation individuelle. Dans ce cas, la constitution de Coopératives d'Utilisation du Matériel Agricole (CUMA) peut être envisagée. Concernant la disponibilité de main d'œuvre, au Québec, l'incitation à la création de Coopérative d'Utilisation de la Main d'Œuvre (CUMO) est une solution promue par le gouvernement pour pallier au problème de disponibilité permettant de mutualiser les frais de salaires et de disposer de façon fiable de main d'œuvre qualifiée. La CUMO est définie comme « une coopérative dont la mission consiste exclusivement à rendre disponibles un ou plusieurs employés auprès des entreprises membres » (Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2010). Cette solution pourrait également être envisagée de façon complémentaire.

La mise en œuvre de CUMA et CUMO a des coûts et bénéfices plus étendus que les seuls effets liés aux inondations qu'il s'agirait de prendre en compte dans une évaluation.

8.7.3. Perspectives de recherche et d'utilisation du modèle EVA

- *Application du modèle EVA à une situation réelle*

L'application du modèle n'a pas été réalisée dans le chapitre 8 sur des cas réels. Cette application est envisageable et nécessiterait :

- la connaissance précise de la localisation et de l'exposition des parcelles et bâtiment de chaque exploitation ;
- la connaissance précise des données de l'exploitation présentée au chapitre 6 ;
- la connaissance des mesures ou combinaisons de mesures à appliquer aux exploitations.

- *Évaluation financière et conséquences sur le risque de faillite*

Comme nous l'avons montré au chapitre 7, le modèle EVA permet une valorisation économique ou financière des dommages. Le modèle EVA pourrait être utilisé pour une évaluation financière des dommages réalisée au cours de diagnostics individuels permettant d'adapter finement :

- les données de caractérisation de l'exploitation ;
- les scénarios d'inondation probables.

D'un point de vue opérationnel, ce diagnostic apparait nécessaire avant la mise en œuvre du programme sur les exploitations et le modèle EVA permet la prise en compte des effets induits.

Cette évaluation financière couplée à un modèle de trésorerie de l'exploitation permettrait également d'analyser l'impact de la mise en place des mesures de réduction de la vulnérabilité sur le risque de faillite.

La principale difficulté réside dans l'attribution d'un profil à chaque exploitant. Dans ce cas, l'approche par les diagnostics individuels permettrait soit par retour d'expérience sur des inondations passées ou d'autres types d'aléa de réfléchir à la définition d'indicateurs pour déterminer les profils.

Par ailleurs la réalisation de ces diagnostics individuels permettrait l'élaboration en collaboration avec les exploitants, de plan d'évacuation. En effet, nous n'avons testé ici qu'un type d'évacuation (deux tracteurs / par exploitation). Mais le modèle offre la possibilité de tester quels seraient les éléments de matériels les plus pertinents à évacuer pour chaque exploitation.

- *Évaluation de l'efficacité du couplage des mesures*

L'intégralité des mesures de réduction de la vulnérabilité ne pourra pas être mise en œuvre sur toutes les exploitations. De plus, il est probable que les bénéfices des différentes mesures ne soient pas additifs. Il s'agit donc de déterminer pour les différentes exploitations les combinaisons de mesures permettant d'obtenir les plus forts DEMA et d'analyser les coûts associés.

Cette complémentarité peut être analysée par rapport à la période générant le plus de dommages évités. Par exemple, la surélévation des plantations permet de limiter le dommage direct sur les récoltes alors que les autres mesures sont plus axées sur le matériel. Il peut également exister une complémentarité entre les mesures portant sur le matériel : le matériel roulant pouvant être évacué et le petit matériel pouvant être surélevé.

- *Utilisation du modèle EVA pour l'adaptation au changement climatique*

Le principal intérêt du modèle EVA est de permettre l'évaluation d'une modification des caractéristiques physiques ou organisationnelles des exploitations agricoles. En ce sens, il permet, au contraire des autres modèles d'évaluation des dommages agricoles, d'envisager une réelle prise en compte des adaptations des enjeux.

En l'état actuel, le modèle EVA peut être utilisé pour répondre à certaines questions liées au changement climatique.

Si des scénarios d'inondation futurs existent, l'ensemble des mesures qui ont été présentées dans le chapitre 8 peuvent être évaluées. La principale contrainte est de déterminer l'horizon temporel à considérer. Sous les hypothèses faites au chapitre 8, nous considérerions que l'exploitation mettrait en place les mesures de réduction de la vulnérabilité lorsque le changement climatique est avéré et l'évaluation porterait sur un horizon temporel de 15 ans.

Il est également envisageable d'utiliser le modèle EVA pour déterminer l'effet d'une modification des cycles végétatifs des cultures liée au changement climatique sur la vulnérabilité des exploitations. En effet, il est attendu que le changement climatique perturbe les cycles végétatifs de certaines cultures entraînant une modification de la sensibilité des cultures et de l'organisation du travail attenante. Le modèle EVA permettrait d'évaluer ces effets pour des scénarios hydrologiques déterminés. Une mesure d'adaptation qui peut être envisagée est la modification du type de culture. En particulier, cette mesure est envisageable pour une adaptation au risque de sécheresse. Le modèle EVA permettrait de déterminer l'effet d'une telle mesure sur la vulnérabilité face aux inondations.

- *Intérêt d'une évaluation ex-post des programmes*

Bien qu'elle soit de plus en plus souhaitée par les décideurs et financeurs, la temporalité laissée à la réalisation de l'évaluation économique des projets de gestion des inondations est réduite. Il s'agit de faire l'évaluation économique, une fois que les analyses techniques ont déjà été réalisées et qu'une seule option a déjà, bien souvent été retenue. Le suivi de l'évaluation sur la globalité des projets et en particulier, ex post, serait enrichissant tant d'un point de vue opérationnel que méthodologique. Concernant le modèle EVA, la mise en place d'un protocole de suivi ex post du programme de réduction de la vulnérabilité pourrait être envisagée en constituant deux groupes d'exploitation en situation d'exposition équivalente : l'un ayant mis en place des mesures de réduction de la vulnérabilité, l'autre non.

Les résultats des simulations du modèle EVA pourrait ainsi être confrontés à des données réelles. Étant attendu que les mesures soient mises en place sur des exploitations fréquemment inondées, ce retour d'expérience est envisageable à court terme.

Par ailleurs, la mise en place d'un suivi permettrait de valider et affiner certaines hypothèses de modélisation. En particulier, il serait intéressant de confronter les données expertes sur l'endommagement et les coûts de restauration à des données de retour d'expérience.

CONCLUSIONS DE LA PARTIE III

La partie 3 visait à mettre en application sur un bassin versant mettant en place des politiques de gestion innovantes, le modèle conceptuel décrit dans la partie 2. Les objectifs étaient d'illustrer son intérêt d'une part, pour caractériser et évaluer la vulnérabilité des exploitations aux inondations et d'autre part, pour évaluer des projets de gestion des inondations dans une optique d'aide à la décision.

Nous avons montré, au chapitre 6, le lien entre la problématique opérationnelle des décideurs du Plan Rhône et notre problématique de recherche qui trouve son application sur le Rhône aval. Après la description des exploitations types retenues, nous montrons la méthodologie mise en œuvre pour la collecte des données. Le temps nécessaire pour la collecte de données est important mais le modèle de données utilisé permet une collecte plus efficace et pourrait être complété par de futures enquêtes.

La caractérisation et l'évaluation de la vulnérabilité de trois exploitations types sont réalisées au chapitre 7. Nous montrons que la vulnérabilité peut être analysée sous différentes perspectives. Le dommage économique total est l'indicateur le plus synthétique mais nous le décomposons en dommage économique direct et induit. Un des résultats importants qui justifiait cette démarche de thèse est de montrer que la prise en compte des seuls dommages directs aux cultures n'est pas représentative de l'ensemble des dommages économiques sur les exploitations. À un premier niveau, les autres dommages directs peuvent avoir un poids important dans le montant de dommages directs pour les évènements de faible intensité. À un second niveau, nous montrons en comparant les profils d'exploitants que les effets induits peuvent représenter pour certains scénarios des montants importants.

Nous proposons donc de distinguer deux catégories de vulnérabilité :

- la vulnérabilité aux évènements extrêmes touchant l'intégralité d'une exploitation où les coûts de restauration et la perte directe de récolte dominent le montant total de dommage ;
- la vulnérabilité aux évènements faibles à moyens touchant l'intégralité de l'exploitation ou fort mais ne touchant qu'une partie de l'exploitation pour lesquels tant les coûts de restauration que les pertes directes de récolte peuvent être faibles.

Pour le premier type de vulnérabilité, un modèle d'évaluation reposant uniquement sur l'évaluation des dommages directs semble suffisant. Nous avons proposé, à cet effet, une méthode d'évaluation distinguant les différentes composantes de l'exploitation.

Par contre, pour le deuxième type de vulnérabilité, le modèle développé à l'échelle de l'exploitation agricole et prenant en compte son organisation apparaît justifié et permet de prendre en compte des effets jusqu'à présent négligés mais pouvant pourtant représenter des montants beaucoup plus importants que les seuls dommages directs.

En plus de l'évaluation économique, il nous est apparu important de proposer une évaluation financière (avec et sans prise en compte de l'assurance) qui permet d'engager une réflexion sur la question de la résilience des exploitations et pour laquelle il faudrait associer un modèle de trésorerie à notre modèle de vulnérabilité.

Dans le chapitre 8, nous montrons les types de mesures de réduction de la vulnérabilité pouvant être évaluées économiquement en utilisant le modèle EVA.

Nous proposons une évaluation des dommages évités moyens annuels dans le contexte de la zone aval du Rhône pour trois exploitations types. Nous ne réalisons pas une ACB complète des mesures.

Nous proposons un classement des mesures en termes d'efficacité pour les différentes exploitations types révélant que certaines mesures se classent en première position pour l'ensemble des exploitations types. Enfin, nous proposons une réflexion sur les perspectives et limites d'utilisation du modèle EVA qui sont les suivantes :

- utilisation pour l'évaluation financière des mesures de réduction de la vulnérabilité à l'échelle de l'exploitation et influence sur les risques de faillite ;
- évaluation de l'efficacité du couplage des mesures ;
- utilisation pour l'adaptation au changement climatique ;
- utilisation pour une évaluation ex-post.

Les chiffres proposés dans ces deux derniers chapitres n'ont pas vocation à être réutilisés tels quels. Une réflexion devrait être au préalable engagée sur la sensibilité du modèle aux nombreux paramètres.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

La thèse soutenue dans ce travail est que la modélisation de la vulnérabilité considérant le fonctionnement de l'exploitation agricole permet d'intégrer des effets jusqu'à présent non pris en compte dans l'évaluation des projets de gestion des inondations.

Nous avons donc défini un cadre théorique en mobilisant la littérature sur la vulnérabilité, la modélisation des exploitations agricoles et l'évaluation économique pour construire le modèle EVA.

Ce modèle présenté d'abord de façon conceptuelle dans la partie II, puis appliqué dans la partie III, sur des exploitations types de la basse vallée du Rhône répond aux objectifs que nous nous étions fixés, à savoir :

- permettre l'évaluation des dommages à l'échelle de l'exploitation et amener une réflexion sur la vulnérabilité ;
- contribuer à l'amélioration l'évaluation économique des projets de gestion des inondations permettant d'évaluer la réduction de la vulnérabilité.

- **Synthèse des principaux apports du modèle**

  - *Importance des profils d'exploitants pour l'évaluation des dommages*

Dans le chapitre 7, nous montrons que la prise en compte des profils d'exploitant permet d'évaluer les effets induits liés à l'organisation de l'exploitation agricole et sa capacité de remise en route. La répartition entre les dommages directs et induits dépend principalement de l'intensité de l'aléa subi. Nous avons donc distingué :

- la vulnérabilité aux évènements extrêmes dont les effets sont principalement les effets directs ;
- la vulnérabilité aux évènements de plus faible intensité pour lesquels les effets induits peuvent représenter des montants importants.

Dans une perspective d'évaluation, ces deux types d'évènements peuvent se produire et les probabilités associés aux évènements extrêmes sont les plus faibles. Notre modèle contribue donc à améliorer l'évaluation des dommages des scénarios les plus fréquents.

  - *valorisation financière et économique*

Bien que le modèle EVA ait été développé pour une utilisation dans le cadre de l'évaluation économique, nous avons conservé la possibilité d'une valorisation financière. Cela rend envisageable une analyse future du risque de faillite permettant d'apporter un éclairage sur l'hypothèse de

stabilité (résilience au sens du retour à l'état initial) sous-jacente à la pratique de l'ACB avec la méthode des dommages évités. De plus, la mobilisation de la théorie des capitaux multiples nous engage à entamer une réflexion sur les transferts de capitaux (physique, humain, social et financier) et leur régénération suite à la remise en route.

- *Classement des mesures de réduction selon un critère d'efficacité*

Dans le cadre du Plan Rhône, il était difficilement envisageable, à ce stade de la réflexion sur la réduction de la vulnérabilité, de réaliser une véritable ACB du programme. Elle aurait nécessité de connaitre :

- le nombre et le type d'exploitations concernées par le programme ;
- les mesures ou combinaisons de mesures à mettre en œuvre ;
- la localisation précise des parcelles et bâtiments de chaque exploitation concernée.

Nous fournissons un premier éclairage sur l'efficacité des mesures de réduction de la vulnérabilité sur trois exploitations types en hiérarchisant les mesures produisant les DEMA les plus élevés. L'évaluation réalisée permet de classer les mesures de réduction de la vulnérabilité pour les trois exploitations types mettant en évidence, notamment, l'importance de l'organisation de la solidarité.

- **Implications en termes de politiques de gestion des inondations**

  - *Conditions de la mise en œuvre de la réduction de la vulnérabilité*

  La réduction de la vulnérabilité vise à réduire les dommages totaux subis par les exploitations agricoles. On peut donc légitimement se poser la question de savoir pourquoi elle n'est pas mise en œuvre directement par les exploitants. Analysons les différentes explications.

  1. Sous l'hypothèse de rationalité parfaite, le coût de la mesure est plus élevé que les bénéfices générés.
  2. L'exploitant associe aux scénarios d'inondation des probabilités subjectives minorant les DEMA mais dans un contexte d'information complète, le coût de mise en œuvre est inférieur aux bénéfices.
  3. L'exploitant identifie les bénéfices de la mise en œuvre mais n'est pas en situation financière lui permettant d'engager, seul, les coûts de mise en œuvre de la mesure.
  4. L'exploitant n'est pas incité à mettre en œuvre des mesures de protection car ses biens sont assurés quelle que soit son exposition.

Dans le cas 1, la mesure n'est pas efficiente et ne présente pas d'intérêt à être mise en œuvre ni par l'exploitant ni par le décideur public.

Dans le cas 2, la question porte principalement sur l'information et la perception du risque. Dans ce cas, le rôle du décideur public est important d'une part, pour sensibiliser les exploitants et d'autre part, pour les accompagner dans le choix de la mise en œuvre de mesures de prévention.

Ce point a été intégré dans la démarche du Plan Rhône à travers la réalisation de diagnostics de vulnérabilité permettant à l'exploitant d'envisager les conséquences des évènements qui se sont déjà produits. Les diagnostics sont intéressants du point de vue de la prise de conscience mais ne permettent pas d'améliorer complètement la perception du risque d'inondation. En effet, ils sont centrés sur les évènements exceptionnels. Or, la mobilisation en termes de solidarité et d'indemnisation des dommages pour ces évènements est considérable permettant d'envisager qu'une grande partie des exploitants bénéficient de ressources externes (financières ou solidaires) pour se remettre en route. Dans ce cas, il serait pertinent de pouvoir réaliser, comme le permet le modèle EVA, une évaluation des DEMA avec l'exploitant reposant sur une pondération des dommages associés à différents scénarios d'aléa.

Dans le cas 3, la mesure est efficiente mais l'exploitant n'est pas en mesure, seul, de la financer. Dans ce cas, il y a un réel intérêt du point de vue du décideur public à contribuer à la mise en œuvre de cette mesure et à organiser une mutualisation des coûts entre plusieurs agriculteurs dans la même situation.

Le cas 4 correspond au dilemme mis en évidence par Latruffe et Picard (Latruffe et al., 2005 ; Picard, 2005) entre prévention et solidarité et reposant sur l'hypothèse qu'étant donné que les usagers paient une prime dont le montant ne dépend pas des risques d'inondation encourus, ils ne sont pas incités à mettre en œuvre de mesure de prévention.

Le modèle EVA peut apporter un éclairage sur ce dilemme car malgré l'indemnisation des biens matériels, la prise en compte des effets induits peut peser dans le sens d'une incitation à la mise en sécurité du matériel. Pour cela, il serait intéressant d'évaluer, avec une perspective financière prenant en compte l'assurance, la mise en place de mesures de réduction de la vulnérabilité.

- *Marges de manœuvre du décideur public*

Dans le cas d'une efficacité des mesures, une des problématiques majeures pour le décideur est de mettre en œuvre les mesures permettant, avec un certain budget, de générer le plus de DEMA. Dans cette perspective, les mesures collectives semblent être prioritaires puisqu'elles permettent une mutualisation des coûts. Le classement des mesures met clairement en évidence l'intérêt de la délocalisation ou de la surélévation des bâtiments. Par ailleurs, l'importance de la possibilité de bénéficier de ressources externes au moment de la remise en route ressort comme efficace pour toutes les exploitations (mesure portant sur le changement de profil).

Il semble donc que le décideur public puisse jouer un rôle important dans la création de ces structures collectives (CUMA, CUMO, plateforme collectives de mise en sécurité des matériels…).

- **Perspectives d'utilisation et de développement du modèle EVA**

  - *Évaluation de politiques de gestion des inondations sur un territoire*

Une politique de gestion des inondations sur un territoire envisage généralement une combinaison de différents projets de gestion des inondations. À l'échelle des bassins versants, les politiques de restauration ou de création de ZEC peuvent être associées à des mesures de protection de certains enjeux urbains et à la réduction de la vulnérabilité sur les enjeux surexposés. Le modèle EVA permet, contrairement aux autres méthodes d'évaluation des dommages agricoles, d'évaluer les dommages évités[79] par la mise en place de mesures portant sur l'aléa et sur la réduction de vulnérabilité des enjeux agricoles. L'utilisation du modèle EVA devrait, dans ce cas, être couplé à des modèles d'évaluation des dommages sur les autres types d'enjeu.

Les projets de restauration de ZEC qui créent clairement un transfert d'exposition et entraînent des dommages supplémentaires sur une zone (souvent agricole) pour en protéger une autre (souvent urbaine). Les travaux de Kahneman et Tversky (1979) montrent que l'utilité associée aux gains de la mise en la place d'un projet serait moins important que la perte d'utilité associé au même montant de perte. Pour tenir compte de ces travaux, un poids plus important pourrait être accordé aux dommages générés par le projet dans la réalisation d'une ACB. Dans tous les cas, il est nécessaire de connaître finement d'une part, les dommages générés par la mise en place de ces projets sur les zones agricoles, et d'autre part, le rôle compensateur que peuvent jouer les mesures de réduction de vulnérabilité sur les activités agricoles qui vont a priori être plus exposées.

  - *Utilisation pour l'évaluation de l'adaptation dans le contexte du changement climatique*

Dans le contexte actuel, la problématique du changement climatique et les perspectives en termes d'adaptation sont de plus en plus importantes.

Le modèle EVA peut contribuer à appréhender certaines questions. Avec le modèle actuel, il est possible d'analyser l'effet d'une modification des cycles culturaux des cultures (modification des périodes de récolte en fonction de l'évolution de la température par exemple) ou encore l'effet croisé d'une adaptation à un autre type de risque comme la sécheresse.

[79] Le terme « dommage évité »inclut les dommages réellement évités mais aussi les dommages supplémentaires liés à la mise en œuvre du projet.

De manière générale, deux difficultés principales sont à considérer pour l'évaluation économique de l'adaptation au changement climatique :

- une connaissance hydrologique fine de l'évolution des scénarios d'inondation est requise ;
- la temporalité de l'évaluation ne permet pas de raisonner sur des systèmes statiques (nécessité de définir des scénarios d'évolution prospectifs).

- *Approfondissement de la caractérisation des profils d'exploitants*

Les profils (Interne, Prestation, Solidarité) sont utilisés pour mettre en évidence l'importance des ressources externes dans la remise en route des exploitations et les effets induits en termes de dommages. Cependant, la réalité des stratégies est beaucoup plus complexe. En particulier dans les entretiens réalisés, peu d'exploitations enquêtées pouvaient réellement être associées au profil Prestation. L'intérêt des profils ne réside pas tant dans la stratégie mise en œuvre que dans l'analyse des conditions de sa mise en œuvre.

Pour le profil Prestation, on suppose que les prestataires, matériels à louer sont disponibles et que ces services préexistent à l'inondation. De même, pour le profil Solidarité, on suppose que les exploitants prêtent leur matériel et que la main d'œuvre solidaire est effectivement disponible.

Une analyse plus approfondie de ces conditions permettrait d'affiner les coûts d'opportunité associés aux différents services.

- *Prise en compte des interactions avec les autres systèmes du territoire*

Nous avons centré notre travail sur les exploitations agricoles. Cependant, dans le chapitre 4, nous avons décrit l'exploitation comme faisant partie d'un environnement plus large. Différents types d'interactions doivent faire l'objet d'une analyse afin de passer de l'échelle de l'exploitation à celle du territoire. Il est d'abord nécessaire d'envisager les différents systèmes et leurs interactions comme le proposent Benoît et al (1997) dans l'analyse de la pollution en nitrates d'un bassin d'alimentation en eau.

- le système hydrique ;
- les systèmes exploitations agricoles ;
- les filières amont et aval ;
- les autres enjeux du territoire.

Par exemple, les quelques interactions suivantes pourraient être analysées :

- relations (solidarité, prestation) entre les exploitants afin d'affiner les profils ;
- relations entre les exploitants et les filières amont et aval pour la caractérisation d'effets indirects de l'inondation ;
- relations entre exploitants et autres enjeux du territoire.

- *Transférabilité du modèle EVA à d'autres contextes*

Nous avons insisté sur la définition d'un modèle conceptuel explicite dans l'objectif de permettre une implémentation sur des zones d'application différentes. L'enjeu d'avoir explicité finement les processus et d'utiliser une formalisation explicite est de pouvoir remettre en discussion les différentes hypothèses retenues pour l'implémentation.

Pour l'utilisation du modèle EVA sur une autre zone d'étude, nous envisageons la méthodologie suivante :

- mise en discussion du modèle conceptuel avec les experts et exploitants locaux ;
- adaptation de l'implémentation ;
- collecte des données à partir du modèle de données retenu.

Dans le modèle EVA, nous avons centré notre analyse sur la vulnérabilité aux inondations. Cependant, d'autres types de risque s'appliquent aux exploitations agricoles. Sans modification du modèle, l'influence d'autres types de risques sur la vulnérabilité aux inondations peut déjà être analysée :

- il est possible d'étudier l'effet de la volatilité des prix de vente et des intrants ;
- il est également envisageable d'analyser l'effet des adaptations à la pénurie d'eau par un changement des cultures associé à une adaptation des pratiques et du matériel.

L'intégration du risque de pollution des sols (métaux, polychlorobiphényles…) à l'évaluation de la vulnérabilité aux inondations apparait également intéressante à considérer. Cependant, peu de modèles physiques sur ce type de risque existent.

ANNEXES

ANNEXE 1 : SYSTÈMES D'ASSURANCE ET D'INDEMNISATION DES DOMMAGES AGRICOLES («CATNAT» ET « CALAMITÉ AGRICOLE ») 281

ANNEXE 2 : GLOSSAIRE 293

ANNEXE 3 : GÉNÉRALITÉS SUR LES MÉTHODES D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE 297

ANNEXE 4 : LISTE DES OBJETS DU MODÈLE DE VULNÉRABILITÉ (EVA) 299

ANNEXE 5 : MISE EN ÉQUATIONS DU CALCUL DES DOMMAGES 301

ANNEXE 6 : MESURES DE RÉDUCTION DE LA VULNÉRABILITÉ ANALYSÉES DANS LE CADRE DU PROJET « ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ AGRICOLE » 309

ANNEXE 7 : LISTE DES ENTRETIENS RÉALISÉS AUPRÈS D'EXPERTS 313

ANNEXE 8 : DESCRIPTION DES EXPLOITATIONS ENQUÊTÉES 315

ANNEXE 9 : DÉTAILS DES CHOIX ET HYPOTHÈSES SUR LA CONSTRUCTION DES EXPLOITATIONS TYPES 317

ANNEXE 10 : ITINÉRAIRES TECHNIQUES DE QUELQUES PRODUCTIONS DE LA ZONE RHÔNE AVAL 327

ANNEXE 11 : TEMPS DE RÉALISATION DES TÂCHES POUR LES CULTURES DES EXPLOITATIONS TYPES 339

ANNEXE 12 : DONNÉES TECHNIQUES SUR LE MATÉRIEL NÉCESSAIRE À LA RÉALISATION DES TÂCHES 343

ANNEXE 13 : ÉVALUATION DES DOMMAGES DIRECTS 345

ANNEXE 14 : DOMMAGES ÉVITÉS PAR LES MESURES DE RÉDUCTION DE LA VULNÉRABILITÉ SUR LES TROIS EXPLOITATIONS TYPES 361

ANNEXE 15 : BILAN DES DEMA POUR LES TROIS EXPLOITATIONS TYPES 371

Annexe 1 : Systèmes d'assurance et d'indemnisation des dommages agricoles («CatNat» et « calamité agricole »)

L'assurance fait partie des moyens permettant de diminuer les effets d'une inondation sur les enjeux en leur permettant d'accéder à un moyen de financer la remise en route. Cette section n'a pas pour ambition de détailler les principes de l'assurance mais de présenter les mécanismes d'assurance agricole et leur évolution récente.

1. Description du système Calamités Agricoles et Catastrophe Naturelle

L'assurance des risques naturels ne fait généralement pas partie des risques assurables par les seules assurances privées pour trois raisons principales (Grelot, 2004) :

- le manque de fiabilité sur les statistiques de prévision sur les évènements ;
- le fait que ces risques vont toucher un grand nombre d'agents en même temps ;
- le risque d'anti-sélection, c'est-à-dire que seuls les agents exposés au risque sont susceptibles de contracter l'assurance.

De plus, l'assurance peut favoriser l'aléa moral c'est-à-dire que les agents ayant contractés une assurance pourraient avoir un comportement de prise de risque plus important. Pourtant, comme le souligne Schwarze (2007), l'assurance de ces risques est envisageable si elle est associée à une implication de l'Etat comme fond de garantie ainsi qu'à une politique d'incitation à la prévention.

En Europe, une grande diversité des systèmes d'assurance face au risque naturel existe. Schwarze et Wagner (2009) proposent une classification en cinq catégories des systèmes d'assurance européens :

- Modèle 1 : assurance par monopole public
- Modèle 2 : assurance obligatoire pour tous les risques naturels
- Modèle 3 : inclusion obligatoire de l'assurance contre tous les risques naturels dans l'assurance classique pour les habitations
- Modèle 4 : assurance privée des risques naturels et aides gouvernementales post catastrophe
- Modèle 5 : fonds national d'aide pour les catastrophes naturelles financés par des taxes.

En France, le choix a été fait d'un système d'indemnisation solidaire (type modèle 2/modèle 3) pour les activités économiques et domestiques depuis la loi du 13 juillet 1982, le système «CatNat». Il existe également un fonds national d'aide spécifique au secteur agricole (type modèle 5), le fonds « calamités agricoles ».

2. Assurance à l'échelle de l'exploitation agricole

Les exploitants agricoles bénéficient des deux systèmes d'indemnisation des dommages existant en France et résultant d'une collaboration public-privé. Tout d'abord, comme toutes les activités domestiques et économiques, les activités agricoles bénéficient pour la majorité des biens matériels d'une assurance reposant sur le système «CatNat» lorsque le sinistre est une catastrophe naturelle. Deuxièmement, depuis 1964, le système d'indemnisation appelé « calamités agricoles » spécifique pour le secteur agricole a été créé et indemnise une partie des pertes de récolte de fonds (sol, matériel végétal…). Nous allons détailler les caractéristiques de chacun des systèmes d'indemnisation.

3. Système «CatNat»

Le système «CatNat» existe en France depuis la loi n°82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles qui prévoit que « les contrats d'assurance, souscrits par toute personne physique ou morale autre que l'Etat et garantissant les dommages d'incendie ou tous autres dommages à des biens situés en France […] ouvrent droit à la garantie de l'assuré contre les effets des catastrophes naturelles sur les biens faisant l'objet de tels contrats ». Par ce texte, l'assurance contre les catastrophes naturelles est intégrée dans les contrats d'assurance des dommages aux biens et pertes d'exploitation .Elle est financée par tous les agents à travers une prime additionnelle fixée par arrêté et représentant 12% de la prime principale (Dumas et al., 2005). La reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle se fait par arrêté interministériel suite à une procédure administrative faisant intervenir les maires des communes concernées et les préfets appuyés par les services d'état (Grelot, 2004).

La Caisse Centrale de Réassurance (CCR), joue un rôle important dans ce système. Avec un statut d'entreprise publique, elle assure le lien entre public et privé en proposant aux assureurs de céder 50% des risques et des primes «CatNat», et de souscrire une réassurance limitant leur charge de sinistres. La garantie de l'Etat à la CCR est illimitée et intervient lorsque la charge de sinistres de celle-ci atteint 90% de ses réserves «CatNat» et provisions d'égalisation (Dumas et al., 2005).

Pour le risque inondation, suite à la déclaration de l'état de catastrophe naturelle, la procédure d'indemnisation est mise en place à travers un système combinant assurance privée – CCR – Etat. Cependant, une franchise reste toujours à la charge de l'assuré. Le niveau des franchises, qui sont non indexées, a été fixé par l'arrêté du 10 août 1982 et a fait l'objet de nombreuses révisions. Depuis le 1er janvier 2002,ces franchises s'élèvent à (CCR, 2004):

- 380 euros pour les biens à usage privé (maison, voiture, ...) ;

- 10 % du montant des dommages avec un minimum de 1140 euros pour les biens à usage professionnel (entreprise, commerce, ...) ;
- 3 jours ouvrés avec un minimum de 1140 euros pour la garantie pertes d'exploitation, mais lorsque la franchise prévue par le contrat est supérieure, c'est cette dernière qui sera appliquée.

Pour les biens autres que les véhicules, en cas de sinistres répétitifs, si la commune n'est pas dotée d'un plan de prévention (PPR), la franchise est modulée en fonction du nombre de constatations de l'état de catastrophe naturelle intervenues pour le même risque au cours des cinq années précédant la date de la nouvelle constatation. Elle est doublée au troisième arrêté constatant la catastrophe, triplée au quatrième et quadruplée pour les arrêtés suivants.

Le système «CatNat» offre aux assurés une couverture relativement étendue pour un coût modéré et semble satisfaire autant les usagers que les assureurs. Bien que le rapport Dumas (2005) préconisait une réforme « pour renforcer les réserves de la CCR, créer des incitations efficaces à la prévention et rendre la gestion du régime plus rigoureuse et plus transparente », celle-ci n'a pas encore été mise en œuvre. Lors des entretiens réalisés au cours de ce travail de thèse, les agriculteurs ont souvent précisé que les indemnisations par les assurances via «CatNat» suite aux inondations avaient généralement été versées relativement rapidement, avec notamment des avances faites pour les personnes les plus touchées.

4. Système calamité agricole

a. Evolution réglementaire

- *Loi 64-706 du 10 juillet 1964*

Le Fond National de Garantie des Calamités Agricoles (FNGCA) a été institué par la loi n° 64-706 du 10 juillet 1964 qui met en place un régime de garantie contre les calamités agricoles. Elle se décline en 20 articles législatifs inscrits au code rural. Aux termes de l'article L. 361-1 du Code rural, le FNGCA est chargé de prévenir et d'indemniser les dommages matériels causés aux exploitations agricoles par les calamités agricoles. Ce fonds est, en outre, chargé de favoriser le développement de l'assurance contre les risques agricoles.

Aux termes de l'article L. 361-2 du Code rural, sont considérés comme des calamités agricoles :

- les dommages non assurables
- les dommages d'importance exceptionnelle
- dus à des variations anormales d'intensité d'un agent naturel
- lorsque les moyens techniques de lutte préventive et curative employés habituellement dans l'agriculture n'ont pu être utilisés ou se sont révélés insuffisants ou inopérants.

L'article L361-10 du Code rural et de la pêche maritime prévoyait également les modalités d'indemnisation suivantes :

- pour les bâtiments, d'après les conditions fixées par la police d'assurance ;
- pour le cheptel mort ou vif, d'après sa valeur au jour du sinistre ;
- pour les sols, d'après les frais nécessaires à la remise en état de culture ;
- pour les récoltes ou cultures, d'après les frais nécessaires pour la remise en culture si celle-ci peut être de nouveau réalisée dans des conditions normales de production et de commercialisation et, dans le cas contraire, d'après la valeur marchande qu'auraient eue les produits détruits parvenus à maturité en tenant compte du nombre de récoltes qui ne pourront avoir lieu, l'expertise se faisant au niveau de l'exploitation

Cependant, cet article a été abrogé par la récente loi du 27 juillet 2010 de modernisation de l'agriculture et de la pêche.

- *Loi du 5 janvier 2006 d'orientation agricole et ses décrets d'application*

La Loi d'orientation agricole de 2006 marque le démarrage d'un changement de perspective du Ministère concernant l'assurance des risques en agriculture. Elle vise à favoriser les systèmes d'assurance récolte privés, en remplacement du système d'indemnisation par le FNGCA. Un des objectifs est également de développer l'épargne de précaution par des systèmes de déduction fiscale. Ce projet vise à responsabiliser les agriculteurs face au risque et à assurer une meilleure indemnisation des dégâts (Décret n° 2006-370 du 27 mars 2006). Le décret n° 2007-72 du 19 janvier 2007 relatif à l'assurance et aux calamités agricoles et modifiant le code rural (articles 62 et 63) marque un tournant symbolique en renommant l'ancienne "Commission Nationale des Calamités Agricoles", le « Comité National de l'Assurance en Agriculture ».

- *Arrêté du 31 mars 2009 fixant la liste des risques assurables exclus du régime d'indemnisation du Fonds national de garantie des calamités agricoles*

L'arrêté du 31 mars 2009 marque une rupture importante dans le système calamité agricole. En effet, jusqu'à présent toutes les cultures bénéficiaient des indemnisations du FNGCA. Par ce décret, certaines cultures ou composantes de l'exploitation sont exclues de l'indemnisation par le FNGCA pour certains types de risques. En particulier, les céréales, oléo protéagineux, protéagineux et plantes industrielles ne seront plus indemnisées pour les pertes de récoltes, sur l'ensemble du territoire. De même, pour les cultures de tabac, les pertes de récolte ne seront plus indemnisées pour certains risques, à savoir la grêle, la tempête, le gel, la sécheresse, les inondations et la pluviosité excessive.

Concernant les pertes de fonds, les dommages sur les bâtiments, y compris les abris (notamment les serres), sur les équipements, installations et matériels d'irrigation, notamment les pivots, rampes et tuyaux ne sont plus indemnisés pour l'ensemble des risques climatiques.

- *Loi n° 2010-874 du 27 juillet 2010 de modernisation de l'agriculture et de la pêche*

Enfin l'article L361-5 de la Loi n° 2010-874 du 27 juillet 2010 de modernisation de l'agriculture et de la pêche précise la notion de risque assurable de la manière suivante :

« Les risques considérés comme assurables pour la gestion du Fonds national de gestion des risques en agriculture sont ceux pour lesquels il existe des possibilités de couverture au moyen de produits d'assurance et qui sont reconnus comme tels par arrêté conjoint des ministres chargés de l'agriculture, de l'économie et du budget, notamment en raison d'un taux de diffusion suffisant de ces produits au regard des biens concernés. ».

Elle vient rendre plus flexible mais aussi plus aléatoire, les modalités d'indemnisation en abrogeant l'article L361-10 du Code rural et de la pêche maritime puisque la réglementation s'appliquant actuellement pour l'indemnisation devient la suivante : «Les conditions dans lesquelles les calamités agricoles sont reconnues, évaluées et indemnisées sont déterminées par décret. »

b. Procédure générale

Suite à la survenance d'un sinistre, le régime des calamités agricoles prévoyait initialement deux modes de soutien, à savoir l'indemnisation par le FNGCA ou les prêts « calamités ». Les prêts étaient accordés aux sinistrés d'une calamité agricole pour un montant égal au montant évalué du dégât moins l'indemnisation accordée. Ils étaient peu utilisés parce que les taux de prêt n'étaient pas assez attractifs (autour de 3%). Mais ces taux pouvaient être abaissés, sur décision ministérielle, comme par exemple pour la sécheresse 2003 (1,5%) et les prêts ont alors eu un certain succès (100 M€ accordé pour la sécheresse 2003)[80]. Depuis le 1er janvier 2008, le système de prêt a été remplacé par un dispositif d'allègement des charges (DAC) défini selon la circulaire du 18 février 2008. Par ce dispositif, les intérêts sur les échéances des prêts professionnels à long et moyen terme bonifiés ou non sont pris en charge pour l'année en cours ou suivant le sinistre. Toutes les aides (indemnisation Calamités Agricoles, DAC, aides éventuelles des collectivités territoriales) du fait d'une calamité agricole sont cumulables dans la limite de 75% du dommage calculé.

80 Entretien avec JL BONICEL, Bureau du crédit et de l'assurance MAPR.

C'est la procédure d'indemnisation par le FNGCA qui est ici présentée. La description est basée sur la circulaire du 22 juillet 2009 communiquée par la Direction Générale des Politiques Agricole, Agroalimentaire et des Territoires aux services déconcentrés. La procédure générale se décline en deux étapes majeures :

- une étape de déclaration de sinistre, comportant une phase de demande de reconnaissance ainsi qu'une phase de constitution des dossiers et d'évaluation des pertes
- une étape d'indemnisation

Ces deux étapes feront l'objet d'une description détaillée dans les sous-sections suivantes.

c. Procédure de déclaration

La procédure de déclaration démarre par une demande de reconnaissance de l'état de Calamité Agricole. Cette demande est portée par le préfet appuyé par une mission d'enquête et un Comité Départemental d'Expertise (CDE).

- *Mission d'enquête*

Lorsqu'un sinistre survient, une mission d'enquête est mise en place par la Direction Départementale du Territoire (DDT). Elle regroupe :

- un représentant de la DDT,
- un représentant de la chambre d'agriculture,
- des représentants syndicaux,
- des experts (en assurance, en technique agricole).

Elle a pour rôle de constater les dégâts, d'évaluer les pertes, proposer les zones et les biens sinistrés enfin d'établir le rapport qui sera présenté au Comité Départemental d'Expertise.

Le rapport de la mission d'enquête comprend ainsi :

- l'arrêté fixant la composition de la mission d'enquête,
- les dates et lieux de déplacement,
- l'origine et la caractéristique du sinistre (données météo),
- la zone concernée,
- le nombre d'exploitations concernées,
- la description des dégâts observés,
- des photos et des articles de presse éventuels,
- le montant des dommages indemnisables établi.

- *Comité départemental d'expertise (CDE)*

Après avoir pris connaissance du rapport de la mission d'enquête, le CDE se réunit afin de donner un avis au préfet quant aux dispositions à prendre à la suite du sinistre. Ce comité comprend principalement des représentants de la profession agricole, de l'Etat et des secteurs de l'assurance et de la réassurance. Le CDE émet un avis à l'intention du préfet qui dispose de plusieurs options :

- considérer que le sinistre n'est pas suffisamment important, il demande alors le classement sans suite,
- considérer que le sinistre mérite d'être reconnu au titre des calamités, pour les procédures d'indemnisation et de prêts,
- ne retenir que les prêts spéciaux,
- demander un complément d'enquête.

Au vu de l'avis du comité, le préfet adresse ses propositions au Comité National de l'Assurance en Agriculture (ex Commission Nationale des Calamités Agricoles).

- *Comité National de l'Assurance en Agriculture (CNAA)*

La CNAA émet un avis sur la demande de reconnaissance du caractère de calamité et sur le montant des crédits d'indemnisation affecté au département. Suite à cet avis, les ministres de l'agriculture et de l'économie et des finances peuvent classer l'affaire sans suite ou prendre trois arrêtés interministériels ; le premier fixant les conditions générales d'indemnisation au titre des calamités agricoles, le second reconnaissant le caractère de calamités agricoles et le dernier fixant le montant des crédits d'indemnisation affectés au département.

d. Procédure d'indemnisation

- *Les conditions d'éligibilité*

Pour bénéficier des indemnisations du FNGCA, les exploitants doivent réunir les deux conditions suivantes :

– l'exploitation sinistrée doit être assurée (assurance incendie, bâtiment ou grêle s'il n'existe ni matériel ni bâtiment)

– l'assurance doit alimenter le FNGCA par le biais d'une contribution additionnelle.

- *Biens indemnisables*

Le FNGCA indemnise les dommages directs aux biens, autres que les biens assurables, c'est à dire les récoltes et les pertes de fonds telles que définies par l'Arrêté du 31 mars 2009. Les pertes de récoltes concernent les pertes de récoltes sur pied et les pertes de culture dont le cycle végétatif est inférieur ou égal à 1 an et les pertes de fonds concernent les pertes sur cultures pérennes

(plantations) et les dégâts au sol. Un des problèmes fréquemment mentionné par les exploitants est la non prise en compte des pertes indirectes par apparition de dégâts a posteriori du sinistre comme le développement de maladies liées à une période de submersion.

- *Évaluation des pertes indemnisables par les experts*

Dans la première phase de la procédure, des experts, effectuent un constat d'expertise sur chaque exploitation agricole sinistrée pour une estimation quantitative mais non monétaire des pertes de récolte et de fonds. Pour les pertes de fonds, l'expert doit qualifier selon une terminologie précise les heures de travail estimées pour la réparation des dommages.

- *Le barème départemental*

Le barème départemental fixe les rendements et prix moyens par nature de productions (végétales et animales). Il est établi par les DDT en concertation avec la profession agricole et validé par les différents représentants siégeant au CDE. Ce document est généralement largement diffusé et peut être notamment utilisé par les services fiscaux pour définir la base de l'impôt forfaitaire. Cela permet de rétablir un certain équilibre dans les négociations sur les rendements des cultures proposés par les Chambres d'Agriculture[81].Ces informations sont utilisées pour calculer de façon homogène le produit brut théorique des exploitations sinistrées à partir du constat d'expertise.

- *Les seuils d'éligibilité pour l'indemnisation*

Deux conditions s'appliquent aux exploitations pour bénéficier des indemnisations du FNGCA. Concernant les pertes de récoltes, la somme des dommages aux récoltes rapportée à la valeur totale du produit brut théorique de l'exploitation doit être au moins égale à 13%. De plus, pour chaque culture, le montant de dommage doit atteindre au moins 30% du produit brut théorique de la culture pour les cultures non primées par la PAC et 42 % pour les cultures primées.

- *Déclaration des dommages*

Suite à la reconnaissance du caractère de « Calamité agricole » par les ministres, les trois arrêtés interministériels sont affichés et les dossiers de déclarations de dommages mis à disposition en mairie. Les dossiers de déclarations de dommages doivent être remplis par les agriculteurs. Ces dossiers renseignent toutes les cultures présentes sur l'exploitation au moment du sinistre et les dégâts constatés.

[81] Entretien avec JL BONICEL, Bureau du crédit et de l'assurance MAPR

- *Instruction des dossiers en DDT*

Les dossiers de déclaration, confrontés au constat d'expertise, sont instruits en DDT et traités par un logiciel en télé service depuis 2009 selon l'arrêté du 12 janvier 2009. La finalité de ce logiciel, teléCALAM, est de permettre aux agents du MAAPRAT de déclarer les pertes de productions agricoles causées par un aléa météorologique en vue de leur indemnisation par le FNGCA.

Les taux d'indemnisations varient entre 12 et 30% des pertes subis par l'exploitation. Ces taux peuvent être majorés par décision ministérielle ou pour incitation à l'assurance grêle. Si l'agriculteur dispose d'une assurance grêle, le taux d'indemnisation est majoré de 10 points[82]. La Figure 124 propose un récapitulatif des étapes clés de la procédure de mise en œuvre du FNGCA.

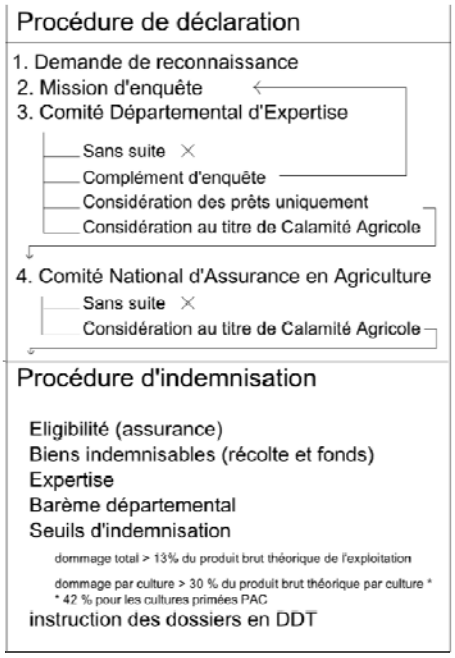


Figure 124 : Récapitulatif de la procédure d'indemnisation du FNGCA

e. Évolution du régime calamités agricoles : le passage à l'assurance récolte

Historiquement, depuis 1964, le FNGCA a pour mission de promouvoir l'assurance. Jusqu'aux années 2000, cette mission n'a pas été très développée. Il y a essentiellement eu une incitation à l'assurance grêle, de façon directe par une participation aux cotisations (primes) et indirecte par la mise en place d'un taux majoré d'indemnisation suite à un sinistre au titre de Calamité Agricole (de 5 à 10 points) pour les contractants d'une assurance grêle.

Plusieurs missions de rapporteur ont apporté des éléments de réflexion. Notamment, le rapport Babusiaux (2000) proposait de faire des expérimentations de couples culture-risque (comme

[82] Entretien avec JL BONICEL, Bureau du crédit et de l'assurance MAPR

par exemple gel+grêle sur vigne) pour que tous (État, monde agricole et assureurs) aient un début de retour d'expérience sur la faisabilité.

En 2005, sur la base du rapport Ménard (2004), deux nouveaux dispositifs ont été créés. Il s'agit d'une part, des Déductions fiscales Pour Aléa (DPA) et d'autre part, d'une assurance multirisque. Les contrats d'assurance devaient prendre en charge la sécheresse, la grêle, le gel, l'inondation, l'excès d'eau et le vent. L'incitation pour les exploitants à s'engager sur ces produits était liée à la prise en charge de 35% du montant des primes. Il est possible par ces contrats de n'assurer qu'un type de récolte avec l'exigence d'assurer la totalité de cette culture pour une exploitation. Il s'agit alors de l'assurance récolte. L'exploitant peut également contracter une assurance multirisque pour l'exploitation. Dans ce cas, 80% au moins des surfaces doivent être assurées.

Après deux ans, un premier bilan est établi dans le rapport Mortemousque (2007). Il montre que le taux de pénétration est de l'ordre de 20% avec une grande variabilité en fonction des types de production. Le rapport Soulage (2008) vient confirmer cette conclusion. Si 26% des exploitations céréalières ont contractées une assurance multirisque, seulement 10% des exploitations viticoles et 2% des exploitations arboricoles sont concernées. Comme nous l'avions déjà signalé, cet écart se justifie principalement par le montant de la prime en arboriculture qui est très élevé.

L'incitation à l'assurance récolte se fait principalement par la prise en charge d'une partie de la prime. Cette participation est réglementée par décret et prévoit depuis 2010, une participation du Fonds Européen Agricole de Garantie (FEAG). Par le décret du 22 janvier 2010 fixant pour l'année 2010 les modalités d'application de l'article L. 361-8 du code rural en vue de favoriser le développement de l'assurance contre certains risques agricoles, le montant de subvention à été fixé à 65% de la prime dont 25% est pris en charge par le FNGCA et 75% par le FEAG.

Actuellement, l'incitation au passage à l'assurance multirisque est une des préoccupations majeures. Les différents rapports établis le montrent (Babusiaux, 2000 ; Ménard, 2004 ; Mortemousque, 2007 ; Soulage, 2008). Le 18 février 2008, une proposition de loi tendant à généraliser l'assurance récolte obligatoire, a été présentée par MM. Yvon COLLIN et Jean-Michel BAYLET, au Sénat. Cette proposition a été rejetée suite aux recommandations du rapport Soulage qui a jugé cette obligation prématurée et dont la mise en œuvre soulèverait de nombreuses difficultés. Malgré cela, la proposition de loi a été à nouveau proposée le 14 janvier 2010 par les mêmes sénateurs et reste pour l'instant sans suite.

Voici quelques unes des principales difficultés soulevées par Soulage (2008) pour envisager un élargissement de l'assurance récolte. Premièrement, les conséquences financières pour l'Etat seraient très lourdes. Comparant le budget du FNGCA (32 millions d'euros) à celui engagé par

l'Espagne (280 millions d'euros) pour maintenir un taux de pénétration de 50% des exploitations agricoles, Soulage pointe l'effort financier considérable qu'il resterait à fournir. Deuxièmement, la nécessité d'une réassurance publique est récurrente dans les rapports. En particulier, Soulage montre que les besoins lors d'une année difficile, comme par exemple la sécheresse de 2003, peuvent s'élever à un milliard d'euros alors que la capacité de réassurance privée des assureurs s'élèverait à seulement 300 à 700 millions d'euros. Enfin, le marché de l'assurance récolte ne semble pas encore être en mesure de proposer des produits adaptés à toutes les situations. En particulier, la question de l'arboriculture reste encore très difficile à gérer.

Le tableau 59 propose une synthèse des principales caractéristiques des systèmes d'assurance et d'indemnisation en agriculture.

Tableau 59 : récapitulatif des systèmes d'assurances Cat Nat et l'assurance Multirisque en agriculture

	Assurance «CatNat»	**Assurance Multirisque Récolte**	**Assurance Multirisque Exploitation**
Conditions	Pas de conditions particulières, s'adresse aux particuliers et activités	Toutes les surfaces de la culture concernée doivent être assurées. Les pertes doivent être supérieures à 30%	80% au moins des surfaces de l'exploitation doivent être assurées Les pertes doivent être supérieures à 30%
Franchise	Fixée par décret (2002) - 380 € pour biens privés - 10% du montant des dommages avec un minimum de 1140 euros pour les biens à usage professionnel - 3 jours ouvrés avec un minimum de 1140 euros pour la garantie pertes d'exploitation	Fixée par décret (février 2010) comprise entre 25 et 50%de la production garantie Possibilité d'extension de la franchise non prise en charge par la subvention	Fixée par décret (février 2010) comprise entre 20 et 50% de la production garantie) Possibilité d'extension de la franchise non prise en charge par la subvention
Prime	prime additionnelle «CatNat» fixée par décret à 12%	Pas de prime additionnelle Montant très variable en fonction des cultures Bénéficie d'une subvention FNGCA et FEAG (65% en 2010)	Pas de prime additionnelle Montant très variable en fonction des exploitations Bénéficie d'une subvention FNGCA et FEAG (65% en 2010)
Réassurance par l'Etat	Oui via CCR	Non Recommandation de rapports d'expert dans ce sens	Non Recommandation de rapports d'expert dans ce sens

Annexe 2 : Glossaire

A

Adaptation : ajustement des systèmes naturels ou anthropiques, en réponse à des stimuli climatiques actuels ou attendus, qui limite les dommages et favorise le développement d'opportunités.

Aléa : hasard favorable ou, plus souvent, défavorable c'est-à-dire un évènement se produisant de façon aléatoire et pouvant être à l'origine d'effets.

B

Bénéfices : valeur attribuée à l'ensemble des conséquences positives d'un projet.

C

Capacité d'adaptation : processus par lequel un individu est capable de s'adapter à de nouvelles conditions.

Capital : ensemble des moyens de production permettant d'obtenir un flux de biens et services qui contribuent au bien-être des individus.

Capabilité : ensemble des modes de fonctionnement humain qui sont potentiellement accessibles à une personne, qu'elle les exerce ou non.

Capital financier : ensemble des ressources financières (épargne, prêt, subventions…) pouvant être mobilisées pour assurer un processus de production de bien-être.

Capital humain : ensemble des compétences, connaissance, capacité à travailler permettant d'assurer une production de bien-être.

Capital institutionnel : ensemble des institutions qui constituent la structure incitative organisant les relations entre les individus ou entre les organisations au sein des processus de productions économiques et sociaux.

Capital naturel : ensemble des ressources naturelles (bois, eau, énergie…) incluant les ressources difficilement valorisables (biodiversité, écosystèmes…) participant à la création de services écologiques.

Capital physique : ensemble des biens matériels (infrastructures, bâtiments, matériel) permettant de produire des biens et services.

Capital social : ensemble des ressources sociales (réseaux, aide mutuelle, associations..) que les personnes peuvent mobiliser pour assurer un processus de production de bien-être.

Caractéristique sommative : caractéristique ne dépendant pas du fait qu'un élément se trouve à l'intérieur d'un système.

Caractéristique constitutive : caractéristique dépendant des relations spécifiques à l'intérieur du système et nécessitant la connaissance des liens entre éléments.

Courbe de dommages : fonction permettant, pour chaque type d'enjeu, d'exprimer le montant de dommage monétaire correspondant à une intensité d'aléa.

Coût : valeur attribuée à l'ensemble des dépenses monétaires (coûts d'investissement, d'entretien…) et non monétaires (externalités et coûts d'opportunité) liées à la réalisation d'un projet.

Coût d'opportunité : Manque à gagner résultant d'une possibilité non exploitée, par exemple une occasion d'investir ou de s'implanter sur un marché.

Crue : dépassement d'un débit considéré comme seuil pour le cours d'eau.

D

Dommage : valeur anthropocentrique mais pas nécessairement monétaires, que la société et/ou ses membres attribuent aux effets.

Dommage Moyen Annuel : somme des dommages associés aux différents scénarios d'inondation pondérés par la probabilité d'occurrence de ces scénarios.

Dommage Évité Moyen Annuel : différence entre le DMA sans projet et le DMA avec projet.

E

Effet : modification attendue sur un enjeu liée à l'occurrence d'une perturbation.

Effet direct : modification attendue sur les enjeux exposés à l'inondation et résultant du contact physique direct entre l'eau d'inondation et les biens vulnérables.

Effet induit : modification de l'activité d'un système économique résultant des effets directs de l'inondation sur ses dotations en capitaux.

Effet indirect : modification résultant des ruptures dues aux effets directs et induits sur les enjeux n'ayant pas été directement exposés l'inondation.

Effet intangible : modification considérée comme non mesurable et donc non exprimable dans une unité, notamment monétaire, permettant de les classer et de les comparer.

Exposition : degré, durée, ampleur du contact entre un aléa et un système.

I

Itinéraire technique : suite logique et ordonnée de techniques culturales appliquées à une espèce végétale cultivée.

M

Mitigation : actions anthropiques pour réduire les sources d'émissions ou augmenter le stockage des gaz à effets de serre.

Moyen de subsistance : moyens incluant les capabilités, enjeux (zone d'approvisionnement, ressources, demande et accès) et activités nécessaires comme moyen de vie.

Modèle d'actions : modèle exprimant les objectifs à atteindre ainsi que les règles de décision attenantes.

P

Produit brut : somme de la production de l'exercice, des subventions de l'exploitation, des indemnités d'assurance, des remboursements forfaitaires de TVA, des remises, des autres produits de gestion courante, et des transferts de charge.

R

Résilience : capacité d'un système à conserver ses fonctionnalités suite à l'occurrence d'un choc.

Risque : intersection potentielle d'un aléa et d'une vulnérabilité.

S

Scénario : combinaison particulière des paramètres de l'aléa (hauteur, vitesse, durée, période d'occurrence) pouvant être associée à une probabilité d'occurrence.

Stabilité : capacité d'un système à revenir à un état d'équilibre après une perturbation temporaire.

Système : ensemble d'ensemble d'éléments en interactions.

Système socio-écologique (Socio-Ecological System, SES) : système incluant des sous-systèmes social (humains) et écologique (biophysique) en interaction.

Système de production : système mobilisant du capital physique et technique, du capital humain, financier et social à des fins de production végétale et/ou animale.

U

Unité de Travail Annuel (UTA) : unité de mesure de la quantité de travail humain fourni sur chaque exploitation agricole équivalent au travail d'une personne travaillant à temps plein pendant une année. On distingue les UTA salariées (qui comprennent éventuellement les exploitants eux-mêmes ou des membres de leur famille), permanents ou saisonniers, des UTA non salariées. On considère aussi parfois l'ensemble des UTA familiales qui regroupent les exploitants et les membres de leur famille participant au travail sur l'exploitation, qu'ils soient salariés ou non.

Utilisabilité : possibilité pour l'exploitant d'accéder et d'utiliser un objet fonctionnel.

V

Valeur ajoutée : valeur de la production diminuée des consommations intermédiaires.

Vulnérabilité : propension d'un système à subir des effets suite à une exposition à un aléa en fonction de sa sensibilité et de sa capacité de réponse, qui sont déterminées par l'ensemble de ses dotations en capital physique, humain, financier, social et institutionnel.

Annexe 3 : Généralités sur les méthodes d'évaluation économique

1. Principes généraux

Dans le cadre de l'évaluation économique, il convient de distinguer les méthodes reposant sur la valeur d'utilité totale et la valeur d'activité totale (Garrabé, 1994). Les méthodes d'évaluation de l'activité totale reposent sur les comptabilités nationales ou régionales dont certaines dépenses d'activité ne procurent pas de variation de l'utilité.

2. Évaluation de la valeur d'utilité totale[83]

Différentes méthodes d'évaluation de la valeur d'utilité totale peuvent être distinguées selon les objectifs qu'elles permettent d'évaluer. La principale est l'analyse Coût-Bénéfice (ACB)[84] qui permet de mesurer l'efficience d'un projet en comparant, dans le temps et l'espace, les variations positives (bénéfices) et négatives (coûts) induites sur l'utilité des acteurs concernés par la mise en place d'un projet.

Ensuite, l'analyse Coût-Efficacité permet de comparer les coûts de différentes options de projet, les objectifs étant supposés satisfaits. Il est possible d'introduire dans cette analyse un coefficient de satisfaction des objectifs.

3. Évaluation de la valeur d'activité totale

Nous citons ici quelques méthodes d'évaluation de la valeur d'activité totale sachant que ces approches ne sont pas mobilisées par la suite :

[83] On peut également signaler l'existence de la méthode QALY (Quality Adjusted Life Year), développée dans le domaine médical, et qui propose d'évaluer l'utilité perçue par les patients d'une action médicale qui correspond à une année de vie gagnée. Cette méthode est toutefois contestée au sein des économistes pour son manque de cohérence avec la théorie de l'utilité (Moatti et al., 1995).

[84] La terminologie analyse Coût-Avantages est également parfois utilisée pour désigner l'Analyse Coût-Bénéfice car le terme « bénéfice » peut être interprété au sens financier et provient de la traduction directe de l'anglais Cost-Benefit Analysis. Nous utilisons le terme Analyse Coût-Bénéfice dans la suite du texte car il est le plus fréquemment utilisé dans la littérature. Le terme bénéfice est ici entendu comme l'ensemble des effets positifs sur le bien être des agents concernés par l'analyse.

- La méthode des effets[85] repose sur l'évaluation à partir des données de comptabilité des effets en termes de variation de la valeur ajoutée des acteurs concernés par le projet. L'évaluation repose sur les prix observés et non sur les coûts d'opportunité mobilisés dans les ACB.
- La méthode coûts-emplois[86] propose de comparer le nombre total d'emplois créés aux coûts de la mise en place d'un projet.
- Les modèles d'équilibre général calculable reposent sur le principe de l'équilibre général des marchés permettant de déterminer les prix et quantités sur chaque marché sectoriel et proposent des méthodes de résolution quantitative. Sassi (2010) propose une analyse du risque inondation fondée sur un modèle d'équilibre général calculable visant à déterminer la capacité des activités économiques à retrouver une situation d'équilibre suite aux inondations de 2003 sur la vallée du Rhône. Cette analyse repose sur la comparaison du coût moyen annuel des dommages et du revenu annuel des activités.
- La méthode des multiplicateurs territoriaux qui consiste à mesurer directement sur le revenu et la production, les effets de l'injection de ressources via la mise en place d'un projet en considérant l'investissement et le fonctionnement.

[85] Pour une présentation détaillée de cette méthode voir Garrabé (1994, p151)

[86] Pour une présentation détaillée de cette méthode voir Garrabé (1994, p179)

Annexe 4 : Liste des objets du modèle de vulnérabilité (EVA)

Anglais	Modele	Français
Territory	Territoire	territoire
Flood	Inondation	scénario d'inondation
Spatial_El	Element_Spat	élément spatial
Physical_C	Composante_P	composante physique
Building	Batiment	bâtiments
Input	Stock_Intran	stock d'intrants
Product	Stock_Produi	stock de produit
Equipment	Materiel	matériel
Landplot	Parcelle	parcelles
Tree	Materiel_Veg	matériel végétal
Production	Production	production végétale en cours
CMS	Itineraire_T	itinéraire technique
Task	Tache	tâche
Production	Tache_Produc	tâche de production
Recovery_T	Tache_Inonda	tâche de remise en état
Farm	Exploitation	exploitation agricole
Workforce	Main_Oeuvre	main d'œuvre mobilisée pour réaliser les tâches
Normal	Normal	normal
Flooded	Inonde	inondé
Dirty	Sali	sali
Damaged	Endommage	endommagé
Destroyed	Detruit	détruit
Cleaning	En_Nettoyage	en cours de nettoyage
Repairing	En_Reparatio	en cours de réparation
Buying	En_Rachat	en cours de rachat
Drying	En_Ressuyage	en cours de ressuyage
Locator	Localisateur	localisateur
Task_Begin	td,T	date de démarrage d'une tâche
Task_End	tf,T	date de fin pour la réalisation d'une tâche
Task_Work	dT	temps de travail nécessaire pour la réalisation de la tâche
Task_Equip	Tache_Materi	liste de matériel nécessaire pour la réalisation de la tâche
Task_Input	Tache_Intran	liste des types et quantités d'intrants nécessaires pour la
Utilisabil	Utilisabilit	utilisabilité
State	Etat	état
Clean	Nettoyage	nettoyage
Rebuy	Rachat	rachat
Repair	Reparation	réparation
Flood_Begi	Debut_Inonda	date de début de l'inondation
Flood_End	Fin_Inondati	date de fin de l'inondation
Flood_Spee	Vitesse_Inon	vitesse de l'inondation
Flood_heig	Hauteur_Inon	hauteur de l'inondation
Area	Surface	superficie agricole utile (SAU)
Profile	Profil	profil de l'exploitant en termes de capitaux social et
Farmer	Exploitant	exploitant agricole

Task_List	Liste_Tache	liste des tâches à réaliser
Utilisabil	Liste_Utilis	liste de l'utilisabilité des composantes physiques
Internal	Interne	mode de réalisation en interne
Service	Prestation	mode de réalisation par un prestataire
Solidarity	Solidarite	mode de réalisation par la solidarité
C_Stock	Cs	Cout unitaire d'un intrant
C_Equipmen	Cm	cout horaire d'utilisation d'un type de materiel
Q_Input	Q_Intrant	quantité d'intrant utilisée pour réaliser une tâche
C_Workforc	Cmo	cout horaire de la main d'œuvre
Type_Workf	Type_Mo	type de main d'œuvre
Q_Workforc	Q_MO	quantité de main d'œuvre disponible en fonction du type
	Mode_Realisa	mode de réalisation des tâches
Task_Cost	Tache_Cout	cout total de réalisation d'une tâche

Annexe 5 : Mise en équations du calcul des dommages

L'objectif de cette annexe est de présenter sous forme d'équations, les modalités de calculs des dommages dans le modèle EVA.

1. Notations utilisées

a. Composantes de l'exploitation

Soit $\mathcal{B}$, l'ensemble des bâtiments agricoles b, d'une exploitation, définis par, leur hauteur de surélévation, h_b et la surface du bâtiment, S_b.

$\mathcal{M}$ est l'ensemble des matériels m. Chaque matériel est contenu dans un bâtiment de $\mathcal{B}$ et dispose d'une hauteur de surélévation h_m propre par rapport à la hauteur du bâtiment.

$\mathcal{S}$ est l'ensemble des stocks s. Chaque élément de stock est contenu dans un bâtiment de $\mathcal{B}$ et dispose d'une hauteur de surélévation h_s propre par rapport à la hauteur du bâtiment.

Soit $\mathcal{P}$, l'ensemble des parcelles p. La parcelle p est définie par sa surface S_p et la nature de son sol.

Soit $\mathcal{C}$, l'ensemble des cultures c. Chaque culture est localisée sur une parcelle.

Soit $\mathcal{MV}$, l'ensemble des matériels végétaux mv. Chaque matériel végétal est localisé sur une parcelle et dispose d'une hauteur de surélévation h_{mv}.

Soit $\mathcal{A}$, l'ensemble des composantes physiques a, de l'exploitation agricole :

$$\mathcal{A} = \mathcal{B} \cup \mathcal{M} \cup \mathcal{S} \cup \mathcal{P} \cup \mathcal{C} \cup \mathcal{MV}$$

b. Fonction d'endommagement

Pour chaque composante physique $a \in \mathcal{A}$ est définie δ_a, la fonction d'endommagement, associant à un ensemble de paramètres de la submersion $\mathcal{I}$ affectant cette composante, une valeur d'endommagement comprise entre 0 et 1

$$\delta_a : \mathcal{I} \to [0,1]$$
$$p \mapsto \delta(p)$$
$$h \leq 0 \Rightarrow \delta(t,h,v,d) = 0$$

De façon plus générale, l'ensemble $\mathcal{I}$ est une combinaison des différents paramètres suivants :

- $\mathcal{T}$, l'ensemble des périodes d'occurrence de la submersion, t_d, considérées sur une année. t_d correspond à la date de début de la submersion.
- $\mathcal{H}$, l'ensemble des hauteurs d'eau h, de la submersion. $\mathcal{H} \subset \mathbb{R}$.
- $\mathcal{V}$, l'ensemble des vitesses v, de la submersion. $\mathcal{V} \subset \mathbb{R}^+$.

- $\mathcal{D}$, l'ensemble des durées de la submersion, d telle que d = t_f - t_d, avec t_d la date de fin. $\mathcal{D} \subset \mathbb{R}^+$

  Dans l'application présentée au chapitre 7,

- $\mathcal{T} = \{1; 52\}, correspond\ au\ numéro\ de\ chaque\ semaine\ de\ l'année$
- $\mathcal{H} = \mathbb{R}$
- $\mathcal{V} = \{0,1,2\}$, correspond à des niveaux qualitatifs d'intensité
- $\mathcal{D} = \mathbb{N}$

c. Tables des variables et fonctions utilisées

Tableau 60 : Variables utilisées dans le calcul des dommages agricoles

variable	nom	unité
E	une exploitation	
b	bâtiment	
h_b	hauteur de surélévation d'un bâtiment	cm
S_b	surface du bâtiment	ha
m	un élément de matériel	
h_m	hauteur de surélévation d'un matériel	cm
a_m	âge de chaque matériel m	an
P_m	prix d'achat des matériels	€
h_α	hauteur seuil entre résistance et endommagement pour un matériel	cm
h_β	hauteur seuil entre endommagement et destruction pour un matériel	cm
s	un élément de stock	
h_s	hauteur de surélévation d'un stock	cm
qs(t)	quantité de stock en fonction du temps	kg
Cmo	coût horaire de la main d'œuvre	€/h
p	parcelle	
S_p	surface de la parcelle	ha
c	une culture	
P_c	prix unitaire de vente espéré de la culture c	€/u
R_c	rendement de la culture c	u
mv	un matériel végétal	
h_{mv}	hauteur de surélévation du matériel végétal	cm
CR^i_{mv}	coût annuel de restauration du matériel végétal	€/ha
r	taux d'actualisation	
$t_{d,T}$	date de démarrage de la tâche T	
$t_{f,T}$	date de fin de réalisation possible d'une tâche	
δ_T	coefficient de perte de rendement induite par la non réalisation	
θT	coefficient de réalisation d'une tâche	
C_T	coût de réalisation d'une tâche	€/ha
δ_{NR}	perte de rendement liée à la non réalisation de l'ensemble NR	

Tableau 61 : Liste des fonctions utilisées pour le calcul des dommages

δ_a	fonction d'endommagement des composantes a
d_n	fonction définissant la durée de nettoyage des bâtiments
CR_p	fonction définissant le coût de restauration du sol

2. Calcul des dommages

Les dommages sont entendus comme les variations de charges et de produits attendues entre la situation normale et la situation après inondation.

a. Bâtiment agricole

Dans un premier temps, considérons les variations de charges et produits sur les composantes liées aux bâtiments agricoles. Les dommages aux composantes physiques des bâtiments sont principalement des variations de charges (coûts de restauration). Les pertes de produit induites par l'endommagement des composantes physiques (matériel et intrants) sont considérées à travers les pertes de produits ou augmentation de charges sur les parcelles.

- *Dommage au sol des bâtiments*

La fonction d'endommagement d'un bâtiment $\delta_b$ne dépend que de la hauteur :

$$\delta_b : \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{R}$$
$$h \mapsto \delta_b$$

Le coût de restauration du bâtiment D_b (€/bâtiment) est :

$$D_b = d_n(\delta_b)\ C_{mo}\ S_b$$

Où C_{mo}, est le coût horaire de la main d'œuvre (€/h) et d_n est la fonction définissant la durée de nettoyage en fonction de l'endommagement :

$$d_n : [0,1] \rightarrow \mathbb{R}$$
$$\delta_b \longmapsto\ d_n$$

- *Dommage au matériel*

Chaque élément de matériel est défini par son âge (a_m), son prix (P_m). Soit h_α, la hauteur définissant le seuil entre résistance et endommagement et h_β, la hauteur seuil entre endommagement et destruction pour un matériel m.

La fonction d'endommagement d'un matériel $\delta_m$ne dépend de la hauteur et de l'âge du matériel :

$$\delta_m : \mathcal{H}\ \times\ \mathbb{R}^+\ \rightarrow [0;1]$$
$$h, a_m \mapsto \delta_m$$
$$h \leq h_\alpha \Rightarrow \forall\ a_m, \delta_m(h, a_m) = 0$$
$$h_\alpha < h < h_\beta\ \Rightarrow \forall\ a_m, \delta_m(h, a_m) = 0{,}15$$
$$h > h_\beta\ \Rightarrow\ \ a_m \leq 5, \delta_m(h, a_m) = 1$$
$$5 < a_m \leq 10, \delta_m\ (h, a_m) = 0{,}5$$
$$a_m > 10, \delta_m\ (h, a_m) = 0{,}2$$

Le coût de restauration D_m d'un matériel est

$$D_m = \delta_m(h - h_b - h_m)\, P_m$$

Soit $D_{\mathcal{M}}$, le dommage correspondant au coût de restauration de l'ensemble du parc matériel $\mathcal{M}$, d'un bâtiment (€/bâtiment) :

$$D_{\mathcal{M}} = \sum_{m \in \mathcal{M}} D_m$$

- *Dommage aux stocks*

L'endommagement du stock dépend uniquement de la hauteur de submersion

$$\delta_s : \mathcal{H} \to [0; 1]$$
$$h \mapsto \delta_s$$
$$h < 20\ cm, \delta_s(h) = 0$$
$$20 \leq h < 50\ cm, \delta_s(h) = 0{,}5$$
$$h \geq 50\ cm, \delta_s(h) = 1$$

Le dommage $D_s$correspond au coût de restauration d'un élément de stock s dont le coût de rachat est C_s:

$$D_s = \delta_s(h - h_b - h_s)\, C_s\, q_s(t)$$

δ_s est identique pour tous les types de stocks et est donc nommée δ_{Stock}.

La quantité de stock s varie en fonction du temps de la manière suivante :

$$q_s : \mathcal{R}^+ \to \mathcal{R}^+$$
$$t \mapsto q_s(t)$$

Soit $D_{\mathcal{S}}$, le dommage correspondant au coût de restauration de l'ensemble des stocks $\mathcal{S}$, d'un bâtiment (€/bâtiment):

$$D_{\mathcal{S}} = \sum_{s \in \mathcal{S}} \delta_{Stock}(h - h_b - h_s)\, q_s(t)\, C_s$$

- *Dommage total aux bâtiments*

Le dommage total DT_b, dans le bâtiment b (contenant et contenu) est exprimé comme suit :

$$DT_b = D_{\mathcal{M}_b} + D_b + D_{\mathcal{S}_b}$$

Pour l'ensemble, $\mathfrak{B}$, des bâtiments agricoles b d'une exploitation, le dommage total $DT_{\mathcal{B}}$ (€/exploitation) est :

$$DT_{\mathcal{B}} = \sum_{b \in \mathcal{B}} DT_b$$

b. Parcelle

À une parcelle p, est associé un type de culture c et un matériel végétal mv (mv peut être une ensemble vide). P_c est le prix de vente espéré et R_c, le rendement de la culture c.

Nous rappelons qu'une tâche de production T est définie par :

- une date de démarrage, $t_{d,T}$,
- une date limite pour la fin de la réalisation, $t_{f,T}$,
- une perte de rendement en cas de non réalisation δ_T,
- un coefficient de non réalisation θ_T lorsque la tâche n'a pu être réalisée que partiellement (pour le détail du calcul de θ_T, cf section 5.6),
- un coût de réalisation C_T.

- *Dommage au sol de la parcelle*

L'endommagement de la parcelle p de surface S_p dépend de la hauteur et de la vitesse de submersion :

$$\delta_p : \mathcal{H} \times \mathcal{V} \to [0,1]$$
$$(h, v) \mapsto \delta_p$$

Le dommage à la parcelle est le coût de restauration du sol de la parcelle avec CR_p, le coût de restauration unitaire (€/ha) :

$$D_p = CR_p(\delta_p)\, S_p$$
$$CR_p : [0,1] \to \mathbb{R}$$
$$\delta_p \mapsto CR_p$$

- *Dommage au matériel végétal*

L'endommagement du matériel végétal, δ_{mv}, dépend de la hauteur d'eau, de la vitesse, de la période d'occurrence et de la durée de submersion :

$$\delta_{mv} : \mathcal{H} \times \mathcal{V} \times \mathcal{T} \times \mathcal{D} \to [0; 1]$$
$$(h - h_{mv}, v, t, d) \mapsto \delta_{mv}$$

L'endommagement du matériel végétal correspond à une destruction et les dommages s'étalent sur plusieurs années avant la remise en production. Le temps de mise en production est noté T_{mv}. CR^i_{mv}, correspond au coût de restauration annuel d'un type de matériel végétal mv.

$$D_{mv} = \sum_{i=0}^{T_{mv}} \delta_{mv}\, S_p \left(CR^i{}_{mv} - R_c P_c\right) \times \frac{1}{(1+r)^i}$$

r est le taux d'actualisation.

T_{mv} étant supposé une durée relativement courte, r est a priori constant.

L'endommagement du matériel végétal entraîne l'adaptation des pratiques de l'exploitant et la non réalisation d'un certain nombre de tâches.

$\mathcal{NR}$ est l'ensemble des tâches non réalisées

Si $\delta_{mv} < 1$, nous considérons que l'intégralité des charges, hormis la récolte, est réalisée avant l'arrachage l'année de l'inondation : $\mathcal{NR} = \{récolte\}$.

Si $\delta_{mv} = 1$, nous considérons que les tâches de production restant à réaliser après l'inondation ne sont pas engagées par l'exploitant : $\mathcal{NR} = \{T\ tq\ \mathrm{t_{d,T}} > \mathrm{t_{d,i}}\}$.

Ainsi, le dommage au matériel végétal, D_{mv}, s'écrit alors :

$$D_{mv} = \sum_{i=0}^{T_{mv}} \delta_{mv}\, S_p\left(CR^i{}_{mv} - R_c P_c\right) \times \frac{1}{(1+r)^i} - \sum_{T \in \mathcal{NR}} C_T$$

- *Discussion des hypothèses sur l'endommagement du matériel végétal*

Dans cette configuration, on considère que l'intégralité des charges est apportée avant l'arrachage l'année de l'inondation sauf les frais de récolte qui dépendent de la densité de plantation. Cette hypothèse est justifiée, sur la base de nos enquêtes, par le fait que les exploitants préfèrent éviter des proliférations de pestes dans les végétaux morts avant leur arrachage. Nous faisons également une seconde hypothèse qui est qu'aucun produit n'est récolté sur le matériel végétal endommagé.

Concernant l'hypothèse sur les charges de production l'année de l'inondation, si l'hypothèse est que les charges ne sont plus apportées sur le matériel végétal endommagé alors $\mathcal{NR}$, doit être défini comme suit : $\mathcal{NR} = \{T\ tq\ \mathrm{t_{d,T}} > \mathrm{t_{d,i}}\}$.

Les enquêtes ont révélé l'existence d'un seuil d'endommagement, λ, au-delà duquel l'intégralité du matériel végétal est arrachée. Cela revient à faire l'hypothèse suivante :

$$\delta_{mv} > \lambda \Rightarrow \delta_{mv} = 1$$

- *Dommage aux cultures hors endommagement du matériel végétal*

L'endommagement des cultures, δ_c, dépend de la hauteur, de la vitesse, de la période d'occurrence et de la durée de submersion.

$$\delta_c : \mathcal{H} \times \mathcal{V} \times \mathcal{T} \times \mathcal{D} \to [0;1]$$
$$(h, v, t, d) \mapsto \delta_c$$

L'endommagement du matériel végétal entraîne l'adaptation des pratiques de l'exploitant et la non réalisation ou la réalisation en externe d'un certain nombre de tâches en fonction du profil de l'exploitant.

$\mathcal{NR}$ est l'ensemble des tâches non réalisées.

$\mathcal{TE}$ est l'ensemble des tâches réalisées en externe.

$\mathcal{M}_T$ est l'ensemble des matériels $m_{T,i}$ nécessaires pour la réalisation d'une tâche T.

MO_{EA} correspond à la main d'œuvre disponible sur l'exploitation agricole.

$\mathcal{X}$ est l'ensemble des tâches non réalisée car la date de fin de réalisation de la tâche est comprise en la date de début et de fin de l'inondation : $t_{d,i} < t_{f,T} < t_{f,i}$

$\mathcal{Y}$ est l'ensemble des tâches pour lesquelles une contrainte de matériel est rencontrée. Cette contrainte pouvant s'écrire $\exists\, m_{T,i} \in \mathcal{M}_T, m_{T,i} = \{inutilisable\}$

$\mathcal{Y}'$ est l'ensemble des tâches pour lesquelles une contrainte de stock est rencontrée. Cette contrainte pouvant s'écrire $\exists\, s_{T,i} \in \mathcal{S}_T, s_{T,i} = \{inutilisable\}$

$\mathcal{Z}$ est l'ensemble des tâches pour lesquelles une contrainte de main d'œuvre est rencontrée. Cette contrainte nécessite de faire un bilan des tâches à réaliser, des tâches partiellement ou non réalisées en raison de contrainte sur la date de réalisation, le matériel ou les stocks.

Si $\delta_c = 1$, alors $\mathcal{NR} = \{T, tq\ t_{d,T} > t_{d,i}\}$ quel que soit le profil de l'exploitant.

Si $\delta_c < 1$ et que le profil est de type Interne (pas de mode de réalisation alternatif), alors :

$$\mathcal{NR} = \mathcal{X} \cup \mathcal{Y} \cup \mathcal{Y}' \cup \mathcal{Z}\ et\ \mathcal{TE} = \emptyset$$

Si $\delta_c < 1$ et que le profil est de type Prestation ou Solidarité, alors :

$$\mathcal{NR} = \mathcal{X}\ et\ \mathcal{TE} = \mathcal{Y} \cup \mathcal{Y}' \cup \mathcal{Z}$$

δ_{NR} est la perte de rendement globale correspondant à la réalisation partielle ou non réalisation de l'ensemble NR telle que :

$$\delta_{NR} = 1 - \prod_{T\,\epsilon\,\mathcal{NR}} (1 - \delta_T \theta_T)$$

Sur la parcelle p, les variations de charges et produits peuvent donc être exprimés par l'équation suivante :

$$DT_p = CR_p(\delta_p)\, S_p + \sum_{i=0}^{T_{mv}} \delta_{mv}\, S_p\left(CR^i{}_{mv} - R_c P_c\right) \times \frac{1}{(1+r)^i}$$
$$+ R_c P_c[1 - (1 - \delta_c)(1 - \delta_{NR})]\,(1 - \delta_{mv})\, S_p - \sum_{T\,\in\,\mathcal{NR}} C_T\,(1 - \theta_T)\,(1 - \delta_{mv})\, S_p$$
$$+ \sum_{T\,\in\,\mathcal{TE}} C_T\ (1 - \delta_{mv})\, S_p$$

- *Dommages totaux aux parcelles*

$$DT_{\mathcal{P}} = \sum_{p\,\in\,\mathcal{P}} DT_p$$

c. Dommages à l'exploitation

Le dommage total pour une exploitation agricole E correspond à la somme des dommages sur les parcelles et bâtiments :

$$DT_E = DT_{\mathcal{B}} + DT_{\mathcal{P}}$$

Annexe 6 : Mesures de réduction de la vulnérabilité analysées dans le cadre du projet « Évaluation de la Vulnérabilité Agricole »

		Exploitation type A_8			Exploitation type MC_15		
Libelle	**Description mesure**	**Évaluation dommages évités**	**ACB**	**Dommages évités similaires**	**Évaluation dommages évités**	**ACB**	**Dommages évités similaires**
Elaboration d'un plan d'urgence	oui	non	Coûts de mise en place non dispo	non	non	non	non
Elaborer un programme de remise en route de l'exploitation	oui	oui	Coûts de mise en place non dispo	non	oui	non	non
Limiter les stocks d'intrants en ZI par une gestion en flux tendus	oui	oui	Coûts de mise en place non dispo	non	oui	coûts non dispo	non
Organiser la consommation des stocks de fourrage et de paille en fonction de leur exposition	oui			Non concerné			
Stocker durablement la production viticole en dehors de la ZI	oui			Non concerné			
Stocker la production agricole en dehors de la ZI	oui	oui	coûts non dispo	2.9			
Stocker le fourrage et la paille en dehors de la zone inondable	oui			Non concerné			
Rechercher une association avec des exploitants situés en dehors de la ZI	oui	non	coûts de mise en place non dispo et scénario à définir	non	non	coûts de mise en place non dispo et scénario à définir	non
Concevoir la plantation en fonction du risque inondation	oui	oui	oui	non			
Préparer l'évacuation des stocks de production agricole ou leur mise hors d'eau	oui	oui	oui	2.4			

Parquer durablement le matériel d'exploitation en dehors de la ZI	oui	oui	coût d'achat ou location de parcelle et hangar hors ZI	non	oui	coût d'achat ou location de parcelle et hangar hors ZI	non
Adapter ses réseaux en fonction du risque inondation	oui	non	effets de la mesure à déterminer et coûts de mise en place	non	non	effets de la mesure à déterminer et coûts de mise en place	non
Créer des zones refuge pour le matériel, le cheptel et les stocks	oui	oui (2 scénarios)	oui (2 scénarios) mais coûts de mise en place non précis	4.2 (mais h surélévation différente)	oui (2 scénarios)	oui (2 scénarios) mais coûts de mise en place non précis	4.2 (mais h surélévation différente)
Surélever de façon permanente le matériel fixe sensible au-dessus des plus hautes eaux prévues	oui	non	liste du matériel fixe, effets de la mesure et coûts de mise en place	non	non	liste du matériel fixe, effets de la mesure et coûts de mise en place	non
Surélever les bâtiments d'exploitation ou les aires de stockage au-dessus des plus hautes eaux prévues	oui	oui	oui mais coûts de mise en place peu précis	2.12 (mais h surélévation différente)	oui	oui mais coûts de mise en place peu précis	2.12 (mais h surélévation différente)
Prévoir la possibilité de surélever le matériel mobile au dessus des plus hautes eaux prévues	oui	oui	oui mais coûts de mise en place peu précis	non	oui	oui mais coûts de mise en place peu précis	non
Acheter un groupe électrogène	oui	non	effets de la mesure à déterminer	non	non	effets de la mesure à déterminer	non
S'équiper d'un moyen de navigation	oui	non	effets de la mesure à déterminer	non	non	effets de la mesure à déterminer	non
Mettre en place une ligne de traite haute	oui	Non concerné					
Préparer l'évacuation des bêtes hors de la ZI	oui	Non concerné					
Protéger les bâtiments et les serres les plus exposées	oui	oui (2scénarios)	oui (2 scénarios)	2.12 mais risque de rupture des barrières	oui (2scénarios)	oui (2 scénarios)	2.12 mais risque de rupture des barrières
Prévoir la compensation des pertes de production par des achats externes	oui	non	Manque d'informations (effets, coûts,…)	non	non	Manque d'informations (effets, coûts,…)	non

Réduire la vulnérabilité du matériel d'irrigation	oui	non	Manque d'informations (effets, coûts,…)	non	non	Manque d'informations (effets, coûts,…)	non
Renforcer et adapter les serres situées en zone inondable	oui	non	Manque d'informations (effets, coûts,…)	non	non	Manque d'informations (effets, coûts,…)	non
Implanter des cultures moins sensibles aux inondations en ZI	oui	non	Manque d'informations (effets, coûts,…)	non	non	Manque d'informations (effets, coûts,…)	non
Planter sur buttes afin de réduire les risques d'asphyxie et d'affranchissement	oui	oui	oui mais pas d'information sur les coûts de mise en place	non			
Réduire la vulnérabilité du matériel sur la parcelle	oui	non	Manque d'informations (effets, coûts,…)	non	non	Manque d'informations (effets, coûts,…)	non
La prise en compte des enjeux agricoles dans les PCS	oui	non	Manque d'informations (effets, coûts,…)	non	non	Manque d'informations (effets, coûts,…)	non
Créer, viabiliser des zones de repli collectives	oui	non	Manque d'informations (effets, coûts,…)	non	non	Manque d'informations (effets, coûts,…)	non

Annexe 7 : Liste des entretiens réalisés auprès d'experts

Nom	Prénom	Organisme	Spécialisation	Entretien
Attias	Sébastien	Chambre d'Agriculture des bouches du Rhône	Spécialiste élevage taureaux	04/08/2009
Branger	Jean Louis	EPL Rodilhan	Spécialiste viticulture	06/02/2009
Braun	Philippe	Arvalis	Spécialiste blé	17/03/2009
Caillol	Philippe	Chambre d'Agriculture du Gard	Spécialiste maraichage Gard	23/01/2009
Cottencin	Luc	DRAF / SRISE	Statistique agricole (RGA)	03/03/2009
Delpon	Eric	Domaine expérimental de Lavalette	Spécialiste céréale	20/11/2008
Durel	Anne Claire	CER France	Données technico économique et financière	11/06/2009
Féougier	Gérard	Centre français du riz	informations sur la riziculture	23/02/2009
Hilaire	Christian	CTIFL	Spécialiste arboriculture (pêche)	27/01/2009
Mangin	Michel	Arvalis	Spécialiste céréales (maïs)	17/02/2009
Nouet	Yves	Chambre d'Agriculture du Gard	Spécialiste maraichage Gard	23/01/2009
Pianetti	Thierry	Chambre d'Agriculture du Gard	Spécialiste céréale / prairie	26/06/2009
Ruelle	Pierre	CEMAGREF	chercheur (céréale)	25/11/2008
Tisiot	Raphaël	CTIFL	Spécialiste tomate	27/01/2009
Vincent	Mathieu	CTIFL	Spécialiste arboriculture (pomme)	27/01/2009 27/06/2011

Annexe 8 : Description des exploitations enquêtées

	Surface (ha)						
Exploitation enquêtée	**Céréale**	**Maraichage**	**Arboriculture**	**Viticulture**	**Prairie**	**Nombre d'animaux**	**SAU totale (ha)**
1	10	8			40	30 chevaux	58
2	100						100
3			12				12
4	18	4	5				27
5	24				28		52
6	4		7,5		7		18,5
7					805	250 taureaux / 12 chevaux	805
8				60			60
9				35			35
10		3					3
11		2,5					2,5
12	15	15	3	15			48
13			17				17
14	89						89

Annexe 9 : Détails des choix et hypothèses sur la construction des exploitations types

1. Exploitation type en arboriculture

a. Surface et UTA moyenne

Selon les données du RGA sur les 5 départements de la zone d'étude (Bouches du Rhône, Gard, Vaucluse, Drôme, Ardèche), 4300 exploitations agricoles peuvent être rattachées à l'OTEX[87] arboriculture. Sur la base des enquêtes auprès d'experts et des données du RGA, les exploitations agricoles spécialisées en arboriculture ont été divisées en deux classes équivalentes en nombre. Le seuil correspond à une surface 15ha.

Tableau 62 : Caractéristiques des exploitations arboricoles sur les 5 départements du Rhône aval (07, 13, 26, 30, 84)

Superficie (ha)	Nombre total	SAU * totale (ha)	SAU moyenne	UTA** moyenne
< 15	2 031	16 450	8	2
> 15	2 266	86 236	38	8

* Surface Agricole Utile
** Unité de Travail Annuelle

Source : RGA 2000

Les exploitations de plus de 15 ha sont plutôt des structures de type « entreprises ». La classe inférieure à 15 ha correspond plutôt à des exploitations familiales. Nous avons choisi de travailler prioritairement sur les petites exploitations qui ont une capacité de financement inférieure, ce qui peut jouer un rôle dans la mise en place de mesures de réduction de vulnérabilité. La SAU moyenne de ces exploitations est de 8 ha et en moyenne 2 personnes y travaillent à temps plein.

b. Production et itinéraire technique

Parmi les productions en arboriculture, il apparait pertinent de distinguer les productions de fruits à pépins (pomme, poire), des productions de fruits à noyaux (pêche, abricot, cerise) car la sensibilité des vergers de fruits à noyaux est plus importante que les vergers de fruits à pépins.

De plus, notre modélisation requiert la connaissance de l'itinéraire technique de la culture pratiquée sur l'exploitation pour simuler les conséquences sur l'organisation du travail. Or, chaque espèce et même chaque variété dispose d'un itinéraire technique particulier.

[87] **OTEX** : orientation technico-économique des exploitations agricoles

Plusieurs options étaient envisageables pour le choix des espèces cultivées sur l'exploitation type :

- 100 % des surfaces en fruits à pépin, la pomme étant l'espèce la plus représentée en surface sur la zone d'étude;
- 100 % des surfaces en fruits à noyaux, la pêche étant l'espèce la plus représentée en sur la zone d'étude;
- 50 % des surfaces en fruits à pépin (pomme) et 50 % des surfaces en fruits à noyaux (pêche).

Sur la base des entretiens, nous avons conservé la première option (100% des surfaces en fruits à pépins). La variété retenue est la Royal Gala qui est la plus représentée sur notre zone d'étude (entretien CTIFL).

c. Présence des stocks d'intrants

La liste et la quantité maximale de chaque intrant sur l'exploitation type est donnée au tableau 63.

Tableau 63: Type et coût des intrants stockés sur l'exploitation type en arboriculture

Intrants stockés	Prix (€/ha)	Montant maximum des intrants stockés (€)
Désherbant	193	1 544
Engrais	192	1 536
Phytosanitaire	687	5 496
Produit éclaircissage	147	1 176
Rodenticide	77	616
	Total	10 368

Source : adapté de Chambre d'Agriculture du Vaucluse (2005)

L'évolution de la présence des intrants déterminée sur la base de l'itinéraire technique est donnée au tableau 64.

Tableau 64: Évolution de la quantité des intrants sur l'exploitation type en arboriculture

	Mois											
Stock	**Janv**	**Fév**	**Mars**	**Avril**	**Mai**	**Juin**	**Juil**	**Août**	**Sept**	**Oct**	**Nov**	**Déc**
désherbant	0 %	100 %	100 %	100 %	67 %	33 %	33 %	33 %	33 %	33 %	33 %	0
engrais	100 %	100 %	100 %	33 %	33 %	0	0	0	0	0	0	0
phytosanitaire	100 %	100 %	100 %	86 %	57 %	36 %	14 %	0	0	0	0	0
produit éclaircissage	0	100 %	100 %	100 %	33 %	0	0	0	0	0	0	0
rodanticide	100 %	100 %	100 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	0	0

Source : adapté de Chambre d'Agriculture du Vaucluse (2005)

d. Stocks de produit

Nous considérons que les pommes récoltées ne sont pas stockées sur l'exploitation.

e. Caractéristiques technico-économiques

Le tableau 12 présente les caractéristiques de la production de pomme Royal Gala sur la période allant de 2000 à 2004, en termes de rendements, prix de vente et charges issues des références technico-économiques de la Chambre d'Agriculture du Vaucluse (2005) et estimé en 2009 par le CER. Le montant des charges inclue les approvisionnements, la main d'œuvre et la mécanisation. Les charges de main d'œuvre correspondent à 20% des charges totales pour les travaux avant récolte et 30% des charges totales pour la récolte et correspond majoritairement à de la main d'œuvre saisonnière.

Tableau 65 : Détails des caractéristiques de la culture de pomme Royal Gala

Année	Rendement (kg)	Prix (€/kg)	Produit (€/ha)	Charges totales (€/ha)	Charges de main d'œuvre (€/ha)	Marge brute hors prime (€/ha)	Valeur ajoutée (€/ha)
Références technico-économiques de la CA 84							
2000	45 000	0,3	13 500	9 084	6 756	4 416	11 172
2001	45 000	0,5	24 300	12 794	6 945	11 506	18 451
2002	45 000	0,5	21 600	13 767	7 166	7 833	14 999
2003	40 000	0,5	18 400	13 377	7 021	5 023	12 044
2004	40 000	0,6	23 200	13 940	9 260	9 260	18 520
Références technico-économiques du CER							
2009	40 000	0,35	14 000	11 700	6 429	2 300	8 729
Moyenne							
	43 000	0,45	19 400	12 400	7263	6978	14241

Sources : (CER, 2009b ; Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2005)

Étant donnée la grande variabilité des caractéristiques de prix, rendement et charges en fonction des années, nous avons associé à l'exploitation type la valeur moyenne de chacune des caractéristiques.

f. Liste de matériel

La liste de matériel retenue pour l'exploitation type en arboriculture est présentée au tableau 69. A chaque type de matériel est associé une quantité ainsi qu'un âge moyen.

Tableau 66 : Liste du matériel de l'exploitation type en arboriculture

Dénomination	Nombre	âge
Tracteur arbo 4 roues motrices	1	5
Tracteur arbo 2 roues motrices	1	10
Pulvérisateur arbo 1000l traîné	1	5
Cuve 300l + rampe désherbage	1	10
Epandeur engrais	1	
Tondeuse (Girobroyeur)	1	5
Andaineur et broyeur à bois sur le sol (3 m)	1	10
Matériel de travail du sol	1	5
Remorque fruitière	1	5
Matériel d'assistance à la taille	1	5
Divers arbo	1	15

Compresseur	1	10
Poste à souder	1	10
Nettoyeur haute pression	1	10

Source : (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010)

2. Exploitation spécialisée en viticulture

a. Choix de l'exploitation type

Selon les données de la mission réduction de la vulnérabilité agricole, les exploitations viticoles représentent avec 488 exploitations, 20 % des effectifs des exploitations en zone inondable et représentent une surface totale en zone inondable de l'ordre de 8000 hectares soit 8% des surfaces en zone inondable.

Les données du RGA 2000 permettent de déterminer que, sur les cinq départements de la zone d'étude, les exploitations viticoles sont majoritairement des exploitations approvisionnant des caves coopératives (5495 exploitations) plutôt que des caves particulières (1071 exploitations). Par ailleurs, les experts rencontrés nous ont confirmé que les exploitations situées en zone inondable étaient plus fréquemment des exploitations approvisionnant les coopératives.

L'exploitation type retenue est donc une exploitation viticole fonctionnant en coopérative.

b. Surface et UTA moyenne

La taille moyenne et le nombre d'UTA sur l'exploitation type, nous avons utilisé les données du RGA 2000. La taille des exploitations en cave coopérative est relativement homogène sur les cinq départements allant de 12 à 42 hectares. Sur l'ensemble des départements, la taille moyenne des exploitations est de 22 hectares dont 16 en moyenne sont destinées à la viticulture.

L'exploitation type retenue est spécialisée en viticulture avec une taille moyenne de 22 hectares.

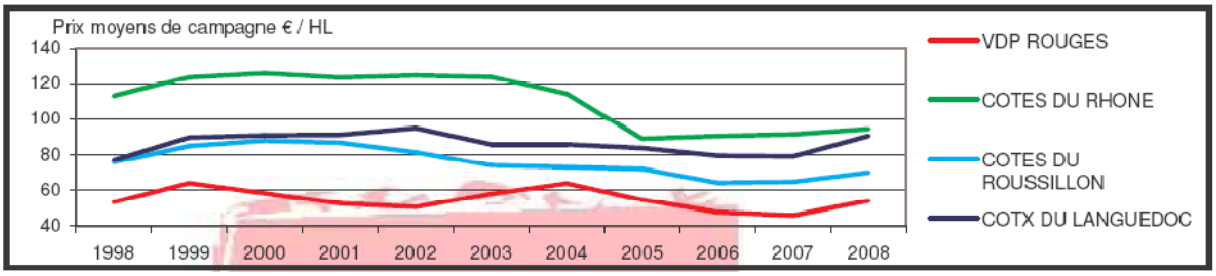
Selon les données du RGA 2000, ces exploitations disposent en moyenne de 2 UTA. Ces caractéristiques ont été validées par nos enquêtes de terrain.

c. Production et itinéraire technique

L'itinéraire technique choisi est celui d'une la vigne palissée en cépage avec récolte mécanique (CER, 2009a).

d. Caractéristiques technico-économiques

Le rendement qui a été choisi pour les calculs est le rendement moyen proposé par le CER (2009a). Selon les appellations et le type de production, les prix observés sont très variables (Figure 125). Cependant, on peut noter sur l'ensemble de la chronique un resserrement des écarts de prix.



Source : (CER, 2009a)

Figure 125 : Evolution des prix moyens de campagnes en Languedoc Roussillon

Nous avons utilisé un prix de vente moyen de 70€/HL. Cela permet de déterminer un produit de 5600 €/ha.

e. Présence des stocks d'intrants

La liste et la quantité maximale de chaque intrant sur l'exploitation type en viticulture est donnée au tableau 67.

Tableau 67: Type et coût des intrants stockés sur l'exploitation type en arboriculture

Intrants stockés	Prix (€/ha)	Montant maximum des intrants stockés (€)
Désherbant	60	1 320
Engrais	65	1 430
Phytosanitaire	264	5 808
	Total	8 558

Source : adapté de CER (2009a)

Les types d'intrants et l'évolution de leur quantité au cours du cycle de production sont donnés au tableau 68.

L'évolution de la présence des intrants déterminée sur la base de l'itinéraire technique de la vigne est donnée au tableau 68.

Tableau 68: Part de chaque type d'intrant présent sur l'exploitation par mois pour deux modes de gestion envisageables sur l'exploitation

	Mois											
Stock	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
désherbant	100 %	100 %	50 %	50 %	50 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	100 %	100 %
engrais	100 %	100 %	100 %	33 %	33 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	100 %	100 %
phytosanitaire	100 %	100 %	100 %	88 %	63 %	38 %	13 %	13 %	0 %	100 %	100 %	100 %
désherbant	100 %	100 %	50 %	50 %	50 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	100 %	100 %
engrais	100 %	100 %	100 %	33 %	33 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	100 %	100 %
phytosanitaire	100 %	100 %	100 %	88 %	63 %	38 %	13 %	13 %	0 %	100 %	100 %	100 %

Source : adapté de (CER, 2009b)

f. Stocks de produit

Les produits issus des récoltes ne sont pas stockés sur l'exploitation et sont directement amenés en coopérative.

g. Liste de matériel

La liste de matériel retenue pour l'exploitation type viticole est présentée au tableau 69. A chaque type de matériel est associé une quantité ainsi qu'un âge moyen.

Tableau 69 : Liste du matériel de l'exploitation type viticole

Dénomination	Nombre	âge
Tracteur viticole 2 roues motrices	1	5
Tracteur viticole 4 roues motrices	1	10
Pulvérisateur pneumatique 1000l traîné	1	5
Cuve 300l + rampe désherbage	1	10
Poudreuse portée 200l	1	10
Epandeur engrais 500l	1	15
Tondeuse (Girobroyeur)	1	5
Andaineur et broyeur sarments sur le sol	1	10
Matériel de travail du sol inter-rangs (actisol,…)	1	5
Ecimeuse	1	5
Bennes à vendanger 3000l	2	10
Prétailleuse sur fil	1	10
Matériel d'assistance à la taille	1	5
Epareuse 1,2m sur bras articulé	1	10
Tarrière, bétonnière	1	15
Divers viticulture	1	15
Matériel de travail inter-ceps	1	5

Source : (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010)

3. Exploitation spécialisée en céréales et maraîchage

a. Surface et UTA moyenne

Sur la base des données du RGA, les exploitations considérées sont celles classées dans l'OTEX « maraîchage », c'est-à-dire que ces exploitations tirent principalement leur revenu du maraîchage. Ces exploitations peuvent être classées en deux groupes sur la zone d'étude : moins de 5 ha ou plus de 5 ha. Les exploitations de moins de 5 ha correspondent plutôt à des exploitations maraîchères pures. Nous avons donc considéré le groupe des exploitations classées dans l'OTEX maraîchage de plus de 5 ha. Dans ces exploitations, la taille moyenne est de 15 ha avec une surface moyenne en maraîchage de 3 ha.

D'après les données du RGA, les exploitations de l'OTEX maraîchage supérieures à 5 ha disposent de 5,6 UTA de main d'œuvre. Ce chiffre ne correspond pas au retour d'expérience que nous avons eu auprès des experts. Cela s'explique en partie par le fait que la culture de céréale nécessite peu de main d'œuvre (1 UTA pour les exploitations céréalières de moins de 50 ha). Nous avons donc considéré que ce type d'exploitation a uniquement un employé permanent (l'exploitant). Cette hypothèse est cohérente avec les résultats des enquêtes de diagnostic de vulnérabilité réalisées par la mission « vulnérabilité agricole en zone inondable ». Ensuite, la main d'œuvre saisonnière est embauchée en fonction des tâches à effectuer au cours de l'année.

b. Production et itinéraire technique

Un assolement classiquement pratiqué sur la zone d'étude pour les exploitations mixtes « céréales/maraîchage » est la culture alternée de melon et de blé dur. Pour compléter l'activité maraichère sur l'année, la salade est cultivée en rotation avec le melon. Le tableau 70 représente les pourcentages d'occupation de chaque culture maraichère sur les 3 ha destinés à cette production. Pour le melon, la récolte s'échelonne de juin à octobre et pour la salade de novembre à mars. De plus, la salade commence à être plantée alors que le melon n'est pas complètement récolté, et inversement.

Tableau 70 : Présence de la récolte sur la parcelle

	Mois											
Culture	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Melon	0	60	80	100	100	100	80	60	40	20	0	0
Salade	60	40	20	0	0	0	0	0	60	80	100	80

c. Présence des stocks d'intrants

La liste et la quantité maximale de chaque intrant sur l'exploitation type est donnée au tableau 71.

Tableau 71: Type et coût des intrants stockés sur l'exploitation type en arboriculture

Intrants stockés	Prix (€/ha)	Montant maximum des intrants stockés (€)
Blé		
Semences (blé)	76	912
Phytosanitaires (blé)	55	660
Engrais (blé)	117	1 404
Désherbant (blé)	55	660
Toile non tissée	240	720
Salade		
Semences (salade)	4 422	13 266
Engrais (salade)	469	1 407
Paillage (salade)	471	1 413
Phytosanitaires (salade)	1 007	3 021
Melon		
Abris	767	2 301
Plant (melon)	3 461	10 383
Engrais (melon)	985	2 955
Paillage (melon)	520	1 506
Produit pollinisation	157	471
Phytosanitaires (melon)	381	1 143

Source : adapté de (Chambre d'Agriculture de la Drôme, 2007 ; Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2006a ; Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2006b)

L'évolution de la présence des intrants déterminée sur la base des itinéraires techniques de cultures de blé, melon et salade est donnée au tableau 72.

Tableau 72: Évolution de la quantité des intrants sur l'exploitation type maraîchage/céréale

	Mois											
Stock	**Janv**	**Fév**	**Mars**	**Avril**	**Mai**	**Juin**	**Juil**	**Août**	**Sept**	**Oct**	**Nov**	**Déc**
Blé												
Semences	0 %	0%	0	0	0	0	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	0
Phytosanitaires	100 %	100 %	100 %	0	0	0	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Engrais	50 %	50 %	25 %	25 %	0	0	100 %	100 %	100 %	75 %	75 %	75 %
Désherbant	33 %	0	0	0	0	0	100 %	100 %	67 %	67 %	33 %	33 %
Salade												
Toile non tissée	0	0	0	0	0	0	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Semences	0	0	0	0	0	0	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Engrais	50 %	40 %	0	0	0	0	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	50 %
Paillage	0	0	0	0	0	0	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	0
Phytosanitaires	46 %	0	0	0	0	0	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	77 %
Melon												
Abris	100 %	100 %	100 %	100 %	0	0	0	0	0	0	0	0
Plant	100 %	100 %	100 %	100 %	0	0	0	0	0	0	0	0
Engrais	100 %	100 %	100 %	40 %	40 %	36 %	0	0	0	0	0	0
Paillage	100 %	100 %	100 %	100 %	0	0	0	0	0	0	0	0
Produit pollinisation	100 %	0	0	100 %	100 %	100 %	0	0	0	0	0	0
Phytosanitaires	100 %	100 %	100 %	100 %	91 %	91 %	4 %	0	0	0	0	0

Source : (Chambre d'Agriculture de la Drôme, 2007 ; Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2006a ; Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2006b)

d. Stocks de produit

Les produits issus des récoltes ne sont pas stockés sur l'exploitation et sont directement amené à des organismes stockeurs pour les céréales ou des coopératives pour les produits maraichers.

e. Caractéristiques technico-économiques

Le rendement et les prix du melon sont issus des références technico-économiques éditées en 2006 par la Chambre d'agriculture du Vaucluse (tableau 73). La moyenne des rendements et des prix entre 2001 et 2006 a été retenue.

Tableau 73 : Rendements et prix de vente de la culture de melon entre 2001 et 2006

Année	Rendement	Prix	Produit (€/ha)	Charges totales (€/ha)	Charges de main d'œuvre (€/ha)	Marge brute hors prime (€/ha)	Valeur ajoutée (€/ha)
2001	20 000	1,0	20 000	15 188	8 105	4 812	1 2917
2002	20 000	1,2	23 000	15 553	8 470	7 447	15 917
2003	23 000	0,9	21 390	16 505	9 237	4 885	14 122
2004	23 000	1,1	26 220	17 104	9 745	9 116	18 861
2005	23 000	1,3	29 900	19 500	10 287	10 400	20 687
2006	23 000	1,1	24 150	20 475	10 723	3 675	14 398
Moyenne							
	22 000	1,1	24 000	17 400	9 428	6 723	16 150

Source : (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2006a)

Ces références permettent également d'estimer les frais de récolte et post récolte à environ 30% des charges totales, soit 5 100€/ha et donc les charges avant récolte à 12 300€/ha.

Le rendement et le prix moyen de la salade sont également issus d'une moyenne entre 2001 et 2006 d'après les références technico économiques éditées par la CA 84 en 2006 (tableau 74).

Tableau 74 : Rendements et prix de vente de la culture de salade entre 2001 et 2006

Année	Rendement	Prix	Produit (€/ha)	Charges totales (€/ha)	Charges de main d'œuvre (€/ha)	Marge brute hors prime (€/ha)	Valeur ajoutée (€/ha)
2001	80 000	0,4	28 000	15 886	9 525	12114	21 639
2002	80 000	0,3	20 800	16 158	9 787	4642	14 429
2003	80 000	0,4	30 400	17 159	10 335	13241	23 576
2004	80 000	0,3	21 600	17 617	10 986	3983	14 969
2005	80 000	0,3	24 800	18 136	11 503	6664	18 167
2006	80 000	0,3	27 200	18 821	12 001	8379	20 380
				Moyenne			
	80 000	0,32	25 500	17 300	10 690	8 171	18 860

Source : (Chambre d'Agriculture du Vaucluse, 2006a)

Ces références permettent d'estimer les charges de récolte et post récolte à 35% des charges totales soit environ 6 100 €/ha et les charges avant récolte à 11 200€/ha.

Les rendements et prix de vente retenus pour les cultures maraichères de l'exploitation type maraichage/céréale sont donnés au tableau 75.

Tableau 75 : Caractéristiques des cultures de l'exploitation type « maraîchage/céréales » de 15 ha

Cultures	Produit (€/ha)	Primes (€/ha)	Charges totales (€/ha)	Charges de main d'œuvre (€/ha)	Marge Brute hors prime (€/ha)	Valeur ajoutée (€/ha)
Melon	24 000	0	17 400	9 400	6 600	16 000
Salade	25 500	0	17 300	10 700	8 200	18 900

Les rendements et prix retenus pour le blé dur sont ceux de la campagne 2007 communiquées par la Chambre d'Agriculture de la Drôme. Les charges de récolte sont estimées à 90€/ha.

Tableau 76 : Rendements et prix de vente de la culture de salade entre 2001 et 2006

Année	Culture	Rendement	Prix	Produit hors prime PAC (€/ha)	Primes PAC (€/ha)	Charges totales (€/ha)	Charges avant récolte (€/ha)	Valeur ajoutée (€/ha)	Marge brute (€/ha)
2007	Blé Dur	50 qx/ha	21 €/qx	1 050	120	530	440	520	640

f. Liste de matériel

La liste de matériel retenue pour l'exploitation type en maraîchage/céréale est présentée au tableau 77. A chaque type de matériel est associé une quantité ainsi qu'un âge moyen.

Tableau 77 : Liste du matériel de l'exploitation type en maraîchage /céréale

Dénomination	Nombre	âge
Tracteur 4 roues motrices 90 cv	1	5
Tracteur 2 roues motrices 70 cv	1	10
Charrue réversible 3 corps	1	10
Combiné 2,5m herse + semoir céréales	1	10
Pulvérisateur à disques 3m	1	10
Vibroculteur	1	10
Semoir à maïs pneumatique 4 rangs	1	10
Distributeur d'engrais porté 1 000l 12m	1	5
Pulvérisateur porté 800l 12m	1	5
Broyeur de paille 3m	1	10
Benne 10t	2	10
Epareuse 1,2m sur bras articulé	1	5
Rouleau 4m	1	10
Dechaumeur	1	10
Sous soleuse	1	10
Bineuse	1	
Decrouteur	1	
Enrouleur 90 x300m	1	
Pompe irrigation	1	
Cureuse fossés	1	10
Lève palette	1	
Tondeuse (girobroyeur)	1	5
Compresseur	1	10
Poste à souder	1	10
Nettoyeur haute pression	1	10
Perceuse, meuleuse, etc.	1	10
Petit outillage	1	10
Divers (tracteur ancien, matériel de travail au sol, etc.)	1	> 10

Source : (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010)

Annexe 10 : Itinéraires techniques de quelques productions de la zone Rhône aval

1. Itinéraire technique de la culture du blé

Le cycle végétatif

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Sol nu												
Levée												
Tallage												
Montaison												
Epiaison												
Floraison												
Développement grain												
Grain cassant												

Itinéraire technique en fonction du cycle végétatif

	Sol nu	Levée	Tallage	Montaison	Epiaison	Floraison	Développement grain	Grain cassant
Labour								
Préparation lit semence								
Semis								
Traitement								
Engrais								
Desherbage								
Récolte								

Itinéraire technique dans l'année

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Labour												
Préparation lit semence												
Semis												
Traitement												
Engrais												
Desherbage												
Récolte												

période de réalisation optimale

période de réalisation possible

2. Itinéraire technique de la culture du riz

Le cycle végétatif

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	début avril	fin avril	début mai	fin mai	début juin	fin juin	début juillet	Fin juillet	Début août	fin août	début septemb	fin septembre
sol nu		■	■	■	■	■	■											
Levée								■	■	■								
1 feuille										■	■							
2-3 feuilles										■	■							
début tallage (3-4feuilles)										■	■							
Tallage												■	■	■				
montaison													■	■				
Epiaison														■	■			
Floraison																■	■	
maturation	■																	■

Itinéraire technique en fonction du cycle végétatif

	sol nu	Levée	1 feuille	2-3 feuilles	début tallage (3	Tallage	montaison	Epiaison	Floraison	maturation
brûlis des pailles	■									
Labour	■									
Nivellement	■									
fertilisation fond	■									
préparation lit semence	■									
Semis										
Désherbage		■	■	■		■				
Engrais azoté (50U)					■			■		
traitement pesticides (pyrale)								■		
Récolte										

Itinéraire technique dans l'année

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	début avril	fin avril	début mai	fin mai	début juin	fin juin	début juillet	Fin juillet	Début août	fin août	début septemb	fin septembre
brûlis des pailles		■																
Labour		■	■	■	■	■												
Nivellement		■	■	■	■	■												
fertilisation fond							■											
préparation lit semence							■											
Semis								■										
Désherbage								■		■	■		■					
Engrais azoté (2*50U)											■		■					
traitement pesticides (pyrale)														■	■			
Récolte	■																■	■

■ période de réalisation optimale

■ période de réalisation possible

3. Itinéraire technique de la culture de la poire

Le cycle végétatif

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Repos végétatif												
Floraison												
Pollinisation florale												
Induction florale												
croissance fruit												
Maturité												

Itinéraire technique en fonction du cycle végétatif

	Repos végétatif	Floraison	Pollinisation florale	Induction florale	croissance fruit	Maturité
Enherbement						
Taille						
Desherbage						
Fertilisation						
Protection phytosanitaire	?	?		?	?	?
Eclaircissage						
Récolte						

Itinéraire technique dans l'année

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Enherbement												
Taille												
Desherbage												
Fertilisation												
Protection phytosanitaire	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Eclaircissage												
Récolte												

période de réalisation optimale

période de réalisation possible

4. Itinéraire technique de la culture de la pomme

Le cycle végétatif

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Repos végétatif												
Floraison												
Induction florale												
croissance fruit												
Maturité												

Itinéraire technique en fonction du cycle végétatif

	Repos végétatif	Floraison	Induction florale	croissance fruit	Maturité
Enherbement					
Taille (hiver)					
Desherbage					
Fertilisation					
Protection phytosanitaire					
Taille en vert					
Eclaircissage					
Récolte					

Itinéraire technique dans l'année

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Enherbement												
Taille (hiver)												
Desherbage												
Fertilisation												
Protection phytosanitaire												
Taille en vert												
Eclaircissage												
Récolte												

période de réalisation optimale

période de réalisation possible

5. Itinéraire technique de la culture de la pêche

Le cycle végétatif

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Repos végétatif	■	■	■	■	■							■
Floraison						■						
Induction florale	■									■	■	■
croissance fruit							■	■	■	■		
Maturité									■	■	■	■

Itinéraire technique en fonction du cycle végétatif

	Repos végétatif	Floraison	croissance fruit	Maturité
Entretien enherbement	■			■
Taille (hiver)	■			
Desherbage	■			
Fertilisation	■			
Protection phytosanitaire	■	■	■	
Taille en vert			■	■
Eclaircissage			■	
Récolte				■

Itinéraire technique dans l'année

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Entretien enherbement	■						■			■		
Taille (hiver)	■	■										
Desherbage				■			■		■			
Fertilisation						■	■	■	■	■	■	■
Protection phytosanitaire				■	■	■	■	■	■			
Taille en vert								■		■		
Eclaircissage								■	■	■		
Récolte									■	■	■	■

■ période de réalisation optimale

■ période de réalisation possible

6. Itinéraire technique de la culture de l'abricot

Le cycle végétatif

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Repos végétatif	■	■	■	■	■							■
Floraison						■						
Pollinisation florale							■	■				
Induction florale								■	■			
croissance fruit									■	■		
Maturité										■	■	

Itinéraire technique en fonction du cycle végétatif

	Repos végétatif	Floraison	Pollinisation florale	Induction florale	croissance fruit	Maturité
Enherbement	■					
Taille	■				■	
Desherbage			■			
Fertilisation	■		■			
Protection phytosanitaire	■				■	
Eclaircissage			■			
Récolte						■

Itinéraire technique dans l'année

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Enherbement	■	■										■
Taille			■						■			
Desherbage							■	■				
Fertilisation					■			■				
Protection phytosanitaire	■			■					■			
Eclaircissage							■	■				
Récolte										■	■	

■ période de réalisation optimale

■ période de réalisation possible

7. Itinéraire technique de la culture de la pomme de terre

Présence sur la parcelle

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre

Itinéraire technique dans l'année

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Labour												
Fumure de fond												
Plantation												
Buttage												
Traitement												
Desherbage												
Récolte												

période de réalisation optimale

période de réalisation possible

8. Itinéraire technique de la culture de la tomate

Présence sur la parcelle

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Serre en verre chauffée (région méridionale)												

Itinéraire technique dans l'année

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Enlèvement paillage												
Arrachage plants												
Pose paillage												
Pose système irrigation												
Fertilisation												
Plantation												
Paillage												
Palissage												
Traitement												
Taille et effeuillage												
Blanchiement abri												
Récolte												

période de réalisation optimale

période de réalisation possible

9. Itinéraire technique de la culture de la salade

Présence sur la parcelle

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Pleine terre (Provence)												
Culture abritée												

	Mise en place culture	Récolte
Pleine terre	10/03-15/04	15/05-15/06
	15/09-15/11	15/11-30/03
Culture abritée (serre ou grand tunnel chauffé)	15/09-10/10	15/11-15/01
	01/11-30/11	15/01-28/02
	01/02-10/02	01/05-10/05

Itinéraire technique dans l'année

		Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Pleine terre	Labour												
	Fertilisation fond												
	plantation												
	protection plant												
	desherbage												
	Traitements												
	récolte												
culture abritée	Travail sol												
	Fertilisation fond												
	plantation												
	Travail sol												
	desherbage												
	Traitements												
	récolte												

période de réalisation optimale

période de réalisation possible

10. Itinéraire technique de la culture du melon

Itinéraire technique CA 84 (2006) quand plantation

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
Sous solage								■				
Labour		■										
Passage de disques								■				
Buttage			■									
Griffonnage		■										
Pose abri			■									
Aération tunnel				■	■							
Plantation			■									
Fertilisation		■		■	■							
Paillage			■									
Taille					■							
Pollinisation					■							
Nettoyage pied				■								
Traitement			■		■	■						
Irrigation Installation		■										
Irrigation Installation				■	■							
Irrigation fertilisante					■	■						
Enlèvement plastique chenille						■						
Enlèvement irrigation							■					
Récolte						■	■					
Broyage après récolte								■				
Enlèvement des arceaux								■				
Enlèvement paillage								■				

■ période de réalisation optimale

■ période de réalisation possible

Itinéraire technique CER (2008) quand semis

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
Disquage												
Rippage												
Labour												
Désherbage												
Fertilisation												
Griffonage												
Herse rotative												
Plasticage / Fertilisation / Phyto												
Pose gaine irrigation												
Montage du peigne (irrigation)												
Semis												
Pose chenille												
Protection phytosanitaire												
Suivi de l'irrigation												
Récolte												
Broyage												
Coupe plastique												
Ramassage plastiques / gaine irrigation												
Démontage réseau goutte à goutte												

période de réalisation optimale

période de réalisation possible

11. Itinéraire technique de la viticulture

Le cycle végétatif

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Repos végétatif		■	■	■	■							
Débourrement						◢	◢					
Floraison								■	■			
Croissance										■		
Veraison											■	■
Maturation	◢											■
Défeuillaison		■	■									

Itinéraire technique en fonction du cycle végétatif

	Repos végétatif	Débourrement	Floraison	Croissance	Veraison	Maturation	Défeuillaison
Prétaille	■						
Taille	■						
Palissage	■						
Epamprage		■	■				
Effeuillage					■		
Labour	■	■	■				
Désherbage	■	■					
Fertilisation	■		■				
Traitements			■	■			
Récolte						■	

Itinéraire technique dans l'année

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Prétaille		■	■	■	■							
Taille		■	■	■	■	■						
Palissage					■	■		■	■			
Epamprage							■	■				
Labour	■				■	■		■	■			
Désherbage							■	■				
Fertilisation et amendements	■	■	■			■	■					
Traitements								■	■	■		
Récolte	◢										◢	■

■ période de réalisation optimale

■ période de réalisation possible

Annexe 11 : Temps de réalisation des tâches pour les cultures des exploitations types

1. Temps de travail mensuel (h/ha) nécessaire pour la réalisation de tâches de production en fonction des cultures et procédés

culture	variété	procédé	tache	précision	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	aout	septembre	octobre	novembre	décembre
pomme	royal gala		taille		30	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40
pomme	royal gala		désherbage		0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	2	0
pomme	royal gala		fertilisation		0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
pomme	royal gala		traitement	(autre)	0	0	0	0	1	3	2	0	0	0	0	0
pomme	royal gala		traitement	tavelure	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
pomme	royal gala		traitement	puceron	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
pomme	royal gala		traitement	oïdium	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
pomme	royal gala		traitement	carpocapse	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
pomme	royal gala		taille en vert		0	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0
pomme	royal gala		éclaircissage chimique		0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0
pomme	royal gala		éclaircissage manuel		0	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0
pomme	royal gala		irrigation		0	0	0	0	2	4	6	4	0	0	0	0
pomme	royal gala		gyrobroyage		0	0	0	0	2	0	2	2	0	0	0	0
pomme	royal gala		andainage		0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
pomme	royal gala		broyage		0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
pomme	royal gala		deratisation		0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0	0
pomme	royal gala		récolte		0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
pomme	royal gala		emballage		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Annexe 11 : Temps de réalisation des tâches pour les cultures des exploitations types

salade	laitue	plein champ	labour 2 socs	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,5	0	0
salade	laitue	plein champ	passage disque	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
salade	laitue	plein champ	herse rotative	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	0
salade	laitue	plein champ	buttage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
salade	laitue	plein champ	debuttage	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
salade	laitue	plein champ	griffonnage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
salade	laitue	plein champ	enlèvement paillage	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
salade	laitue	plein champ	pose de toile non tissée	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
salade	laitue	plein champ	enlèvement toile	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
salade	laitue	plein champ	semis/plantation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	180
salade	laitue	plein champ	fertilisation	0,5	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1,5	0
salade	laitue	plein champ	paillage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0
salade	laitue	plein champ	traitement	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4
salade	laitue	plein champ	irrigation	9	12	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
salade	laitue	plein champ	préparation canalisation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
salade	laitue	plein champ	récolte	0	333,3	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0
salade	laitue	plein champ	enlèvement irrigation	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

melon		chenille	disquage	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
melon		chenille	rippage	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
melon		chenille	labour	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0
melon		chenille	désherbage	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
melon		chenille	fertilisation	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0
melon		chenille	griffonnage	0	0	2	0	2	2	0	0	0	0	0	0
melon		chenille	herse rotative	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
melon		chenille	plasticage/fertilisation/phyto	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
melon		chenille	pose gaine irrigation	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
melon		chenille	montage peigne (irrigation)	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
melon		chenille	semis	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0
melon		chenille	pose chenille	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0
melon		chenille	débâchage	0	0	0	0	0	35	0	0	0	0	0	0
melon		chenille	traitement	0	0	0	0	4	2	2	0	0	0	0	0
melon		chenille	irrigation	0	0	0	0	15	20	20	0	0	0	0	0
melon		chenille	récolte	0	0	0	0	0	0	0	160	0	0	0	0
melon		chenille	broyage	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
melon		chenille	coupe plastique	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
melon		chenille	ramassage plastique/gaine	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0
melon		chenille	démontage réseau goutte à	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
melon		chenille	conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	0

Annexe 11 : Temps de réalisation des tâches pour les cultures des exploitations types

blé	blé dur	labour	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,2	0	0
blé	blé dur	préparation lit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0
blé	blé dur	semis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,8	0
blé	blé dur	traitement	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
blé	blé dur	fertilisation	0	0,3	0	0,3	0	0	0	0	0,3	0	0	0,3
blé	blé dur	désherbage	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0	0,3	0
blé	blé dur	récolte	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

vigne	palissée	pretaille	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5
vigne	palissée	taille	8	8	8	0	0	0	0	0	0	0	8	8
	palissée	dépôt palissage	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
vigne	palissée	relevage palissage	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0
vigne	palissée	épamprage	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0
vigne	palissée	labour	0	2	2	0	2	2	0	2	0	2	0	0
vigne	palissée	désherbage	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
vigne	palissée	traitements	0	0	0	1,5	3	3	3	0	1,5	0	0	0
vigne	palissée	fertilisation	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
vigne	palissée	récolte	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0

Annexe 12 : Données techniques sur le matériel nécessaire à la réalisation des tâches

2. Matériels et intrants nécessaires à la réalisation des tâches de production pour la culture de la pomme

culture	SAU	tache	type	libelle
pomme	8	taille	matériel	Matériel d'assistance à la taille
pomme	8	désherbage	matériel	Tracteur arbo 4 roues motrices
pomme	8	désherbage	matériel	Cuve 300l + rampe désherbage
pomme	8	désherbage	intrant	herbicide
pomme	8	fertilisation	matériel	Tracteur arbo 4 roues motrices
pomme	8	fertilisation	matériel	Epandeur engrais
pomme	8	fertilisation	intrant	engrais
pomme	8	traitement	matériel	Tracteur arbo 4 roues motrices
pomme	8	traitement	matériel	Pulvérisateur arbo 1000l traîné
pomme	8	traitement	intrant	phytosanitaire
pomme	8	taille en vert	matériel	Matériel d'assistance à la taille
pomme	8	éclaircissage chimique	matériel	Tracteur arbo 4 roues motrices
pomme	8	éclaircissage chimique	matériel	Pulvérisateur arbo 1000l traîné
pomme	8	éclaircissage chimique	intrant	produit éclaircissage
pomme	8	éclaircissage manuel	matériel	Matériel d'assistance à la taille
pomme	8	irrigation	matériel	matériel irrigation
pomme	8	irrigation	intrant	eau
pomme	8	girobroyage	matériel	Tracteur arbo 4 roues motrices
pomme	8	girobroyage	matériel	Tondeuse (Girobroyeur)
pomme	8	andainage	matériel	Tracteur arbo 4 roues motrices
pomme	8	andainage	matériel	Andaineur et broyeur à bois sur le sol
pomme	8	broyage	matériel	Andaineur et broyeur à bois sur le sol
pomme	8	dératisation	matériel	Tracteur arbo 4 roues motrices
pomme	8	dératisation	matériel	Pulvérisateur arbo 1000l traîné
pomme	8	dératisation	intrant	dératiseur
pomme	8	récolte	matériel	Tracteur arbo 4 roues motrices
pomme	8	récolte	matériel	remorque
pomme	8	emballage	intrant	emballages

Annexe 13 : Évaluation des dommages directs

Cette annexe a pour objectif de présenter la méthode d'évaluation des dommages directs utilisée dans l'application du modèle EVA. Nous présentons les dommages à l'ensemble des composantes de l'exploitation avant de proposer une comparaison avec deux méthodes existantes pour l'évaluation des dommages aux parcelles.

1. Bâtiment agricole[88]

La fonction d'endommagement établie sur la base des entretiens exprime le temps de nettoyage nécessaire après une inondation en fonction de la hauteur d'eau (tableau 78). Le dommage est obtenu en multipliant ce temps par la valeur attribuée au travail estimée par le coût horaire de la main d'œuvre (12 €/h).

Tableau 78 : Fonction d'endommagement utilisée pour les bâtiments agricole

Hauteur d'eau (cm)	Temps de nettoyage (h)
0	0
0<h<50	48
50<h<100	80
h>100	112

Le montant de dommage est identique pour toutes les exploitations types et varie comme indiqué figure 126 en fonction de la hauteur d'eau

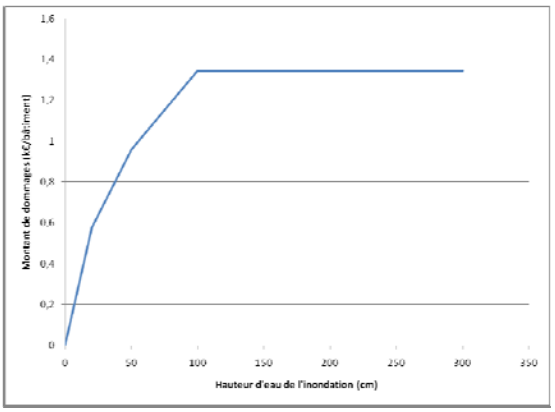


Figure 126: Montant des dommages au bâtiment par exploitation type (k€/bâtiment) en fonction des scénarios d'inondation

[88] Seuls les dommages au bâtiment d'exploitation sont considérés et non le bâtiment d'habitation. Le bâtiment d'exploitation correspond au hangar de stockage du matériel, des produits récoltés et des intrants.

2. Dommages au matériel

Pour chaque matériel, une fonction d'endommagement[89] permet de définir en fonction de la hauteur d'eau si le matériel est résistant, endommagé ou détruit et doit donc être réparé ou remplacé. Deux hypothèses sont implicites dans la démarche : 1) le matériel est considéré comme n'étant pas surélevé dans le bâtiment ; 2) aucun matériel n'est évacué au moment de l'inondation.

L'évaluation des dommages au matériel correspond au coût de restauration (réparation ou rachat) qui dépend de l'âge du matériel et de son prix. Dans l'application suivante, le coût de réparation est estimé à 15 % de la valeur du neuf[90]. L'évaluation du dommage associé à la destruction du matériel tient compte de sa vétusté. Si le matériel à moins de 5 ans, sa valeur est évaluée à 100 % de la valeur du neuf[91], 50 % s'il a de 5 à 10 ans et 20 % s'il a plus de 10 ans.

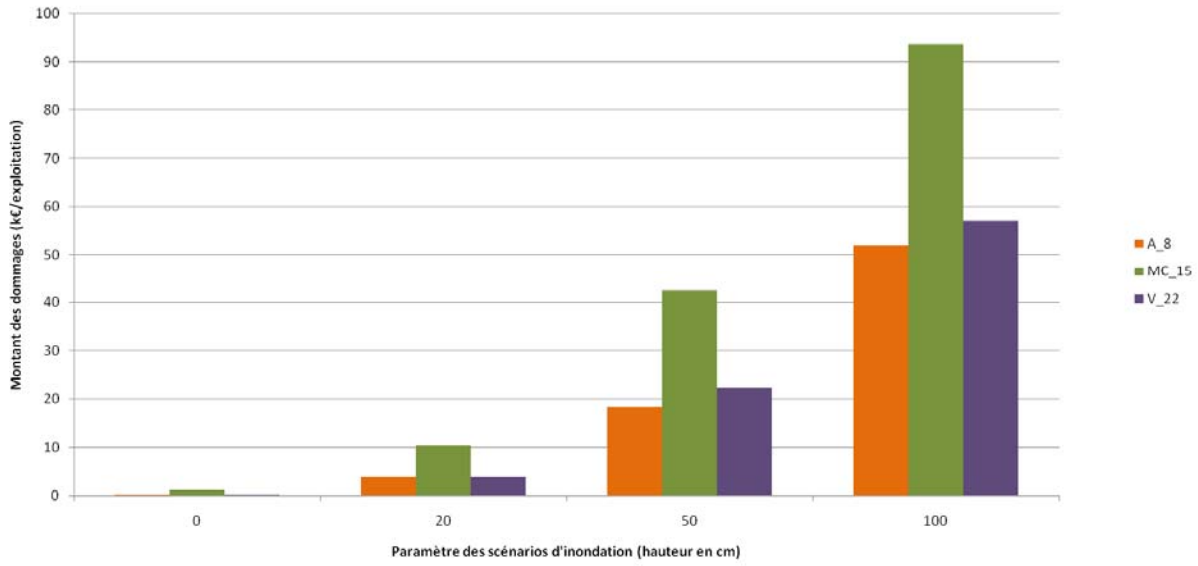


Figure 127 : Montant de dommages au matériel (k€) pour chaque exploitation type en fonction de la hauteur d'eau d'inondation

Les dommages au matériel ne dépendent que de la hauteur d'eau et sont les plus élevés pour l'exploitation mixte céréale / maraichage (92 k€/exploitation). Cela peut s'expliquer notamment par

[89] Ces fonctions ont été définies sur la base des travaux de la Chambre d'Agriculture du Gard (2010).

[90] Dans l'étude de la CA30, deux niveaux de réparation sont définis et leur coût est estimé à 15% et 25% du prix du matériel. Ces réparations incluent le nettoyage du matériel que nous avons déjà pris en compte dans l'évaluation des dommages au bâtiment. Nous considérons donc que le coût de la réparation seule est estimé par 15% du prix neuf du matériel.

[91] La valeur neuve affectée à chaque élément de matériel utilisée est issue du barème d'entraide, publié dans « La France agricole » du 22 août 2008.

le fait qu'elle doit disposer d'une plus grande diversité de matériel pour mener deux types de productions différentes.

3. Dommages aux stocks d'intrants

La fonction d'endommagement du stock d'intrants utilisée[92] définit le taux de destruction en fonction de la hauteur d'eau (tableau 79). Les stocks sont considérés comme n'étant pas surélevé.

Tableau 79: Fonction d'endommagement du stock d'intrants

Hauteur d'eau (cm)	Endommagement (%)
0<h<20	0
20<h<50	50
h>50	100

Source : (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010)

Le dommage au stock d'intrants est évalué sur la base du coût de rachat de la même quantité d'intrants.

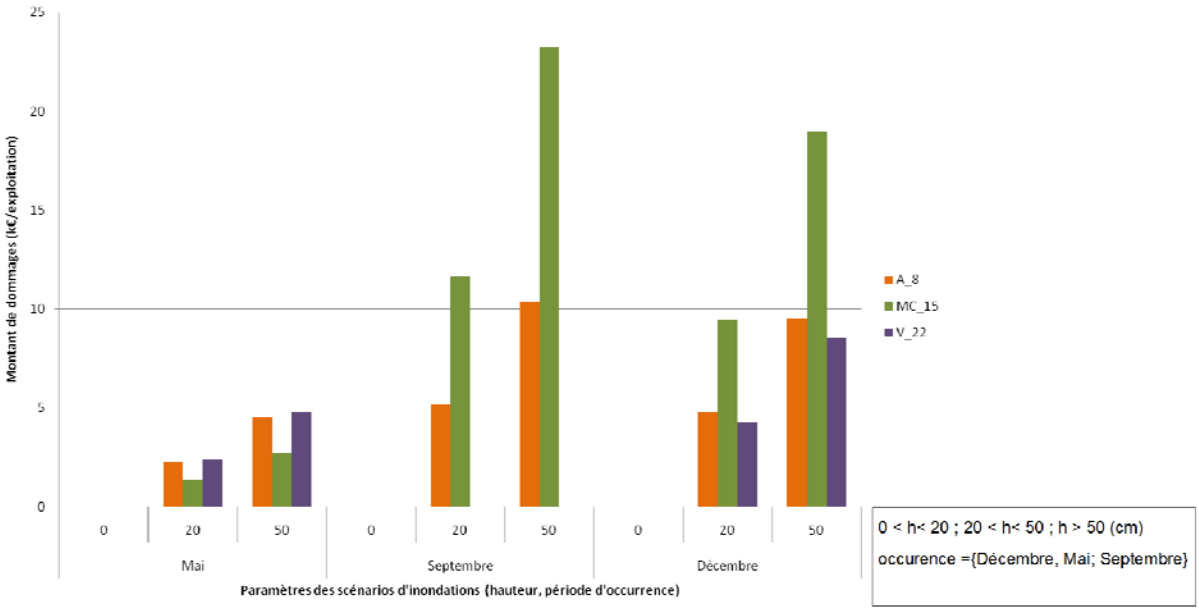


Figure 128 : Montant des dommages au stock d'intrants (k€/ exploitation) en fonction de la hauteur d'eau et de la période d'occurrence

De la même façon que pour le matériel, le dommage au stock d'intrants est plus élevé pour les exploitations mixtes céréale/maraichage pouvant atteindre jusqu'à 24 k€/exploitation en mai.

[92] Elle est issue des travaux de la Chambre d'Agriculture du Gard (2010).

4. Matériel végétal pérenne

Seules les exploitations types en arboriculture et viticulture disposent de matériel végétal ; respectivement, le verger et le vignoble. Les dommages sont estimés par le coût de restauration à mettre en œuvre pour permettre au matériel végétal de retrouver un état équivalent à la situation de référence ainsi que le manque à gagner induit. Le manque à gagner est évalué par la perte de valeur ajoutée (7 k€/ha/an pour l'exploitation A_8 et 2 K€/ha/an pour V_22).

L'actualisation[93] est réalisée sur trois années correspondant, comme indiqué sur la figure 129, aux trois années suivant l'inondation.

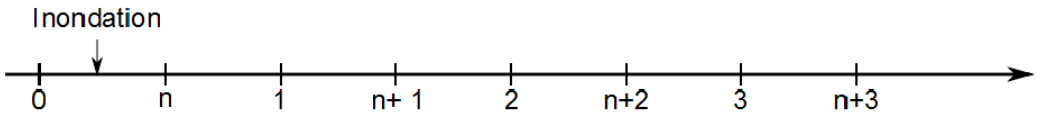


Figure 129 : périodes d'application du taux d'actualisation pour l'évaluation des dommages au matériel végétal

Le coût des dommages au matériel végétal pour les deux exploitations types concernées, A_8 et V_22, sont donnés au Tableau 80[94].

Tableau 80 : Coûts associés aux dommages sur le matériel végétal

Année	Coûts d'arrachage (k€/ha)		Coût de plantation (k€/ha)		Coût d'entretien supplémentaires (k€/ha)		Perte de valeur ajoutée (k€/ha)	
	A_8	V_22	A_8	V_22	A_8	V_22	A_8	V_22
n	3	3	-	-	-	-	Pris en compte dans la perte de récolte	Pris en compte dans la perte de récolte
n + 1	-		22	17	-	-	7	2
n + 2	-		-		2	-	7	2
n + 3	-		-		4	-	7	2

Montant total de dommages actualisé sur 3 années (k€/ha)

A_8	48
V_22	25

[93] Le taux d'actualisation utilisé est de 4% selon les recommandations du Commissariat général du plan.

[94] Les hypothèses de valorisation sont basées sur les références technico-économiques de la Chambre d'Agriculture du Vaucluse et le CER (2009a ; 2005). L'année n, les coûts considérés sont les frais d'arrachage. Trois années sont nécessaires avant le retour à une production normale. Les années suivantes, les coûts considérés sont les coûts de plantation et d'entretien du verger en formation et la perte de production.

Pour les vergers et vignobles, l'endommagement prend deux valeurs (0 ou 100 %) créant d'importants effets de seuil. Il est toujours de 100 % pour les fortes vitesses ou les durées de submersion supérieures à 10 jours sauf pendant la période de repos végétatif où le matériel végétatif est plus résistant. Les dommages au matériel végétal représentent des sommes élevées (48k€/ha en arboriculture et 25 k€/ha en viticulture). Les dommages surfaciques sont plus élevés en arboriculture mais, à l'échelle des exploitations types, ce montant est relativement pour les exploitations viticoles puisque leur taille moyenne est plus élevée (tableau 81).

Tableau 81 : Montant de dommage au matériel végétal pour les exploitations types

	Montant de dommages (k€)	
	Si le matériel végétal est détruit sur 50% des parcelles	Si le matériel végétal est détruit sur100% des parcelles
A_8	206	412
V_22	285	570

5. Dommages au sol

La fonction d'endommagement du sol[95] considère deux niveaux d'endommagement du sol[96] :

1. dépôt de débris
2. dépôt de débris et érosion partielle des sols

Une seule fonction d'endommagement a été développée pour toutes les cultures (Tableau 82).

Tableau 82 : Matrice d'endommagement du sol utilisée pour notre étude

Hauteur	Vitesse	Niveau d'endommagement
0 à 50 cm	0	1
	1	2
	2	2
50 cm à 1 m	0	1
	1	2
	2	2
> 1 m	0	2
	1	2
	2	2

[95] L'élaboration de la fonction d'endommagement repose principalement sur le barème des pertes de fonds constatées pour le Gard datant du 17 octobre 2002

[96] Nous ne traitons donc pas les cas de forte érosion dans l'application car si une forte érosion a pu être constatée suite à des inondations par les affluents du Rhône comme les Gardons, les inondations du fleuve lui-même sont peu concernées par ce phénomène hormis lors de rupture de digues.

Le coût du dommage est estimé par le coût de restauration c'est-à-dire le coût les actions devant être mises en œuvre (nettoyage, travail du sol, labour ou nivelage) en fonction du niveau d'endommagement et du type de culture[97] (Tableau 83).

Tableau 83 : Estimation des coûts des dommages aux sols pour les différents types de culture

Culture	Endommagement	Temps nettoyage (h/ha)	Mécanisation (€ /h)	Temps de travail du sol (€/ha	Mécanisation (€ /h)	Coût de main d'œuvre (€/h)	Coût total (€/ha)
Arboriculture	Niveau 1	60	17,5	-	-	12	1 770
	Niveau 2	120	17,5	32	18,5	12	4 517
Maraichage	Niveau 1	50	17,5	-	-	12	1 477
	Niveau 2	25	17,5	32	45	12	2 562
Céréale	Niveau 1	20	17,5	-	-	12	591
	Niveau 2	10	17,5	32	45	12	2 119
Viticulture	Niveau 1	23	17,5	-	-	12	680
	Niveau 2	46	17,5	32	18,5	12	4517

8.7.3.1. Résultats pour les exploitations types

Les dommages surfaciques au sol pour des parcelles en arboriculture sont les plus élevés (près de 4,5 k€/ha sur la figure 130). La figure 131 présente le niveau de dommage au sol rapporté aux surfaces de cultures pour chaque exploitation type. L'exploitation type en viticulture génère les dommages les plus élevés plus de 50 k€ pour les vitesses importantes et les fortes hauteurs d'eau.

[97] Ces coûts sont estimés sur la base du barème des pertes de fonds du Gard en 2002.

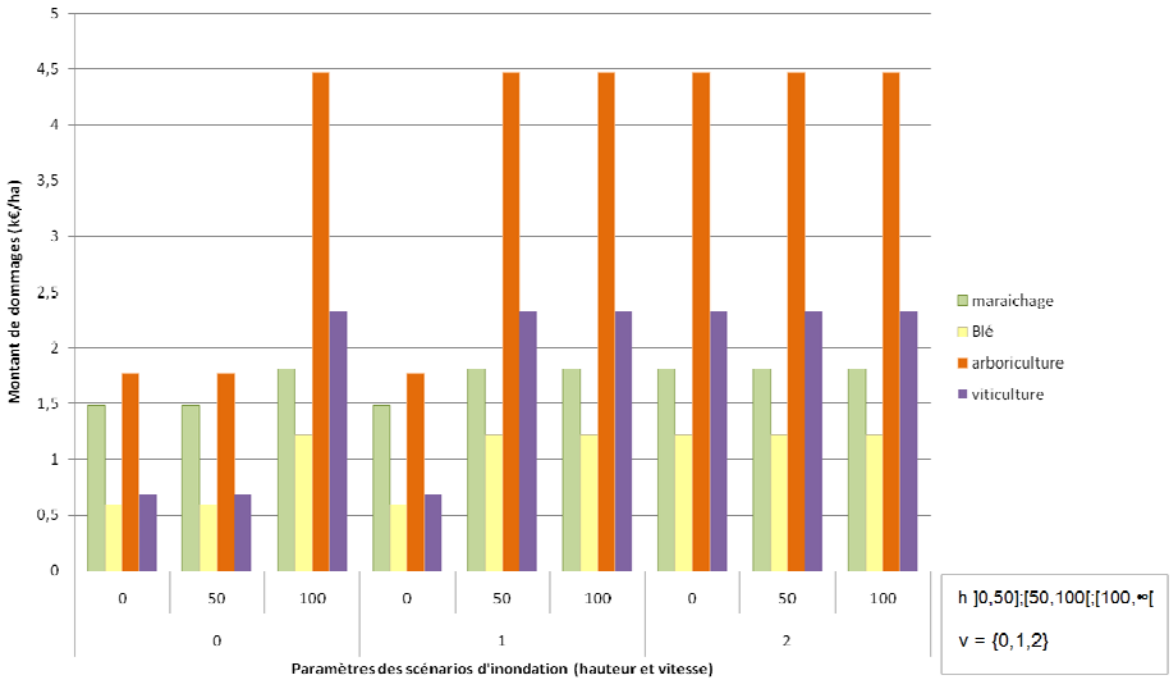


Figure 130 : Montant des dommages au sol (€/ha) en fonction des cultures et des scénarios d'inondation

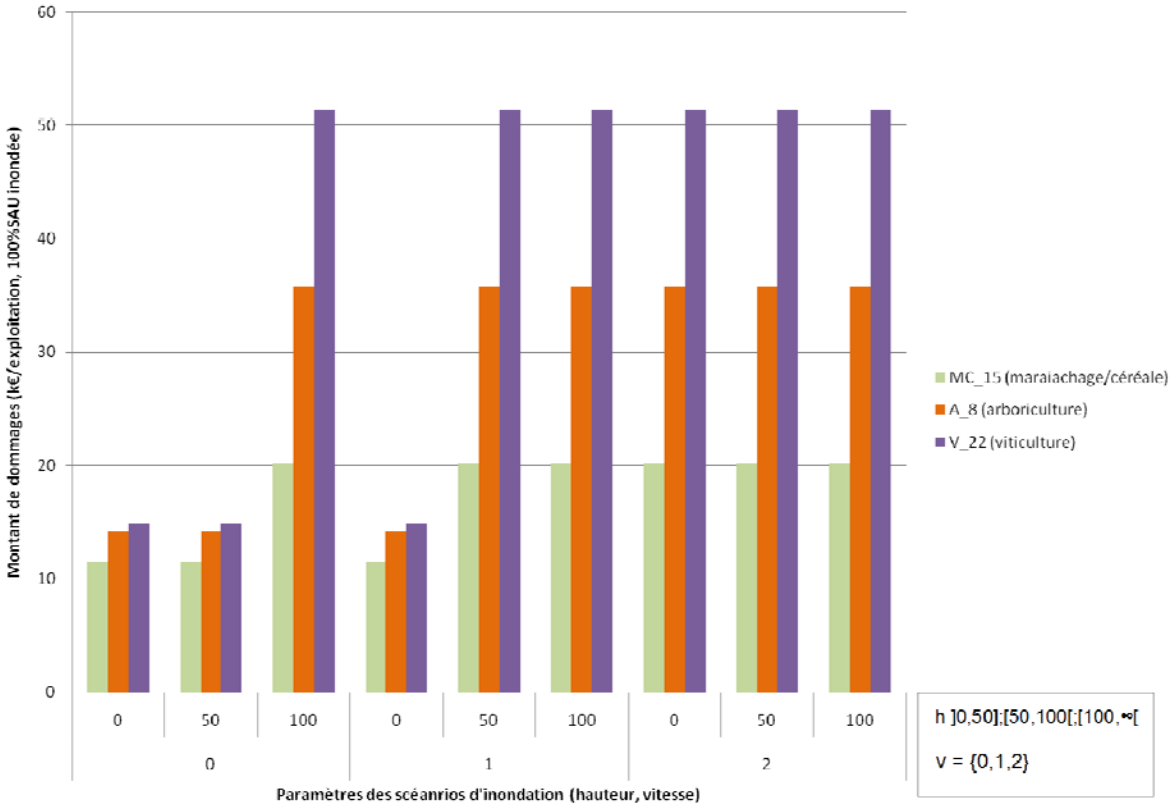


Figure 131 : Montant des dommages au sol (€/exploitation type) en fonction des cultures et des scénarios d'inondation

6. Dommage direct aux cultures

Dans le modèle EVA, le dommage aux cultures prend en compte les variations de valeur ajoutée à plusieurs niveaux :

- l'endommagement direct des cultures,
- la non réalisation de tâches liée à l'impossibilité d'accéder aux parcelles pendant l'inondation,
- la réalisation selon un mode alternatif (profil Prestation ou Solidarité) ou la non réalisation de tâches (profil Interne) liée à l'impossibilité d'utiliser le matériel requis ou de mobiliser la main d'œuvre suffisante.

Nous présentons ici, uniquement les dommages économiques directs (perte de valeur ajoutée liée à l'endommagement direct des cultures). L'évaluation de la perte de produit repose sur les hypothèses de rendement et de prix de vente, présentées au chapitre 6 pour chaque exploitation type[98].

Les montants de dommages aux cultures varient en fonction de la saison pour toutes les exploitations. Cependant, pour les deux exploitations types en monoculture pérenne, certaines saisons (mai pour l'arboriculture et mai et septembre pour la viticulture) provoquent des dommages plus importants. Pour l'exploitation mixte maraichage/céréale, le dommage sur chaque culture prise séparément varie mais le dommage moyen à l'hectare est relativement constant et élevé.

[98] Les prix et rendements de chacune des cultures peuvent être très variables d'une année sur l'autre ; de l'ordre de 10 % pour les rendements mais pouvant atteindre plus de 100 % pour les prix. Il serait donc utile par la suite, d'effectuer une analyse de sensibilité pour déterminer la robustesse des résultats.

a. Exploitation type en arboriculture

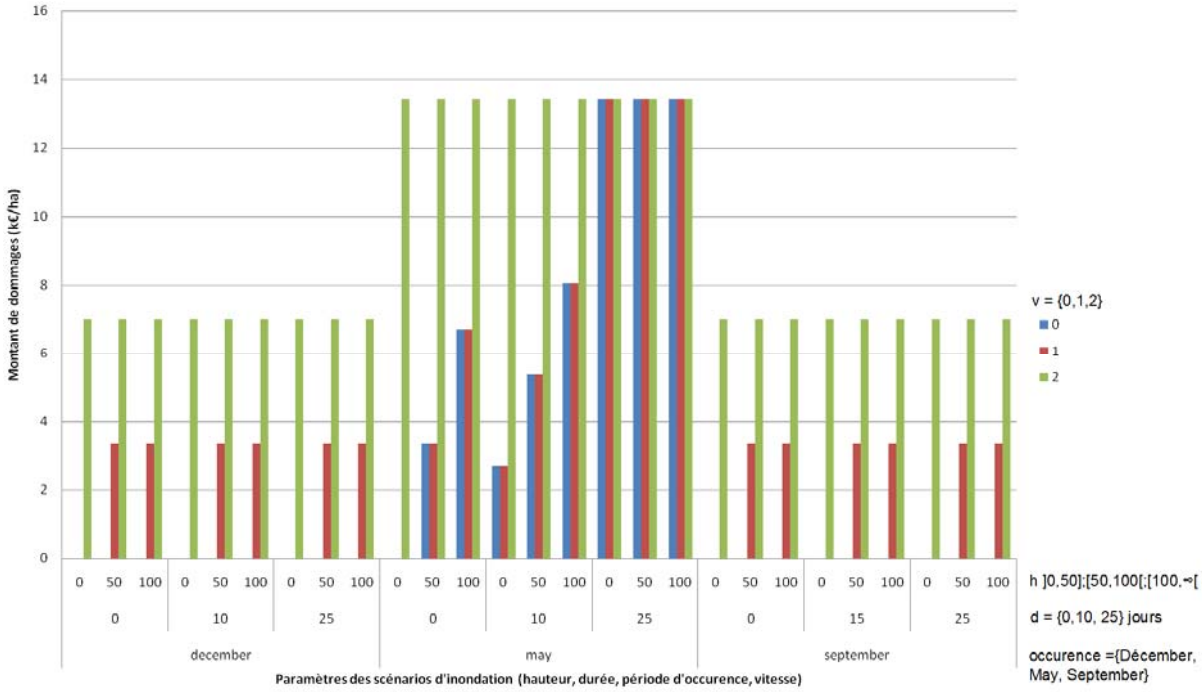


Figure 132 : Montant des dommages aux cultures de pomme Royal Gala de l'exploitation type arboriculture en fonction des scénarios d'inondation

Quelle que soit la période d'occurrence, la vitesse joue un rôle prépondérant sur le dommage à la culture en arboriculture. Cela est principalement lié à la perte de matériel végétal car lorsque le matériel végétal est détruit, la récolte portée l'est également. Pour des vitesses faibles, le dommage est compris entre 0 et 14 k€/ha. Pour des vitesses importantes, le dommage est toujours supérieur à 7 k€/ha. Le dommage maximal est atteint au moment de la fin de la période végétative (mars) et jusqu'à la récolte (fin août).

Pour les faibles vitesses, le dommage n'intervient qu'entre la période de floraison (avril) et jusqu'à la récolte (fin août) ; aucun dommage n'est envisagé pendant la période végétative[99]. Dans ce cas, la vulnérabilité d'une exploitation inondée par un scénario de vitesse faible même avec des durées longues ne provient pas spécifiquement du dommage à la culture.

[99] La culture choisie en arboriculture i.e. la pomme est un fruit à pépin, culture assez peu sensible à l'inondation ce qui n'est pas le cas des cultures de fruits à noyaux (pêche, abricot…) qui sont généralement plus sensibles.

b. Exploitation type en viticulture

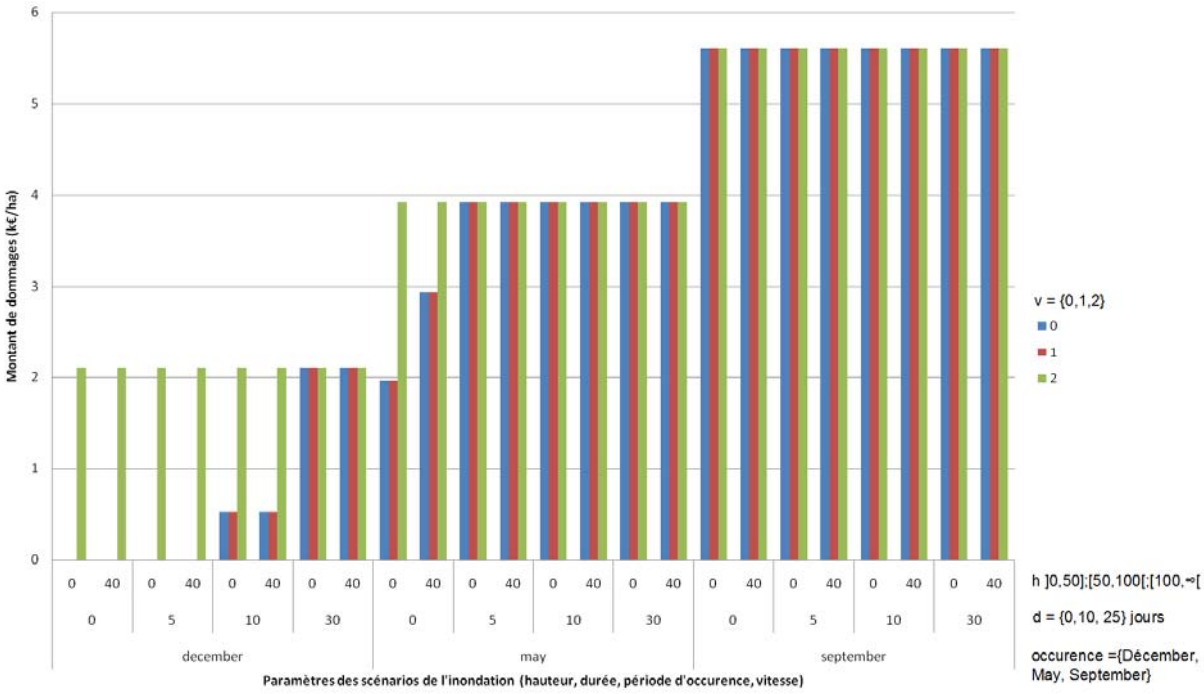


Figure 133 : Montant des dommages aux cultures de raisin de l'exploitation type viticulture en fonction des scénarios d'inondation

L'analyse des dommages à la culture de vigne se rapproche de celle proposée sur l'arboriculture.

Le facteur vitesse joue un rôle prépondérant en lien avec la destruction du matériel végétal et pour une forte vitesse, le dommage maximal est toujours atteint (supérieur à 2k€/ha). Le dommage est compris entre 0 et 5,6k€/ha pour des vitesses faibles.

La culture de la vigne est globalement peu sensible aux inondations en dehors de la période allant de la floraison (mai), à la récolte (septembre). Septembre correspond à la période de la récolte. C'est donc la saison où le dommage potentiel est le plus important.

Pour les inondations d'hiver après récolte, la vulnérabilité n'est pas liée au dommage aux cultures.

c. Exploitation type en maraîchage/céréale

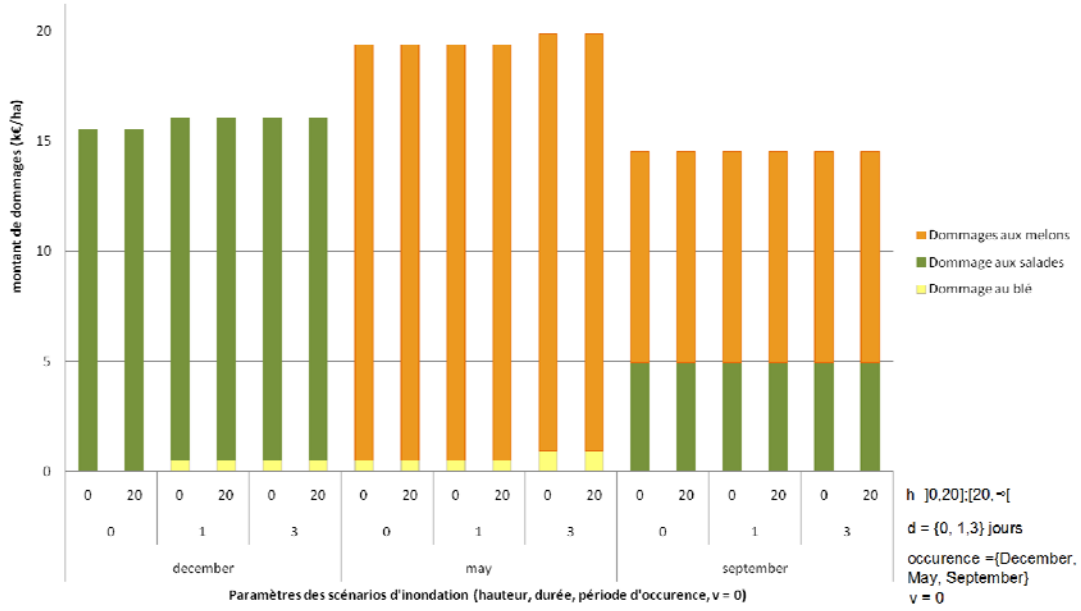


Figure 134 : Montant des dommages aux cultures (k€/ha) de l'exploitation mixte maraichage/céréale en fonction des scénarios d'inondation

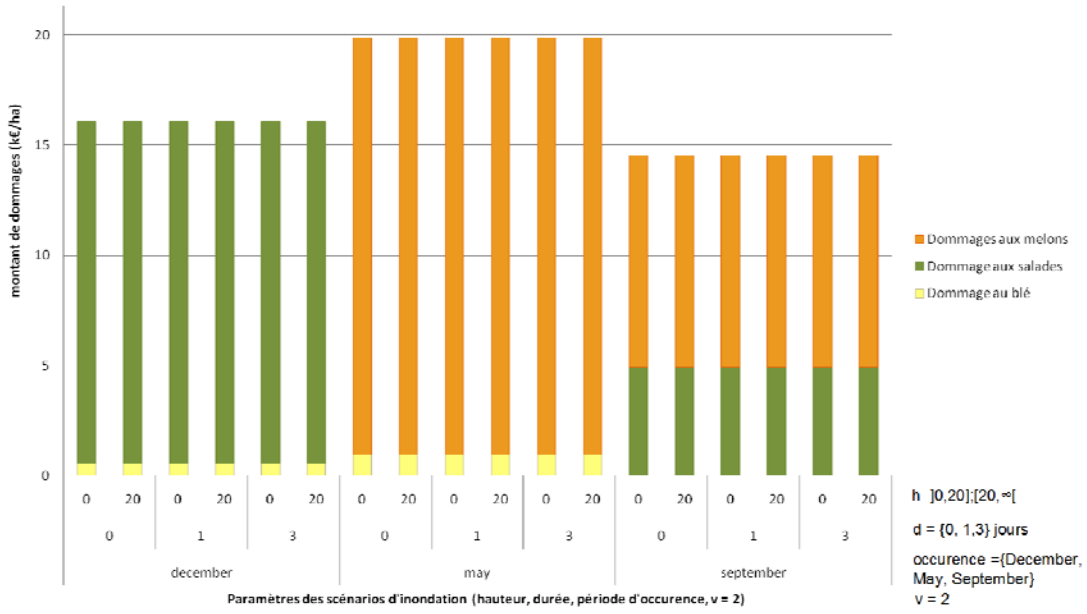


Figure 135 : montant des dommages aux cultures (k€/ha) de l'exploitation mixte maraichage/céréale en fonction des scénarios d'inondation

La vitesse et la durée ont très peu d'influence sur les dommages aux cultures annuelles (cf. comparaison de la figure 134 et figure 135). De plus, dès une hauteur d'eau faible, les cultures sont presque toujours endommagées à 100 %. L'influence de la période d'occurrence de l'inondation est importante pour chaque culture mais le dommage total aux cultures pour l'exploitation type MC_15 est presque constant sur l'année, quels que soient les paramètres de l'inondation.

7. Dommages totaux aux parcelles et comparaison avec les autres méthodes existantes

Les montants de dommage direct aux cultures, au matériel végétal et au sol peuvent être exprimés par unité surfacique. Nous proposons dans cette section une comparaison des montants de dommages totaux aux parcelles pour l'arboriculture et la viticulture, obtenus avec la méthode EVA et deux autres méthodes développées dans le contexte de la basse vallée du Rhône, à savoir l'Étude Globale sur le Rhône commanditée par le Plan Rhône (SIEE et al., 2003) et une étude menée par la Chambre d'Agriculture du Gard (CA30) pour le Syndicat Mixte interrégional d'Aménagement des Digues du delta du Rhône et de la Mer (SYMADREM) (Chambre d'Agriculture du Gard, 2010).

a. Comparaison pour de faibles vitesses d'aléa

Pour la période végétative, illustrée par le mois de décembre, les dommages sur les parcelles sont faibles pour l'arboriculture (figure 136) et la viticulture (figure 137), Avec la méthode EVA (en bleu sur les figures), un dommage minimum (quelques k€/ha) est pris en compte et correspond à la restauration du sol des parcelles. Pour la viticulture, la méthode de la CA30 (en vert sur les figures) et la méthode EVA qui reposent sur les mêmes courbes d'endommagement considèrent une perte de matériel végétal pour les durées de submersion supérieures à 30 jours. La méthode EGR (en rouge) ne prend en compte aucun dommage sur la période végétative[100].

Hors période végétative, des différences importantes entre les montants de dommages existent entre les trois méthodes. EGR propose généralement des dommages inférieurs et la CA30 des dommages supérieurs.

Cette différence provient principalement des hypothèses de valorisation retenues par les trois méthodes. Ainsi, EGR retient comme indicateur de dommage sur les récoltes, la marge brute quelle que soit la période d'occurrence. Ce choix n'est pas pertinent pour l'évaluation économique qui retient la valeur ajoutée et minimise le montant de dommages[101]. Par contre, la CA30 utilise toujours le produit brut ce qui n'est pas non plus toujours pertinent en fonction de la période d'occurrence. En comparaison de la méthode de la CA 30 et de l'EGR, la méthode EVA se situe entre ces deux extrêmes.

[100] La méthode EGR ne prend en compte de modulation des dommages en fonction de la durée de submersion. Les courbes d'endommagement ont été construites pour des scénarios d'inondation longue.

[101] Toutes les charges variables (main d'œuvre incluse) sont retirées quelle que soit la période d'occurrence.

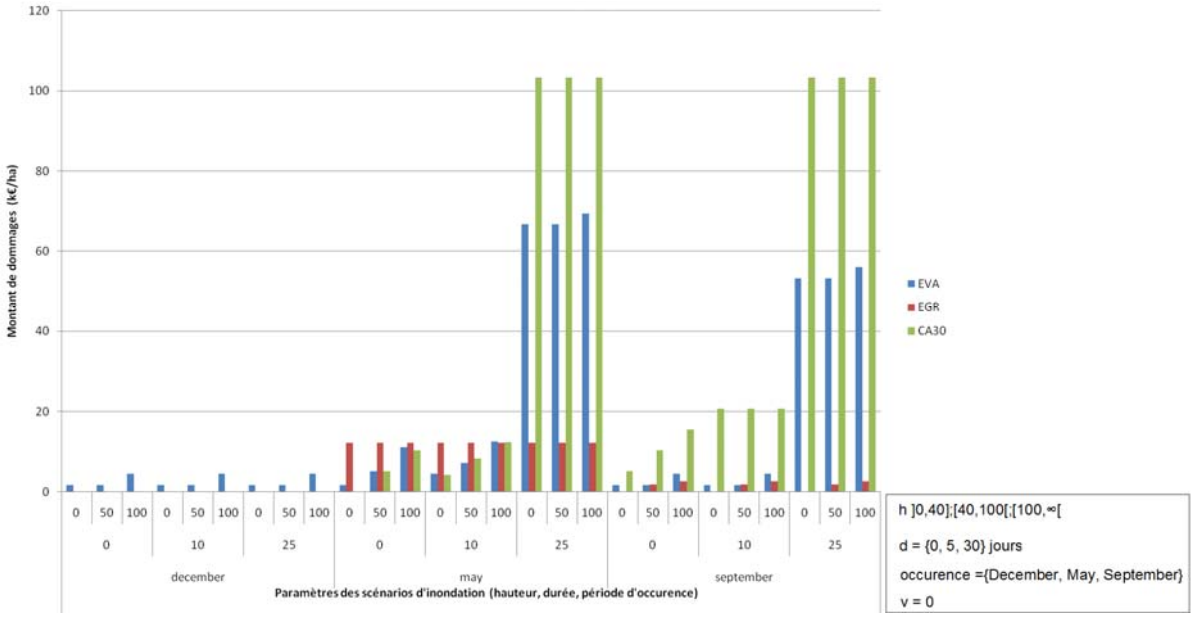


Figure 136 : comparaison de trois méthodes d'évaluation des dommages totaux sur des parcelles en arboriculture (k€/ha) pour une vitesse d'inondation faible

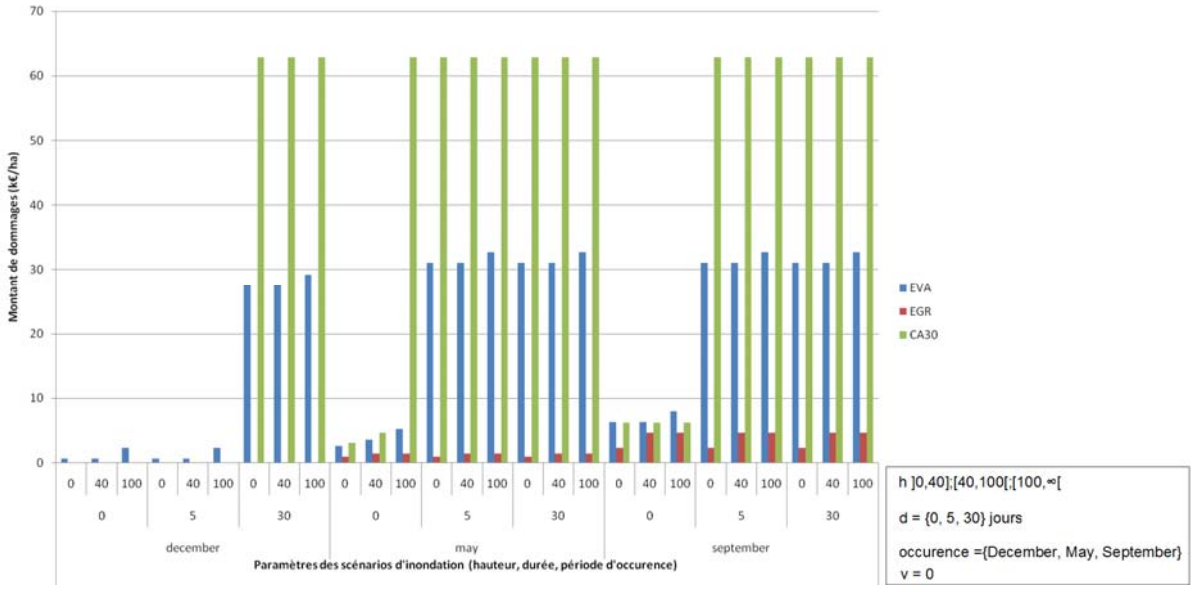


Figure 137 : comparaison de trois méthodes d'évaluation des dommages totaux sur des parcelles en viticulture (k€/ha) pour une vitesse d'inondation faible

b. Comparaison pour de fortes vitesses d'aléa

L'endommagement de toutes les composantes localisées sur les parcelles est maximal pour les fortes vitesses. Les écarts entre les méthodes EVA, EGR et CA30 proviennent principalement de la valorisation des dommages. Des écarts très importants proviennent notamment de l'estimation des pertes de matériel végétal[102].

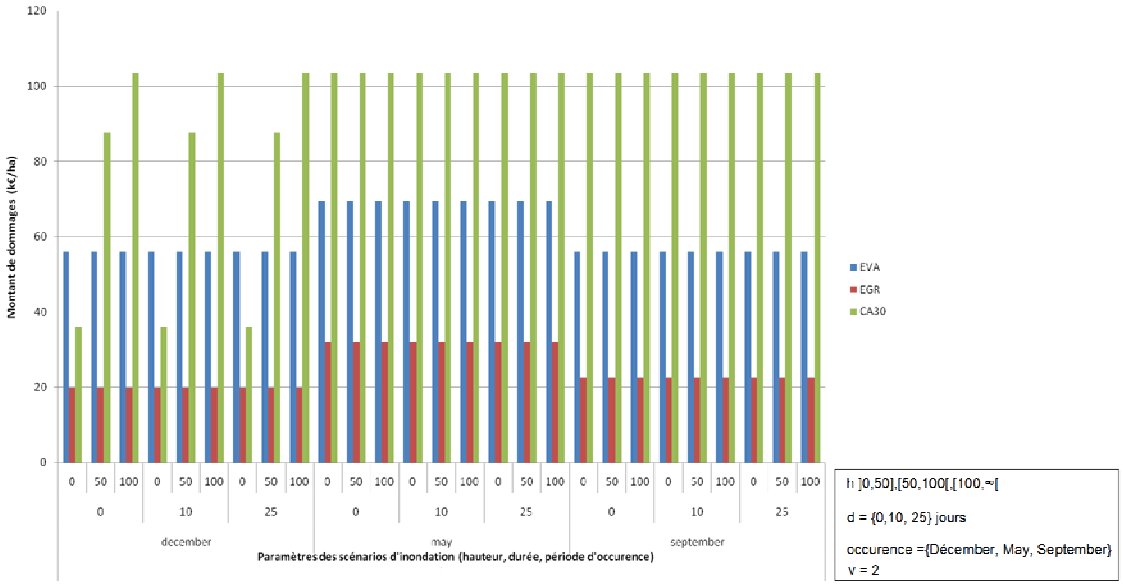


Figure 138 : comparaison de trois méthodes d'évaluation des dommages totaux sur des parcelles en arboriculture (k€/ha) pour une vitesse d'inondation forte

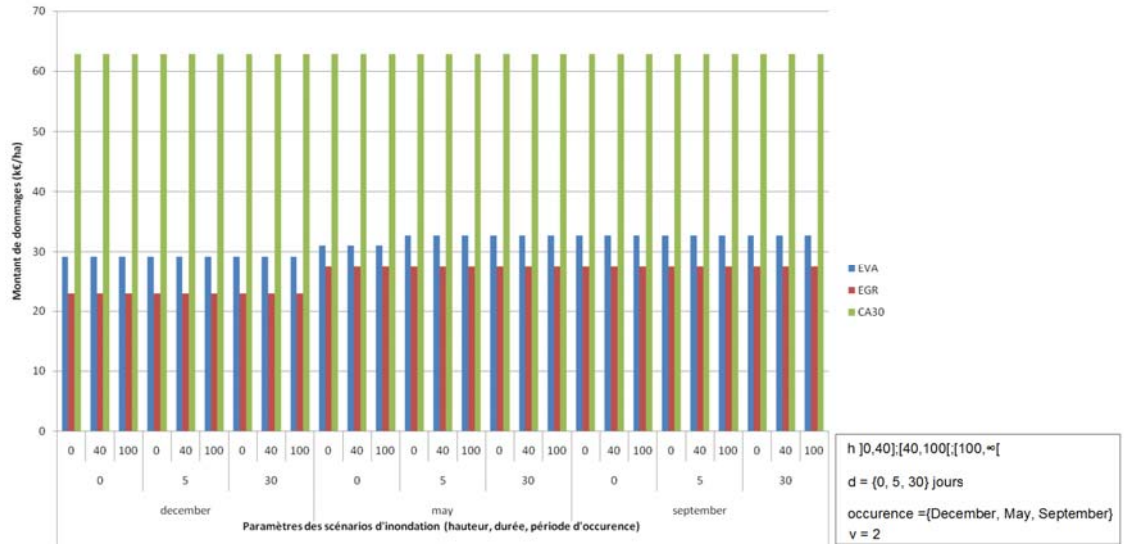


Figure 139 : comparaison de trois méthodes d'évaluation des dommages totaux sur des parcelles en viticulture (k€/ha) pour une vitesse d'inondation forte

[102] C'est pourquoi nous nous sommes efforcés de préciser les hypothèses de valorisation attenantes à tous les coûts de restauration utilisés.

8. Conclusions sur les dommages directs

De manière générale, pour les faibles hauteurs d'eau, les dommages au sol (restauration des sols) représentent une part importante des dommages totaux, surtout pour les cultures pérennes où les temps de nettoyage sont plus importants que pour les cultures annuelles.

Pour les hauteurs d'eau plus importantes, ce sont les dommages au matériel et intrants qui généralement représentent la part la plus importante de dommage.

Cependant, dans le cas de l'exploitation mixte céréale-maraichage, les dommages aux cultures représentent une part importante des dommages, quelle que soit la période d'occurrence et de fait, la part relative des autres catégories de dommage est plus faible.

Les dommages au matériel dépendent de la hauteur d'eau. Les dommages induits liés à l'indisponibilité du matériel sont attendus pour des hauteurs moyennes à fortes.

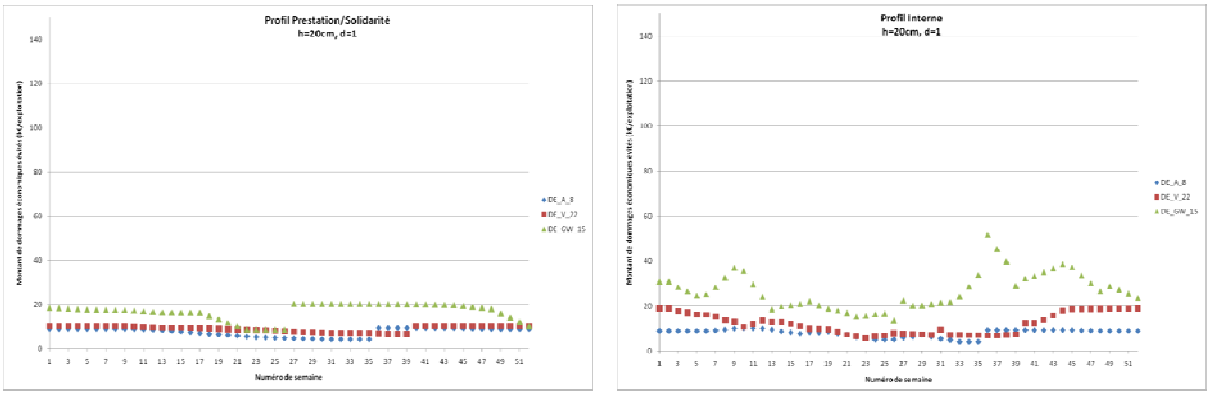
Il ya une forte distinction entre cultures pérennes et cultures annuelles. Notamment, concernant les inondations avec une forte vitesse, en raison de la perte de matériel végétal.

Pour les cultures pérennes, certains scenarios d'inondation avec une faible vitesse et durée longue, en période végétative entraînent peu de pertes de récolte et de matériel végétal. Sur ce type de scénarios, il est important de tester l'importance des effets induits, ce que nous développons dans les sections suivantes.

Annexe 14 : Dommages évités par les mesures de réduction de la vulnérabilité sur les trois exploitations types

1. Surélévation d'un bâtiment (M1)

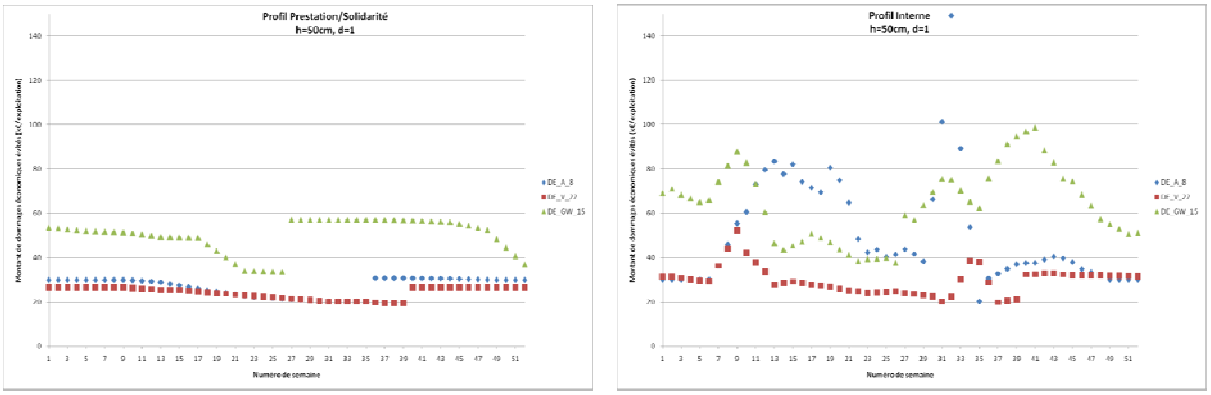
a. Calcul des dommages évités pour h = 20 cm



(a) (b)

Figure 140 : Montant de dommages économiques évités (k€/exploitation) par la surélévation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

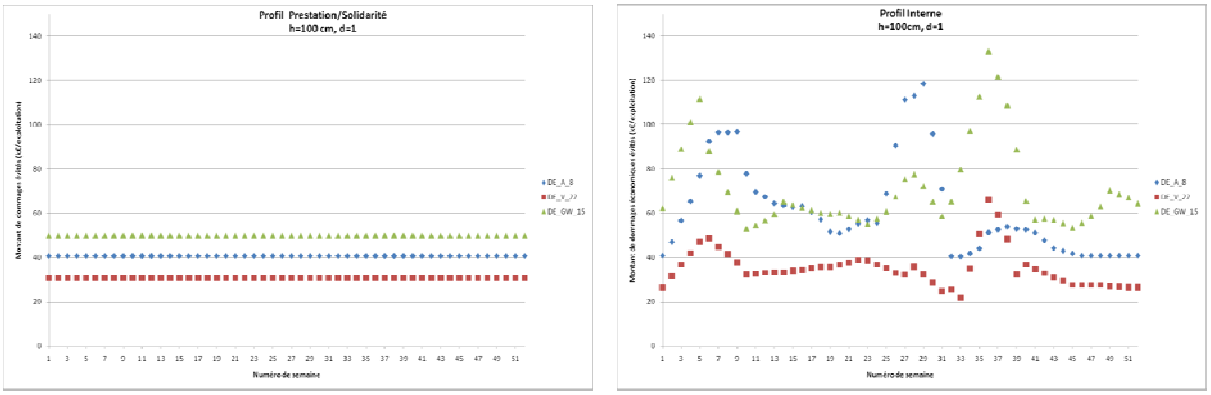
b. Calcul des dommages évités pour h = 50 cm



(a) (b)

Figure 141 : Montant de dommages économiques évités (k€/exploitation) par la surélévation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 50cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

c. Calcul des dommages évités pour h = 100 cm

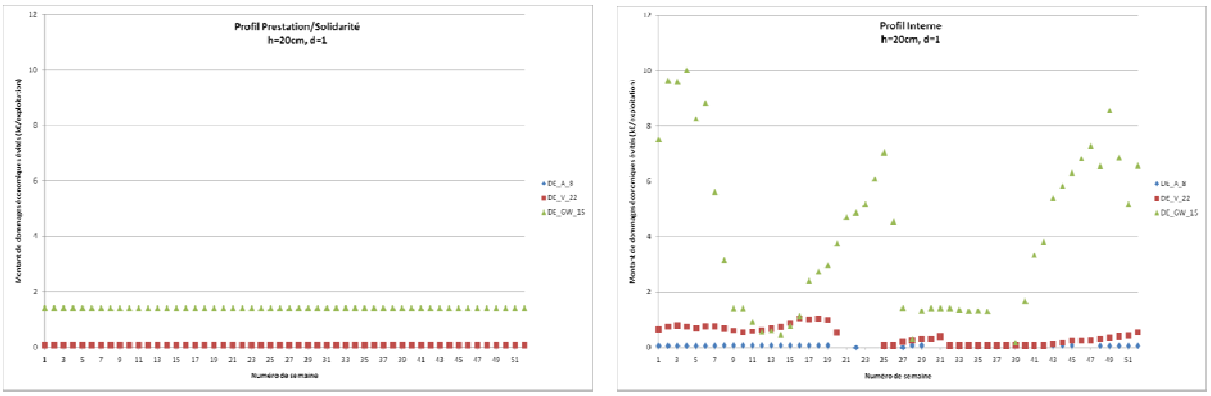


(a) (b)

Figure 142 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 100cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

2. Surélévation d'une liste de matériel (M2)

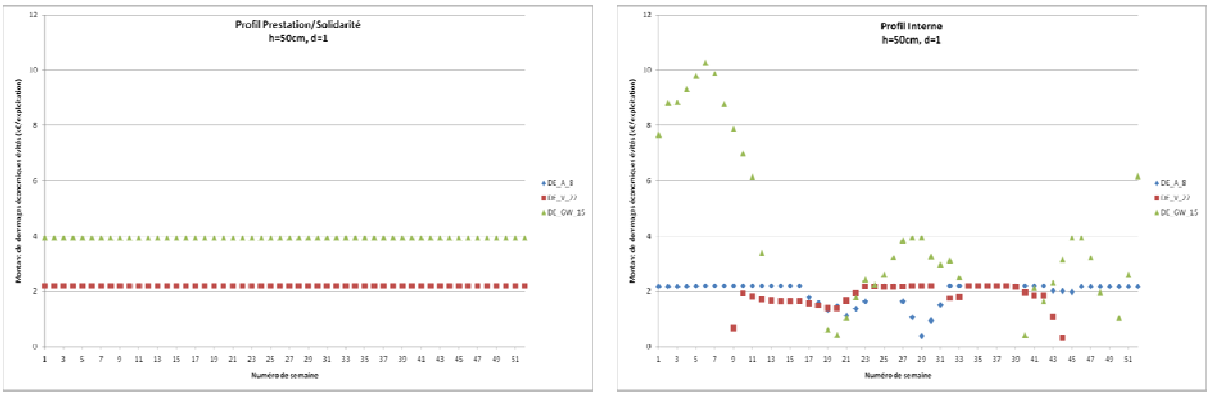
a. Calcul des dommages évités pour h = 20 cm



(a) (b)

Figure 143 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation de certains matériels pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

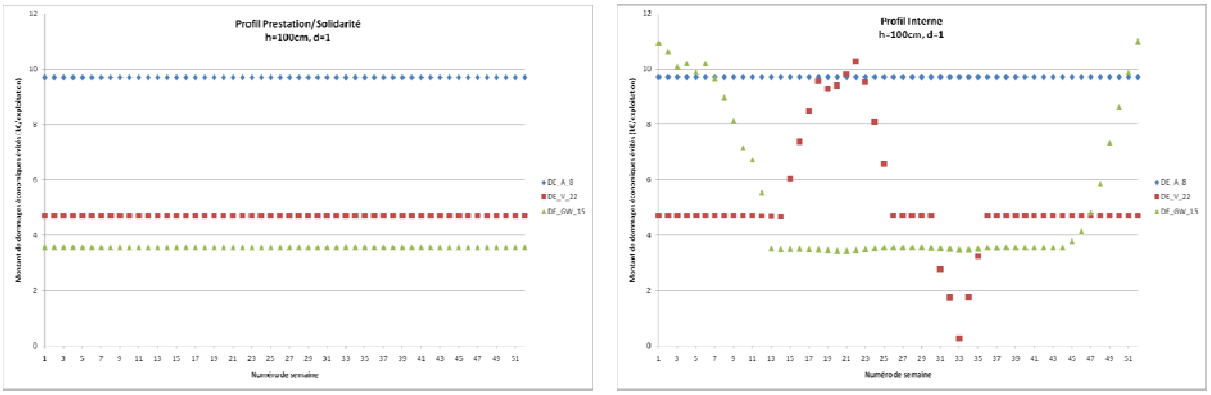
b. Calcul des dommages évités pour h = 50 cm



(a) (b)

Figure 144 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation de certains matériels pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 50cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

c. Calcul des dommages évités pour h = 100 cm



(a) (b)

Figure 145 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation de certains matériels pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 100cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

3. Surélévation d'une liste d'intrants

a. Calcul des dommages évités pour h = 20 cm

L'analyse se porte uniquement sur le Profil Prestation car le modèle EVA n'intègre pas, à ce stade, de contraintes sur l'activité liée à une indisponibilité.

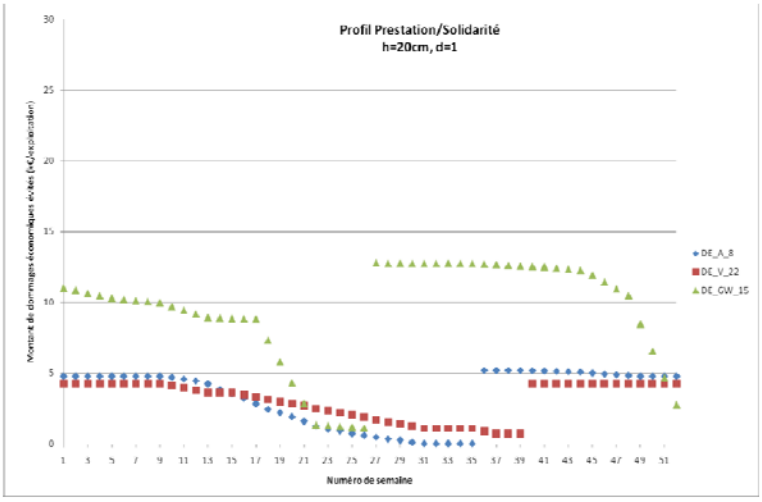


Figure 146 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation des intrants pour une inondation de 20cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

b. Calcul des dommages évités pour h = 50 cm

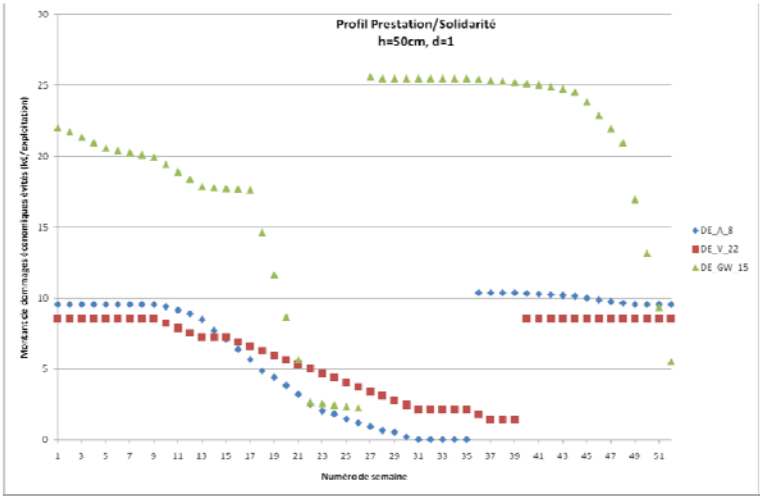


Figure 147 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation des intrants pour une inondation de 50cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

c. Calcul des dommages évités pour h = 100 cm

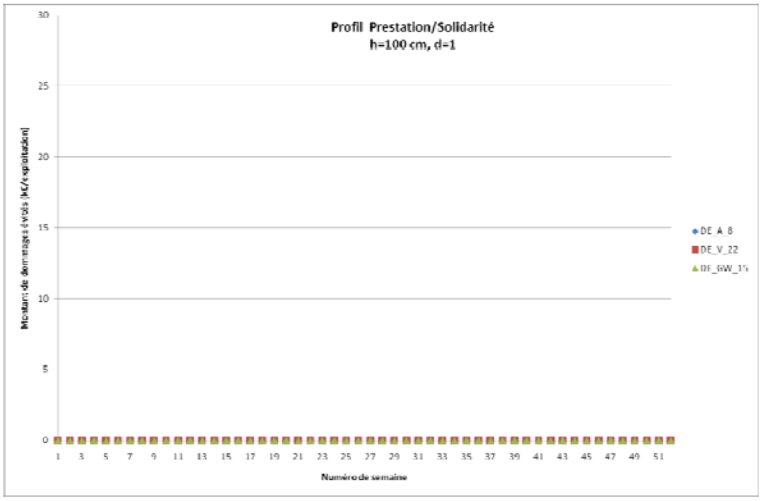


Figure 148 : Dommages évités (k€/exploitation) par la surélévation des intrants pour une inondation de 100cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

4. Surélévation des plantations (M4)

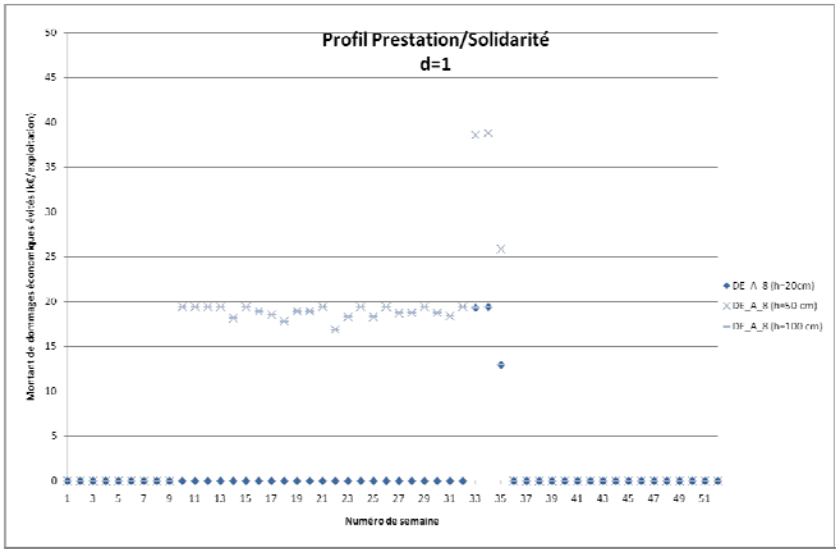
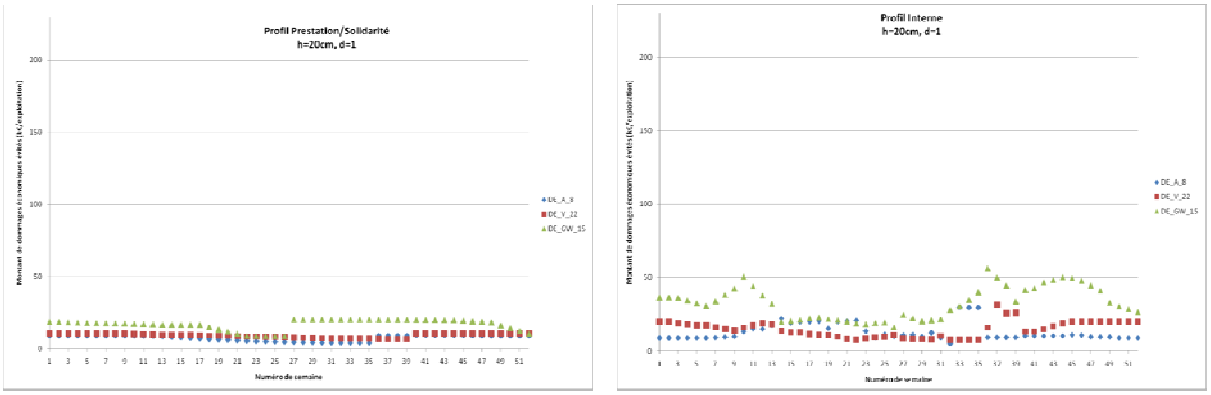


Figure 149 : Dommages évités (k€/exploitation) par la plantation sur buttes pour l'exploitation type A_8 pour les trois hauteurs d'eau et une durée d'une semaine (vitesse faible)

5. Relocalisation définitive d'un bâtiment (M5)

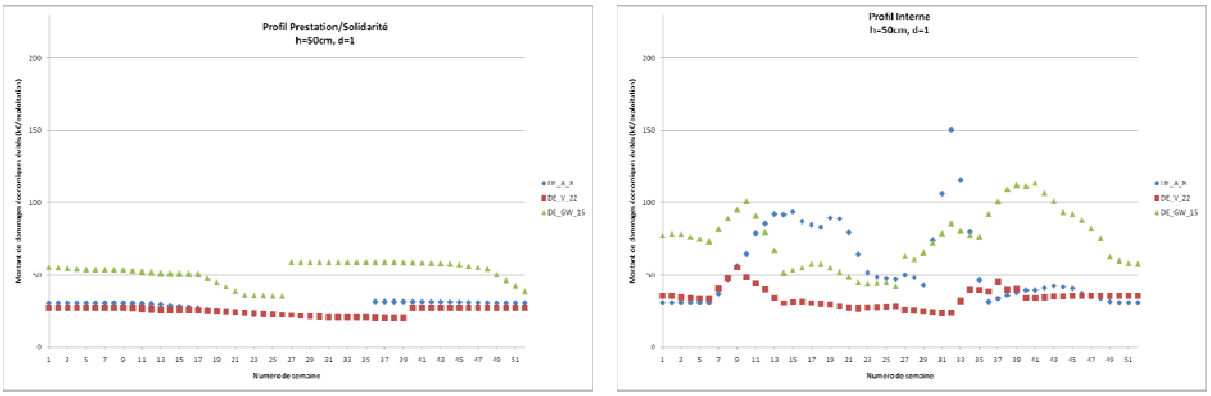
a. Calcul des dommages évités pour h = 20 cm



(a) (b)

Figure 150 : Dommages évités (k€/exploitation) par la relocalisation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

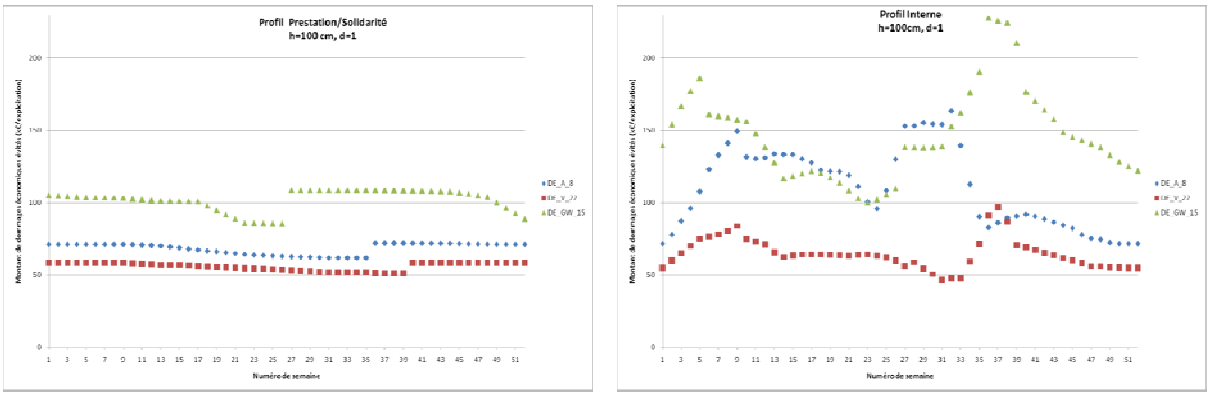
b. Calcul des dommages évités pour h = 50 cm



(a) (b)

Figure 151 : Dommages évités (k€/exploitation) par la relocalisation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 50cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

c. Calcul des dommages évités pour h = 100 cm

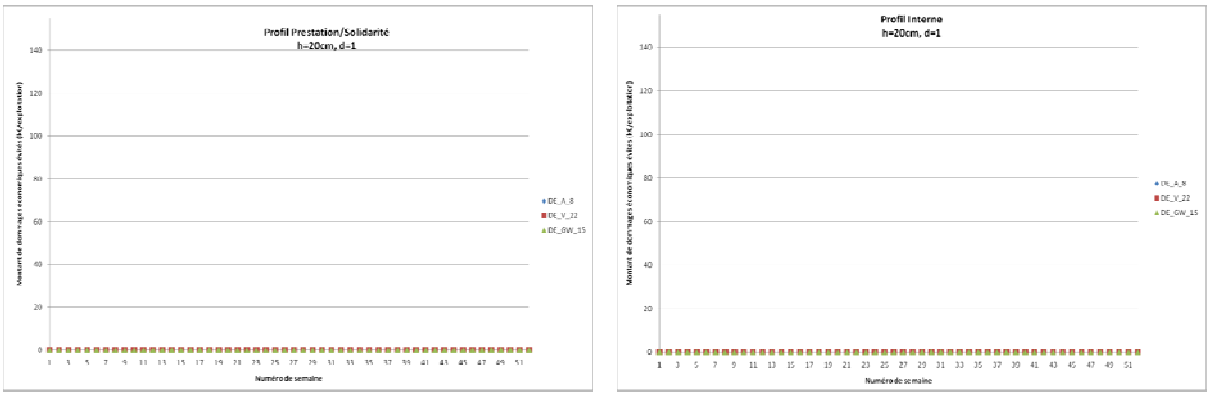


(a) (b)

Figure 152 : Dommages évités (k€/exploitation) par la relocalisation d'un bâtiment pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 100cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

6. Evacuation temporaire d'une liste de matériels (M6)

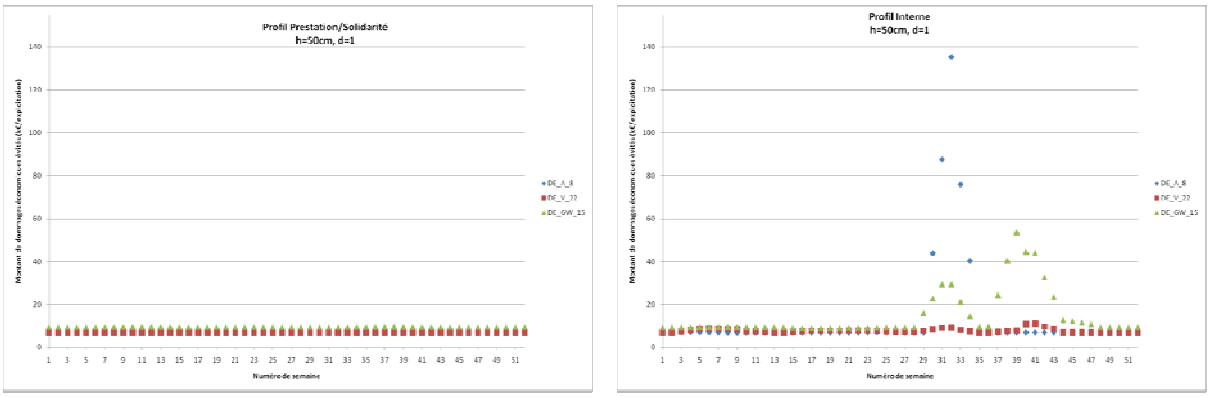
a. Calcul des dommages évités pour h = 20 cm



(a) (b)

Figure 153 : Dommages évités (k€/exploitation) par l'évacuation de certains matériels pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 20cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

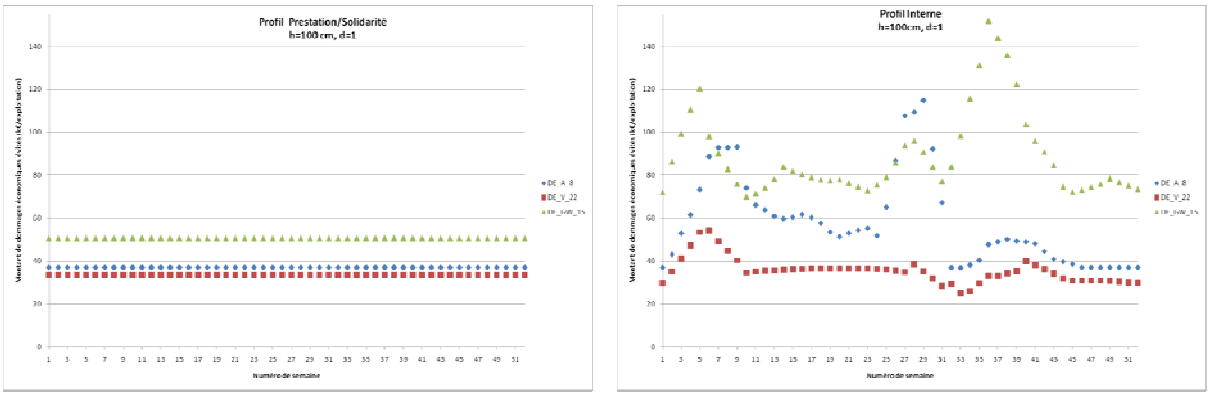
b. Calcul des dommages évités pour h = 50 cm



(a) (b)

Figure 154 : Dommages évités (k€/exploitation) par l'évacuation de certains matériels pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 50cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

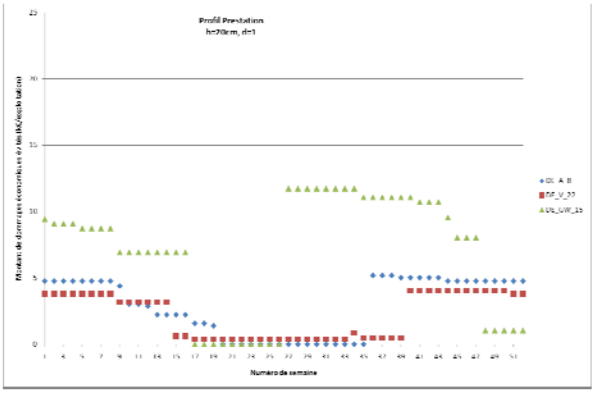
c. Calcul des dommages évités pour h = 100 cm



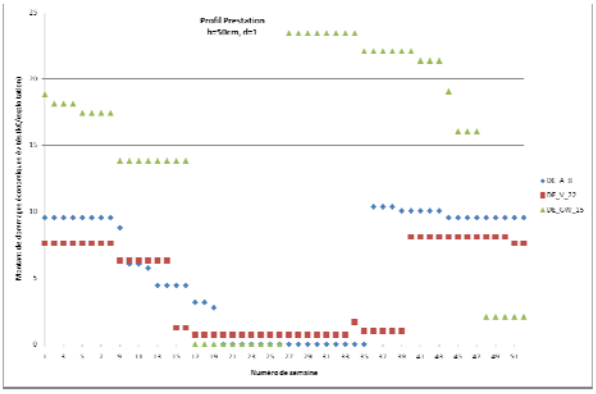
(a) (b)

Figure 155 : Dommages évités (k€/exploitation) par l'évacuation de certains matériels pour les profils Prestation/Solidarité (a) et Interne (b) pour une inondation de 100cm et d'une durée d'une semaine (vitesse faible)

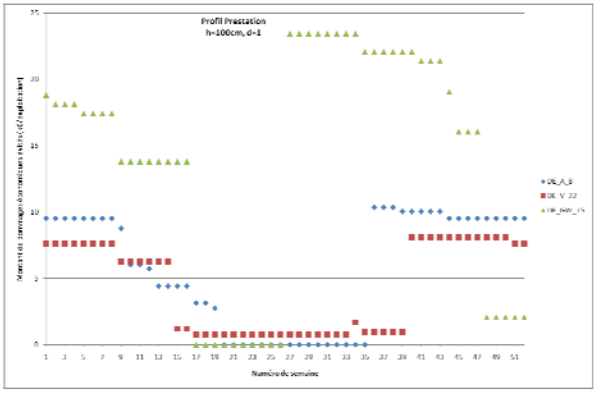
7. Modification de la gestion des stocks (M7)



(a)



(b)

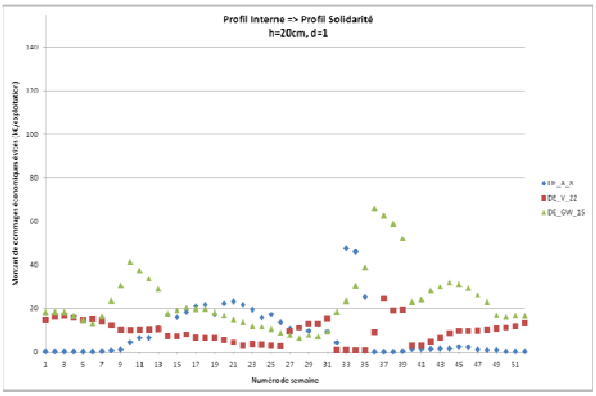


(c)

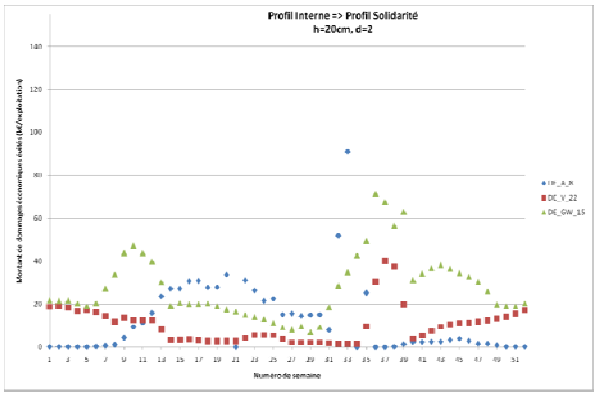
Figure 156 : Dommages évités par la mise en place d'une mesure de gestion des stocks d'intrants sur les trois exploitations types pour un scénario d'inondation de 50% des parcelles et du bâtiment avec 20 cm (a), 50 cm (b) et 100 cm (c), pendant une durée d'une semaine et avec une vitesse faible

8. Modification du profil (M8)

a. Calcul des dommages évités pour h=20cm



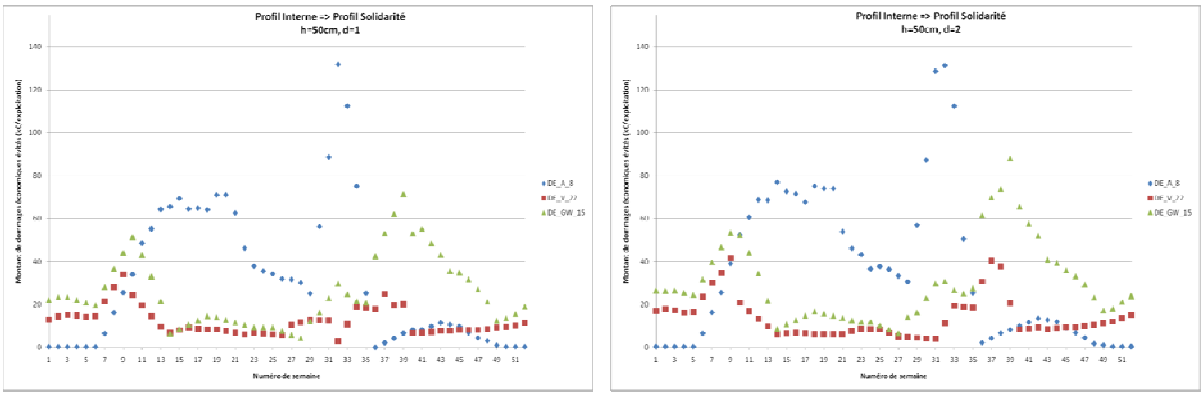
(a)



(b)

Figure 157 : Montant de dommages économiques évités (k€/exploitation) par la modification du profil des exploitants pour une durée d'une semaine (a) et de deux semaine (b) pour une inondation de 20 cm (vitesse faible)

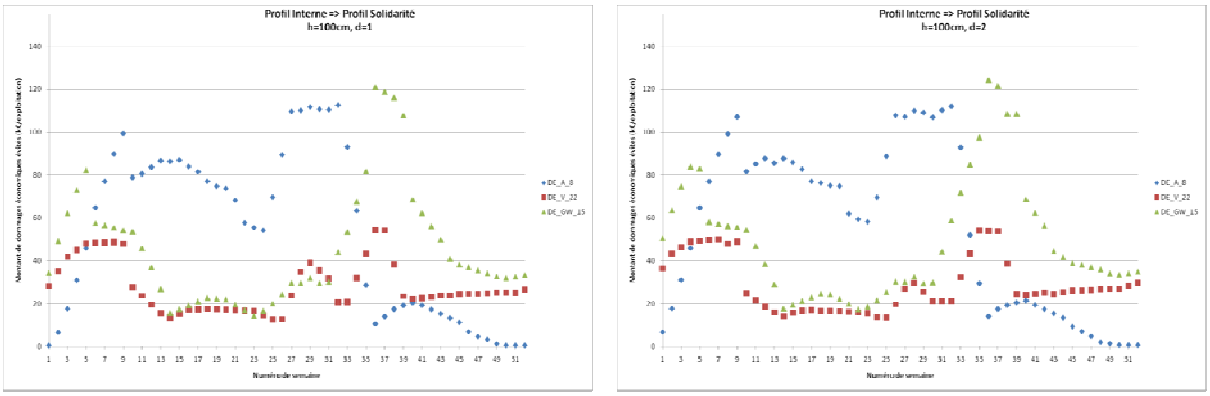
b. Calcul des dommages évités pour h=50cm



(a) (b)

Figure 158 : Montant de dommages économiques évités (k€/exploitation) par la modification du profil des exploitants pour une durée d'une semaine (a) et de deux semaine (b) pour une inondation de 50cm (vitesse faible)

c. Calcul des dommages évités pour h=100cm



(a) (b)

Figure 159 : Montant de dommages économiques évités (k€/exploitation) par la modification du profil des exploitants pour une durée d'une semaine (a) et de deux semaines (b) pour une inondation de 100cm (vitesse faible)

Annexe 15 : Bilan des DEMA pour les trois exploitations types

1. Bilan des DEMA (k€/exploitation) pour les huit mesures pour A_8

	Prestation/Solidarité					Interne				
	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût
Fréquente										
M1	2,4	7,2	0,0	40,7	26,7	3,1	10,7	0,0	149,2	34,3
M2	0,2	1,1	0,1	9,7	2,4	0,2	1,1	-0,9	9,7	2,4
M3	0,8	2,3	0,0	10,4	9,4	0,8	2,3	0,0	10,4	9,4
M4	0,2	2,0	0,0	51,7	2,2	0,1	1,2	0,0	51,7	1,4
M5	3,0	10,0	4,1	72,2	33,4	4,4	15,5	5,2	163,5	48,7
M6	0,7	4,2	0,0	37,0	8,3	1,0	6,6	0,0	135,2	10,9
M7	0,9	2,4	0,0	10,3	10,0	0,9	2,4	0,0	10,3	10,0
M8						1,6	8,5	0,0	131,9	17,3
Rare										
M1	0,4	3,4	0,0	40,7	4,5	0,5	5,2	0,0	149,2	6,0
M2	0,1	0,8	0,1	9,7	0,9	0,1	0,8	-0,9	9,7	0,9
M3	0,1	0,9	0,0	10,4	1,1	0,1	0,9	0,0	10,4	1,1
M4	0,0	0,8	0,0	51,7	0,3	0,0	0,4	0,0	51,7	0,2
M5	0,7	6,3	4,1	72,2	8,3	1,1	9,5	5,2	163,5	12,0
M6	0,3	3,1	0,0	37,0	3,3	0,4	4,9	0,0	135,2	4,7
M7	0,2	1,1	0,0	10,3	1,7	0,2	1,1	0,0	10,3	1,7
M8						0,4	4,9	0,0	131,9	4,4

2. Bilan des DEMA (k€/exploitation) pour les huit mesures pour V_22

	Prestation/Solidarité					Interne				
	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût
Fréquente										
M1	2,3	6,4	0,0	30,9	25,4	3,1	8,4	0,0	66,0	34,1
M2	0,2	0,7	0,1	4,7	1,8	0,1	0,6	-1,6	10,3	0,8
M3	0,7	2,0	0,0	8,6	8,1	0,7	2,0	0,0	8,6	8,1
M5	2,8	8,5	6,7	58,3	31,0	4,4	12,2	7,7	102,7	48,5
M6	0,7	3,9	0,0	33,5	7,9	0,8	4,3	0,0	54,3	8,6
M7	0,7	1,9	0,4	8,1	7,9	0,7	1,9	0,4	8,1	7,9
M8						2,4	6,8	0,7	55,3	26,6
Rare										
M1	0,4	2,9	0,0	30,9	3,9	0,4	3,6	0,0	66,0	4,9
M2	0,0	0,4	0,1	4,7	0,5	0,0	0,4	-1,6	10,3	0,4
M3	0,1	0,8	0,0	8,6	0,9	0,1	0,8	0,0	8,6	0,9
M5	0,6	5,2	6,7	58,3	7,1	0,9	6,7	7,7	102,7	9,6
M6	0,3	2,8	0,0	33,5	3,0	0,3	3,1	0,0	54,3	3,3
M7	0,1	0,9	0,4	8,1	1,3	0,1	0,9	0,4	8,1	1,3
M8						0,4	3,5	0,7	55,3	4,8

3. Bilan des DEMA (k€/exploitation) pour les huit mesures pourMC_15

	Prestation/Solidarité					Interne				
	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Coût
Fréquente										
M1	4,2	12,1	0,0	57,0	46,7	5,9	16,7	0,0	132,9	66,1
M2	0,3	1,0	1,4	3,9	3,8	0,7	2,1	-11,4	11,0	7,8
M3	1,8	5,0	0,0	25,6	19,8	1,8	5,0	0,0	25,6	19,8
M5	5,2	15,9	8,6	108,9	57,3	9,7	27,1	14,7	229,8	108,0
M6	1,0	5,7	0,0	50,7	11,3	1,4	8,0	0,0	133,9	15,1
M7	1,4	4,2	0,0	23,5	15,9	1,4	4,2	0,0	23,5	15,9
M8						5,0	13,6	4,3	124,2	55,9
Rare										0,0
M1	0,6	5,3	0,0	57,0	7,1	0,9	7,2	0,0	132,9	9,8
M2	0,1	0,4	1,4	3,9	0,7	0,1	0,9	-11,4	11,0	1,2
M3	0,2	1,9	0,0	25,6	2,3	0,2	1,9	0,0	25,6	2,3
M5	1,2	9,5	8,6	108,9	13,0	2,0	15,2	14,7	229,8	21,7
M6	0,4	4,2	0,0	50,7	4,5	0,5	5,7	0,0	133,9	5,9
M7	0,2	1,9	0,0	23,5	2,7	0,2	1,9	0,0	23,5	2,7
M8						0,8	6,3	4,3	124,2	9,2

BIBLIOGRAPHIE

Arrêté du 12 janvier 2009 relatif à la création d'un téléservice internet de déclaration de pertes de productions consécutives à une calamité agricole, France. Journal Officiel: AGRF0901715A.

Arrêté du 31 mars 2009 fixant la liste des risques assurables exclus du régime d'indemnisation du Fonds national de garantie des calamités agricoles, France. JORF n°0083 du 8 avril 2009: AGRF0831570A.

Article R5162 abrogé par Décret 2004-802 2004-07-29 art. 4, Code de la santé publique. France. JORF du 8 août 2004.

Circulaire DGPAAT/SDEA/C2009-3086 du 22 juillet 2009, Direction Générale des Politiques agricole agroalimentaire et des territoires (MAP). France. AGRT0917166C.

Circulaire du 19/01/05 relative aux programmes d'actions de prévention des inondations par bassins versants sur les années 2003 à 2007 : modalités de pilotage et de suivi, MEDD. BOMEDD n° 06/2005 du 30 mars 2005: DEV00540054C. 13 p.

Circulaire SG/DAFL/SDFA/C2008-1510 du 18 février 2008, Bureau du crédit et de l'assurance (MAP). France.

Décret n° 2010-91 du 22 janvier 2010 fixant pour l'année 2010 les modalités d'application de l'article L. 361-8 du code rural en vue de favoriser le développement de l'assurance contre certains risques agricoles, JORF n°0020 du 24 janvier 2010: AGRT0925746D.

Directive 2007/60/CE du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, Parlement et conseil européens. Journal officiel n ° L 288 du 11/06/2007: 2007/60/CE. 27-34 pp.

Loi n°64-706 du 10 juillet 1964 organisant un régime de garantie contre les calamités agricoles (Version consolidée au 01 mars 1994), France.

Loi n°82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles France. JO du 14 juillet 1982.

Loi n° 2010-874 du 27 juillet 2010 de modernisation de l'agriculture et de la pêche, France. JORF n°0172 du 28 juillet 2010: AGRS0928330L.

Abdulai A and Tietje H, Estimating technical efficiency under unobserved heterogeneity with stochastic frontier models: application to northern German dairy farms, *European Review of Agricultural Economics,* 2007, 34(3): 393-416 pp.

ADAS, Impacts of 2007 Summer Floods on Agriculture. DEFRA, 2007, 50 p.

Adger W N, Social Capital, Collective Action, and Adaptation to Climate Change, *Economic Geography,* 2003, 79(4): 387-404 pp.

Adger W N, Vulnerability, *Global Environmental Change,* 2006, 16(3): 268-281 pp.

Adger W N and Kelly P M, Social Vulnerability to Climate Change and the Architecture of Entitlements, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,* 1999, 4(3): 253-266 pp.

Antle J M, Capalbo S M, Elliott E T and Paustian K H, Adaptation, Spatial Heterogeneity, and the Vulnerability of Agricultural Systems to Climate Change and CO2 Fertilization: An Integrated Assessment Approach *Climatic Change,* 2004, 64: 289-315 pp.

Appel F, Ostermeyer A, Balmann A and Larsen K. Improving an Agent-Based Model by Using Interdisciplinary Approaches for Analyzing Structural Change in Agriculture. Advances in Social Computing. Chai S-K, Salerno J and Mabry P, Eds. Berlin / Heidelberg. Springer, 2010, 360-366 pp. Disponible sur: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12079-4_45

Arrow K J. Observations on social capital. Social capital: A multifaceted perspective. Dasgupta P and Serageldin I, Eds. Washington. The World Bank, 2000, 3–5 pp.

Attonaty J M, Chatelin M H and Poussin J C. L'évaluation des méthodes et langages de simulation Modélisation systémique et systèmes agraires. Brossier J, Vissac B and Moigne J L L, Eds. Paris. INRA, 1990, 119-133 pp.

Babusiaux C, L'assurance récolte et la protection contre les risques en agriculture. MAP - MINEFI, 2000, 288 p.

Balmann A, Farm-based modelling of regional structural change: A cellular automata approach, *European Review of Agricultural Economics,* 1997, 24(1-2): 85-108 pp.

Barbut L, Bauduceau N and Devaux-Ros C, Vers une évaluation de la vulnérabilité des activités agricoles aux inondations, *Ingénieries Eau-Agriculture-Territoires,* 2004, 39: 29-41 pp.

Barreteau O, Bousquet F, Millier C and Weber J, Suitability of Multi-Agent Simulations to study irrigated system viability: application to case studies in the Senegal River Valley, *Agricultural Systems,* 2004, 80(3): 255-275 pp.

Bauduceau N, Eléments d'analyse des répercussions des inondations de novembre 1999 sur les activités agricoles des départements de l'Aude, des Pyrénées Orientales et du Tarn. Rapport technique. Equipe pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, 2001, 111 p.

Bauduceau N, 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. Equipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, 2004a, 52 p.

Bauduceau N, Rapport de synthèse sur les mesures de réduction de la vulnérabilité des exploitations agricoles face au risque d'inondation. Agence de l'Eau Loire Bretagne, 2004b, 36 p.

Bauduceau N, Elaboration d'un auto diagnostic de la vulnérabilité à l'inondation des exploitations agricoles. Agence de l'Eau Loire Bretagne, 2005a, 77 p.

Bauduceau N, Tests du guide de diagnostic et de réduction de la vulnérabilité des exploitations agricoles face au risque d'inondation. Agence de l'Eau Loire Bretagne, 2005b, 35 p.

BCMA, Le coût d'utilisation du matériel agricole - Barème d'entraide, *La France Agricole,* 2008, 32(47): 60-64 pp.

Benoît M, Deffontaines J P, Gras F, Bienaimé E and Riela-Cosserat R, Agriculture et qualité de l'eau : Une approche interdisciplinaire de la pollution par les nitrates d'un bassin d'alimentation, *Cahiers Agricultures,* 1997, 6: 97-105 pp.

Berbel J and Gómez-Limón J A, The impact of water-pricing policy in Spain: an analysis of three irrigated areas, *Agricultural Water Management,* 2000, 43(2): 219-238 pp.

Berentsen P B M and Giesen G W J, An environmental-economic model at farm level to analyse institutional and technical change in dairy farming, *Agricultural Systems,* 1995, 49(2): 153-175 pp.

Blaikie P, Cannon T, Davis I and Wisner B. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters. London, England. Routledge, 1994, 303 p.

Blanc C, Analyse coût-bénéfice des aménagements pour lutter contre les inondations : Application au cas de la Touloubre aval. Rapport de fin d'étude (Master 2). Cemagref, Montpellier. 2007, 60 p.

Blanc C, Brémond P and Grelot F, Développement méthodologique d'une évaluation économique des mesures de réduction de la vulnérabilité des exploitations agricoles face aux inondations. DREAL Rhône Alpes - Mission Rhône, Lyon. 2010, 222 p.

Blanco Fonseca M and Jacquet F. Introduction à la programmation linéaire. Optimisation et outils de la programmation mathématique pour la modélisation des politiques publiques. Montpellier. IAMM, 2008, 19 p.

Bouleau N. Philosophies des mathématiques et de la modélisation : Du chercheur à l'ingénieur. Paris. L'Harmattan, 1999, 364 p.

Bourdieu P, Le capital social, *Actes de la recherche en sciences sociales,* 1980: 2-3 pp.

Boussard J-M, Boussemart J-P, Flichman G, Jacquet F and Lefer H-B, Les effets de la réforme de la PAC sur les exploitations de grande culture, *Economie Rurale,* 1997, (239): 20-29 pp.

Bouyssou D, Dubois D, Pirlot M and Prade H. Concepts et méthodes pour l'aide à la décision - Volume 1 : Outils de modélisation. Hermès - Lavoisier, 2006, 400 p.

Bouzit A M, Rieu T and Rio P, Modélisation du comportement des exploitants agricoles tenant compte du risque : application du MOTAD généralisé, *Economie rurale,* 1994, 220: 69-73 pp.

Brémond P, Breton C, Erdlenbruch K, Grelot F, Enjolras G, Kast R, Thoyer S, Chastant B and Poulard C, Expertise des pratiques de compensation en cas de transfert d'exposition aux inondations. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, 2007, 376 p.

Bremond P, Grelot F and Bauduceau N, Characterization of agricultural vulnerability for economic appraisal of flood management policies, Fourth International Symposium on Flood Defence (ISFD4), 2008, Toronto, Canada.

Bremond P, Grelot F and Bauduceau N. De la vulnérabilité de la parcelle à celle de l'exploitation agricole : un changement d'échelle nécessaire pour l'évaluation économique des projets de gestion des inondations. Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés. Becerra S and Peletier A, Eds. Paris. L'Harmattan, 2009, 231-244 pp.

Brent R J. Applied Cost-Benefit Analysis. Cheltenham, UK - Northampton, USA. Edward Elgar, 2006, 470 p.

Brossier J, Chia E, Marshall E and Petit M. Recherches en gestion : vers une théorie de la gestion de l'exploitation agricole. Modélisation systémique et système agraire - Décision et organisation. Brossier J, Vissac B and Moigne J L L, Eds. Paris. INRA, 1990a, 65-92 pp.

Brossier J, Vissac B and Moigne J L L. Modélisation systémique et système agraire - Décision et organisation. Paris. INRA, 1990b, 365 p.

Brouwer R, Akter S, Brander L and Haque E, Socioeconomic vulnerability and adaptation to environmental risk: A case study of climate change and flooding in Bangladesh, *Risk Analysis,* 2007, 27(2): 313-326 pp.

Brouwer R and Hofkes M, Integrated hydro-economic modelling: Approaches, key issues and future research directions, *Ecological Economics,* 2008, 66(1): 16-22 pp.

Brouwer R, Remco V E, René B and Jetske B (2001). Living with floods: an integrated assessment of land use changes and floodplain restoration as alternative flood protection measures in the Netherlands, Centre for Social and Economic Research on the Global Environment**:** 40 p.

Brouwer R and Van Ek R, Integrated ecological, economic and social impact assessment of alternative flood control policies in the Netherlands, *Ecological Economics,* 2004, 50(1-2): 1-21 pp.

Brown J D and Damery S L, Managing flood risk in the UK : towards an integration of social and technical perspectives, *Royal Geographical Society,* 2002, 27: 412-426 pp.

BTE, Economic costs of natural disasters in Australia. Bureau of Transport Economics, Canberra, Australia,. 2001, 193 p.

Carney D. Sustainable Rural Livelihoods: What contribution can we make? London. Departement For International Development, 1998.

Carpenter S R, Walker B, Anderies J M and Abel N, From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What?, *Ecosystems,* 2001, 4(8): 765-781 pp.

CCR, Les catastrophes naturelles en France. Caisse Centrale de Réassurance, Paris. 2004, 30 p.

CEPRI, Les PAPI six ans après leur démarrage. 2009, 4 p.

CER, Références technico-économiques d'une vigne palissée en Languedoc Roussillon, 2009a.

CER, Références technico économiques de la variété de pomme Royal Gala en Languedoc Roussillon. 2009b, 2 p.

CER du Gard, Références technico-économiques du melon, 2007.

CGEDD-MEEDAT, Premiers enseignements tirés de la mise en oeuvre des programmes d'action de prévention des inondations (PAPI). 2009, 43 p.

Chambers R and Conway G R. Sustainable rural livelihoods: practical concepts for the 21st century. Institute of development studies Brighton, UK, 1992.

Chambre d'Agriculture de la Drôme, Références technico-économiques du blé dur, 2007: 1 p.

Chambre d'Agriculture du Gard, Etude des Enjeux Agricoles Plaine de Bellegarde/Fourques et Couloir de Saint-Gilles dans le cadre de l'étude de renforcement de la digue du Rhône rive droite entre Beaucaire et Fourques. Symadrem, 2010, 32 p.

Chambre d'Agriculture du Vaucluse, Références technico-économiques de la pomme. 2005.

Chambre d'Agriculture du Vaucluse, Références technico-économiques de la salade. 2006a.

Chambre d'Agriculture du Vaucluse, Références technico-économiques du melon. 2006b.

Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine, Conseil Régional de Lorraine and Arvalis, Guide pratique à destination des techniciens et des agriculteurs lorrains. 2003, 4 p.

Chambres d'Agriculture Rhône Méditerranée, Mission de réduction de la vulnérabilité agricole en zones inondables - Premier rapport d'étape. Plan Rhône, 2006, 150 p.

Chambres d'Agriculture Rhône Méditerranée, Mission de réduction de la vulnérabilité agricole en zones inondables - Rapport de deuxième étape : Diagnostic. Plan Rhône, 2007, 74 p.

Chambres d'Agriculture Rhône Méditerranée, Mission de réduction de la vulnérabilité agricole en zones inondables - Troisième tome : Proposition d'un plan d'action. Plan Rhône, 2008, 69 p.

Coleman J S, Social Capital in the Creation of Human Capital, *The American Journal of Sociology,* 1988, 94: S95-S120 pp.

Commisariat général du Plan (Groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue), Révision du taux d'actualisation des investissements publics. Paris. 2005, 112 p.

Consuegra D Z. Concept de gestion des eaux de surface : aspects méthodologiques et application au bassin versant de la Broye en Suisse, 1992, 228 p. Thèse de doctorat. Génie rural. Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne. Lausanne.

Costanza R, Duplisea D and Kautsky U, Introduction to Special Issue: Ecological Modelling on modelling ecological and economic systems with STELLA *Ecological Modelling,* 1998a, 110(1): 1-4 pp.

Costanza R and Gottlieb S, Modelling ecological and economic systems with STELLA: Part II, *Ecological Modelling,* 1998b, 112(2-3): 81-84 pp.

Costanza R and Voinov A, Modeling ecological and economic systems with STELLA: Part III, *Ecological Modelling,* 2001, 143(1-2): 1-7 pp.

Cutter S L, Vulnerability to environmental hazards, *Progress in human geography,* 1996, 20(4): 529 p.

Cutter S L, Barnes L, Berry M, Burton C, Evans E, Tate E and Webb J, A place-based model for understanding community resilience to natural disasters, *Global Environmental Change,* 2008, 18(4): 598-606 pp.

Cutter S L, Boruff B J and Shirley W L, Social Vulnerability to Environmental Hazards, *Social Science Quarterly,* 2003, 84(2): 242-261 pp.

Darré J P, Mathieu A and Lasseur J. Le sens des pratiques : conceptions d'agriculteurs et modèles d'agronomes. Paris. INRA, 2004, 320 p.

DDAF du Gard, Barème des inondations du Gard de Septembre 2002. Nîmes. 2002, 16 p.

Deleuze C, Fotre C, Nuti I and Pierot F. Evaluation de fonctions de coûts économiques des dommages aux cultures dus aux inondations, 1991, 50 p. Rapport de TGE. ENGREF. Paris, France.

Dent J B, Edwards-Jones G and McGregor M J, Simulation of ecological, social and economic factors in agricultural systems, *Agricultural Systems,* 1995, 49(4): 337-351 pp.

Devaux-Ros C, Evaluation des enjeux et des dommages potentiels liés aux inondations en Loire moyenne : Méthodes et principaux résultats. Equipe Plurisdisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, 2000, 65 p.

Dumas P, Chavarot A, Legrand H, Macaire A, Dimitrov C, Martin X and Queffelec C, Mission d'enquête sur le régime d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles - Rapport de synthèse. N° 2005-M-020-02, N° 2004-0304-01, N° IGE/05/006. Inspection générale des Finances, Inspection générale des Ponts et Chaussées, Conseil général de l'Environnement, 2005, 87 p.

Dunderdale J A L and Morris J, The Benefit: Cost analysis of river maintenance, *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management,* 1997, 11(6): 423-430 pp.

Dutta D, Herath S and Musiake K, A mathematical model for flood loss estimation, *Journal of Hydrology,* 2003, 277(1-2): 24-49 pp.

Ekins P. A four-capital model of wealth creation. Real-life economics: understanding wealth creation. Ekins P and Max-Neef M, Eds. London. Routledge, 1992, 147-155 pp.

Ekins P, Dresner S and Dahlström K, The four-capital method of sustainable development evaluation, *European Environment,* 2008, 18(2): 63-80 pp.

Ekins P and Medhurst J, The European Structural Funds and Sustainable Development: A Methodology and Indicator Framework for Evaluation, *Evaluation,* 2006, 12(4): 474-495 pp.

Epstein J M, Why Model?, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation,* 2008, 11(4). Disponible sur: http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/12.html

Erdlenbruch K, Germano V, Gilbert E, Grelot F and Lescoulier C, Etude socio-économique des inondations sur le bassin versant de l'Orb. Programme européen INTERREG III C Sud Europe - INUNDA. Conseil général de l'Hérault (Pôle environnement, eau, cadre de vie et aménagement rural), 2007, 136 p.

Erdlenbruch K, Gilbert E, Grelot F and Lescoulier C, Une analyse coût-bénéfice spatialisée de la protection contre les inondations : Application de la méthode des dommages évités à la basse vallée de l'Orb, *Ingenieries - Eau Agriculture Territoire,* 2008a, Numéro spécial "la prévention des inondations": 3-20 pp.

Erdlenbruch K, Grelot F, Thoyer S, Brémond P, Breton C, Chastan B, Enjolras G and Kast R, Ralentissement dynamique et partage du risque - Mise en place des systèmes de compensation locaux, *Ingénieries-EAT* 2008b, numéro spécial "La prévention des inondations": 109-119 pp.

Erdlenbruch K, Thoyer S, Grelot F, Kast R and Enjolras G, Risk-sharing policies in the context of the French Flood Prevention Action Programmes, *Journal of Environmental Management,* 2009, 91(2): 363-369 pp.

Fankhauser S, Smith J B and Tol R S J, Weathering climate change: some simple rules to guide adaptation decisions, *Ecological Economics,* 1999, 30(1): 67-78 pp.

Farrow S, Environmental equity and sustainability: rejecting the Kaldor-Hicks criteria, *Ecological Economics,* 1998, 27(2): 183-188 pp.

FEDER, Programme Opérationnel Pluri Régional - Accompagnement du volet "Inondation" (2007-2013). Union Européenne, 2007.

Ferber J. Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective. Paris. InterEditions, 1995, 499 p.

Flichman G and Jacquet F, Le couplage des modèles agronomiques et économiques: intérêt pour l'analyse des politiques, *Cahiers d'économie et sociologie rurales,* 2003, (67): 51-69 pp.

Forster S, Kuhlmann B, Lindenschmidt K E and Bronstert A, Assessing flood risk for a rural detention area, *Natural Hazards and Earth System Sciences,* 2008, 8: 311-322 pp.

Foster J, Greer J and Thorbecke E, A Class of Decomposable Poverty Measures, *Econometrica,* 1984, 52(3): 761-766 pp.

Frigg R and Hartmann S. Models in Science. The Stanford Encyclopedia of Philosophy. Zalta E N, Ed., 2006. Disponible sur: http://plato.stanford.edu/entries/models-science/

Füssel H-M, Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research, *Global Environmental Change,* 2007, 17(2): 155-167 pp.

Gallopin G C, Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity, *Global Environmental Change,* 2006, 16(3): 293-303 pp.

Garrabé M. Ingénierie de l'évaluation économique. Paris. Ellipses, 1994, 255 p.

Garrabé M. Economie sociale. Communauté Européenne (Projet FORMder), 2007, 221 p. Disponible sur: http://michel-garrabe.com

Gilard O. Les bases techniques de la méthode Inondabilité. Paris. Cemagref Editions, 1998, 207 p.

Gilbert É, Programme Cadereau - Évaluation socioéconomique des vulnérabilités de la ville de Nîmes. Phase 5 : Diagnostic précis de la vulnérabilité des quartiers. Egis Eau pour le compte de la Ville de Nîmes, Montpellier, France. 2008.

Gleyze J-F and Reghezza M, La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement, *Géocarrefour,* 2007, 82/1-2.

Gondard-Delcroix C and Rousseau S, Vulnérabilité et stratégies durables de gestion des risques: Une étude appliquée aux ménages ruraux de Madagascar, *Développement Durable et Territoires,* 2004, 3 (Les dimensions humaine et sociale du Développement Durable). Disponible sur: http://developpementdurable.revues.org/document1143.html

Goulter I C and Morgan D R, Analyzing Alternative Flood Damage reduction Measures on Small Watersheds Using Multiple return Period Floods, *Water Resources research,* 1983, 19(6): 1376-1382 pp.

Graveline N, Rinaudo J D, Segger V, Lambrecht H, Casper M, Elsass P, Grimm-Strele J, Gudera T, Koller R and Van Dijk P. Integrating economic and groundwater models for developing long-term nitrate concentration scenarios in a large aquifer. Aquifer Systems Management: Darcy's legacy in a world of impending water shortage. Chery L and de Marsilly G, Eds. AA. Balkema, 2007.

Grelot F. Gestion collective des inondations : Peut-on tenir compte de l'avis de la population dans la phase d'évaluation économique a priori ?, 2004, 405 p. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers. Paris.

Hanley N and Spash C L. Cost - benefit analysis and the environnement. Northampton. Edward Elgar, 1993, 278 p.

Hansson K, Danielson M and Ekenberg L, A framework for evaluation of flood management strategies, *Journal of Environmental Management,* 2008, 86(3): 465-480 pp.

Happe K, Agricultural policies and farm structures - Agent-based modelling and application to EU-policy reform. Studies on the agricultural and food sector in Central and Eastern Europe. Institut für Agrarentwicklung in Mittel und Osteuropa (IAMO), Halle. 2004, 298 p. Disponible sur: http://www.iamo.de/dok/sr_vol30.pdf.

Happe K, Balmann A and Kellermann K, The agricultural policy simulator (AgriPoliS): an agent-based model to study structural change in agriculture (Version 1.0). Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe, 2004, 48 p.

Happe K, Kellermann K and Balmann A, Agent-based Analysis of Agricultural Policies: an Illustration of the Agricultural Policy Simulator AgriPoliS, its Adaptation and Behavior, *Ecology and Society,* 2006, 11 (1): 49 p. Disponible sur: http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art49/

Hervé D, Genin D and Migueis J, A modelling approach for analysis of agro pastoral activity at the one-farm level, *Agricultural Systems,* 2002, 71(3): 187-206 pp.

Hervé D and Laloë F. Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés. Bialec. 2009, 224 p.

Hess T M and Morris J, Estimating the value of flood alleviation on agricultural grassland, *Agricultural Water Management,* 1988, 15(2): 141-153 pp.

Hoes O and Schurmans W, Flood standards or risk analyses for polder management in the Netherlands, *Irrigation and Drainage,* 2006, 55(S1): S113-S119 pp.

Holling C S, Resilience and Stability of Ecological Systems, *Annual Review of Ecology and Systematics,* 1973, 4: 1-23 pp.

Houdayer R. Évaluation financière des projets - Ingénieurie de projets et décision d'investissement. Paris. Economica, 1999, 380 p.

Hubert G and Ledoux B. Le coût du risque... L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations. Paris. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1999, 231 p.

INRA, La modélisation à l'INRA. INRA (Groupe de réflexion Modélisation coordonné par Bruno Goffinet), 2003, 65 p.

IPCC, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Annex B: Glossary of terms. 2001, 981-996 pp.

ISL, Etude de renforcement de la digue du Rhône rive droite entre Beaucaire et Fourques. SYMADREM, 2009.

Jacquet F and Blanco Fonseca M. Modélisation de la production agricole. Optimisation et outils de la programmation mathématique pour la modélisation des politiques publiques. Montpellier. IAMM, 2008, 27 p.

Janssen M and de Vries B, The battle of perspectives: a multi-agent model with adaptive responses to climate change, *Ecological Economics,* 1998, 26(1): 43-65 pp.

Janssen M A and Ostrom E, Resilience, vulnerability, and adaptation: A cross-cutting theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, *Global Environmental Change,* 2006a, 16(3): 237-239 pp.

Janssen M A, Schoon M L, Ke W and Börner K, Scholarly networks on resilience, vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change, *Global Environmental Change,* 2006b, 16(3): 240-252 pp.

Janssen S and van Ittersum M K, Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models, *Agricultural Systems,* 2007, 94(3): 622-636 pp.

Johnson C, Penning-Rowsell E and Tapsell S, Aspiration and reality: flood policy, economic damages and the appraisal process, *Area,* 2007, 39(2): 214-223 pp.

Jonkman S N, Bockarjova M, Kok M and Bernardini P, Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands, *Ecological Economics,* 2008, 66(1): 77-90 pp.

Kahneman D and Tversky A, Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk, *Econometrica,* 1979, 47(2): 263-292 pp.

Kaufmann P, Stagl S and Franks D W, Simulating the diffusion of organic farming practices in two New EU Member States, *Ecological Economics,* 2009, 68(10): 2580-2593 pp.

Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, Probert M E, Robertson M J, Holzworth D, Huth N I, Hargreaves J N G, Meinke H, Hochman Z, McLean G, Verburg K, Snow V, Dimes J P, Silburn M, Wang E, Brown S, Bristow K L, Asseng S, Chapman S, McCown R L, Freebairn D M and Smith C J, An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation, *European Journal of Agronomy,* 2003, 18(3-4): 267-288 pp.

Kenyon W, Hill G and Shannon P, Scoping the role of agriculture in sustainable flood management, *Land Use Policy,* 2008, 25(3): 351-360 pp.

Kerselaers E, De Cock L, Lauwers L and Van Huylenbroeck G, Modelling farm-level economic potential for conversion to organic farming, *Agricultural Systems,* 2007, 94(3): 671-682 pp.

Koundouri P, Laukkanen M, Myyrä S and Nauges C, The effects of EU agricultural policy changes on farmers' risk attitudes, *European Review of Agricultural Economics,* 2009, 36(1): 53-77 pp.

Kreibich H, Christenberger S and Schwarze R, Economic motivation of households to undertake private precautionary measures against floods, *Natural Hazards and Earth System Sciences,* 2011, 11(2): 309 - 321 pp.

Kumbhakar S C and Tveteras R, Risk Preferences, Production Risk and Firm Heterogeneity, *The Scandinavian Journal of Economics,* 2003, 105(2): 275-293 pp.

La France Agricole, Var : les agriculteurs durement touchés par les inondations du 15 juin. publié le 5 juillet 2010. Disponible sur: http://www.lafranceagricole.fr/actualite-agricole/var-les-agriculteurs-durement-touches-par-les-inondations-du-15-juin-29634.html

Lacewell R D and Eidman V R, A General Model for Evaluating Agricultural Flood Plains, *American Journal of Agricultural Economics,* 1972, 54(1): 92-101 pp.

Lacewell R D, Freeman R, Petit D, Rister E, Sturdivant A, Ribera L and Zinn M, Update of estimated agricultural benefits attributable to drainage and flood control in Willacy County, Texas Texas Water Resources Institute, 2006, 32 p.

Lallau B and Rousseau S. De la vulnérabilité à la résilience : une approche par les capabilité de la gesiotn des risques. Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés. Becerra S and Peletier A, Eds. Paris. L'Harmattan, 2009, 171-183 pp.

Lang M, Chastan B and Grelot F. La méthode Inondabilité : Appropriation par les hydrologues de la vulnérabilité dabs ke diagnostic sur le risque d'inondation. Risques et Environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés. Beccera S and Peltier A, Eds. Paris. L'Haramttan, 2009.

Latruffe L and Picard P, Assurance des catastrophes naturelles : faut-il choisir entre prévention et solidarité ?, *Annales d'économie et de statistique,* 2005, 78: 33-56 pp.

Le Bars M. Un Simulateur Multi-Agent pour l'Aide à la Décision d'un Collectif : Application à la Gestion d'une Ressource Limitée Agro-environnementale, 2003, 234 p. Thèse de doctorat. UFR Sciences des organisations. Université Paris IX-Dauphine. Paris.

Le Moigne J L. La modélisation des systèmes complexes. Dunod, 1990, 178 p.

Le Moigne J L. La théorie du système général - Théorie de la modélisation. PUF, 1994, 360 p. Disponible sur: http://www.mcxapc.org/inserts/ouvrages/0609tsgtm.pdf

Le Page C and Bommel P. A methodology for building agent-based simulations of common-pool resources management: from a conceptual model designed with UML to its implementa-tion in CORMAS. Companion modeling and Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resource Management in Asia. Bousquet F, Trébuil G and Hardy B, Eds. Los Baños, Philippines. IRRI, 2005, 327-350 pp.

Ledoux B. La gestion du risque inondation. Clamecy. Lavoisier, 2006, 770 p.

Léonard J L, Rapport d'information déposé en application de l'article 145 du règlement par la mission d'information sur les raisons des dégâts provoqués par la tempête Xynthia. Assemblée Nationale, Paris. 2010, 487 p. Disponible sur: http://www.assemblee-nationale.fr/13/pdf/rap-info/i2697.pdf

Ligon E and Schechter L, Measuring vulnerability, *Economic Journal,* 2003, 113(486): C95-C102 pp.

Longhini M, Analyse micro-économique de la vulnérabilité aux inondations - recherche d'un cadre théorique : cas agricole. Cemagref / LATEC, Lyon. 1997, 82 p.

Longhini M, Contribution potentielle des agriculteurs à la gestion de l'inondabilité : recherche d'outils micro-économiques d'analyse. Cemagref / LATEC, Lyon. 1998, 103 p.

Louhichi K, Flichman G and Blanco Fonseca M, A generic template for FSSIM for all farming systems in the EU SEAMLESS integrated project (EU 6th Framework Programme), 2009, 80 p. Disponible sur: www.SEAMLESS-IP.org

Louhichi K, Kanellopoulos A, Janssen S, Flichman G, Blanco M, Hengsdijk H, Heckelei T, Berentsen P, Lansink A O and Van Ittersum M, FSSIM, a bio-economic farm model for simulating the response of EU farming systems to agricultural and environmental policies, *Agricultural Systems,* 2010, 103(8): 585-597 pp.

Luers A L, Lobell D B, Sklar L S, Addams C L and Matson P A, A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico, *Global Environmental Change,* 2003, 13(4): 255-267 pp.

Martin S. La résilience dans les modèles de systèmes écologiques et sociaux, 2005, 195 p. Thèse de doctorat. Mathématiques Appliquées. Ecole Normale Supérieure. Cachan.

McCown R L, Hammer G L, Hargreaves J N G, Holzworth D P and Freebairn D M, APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research, *Agricultural Systems,* 1996, 50(3): 255-271 pp.

McDonald G T, Agricultural Flood Damage Assessment: A Review and Investigation of a Simulation Method *Review of Marketing and Agricultural Economics,* 1970, 38(03): 105-120 pp.

MEDDTL, Des PAPI d'aujourd'hui aux enjeux de la Directive Cadre Européenne inondations : Séminaire National PAPI - Programmes d'Actions et de Prévention des Risques liés aux Inondations. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, Paris. 2009, 58 p.

Ménard C, Gestions des risques climatiques en agriculture - Engager une nouvelle dynamique. Assemblée Nationale, Paris. 2004, 105 p.

Mengual P G. La réduction de la vulnérabilité des PME-PMI aux inondations. Paris. TEC&DOC, 2008, 219 p.

Messner F and Meyer V, Flood damage, vulnerability and risk perception - challenges for flood damage research. UFZ, Leipzeig. 2005.

Meyer V and Messner F, Methods of flood damage evaluation. National flood damage evaluation methods : A review of applied methods in England, the Netherlands, the Czech republic and Germany. UFZ Leipzig, 2005.

Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Cadre de référence pour la mise en place et le développement des CUMA et des CUMO - Volume 2 : La coopérative d'utilisation de main-d'oeuvre (CUMO). Québec. 2010, 27 p.

Ministry of Agriculture Fisheries and Food, Flood and coastal defence project - Appraisal guidance. Flood and coastal defence with emergencies division, London. 1999, 102 p.

Ministry of Construction, Manual on flood economy assessment. Japan. 2005, 112 p.

Mission Rhône, Schéma de gestion des inondations du Rhône aval pour une stratégie de gestion des crues du Rhône à l'aval de Viviers. DREAL Rhône-Alpes / Service prévention des risques, Lyon. 2009a, 299 p.

Mission Rhône. Un siècle de crues du Rhône : Regard d'un collectionneur. Lyon. Direction Régionale de l'Environnement Rhône-Alpes, 2009b, 57 p.

Moatti J P, Auquier P, Corollier A G L and Macquart-Moulin G, QALYs or not QALYs : that is the question ?, *Revue d'épidémiologie et de santé publique* 1995, 43(6): 573-583 pp.

Moore A D, Holzworth D P, Herrmann N I, Huth N I and Robertson M J, The Common Modelling Protocol: A hierarchical framework for simulation of agricultural and environmental systems, *Agricultural Systems,* 2007, 95(1-3): 37-48 pp.

Moore A D, Robertson M J and Routley R, Evaluation of the water use efficiency of alternative farm practices at a range of spatial and temporal scales: A conceptual framework and a modelling approach, *Agricultural Systems,* 2010, In Press, Corrected Proof.

Morardet S, Masiyandima M, Jogo W and Juizo D, Modelling trade-offs between livelihoods and wetland ecosystem services: the case of Ga-Mampa wetland, South Africa, 11th Biennial Conference of the International Society for Ecological Economics (ISEE) : Advancing sustainability in a time of crisis, 2010, Oldenburg and Bremen, Germany.

Morris J, Agricultural land drainage, land use change and economic performance; experience in the UK, *Land Use Policy,* 1992, 185-198.

Morris J and Hess T M, Agricultural flood alleviation benefit assessment: a case study, *Journal of Agricultural Economics,* 1988, 39(3): 402-412 pp.

Mortemousque D, Une nouvelle étape pour la diffusion de l'assurance récolte. Sénat, Paris. 2007, 50 p.

Moscarola J. Organizational decision processes and ORASA intervention. Rethinking the process of operational research and systems analysis. Oxford, UK. Pergamon Press, 1984, 169–186 pp.

Nédélec Y. Interactions en crue entre drainage souterrain et assainissement agricole, 2005, 235 p. Thèse de doctorat. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts. Paris.

Neil P G, Sherlock R A and Bright K P, Integration of legacy sub-system components into an object-oriented simulation model of a complete pastoral dairy farm, *Environmental Modelling and Software,* 1999, 14(6): 495-502 pp.

Neubert G and Thiel R. Schadenpotentiale in der Landwirtschaft. Möglichkeiten zur Minderung des Hochwasserrisikos durch Nutzung von Flutpoldern an Havel und Oder. Bronstert A, Ed. Postdam. Universität Potsdam, 2004, 117-140 pp.

O'Brien K L, Eriksen S, Schjolden A and Lygaard L, What's in a word? Interpretations of vulnerability in climate change research, *Climate Policy,* 2005, ((soumis pour publication)).

Papy F, Attonaty J-M, Laporte C and Soler L-G, Work Organization Simulation as a Basis for Farm Management Advice - Equipment and Manpower, Levels Against Climatic Variability, *Agricultural Systems* 1988, 27 295-314 pp.

Pearce D W, Atkinson G and Mourato S. Analyse coûts-bénéfices et environnement : développements récents. Paris. OCDE, 2006, 355 p. Disponible sur: http://browse.oecdbookshop.org/oecd/pdfs/browseit/9706012E.PDF

Penning-Roswell E, Johnson C, Tunstall S, Tapsell S, Morris J, Chatterton J and Green C. The benefits of flood and coastal risk management: a handbook of assessment techniques. Middlesex University Press, 2005, 81 p.

Péron J Y. Références Productions légumières. . Synthese Agricole - Lavoisier, 2006, 696 p.

Picard P, Natural disaster insurance and the equity-efficiency trade-off, *Ecole Polytechnique - Centre National de la Recherche scientifique,* 2005, Cahier n° 2005-039.

Pimm S L, The complexity and stability of ecosystems, *Nature,* 1984, 307(5949): 321-326 pp.

Pivot J-M and Martin P, Farms adaptation to changes in flood risk: a management approach, *Journal of Hydrology,* 2002, 267(1-2): 12-25 pp.

Plan Rhône, CPIER. Préfecture de la région Rhône Alpes, Comité de Bassin Rhône Méditerranée, Région Languedoc Roussillon, Région Provence Alpes Côte d'Azur, Région Rhône Alpes, Région Bourgogne, Région Franche-Comté, CNR, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, ADEME, VNF, 2007, 65 p.

Plan Rhône, Méthode standard pour l'analyse coût-bénéfice des projets de prévention des inondations - Guide d'accompagnement. 2010, 34 p.

Polsky C, Neff R and Yarnal B, Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram, *Global Environmental Change,* 2007, 17(3-4): 472-485 pp.

Posthumus H, Morris J, Hess T M, Neville D, Phillips E and Baylis A, Impacts of the summer 2007 floods on agriculture in England, *Journal of Flood Risk Management,* 2009, 2(3): 182-189 pp.

Putnam R, Bowling alone: America's declining social capital, *Journal of Democracy,* 1995, 6(1): 65-78 pp.

Reboul C, Mode de production et systèmes de culture et d'élevage, *Economie rurale,* 1976, 112: 55-65 pp.

Reid S, Smit B, Caldwell W and Belliveau S, Vulnerability and adaptation to climate risks in Ontario agriculture, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,* 2007, 12(4): 609-637 pp.

Reidsma P, Ewert F, Lansink A O and Leemans R, Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: The importance of farm level responses, *European Journal of Agronomy,* 2010, 32(1): 91-102 pp.

Reyniès B, Etude et propositions concernant les enjeux du coût de la main d'oeuvre dans le secteur de la production agricole. Assemblée Nationale, 2011, 48 p.

Ribot J C. Vulnerability does not just Fall from the Sky: Toward Multi-scale Pro-poor Climate Policy. Social Dimensions of Climate Change: Equity and Vulnerability in a Warming World. Mearns R and Norton A, Eds. Washington. The World Bank, 2009, 30 p.

Ribot J C and Peluso N L, A Theory of Access, *Rural Sociology,* 2003, 68(2): 153-181 pp.

Ricordel P-M and Demazeau Y (2000). From Analysis to Deployment: A Multi-agent Platform Survey. Proceedings of the First International Workshop on Engineering Societies in the Agent World: Revised Papers, Springer-Verlag.

Roux-Rouquié M, Caritey N, Gaubert L and Rosenthal-Sabroux C, Using the Unified Modelling Language (UML) to guide the systemic description of biological processes and systems, *Biosystems,* 2004, 75(1-3): 3-14 pp.

Salamin P, Les recherches hydrologiques en Hongrie, *Revue générale de l'hydraulique,* 1948, 44.

Sassi M, La modélisation du risque d'inondation en région PACA : une analyse économique et technique, *Revue d'Economie Régionale et Urbaine,* 2010: 5-22 pp.

Schwarze R and Wagner G G, The political economy of natural disaster insurance: lessons from the failure of a proposed compulsory insurance scheme in Germany, *European Environment,* 2007, 17(6): 403-415 pp.

Schwarze R and Wagner G G, Natural Hazards Insurance in Europe - Tailores responses to climate change needed. Working paper. UFZ, Leipzig. 2009, 21 p.

Scoones I, Sustainable Rural Livelihoods: A Framework for Analysis. Institute of Development Studies, 1998, 22 p.

Sébillote M and Soler L G. Les processus de décision des agriculteurs. Modélisation systémique et système agraire - Décision et organisation. J Brossier, Vissac B and Moigne J L L, Eds. Paris. INRA, 1990, 93-117 pp.

Sebillotte M and Papy F, Michel Sebillotte, agronome : penser l'action, *Natures Sciences Sociétés,* 2010, 18: 446-451 pp.

Sen A, Development as capability expansion, *Journal of Development planning,* 1989, 19: 41-58 pp.

Sen A. Inequality reexamined. Oxford University Press, 1992.

Sen A, The Discipline of Cost-Benefit Analysis, *The Journal of Legal Studies,* 2000, 29(2): 931-952 pp.

Serre C, Création d'un lotissement agricole pour regrouper et délocaliser des exploitations et dépendances agricoles hors zone inondable à Pierrelatte, Journée technique du CETE - La prise en compte des risques dans les politiques de l'aménagement, 2011, Aix en Provence.

Shabman L and Stephenson K, Searching for the Correct Benefit Estimate: Empirical Evidence for an Alternative Perspective, *Land Economics,* 1996, 72(4): 433-449 pp.

Sherlock R A, Bright K P and Neil P G, An Object-oriented simulation model of a complete pastoral dairy farm, MODSIM97 - Proceedings of the International Conference on Modelling and Simulation Modelling and Simulation Society of Australia, 1997, Hobart, 1154–1159 pp. Disponible sur: http://www.mssanz.org.au/MODSIM97/Vol%203/Sherlock.pdf

SIEE, EDATER, ASCA and TTI, Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône - Rapport d'étape n°3 : Identification des enjeux exposés aux crues et définition et analyse des casiers stratégiques. EPTB Territoire Rhône, 2003, 56 p.

Simon H. From substantive to procedural rationality. Method and appraisal in economics. Latsis S J, Ed. Cambridge. Cambridge University Press, 1976, 129-148 pp.

Simon H A, A Behavioral Model of Rational Choice, *The Quarterly Journal of Economics,* 1955, 69(1): 99-118 pp.

Smit B and Skinner M W, Adaptation options in agriculture to climate change: a typology *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,* 2002, 7: 85-114 pp.

Solesbury W (2003). Sustainable Livelihoods: A Case Study of the Evolution of DFID Policy, Overseas Development Institute**:** 36 p.

Soltner D. Les grandes productions végétales. Bressuire. SOLTNER, 2005, 472 p.

Soulage D, Rapport fait au nom de la commission des Affaires économiques sur la proposition de loi présentée par MM. Yvon Collin et Jean-Michel Baylet tendant à généraliser l'assurance récolte obligatoire. Session ordinaire de 2008-2009. Sénat, 2008.

Sterman J D. Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. McGraw Hill, 2000, 982 p.

Thieken A H, Kreibich H, Muller M and Merz B, Coping with floods: peparedness, response and recovery of flood-affected residents in Germany in 2002, *Hydrological Sciences Journal,* 2007, 52(5): 1016-1037 pp.

Tierney K and Bruneau M, Conceptualizing and measuring resilience: a key to disaster loss reduction, *TR News,* 2007, 250: 14-18 pp. Disponible sur: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/trnews/trnews250_p14-17.pdf

Timmerman P, Vulnerability, Resilience and Collapse of Society. Environmental Monograph No. 1. Institute for Environmental Studies - University of Toronto, Toronto. 1981, 42 p. Disponible sur: http://dx.doi.org/10.1007/BF02423391

Tol R S J, Estimates of the Damage Costs of Climate Change - Part II. Dynamic Estimates, *Environmental and Resource Economics,* 2002, 21: 135-160 pp.

Torterotot J P. Le coût des dommages dus aux inondations : Estimation et analyse des incertitudes, 1993, 283 p. Thèse de doctorat. École Nationale des Ponts et Chaussées. Paris.

Treuil J-P and Mullon C, Expérimentation sur mondes artificiels: pour une réflexion méthodologique, Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement, 1996, Citédes Sciences et de l'Industrie, Paris, Actes des journées du programme Environnement, Vie et Sociétés, 6 p.

Treuil J P, Drogoul A and Zucker J D. Modélisation et simulation à base d'agents. Vottem (Belgique). Dunod, 2008, 322 p.

Turner II B L, Kasperson R E, Matson P A, McCarthy J J, Corell R W, Christensen L, Eckley N, Kasperson J X, Luers A, Martello M L, Polsky C, Pulsipher A and Schillerb A, A framework for vulnerability analysis in sustainability science, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003a, Washington, 8074–8079 pp.

Turner II B L, Matson P A, McCarthy J J, Corell R W, Christensend L, Eckley N, Hovelsrud-Broda G K, Kasperson J X, Kasperson R E, Luers A, Martello M L, Mathiesen S, Naylor R, Polsky C, Pulsipher A, Schillerb A, Selink H and Tylerl N, Illustrating the coupled human–environment system for vulnerability analysis: Three case studies Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003b, US, The National Academy of Sciences.

Tversky A and Kahneman D, Loss Aversion in Riskless Choice: A Reference-Dependent Model, *The Quarterly Journal of Economics,* 1991, 106(4): 1039-1061 pp.

USACE, AGDAM (Agricultural Flood Damage Analysis) - Users Manual. US Army Corps of Engineers, Davis, California. 1985, 155 p.

Van Ittersum M K, Ewert F, Heckelei T, Wery J, Alkan Olsson J, Andersen E, Bezlepkina I, Brouwer F, Donatelli M, Flichman G, Olsson L, Rizzoli A E, van der Wal T, Wien J E and Wolf J, Integrated assessment of agricultural systems - A component-based framework for the European Union (SEAMLESS), *Agricultural Systems,* 2008, 96(1-3): 150-165 pp.

Vogel C, Moser S C, Kasperson R E and Dabelko G D, Linking vulnerability, adaptation, and resilience science to practice: Pathways, players, and partnerships, *Global Environmental Change,* 2007, 17(3-4): 349-364 pp.

Von Bertalanffy L. General System Theory. New York. Georges Braziller, 1968, 308 p.

Walker B, Holling C S, Carpenter S R and Kinzig A, Resilience, Adaptability and Transformability in Social--ecological Systems, *Ecology and Society,* 2004, 9(2): 5 p. Disponible sur: http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/

Walker B H, Ludwig D, Holling C S and Peterman R M, Stability of Semi-Arid Savanna Grazing Systems, *Journal of Ecology,* 1981, 69(2): 473-498 pp.

Wisner B, Blaikie P, Cannon T and Davis I. At Risk. Oxon. Routledge, 2004, 471 p.

Woolcock M, Social capital and economic development: Toward a theoretical synthesis and policy framework, *Theory and Society* 1998, 27(2): 151-208 pp.

Wossink G A A, de Koeijer T J and Renkema J A, Environmental-economic policy assessment: A farm economic approach, *Agricultural Systems,* 1992, 39(4): 421-438 pp.

Zenou B. Le capital social comme un potentiel d'interaction cooperative, 2003, 690 p. Thèse de doctorat. Université de Montpellier 1. Montpellier.

Zimmermann A, Heckelei T and Domínguez I P, Modelling farm structural change for integrated ex-ante assessment: review of methods and determinants, *Environmental Science & Policy,* 2009, 12(5): 601-618 pp.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES FIGURES XVII

LISTE DES TABLEAUX XXV

TABLE DES ENCADRÉS XXIX

TABLE DES ANNEXES XXXI

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

PARTIE I ..... VULNÉRABILITÉ, MODÉLISATION DES SYSTÈMES AGRICOLES ET ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES PROJETS DE GESTION DES INONDATIONS 17

CHAPITRE 1. CONCEPTUALISATION ET ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ 19

1.1 Les concepts clés 20

1.1.1. Définitions retenues des concepts de vulnérabilité, résilience et adaptation 20

1.1.2. Vulnérabilité, aléa, exposition et effets 20

1.2 Analyse du lien entre les concepts de vulnérabilité, résilience et adaptation 22

1.3 Vulnérabilité et risques naturels 23

1.3.1. Distinction entre vulnérabilité biophysique et vulnérabilité sociale 23

1.3.2. Une définition cherchant à unifier le courant sur la gestion des risques naturels 25

1.3.3. Cadres d'analyse proposés : lien entre vulnérabilité sociale et biophysique 26

1.4 Vulnérabilité, accès et formes de capitaux 27

1.4.1. Vulnérabilité et questions d'accès aux ressources : la théorie des capabilités 28

1.4.2. Nouvelle conception des formes de capitaux en économie et vulnérabilité 29

1.4.3. Stratégie de remise en route et substituabilité de certaines formes de capitaux 33

1.5 Résilience et vulnérabilité 34

1.5.1. Définition originelle de la résilience en écologie 34

1.5.2. La stabilité : une vision ingénieuriale de la résilience 35

1.5.3. Résilience et théorie de la viabilité 35

1.5.4. La résilience dans notre modèle 36

1.6 Vulnérabilité et changement climatique 37

1.6.1. La notion de Socio-Ecological System 37

1.6.2. Adaptation et vulnérabilité 37

1.7 Évaluation de la vulnérabilité 38

1.7.1. Évaluation par des approches multicritères 38

1.7.2. Évaluation économique de la vulnérabilité 39

1.8 Analyses existantes de la vulnérabilité des systèmes agricoles 42

1.8.1. Méthode Inondabilité 42

1.8.2. Approches semi-quantitatives d'évaluation 43
1.8.3. Tentative d'évaluation quantitative de la vulnérabilité agricole 45
1.9 Conclusions et hypothèses de travail retenues 46
1.9.1. Définition de la vulnérabilité 46
1.9.2. Le système : l'exploitation agricole 46
1.9.3. L'aléa et l'exposition : la crue et l'inondation 46
1.9.4. Place de la résilience dans l'analyse 47
1.9.5. Evaluation de la vulnérabilité 48

CHAPITRE 2. MODÉLISATION DES EXPLOITATIONS AGRICOLES 51

2.1 Objectifs de recherche et modélisation 52
2.1.1. Positionnement 52
2.1.2. Étapes de la démarche 52
2.2 Modélisation économique d'optimisation de la production agricole 53
2.2.1. Modélisation de la production 53
2.2.2. Modélisation de la décision par l'approche de rationalité classique 54
2.2.3. De la rationalité substantive à la rationalité procédurale (Simon, 1976) 55
2.3 Les couplages de modèles : les modèles bioéconomiques 56
2.3.1. Principes de modélisation 56
2.3.2. The Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) 57
2.3.3. La démarche SEAMLESS 59
2.3.4. Intérêt et limites de ces approches 61
2.4 Modélisation systémique 61
2.4.1. Définition de l'approche systémique 61
2.4.2. Modélisation dynamique des systèmes 62
2.4.3. Modélisation systémique appliquée aux systèmes agronomiques 63
2.5 Modélisation orientée objet et systèmes multi-agents 65
2.5.1. Conception objet, conception fonctionnelle 65
2.5.2. Distinction objet / agent 65
2.5.3. Modélisations objet/SMA des exploitations agricoles 66
2.5.4. Description et Unified Modelling Language (UML) 67
2.5.5. Exemple du modèle AGRIPOLIS : un SMA pour l'évaluation économique de la Politique Agricole Commune 67
2.6 Conclusions et hypothèses de travail retenues 70
2.6.1. Choix d'une modélisation systémique 70
2.6.2. Choix d'une rationalité procédurale et d'un modèle de décision de type « action » 71

CHAPITRE 3. ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES PROJETS DE GESTION DES INONDATIONS 73

3.2 Analyse Coût-Bénéfice 74

3.2.1. Historique et principes théoriques 74
3.2.2. Quelques définitions : coûts, bénéfices et valeur actuelle nette 74
3.2.3. Etapes de l'analyse coût-bénéfice 75
3.2.4. Méthodes d'évaluation de la variation d'utilité dans l'ACB 76
3.3 ACB et gestion des inondations 77
3.3.1. Contexte en France et en Europe 77
3.3.2. Classification des effets liés aux inondations 79
3.3.3. Mise en œuvre d'une ACB pour l'évaluation d'un projet de gestion des inondations 82
3.3.4. Effets des alertes sur les dommages évités 85
3.3.5. Discussions sur l'utilisation de la méthode des dommages évités 85
3.3.6. Difficultés méthodologiques pour l'application de l'ACB aux nouvelles politiques de gestion des inondations 87
3.3.7. Conclusions 91
3.4 Les pratiques existantes de modélisation des dommages agricoles 92
3.4.1. Aperçu général 92
3.4.2. Paramètres de l'aléa pris en compte pour l'estimation des dommages 93
3.4.3. Catégories de dommages considérées 94
3.4.4. Indicateurs de dommages considérés 97
3.5 Éléments de retours d'expérience sur deux catastrophes 101
3.6 Conclusions et hypothèses de travail retenues 103
3.6.1. Conclusions 103
3.6.2. Hypothèses de travail retenues 103

CONCLUSIONS DE LA PARTIE I 105

PARTIE II ..... DÉVELOPPEMENT DUNE APPROCHE SYSTÉMIQUE DE MODÉLISATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES EXPLOITATIONS AGRICOLES FACE AUX INONDATIONS 107

CHAPITRE 4. MÉTHODE ET CADRE CONCEPTUEL UTILISÉS POUR LA MODÉLISATION 109
4.1 Démarche mise en œuvre 110
4.2 Description du système étudié et de son environnement 111
4.2.1. Structure du système 111
4.2.2. Les différentes formes de capitaux de l'exploitation agricole 112
4.2.3. Environnement du système 114
4.3 Modélisation du fonctionnement de l'exploitation agricole 115
4.3.1. Les dimensions prises en compte 115
4.3.2. Modélisation du fonctionnement de l'exploitation agricole en temps normal 116
4.4 Les effets de l'inondation sur l'exploitation agricole 119
4.4.1. Echelles spatio-temporelles du modèle 119
4.4.2. Effets de l'inondation sur la structure et le fonctionnement 121

4.4.3. Profils des exploitants et modes de réalisation 122
4.5 Résultats attendus du modèle 123
4.6 Cadre d'évaluation des dommages 124
4.6.1. Evaluation des dommages directs 124
4.6.2. Evaluation des dommages induits sur l'activité 124
4.7 Synthèse des principales hypothèses du modèle EVA 125
4.8 Conclusions 127

CHAPITRE 5. DESCRIPTION DU MODÈLE DE VULNÉRABILITÉ EVA 129

5.1 Structure générale du modèle 130
5.1.1. Liste et définition des objets utilisés dans le modèle de vulnérabilité 130
5.1.2. Relations d'héritage : propriétés communes 131
5.1.3. Relations de composition : construction d'ensemble 132
5.1.4. Relations d'association : description de la localisation spatiale 132
5.1.5. Synthèse de la structure du modèle 133
5.2 Territoire, éléments spatiaux et inondation 135
5.2.1. Les éléments spatiaux 135
5.2.2. L'inondation 135
5.3 L'exploitation agricole : composantes physiques, tâches, ressources externes et exploitant 136
5.3.1. Description de la classe `Exploitation_Agricole` et de ses attributs 136
5.3.2. Les composantes physiques 136
5.3.3. Les parcelles 139
5.3.4. Le matériel végétal 140
5.3.5. Production en cours sur les parcelles 141
5.3.6. Les bâtiments 142
5.3.7. Le matériel agricole 143
5.3.8. Stocks d'intrants et de produits 144
5.3.9. Tâches 146
5.3.10. Ressources externes mobilisables 148
5.3.11. L'Exploitant 148
5.4 Modèle de données d'entrées 154
5.4.1. Description du modèle de données 154
5.4.2. Intérêt et perspectives d'utilisation 155
5.5 Valorisations financière et économique 157
5.6 Sorties du modèle : indicateurs de vulnérabilité 161
5.6.1. Indicateurs non monétaires 161
5.6.2. Indicateurs de dommages monétaires 163
5.6.3. Synthèse 163

5.7 Conclusion 165

PARTIE III ..... APPLICATION DU MODÈLE EVA SUR LA ZONE RHÔNE AVAL 169

CHAPITRE 6. CADRE ET HYPOTHÈSES DE L'APPLICATION 171

6.1 Liaison d'une problématique de recherche et des besoins opérationnels 172

6.1.1. Des préoccupations au cœur de notre problématique 172

6.1.2. Articulation du projet « Évaluation de la Vulnérabilité Agricole » et de la thèse 173

6.1.3. Modalités de réalisation des enquêtes 176

6.2 Exploitations types sur le Rhône aval 177

6.2.1. Introduction 177

6.2.2. Représentativité des exploitations types 178

6.2.3. Exploitation arboricole 180

6.2.4. Exploitation viticole 181

6.2.1. Exploitation spécialisée en céréales et maraîchage 182

6.2.2. Bilan des caractéristiques des exploitations types 183

6.3 Données collectées et hypothèses de simulation 183

6.3.1. Données techniques de production (`Production tasks`) 183

6.3.2. Données d'endommagement (Damaging_Data) 184

6.3.3. Données sur la remise en état (`Recovery tasks`) 185

6.3.4. Hypothèses de valorisation (`Monetizing data`) 185

6.3.5. Bilan de l'ensemble des données utilisées pour la simulation 186

6.4 Scénarios d'inondations simulés 189

6.4.1. Scénarios d'exposition des exploitations 189

6.4.2. Scénarios d'inondation 190

6.5 Conclusions 191

CHAPITRE 7. CARACTÉRISATION ET ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DE TROIS EXPLOITATIONS TYPES. 193

7.1 Plan d'expérience retenu 194

7.2 Indicateurs de vulnérabilité non monétaires 194

7.2.1. Utilisabilité des composantes physiques 194

7.2.2. Effets sur l'organisation du travail à l'échelle de l'exploitation agricole 195

7.3 Dommages directs 198

7.4 Approche financière des dommages à l'exploitation 200

7.4.1. Analyse du dommage total en fonction des différents profils d'exploitants 200

7.4.2. Analyse de la répartition entre coûts de restauration et pertes de revenu 205

7.4.3. Analyse de la perte de revenu en fonction du profil 209

7.5 Prise en compte de l'assurance dans l'approche financière 211

7.5.1. Catégories de dommages indemnisés et hypothèses de calcul 211

7.5.2. Comparaison des dommages financiers bruts et indemnisés 216
7.6 Approche économique des dommages 217
7.6.1. Prise en compte de la stratégie de remise en route dans l'évaluation économique 217
7.6.2. Sensibilité à la hauteur d'inondation 224
7.6.3. Sensibilité à la période d'occurrence 226
7.6.4. Sensibilité à la durée 227
7.7 Conclusions 229
7.7.1. Description des potentialités du modèle 229
7.7.2. Principaux résultats 229
7.7.3. Perspectives d'utilisation du modèle 232
7.7.4. Perspectives d'amélioration du modèle 232

CHAPITRE 8. ÉVALUATION DEs MESURES DE RÉDUCTION DE LA VULNÉRABILITÉ POUR TROIS EXPLOITATIONS TYPES 237

8.1 Plan d'expérience 238
8.1.1. Paramètres 238
8.1.2. Pondération des simulations 240
8.1.3. Modalité de l'évaluation 241
8.2 Modification de la hauteur d'élévation des composantes de l'exploitation 243
8.2.1. Surélévation d'un bâtiment (M1) 243
8.2.2. Surélévation d'une liste de matériel (M2) 246
8.2.3. Surélévation d'une liste d'intrants (M3) 248
8.2.4. Surélévation des plantations (M4) 251
8.3 Modification de la localisation des composantes 253
8.3.1. Relocalisation définitive d'un bâtiment (M5) 253
8.3.2. Évacuation temporaire d'une liste de matériels (M6) 255
8.4 Modification de la gestion des stocks (M7) 257
8.4.1. Principes Présentation de la mesure et hypothèses 257
8.4.2. Dommages évités : analyse de quelques scénarios 258
8.4.3. DEMA et coût maximal 259
8.5 Modification du profil (M8) 260
8.5.1. Présentation de la mesure et hypothèses 260
8.5.2. Dommages évités : analyse de quelques scénarios 260
8.5.3. DEMA et coût maximal 261
8.6 Synthèse de l'analyse des mesures 262
8.6.1. Analyse en termes d'exposition 262
8.6.2. Analyse en termes de profils 263
8.6.3. Classement des mesures par exploitations types 263

8.7 Conclusions 267
8.7.1. Résultats principaux 267
8.7.2. Apport du modèle EVA pour l'aide à la décision 267
8.7.3. Perspectives de recherche et d'utilisation du modèle EVA 268

CONCLUSIONS DE LA PARTIE III 271

CONCLUSIONS GÉNÉRALES 273

ANNEXES 279

BIBLIOGRAPHIE 373

TABLE DES MATIERES 387

VU et PERMIS D'IMPRIMER

A Montpellier, le

Le Président de l'Université Montpellier I

Philippe Augé