



HAL
open science

Activités agricoles et qualité des eaux de surface au niveau d'un petit bassin versant Gascon : Modélisation multicritère pour le zonage des risques environnementaux

H. Bernert

► **To cite this version:**

H. Bernert. Activités agricoles et qualité des eaux de surface au niveau d'un petit bassin versant Gascon : Modélisation multicritère pour le zonage des risques environnementaux. Sciences de l'environnement. 2010. hal-02594980

HAL Id: hal-02594980

<https://hal.inrae.fr/hal-02594980v1>

Submitted on 15 May 2020

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

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



Activités agricoles et qualité des eaux de surface au niveau d'un petit bassin versant Gascon

Modélisation multicritère pour le zonage des risques environnementaux

Réalisé Par :

Hélène Bernert

Sous la direction de :

Francis Macary

Cemagref- Unité de recherche Aménités
et Dynamique de l'Espace Rural

50 avenue de Verdun
33610 Cestas

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le Cemagref de bordeaux, et en particulier l'unité de recherche ADBX, de m'avoir accueilli pour ce stage de fin d'études. Pour m'avoir fourni un cadre et des conditions de travail remarquables.

Je remercie tout particulièrement Francis Macary, mon maître de stage, pour l'encadrement rigoureux qu'il m'a offert, la patience et la disponibilité dont il a fait preuve, pour le partage de son expérience et pour sa constante bonne humeur, contribuant ainsi à un stage constructif et convivial.

Merci également à Daniel Uny pour son soutien précieux en SIG, à Juscelino Almeida-Dias pour sa disponibilité et son aide pour les méthodes multicritère. Merci à Vincent Gobert et aux agriculteurs d'Auradé pour toutes les informations fournies. Merci à ceux qui ont pu contribuer à l'étude par leur expertise, notamment Paul Bordenave, Anne et Jean-Luc Probst et Philippe Chery.

Je n'oublie pas tous les stagiaires, thésards et contractuels qui ont beaucoup participé à la bonne ambiance générale du stage et avec qui j'ai passé de très bons moments : Véronique, Geneviève, Aurélie, Nadège, Younes, Benjamin, Kévin, Lionel, Corinne, Florian, Vincent, Odile,...

Merci aussi à Nicole pour la relecture.

Enfin, à Manuel, merci pour tout.

Résumé - Abstract

Titre	Activités agricoles et qualité des eaux de surface au niveau d'un petit bassin versant Gascon. Modélisation multicritère pour le zonage des risques environnementaux.
Title	Agricultural activities and water quality within a small watershed in Gascogne. Modelling multicriteria for environmental risk zoning.
Auteur- <i>Author</i>	Hélène BERNERT
Résumé	<p>Ce document présente une modélisation de l'évaluation des zones à risque de contamination des eaux de surfaces par les activités agricoles sur un petit bassin versant des coteaux de Gascogne. Le contexte topographique et pédoclimatique confère au bassin versant expérimental d'Auradé une très forte vulnérabilité au risque de transfert de contaminants vers les eaux de surfaces. La pression agricole est aussi déterminante. Les transferts sont compensés par les mesures environnementales adoptées par les agriculteurs pour la protection du ruisseau.</p> <p>Cette étude s'inscrit dans la continuité des projets agroenvironnementaux menés par Francis Macary sur la problématique érosion sur le bassin-versant de l'Oir en Normandie.</p> <p>La modélisation multicritère sous ELECTRE Tri-C permet de mettre en œuvre des données qualitatives et quantitatives. L'échelle fine de travail offre une bonne échelle pour optimiser la modélisation de la vulnérabilité du milieu, de la pression agricole et des dispositifs agroenvironnementaux de protection tels que les bandes enherbées et la ripisylve.</p> <p>Le risque de contamination est présenté sous forme cartographique à l'échelle parcellaire pour trois types de pression agricole : le transfert des phytosanitaires insolubles dans l'eau et adsorbés sur des particules érodées, les produits phytosanitaires solubles et l'excès d'azote en solution. Il a aussi été mis en évidence l'augmentation du risque pour des parcelles qui ne seraient pas protégées par une bande enherbée.</p>
Abstract	<p>This report presents a risk evaluation of surface water contaminations by agricultural activities within a little watershed in Gascogne. The Auradé experimental watershed has a high vulnerability risk for the contaminants transfers toward water surfaces due to the pedological and climatic context. The agricultural pressure is decisive. The environmental measures adopted by cultivators for the stream protection balance the contaminants transfers.</p> <p>This study is the continuation of Francis Macary work on the environmental issue of erosion in the Oir watershed in Normandy.</p> <p>The modelling multicriteria with ELECTRE Tri-C is adapted to qualitative and quantitative data. The work precise scale allows a high modelling optimization of environmental protection like grass strips and riparian zones. The contamination risk is represented at a plot scale for three types of agricultural pressure: transfer of indissoluble pesticides with suspended sediments, water-soluble pesticides and nitrogen excess in solution. Furthermore, we illustrate an increase of the risk level for the plots which are not protected by grass strips.</p>
Mots Clés	Risque de contamination, pression agricole, vulnérabilité, bassin versant, bandes enherbées, ELECTRE Tri-C, AMCD, SIG, coteaux de Gascogne.
Key-words	Contamination risk, agricultural pressure, vulnerability, watershed, grass strip, ELECTRE Tri-C, MCDA, GIS, Gascogne.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé - Abstract	3
Table des matières	4
Table des figures	6
Table des tableaux	7
Glossaire	8
Glossaire	8
Introduction	9
1. Le bassin versant expérimental d'Auradé : enjeux et caractérisation d'une zone à risque environnemental	11
1.1. Les enjeux de l'étude : une rivière à préserver pour l'approvisionnement en eau potable de l'Isle Jourdain	11
1.2. L'association des agriculteurs d'Auradé : un groupe clé dans les initiatives de la protection agroenvironnementale	11
1.2.1. Une association qui existe depuis 30 ans	11
1.2.2. Des actions agroenvironnementales sont mises en place sur le territoire	12
1.3. Le Cemagref de Bordeaux est associé à des projets sur les coteaux de Gascogne 12	
1.4. Caractérisation du milieu physique du bassin versant expérimental d'Auradé 15	
1.4.1. Localisation du territoire d'étude	15
1.4.2. Le climat	15
1.4.3. Les sols	19
1.4.4. Le relief	21
1.5. Caractérisation des pratiques agricoles sur le bassin versant	21
1.5.1. L'assolement	21
1.5.2. Les pratiques d'utilisation des produits phytosanitaires	23
1.5.3. Les pratiques de fertilisation azotée	24
1.6. Un préalable à l'étude : les mécanismes de transferts des contaminants dans un Bassin versant	25
1.6.1. Les types de transferts de contaminants	25
1.6.2. Les mécanismes de transferts des nitrates	25
1.6.3. Les mécanismes de transferts des produits phytosanitaires	26
1.6.4. Les différents paramètres concourant au risque de transfert des contaminants	26
1.6.5. Mais certains éléments du paysage ralentissent ou diminuent le transfert des contaminants	28

2.	Méthode d'estimation des risques agroenvironnementaux par une modélisation multicritère spatialisée	31
2.1.	La modélisation multicritère.....	31
2.1.1.	La méthode ELECTRE Tri-C est adaptée à l'étude.....	32
2.1.2.	Principes de la méthode Electre Tri.....	33
2.2.	Les différents critères retenus pour le risque de contamination des eaux de surfaces par les nitrates et les pesticides	35
2.2.1.	Généralités.....	35
2.2.2.	La vulnérabilité du milieu : les critères du milieu physique	37
2.2.2.1.	L'effet surfacique des pentes	37
2.2.2.2.	La nature des sols	39
2.2.2.3.	La connectivité au ruisseau.....	41
2.2.2.4.	Le rôle de la ripisylve.....	42
2.2.2.5.	Le rôle des bandes enherbées	44
2.2.3.	L'appréciation de la pression agricole sur le bassin versant d'Auradé.....	45
2.2.3.1.	La couverture du sol : risque érosion	46
2.2.3.2.	Apports azoté : risque de pollution par les nitrates	47
2.2.3.3.	Le risque phytosanitaire apprécié par l'indice de fréquence de traitement : 48	
2.3.	Pondération des critères	50
2.3.1.	Problématique Erosion	50
2.3.2.	Problématique azote et phytosanitaire.....	51
2.4.	Utilisation des seuils de véto pour les critères de pression.....	52
2.5.	Définition du seuil de crédibilité.....	52
3.	Résultats et discussion.....	53
3.1.	Caractérisation des parcelles par rapport au risque érosion	55
3.2.	Caractérisation des parcelles par rapport au risque de transfert de produits phytosanitaires.....	57
3.3.	Caractérisation des parcelles par rapport au risque azoté	61
3.4.	Effet des dispositifs agroenvironnementaux sur l'affectation des parcelles aux catégories de risque.....	62
4.	Discussion et perspectives.....	65
4.1.1.	La méthode présente des avantages et des inconvénients	65
4.2.	Perspectives d'améliorations du modèle	66
4.3.	Effet du redécoupage des grandes parcelles sur l'affectation des parcelles à une catégorie de risque	68
4.3.1.	Comparaison de la campagne 2010 avec la campagne 2009.....	68
	Conclusion.....	69
	Bibliographie.....	71
	Table des Annexes :	73

Table des figures

Figure 1 : Localisation du bassin-versant expérimental d'Auradé	14
Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station de l'Isle Jourdain. (Source Météo France).....	16
Figure 3 : Représentation cartographique des sols sur le bassin versant expérimental d'Auradé.....	18
Figure 4 : Les sols du BVE, d'après la cartographie des sols de J.P Party	19
Figure 5 : Représentation cartographique du relief sur le bassin versant expérimental d'Auradé.....	20
Figure 6 : Caractérisation des types de pentes sur le bassin versant, d'après MNT 25 m IGN.....	21
Figure 7 : Assolement 2010 du bassin versant expérimental d'Auradé	22
Figure 8 : Répartition de l'assolement pour la campagne 2009-2010 sur le bassin versant d'Auradé.....	23
Figure 9 : Caractérisation des pratiques phytosanitaires dans l'Association des Agriculteurs d'Auradé.....	23
Figure 10 : Principaux processus en jeu dans le devenir des pesticides entrant par ruissellement au sein d'une bande enherbée (Lacas, 2005).	28
Figure 11 : Schéma synthétique des critères utilisés pour la modélisation du risque de contamination des eaux de surface.....	36
Figure 12 : Représentation cartographique du parcellaire 2010 ainsi que du réseau hydrographique du bassin versant expérimental d'Auradé.....	40
Figure 13 : Affectation des parcelles du bassin versant expérimental d'Auradé aux catégories de risque érosion.....	54
Figure 14 : Affectation des parcelles du bassin versant expérimental d'Auradé aux catégories de risque produits phytosanitaires	56
Figure 15 : Affectation des parcelles du bassin versant expérimental d'Auradé aux catégories de risque excédents d'azote	60
Figure 16 : Représentation des différences de catégories en simulant une bande enherbée inefficace	63

Table des tableaux

Tableau 1: Moyenne des apports en N de l'AAA et de la région Midi-Pyrénées	24
Tableau 2 : Classes des pentes pour le calcul de l'indicateur : $\sum Pu*Su$	38
Tableau 3 : Les différentes classes de risques utilisées pour le traitement ELECTRE Tri-C, critère effet surfacique des pentes	38
Tableau 4 : Notation des différents sols du bassin versant d'Auradé	39
Tableau 5 : Classes de risques du critère 2 sol	41
Tableau 6 : Notation terrain du critère 3 connectivité	42
Tableau 7 : Notation Electre-TriC du critère 3 connectivité	42
Tableau 8 : Notation du critère 4 ripisylve	43
Tableau 9 : Notation ElectreTri-C pour le critère 4 ripisylve	43
Tableau 10 : Echelle de notation du critère 5 bandes enherbées	44
Tableau 11 : Notation du risque pour le critère 5 bandes enherbées	45
Tableau 12 : Echelle de notation du critère 6a, couverture du sol	46
Tableau 13 : Notation Electre-TriC du critère 6a, couverture du sol	46
Tableau 14 : Correction des apports pour prendre en compte le fractionnement	47
Tableau 15 : Notation Electre Tri-C pour le critère pression Azote corrigé	48
Tableau 16 : Echelle de valeur de risque pour la pression phytosanitaire	49
Tableau 17 : Notation du critère de pression phytosanitaire	49
Tableau 18 : Pondération des différents critères pour la problématique érosion	50
Tableau 19 : Pondération des différents critères pour la problématique azote et produits phytosanitaires	51
Tableau 20 : Résultats de la modélisation, pourcentage d'affectations directes et finales	53
Tableau 21 : Pourcentage de la SAU affectée dans chaque catégorie de risque pour l'objectif risque érosion	55
Tableau 22 : Pourcentage de la SAU affectée dans chaque catégorie de risque pour l'objectif risque produits phytosanitaires	57
Tableau 23 : Extrait de la matrice de performance pour l'évaluation multicritère du risque phytosanitaire	58
Tableau 24 : Pourcentage de la SAU affectée dans chaque catégorie de risque pour l'objectif risque produits phytosanitaires	61
Tableau 25 : Nombre de parcelles ayant changé de catégories, effet bandes enherbées	62

Glossaire

AAA : Association des Agriculteurs d'Auradé.

ABVE : Bassin versant expérimental d'Auradé.

ADBX : Unité de recherche Aménités et Dynamiques des Espaces Ruraux à Bordeaux.

AMCD : Analyse Multicritère d'Aide à la Décision.

Battance : Dégradation de la structure du sol en surface sous l'influence des précipitations formant une "croûte de battance" difficile à traverser par l'eau.

BV : Bassin versant, secteur géographique de convergence des eaux vers un même point.

CEMAGREF : Organisme de recherche en sciences et technologies pour environnement.

CORPEN : Comité d'orientation pour la réduction de la pollution des eaux par les nitrates, les phosphates et les produits phytosanitaires.

ECOLAB : Laboratoire d'écologie fonctionnelle, Université Paul Sabatier, Toulouse

ELECTRE : ÉLImination Et Choix Caractérisant la Réalité, groupe de méthode AMC.

IFT : Indice de Fréquence de Traitement, indicateur de suivi des pratiques d'utilisation des produits phytosanitaires.

LAMSADE : Laboratoire d'Analyse et de Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision ; laboratoire ayant créé les méthodes ELECTRE.

MAET : Mesures Agro Environnemental Territorialisée

MNT : Modèle Numérique de Terrain.

PAC : Politique Agricole Commune.

PAT: Plan d'Action Territorialisé.

PVE : Plan Végétaux pour l'Environnement.

Ripisylve : L'ensemble des formations boisées, buissonnantes et herbacées présentes sur les rives d'un cours d'eau.

SIG : Système d'Information Géographique

Introduction

L'analyse des dernières statistiques en 2007 montre que la présence des pesticides s'est généralisée à 91 % des cours d'eau en France malgré la diminution de la présence de produits interdits (Commissariat général au développement durable, Service de l'observation et des statistiques, juillet 2010). De la même façon, la quantité de fertilisants retrouvée dans les eaux superficielles est encore alarmante. On assiste donc à la dégradation de quasiment l'ensemble des hydrosystèmes en France. Les pays membres de l'union européenne ont adopté en 2000 la Directive Cadre Européenne sur l'eau dont l'objectif est de parvenir à un bon état écologique et chimique des hydrosystèmes d'ici 2015. En parallèle, la réglementation de la politique agricole commune a évolué de façon à prendre en compte l'environnement dans l'attribution des subventions aux agriculteurs. La profession agricole est donc incitée, par l'intermédiaire des Mesures Agro-Environnementales (MAE), à adopter des pratiques moins polluantes mais aussi à développer des protections du ruisseau comme par exemple les bandes enherbées.

Pour pouvoir progresser encore dans la protection de la ressource en eau, il est essentiel de développer des méthodes pour évaluer le risque potentiel de contamination des eaux de surfaces d'un espace donné. Ce risque découle du croisement entre des facteurs liés au milieu naturel, représentant la vulnérabilité du milieu, et des facteurs d'origine anthropique définissant la pression. L'UR ADBX du Cemagref de Bordeaux, associé au laboratoire ECOLAB à Toulouse, a participé à plusieurs projets de recherches consécutifs, relatifs à l'évaluation du risque de contamination des eaux de surfaces des rivières de la Gascogne. Tout d'abord le projet Imaque (2004-2006), puis le projet Insolevie (2007-2009), et enfin le projet en cours Aguaflash (2009-2012) avec la problématique supplémentaire du risque lié aux crues. Les modèles spatiaux mis en œuvre ont permis d'évaluer le risque de transfert des produits phytosanitaires et des nitrates en excès à différents niveaux d'organisation spatiale. Les résultats sont ensuite agrégés à l'échelle du bassin versant élémentaire de la zone hydrographique.

Dans le cadre des projets précités, une modélisation agro-hydrologique a été également réalisée pour évaluer les flux d'azote dans les cours d'eau (JL. Probst, 2006) et elle est en cours de réalisation pour les flux de phytosanitaires. Mais, ces modèles ne permettent pas de prendre en compte les éléments fins du paysage tels que les bandes enherbées, la ripisylve...

Afin d'apporter des éléments de réponse aux effets des aménagements agroenvironnementaux, le Cemagref a décidé la mise en œuvre d'une démarche de modélisation multicritère pour l'aide à la décision de manière très fine sur un petit bassin versant des Coteaux de Gascogne. Mon stage s'intègre totalement dans cette opération. L'objectif est d'établir un zonage des parcelles à risque environnemental sur le bassin versant expérimental d'Auradé, suivant différents types d'enjeux : érosion, transferts de pesticides et excès d'azote.

Après avoir présenté la problématique de préservation de la ressource en eau sur le territoire, ce mémoire s'attachera donc à caractériser le bassin versant étudié et les pratiques des agriculteurs du territoire. Nous nous intéresserons aussi aux différents mécanismes de transfert des contaminants vers les eaux de surfaces. Nous aborderons ensuite la mise en œuvre de la modélisation multicritère sur le bassin versant. Puis, nous présenterons les résultats de cartographie du risque pour l'année 2010 en mettant en avant l'intérêt de la mise en œuvre de dispositifs environnementaux le long du ruisseau. Enfin, nous évaluerons les limites et les améliorations possibles de la démarche.

1. Le bassin versant expérimental d'Auradé : enjeux et caractérisation d'une zone à risque environnemental

1.1. Les enjeux de l'étude : une rivière à préserver pour l'approvisionnement en eau potable de l'Isle Jourdain

La cartographie des zones à enjeux de l'Agence de l'Eau place la Save et ses affluents, dont la Boulouze, en zone à Enjeux « Pollutions agricoles » vis-à-vis de la gestion qualitative et quantitative de l'eau. Le territoire des coteaux est dominé par l'agriculture « intensive » avec la présence essentiellement de céréales d'hiver, colza, et tournesol. Il présente aussi un fort risque de contamination des eaux de part sa nature physique. Il a ainsi été mesuré une quantité importante de produits phytosanitaires en particulier d'herbicides dans les différents affluents de la Garonne. (AAA 2008)

Or, la station de pompage en rivière de l'Isle Jourdain, pour une capacité de 20000 habitants, constitue l'unique point de production d'eau potable de cette commune en pleine expansion située aux abords de l'agglomération toulousaine. Pour assurer la durabilité de la ressource en eau pour la commune, ainsi que pour parvenir à « un bon état » écologique et chimique du cours d'eau, il est donc important de pouvoir prévoir le risque de pollution à une échelle plus fine et ainsi mettre en place des actions pour diminuer la concentration en nitrates et pesticides dans le cours d'eau. C'est pourquoi, parallèlement au projet européen Aguaflash qui étudie le risque de ces mêmes pollutions à l'échelle de quatre bassins versants dont la Save, puis trois autres en Espagne et Portugal, en période de crues, nous nous sommes intéressés à prévoir le risque de contamination à l'échelle d'un bassin versant élémentaire : le bassin versant expérimental d'Auradé (ABVE). Le niveau d'analyse est effectué à l'échelle de la parcelle agricole qui constitue le lieu de prise de décision par l'agriculteur.

1.2. L'association des agriculteurs d'Auradé : un groupe clé dans les initiatives de la protection agroenvironnementale

1.2.1. Une association qui existe depuis 30 ans

L'Association des Agriculteurs d'Auradé (l'AAA) regroupe depuis 1992, 32 exploitations agricoles désireuses de travailler ensemble à l'amélioration des pratiques, pour une production plus performante et plus soucieuse de l'environnement. L'association travaille à deux échelles différentes :

- au niveau d'un petit bassin versant expérimental de 320 ha à Auradé, où avait été mis en place depuis les années 1980 un suivi de la qualité des eaux par le laboratoire des établissements AZF à Toulouse.

- mais aussi au niveau d'un parcellaire de 2500 ha qui représente l'ensemble des parcelles des agriculteurs ayant au moins une parcelle sur la commune d'Auradé. Depuis ces dernières années, ce suivi est effectué par le laboratoire ECOLAB de l'INP-ENSAT.

Le rôle de l'AAA est d'aider les agriculteurs dans le raisonnement de la fertilisation de leurs cultures mais aussi dans les pratiques phytosanitaires. Elle accompagne également les agriculteurs qui s'engagent dans des démarches environnementales telles que les Mesures Agro-environnementales Territorialisées (MAET) et les Plan végétaux pour l'environnement (PVE). Elle enregistre tous les ans les pratiques de ses adhérents pour permettre le suivi de la qualité de l'eau du Bassin-versant.

1.2.2. Des actions agroenvironnementales sont mises en place sur le territoire

Au début des années 80, il a été mis en place, sur ce bassin versant, des expérimentations pour mesurer l'évolution de la concentration en nitrate. En parallèle, l'Association des Agriculteurs d'Auradé s'est engagée dans une démarche de raisonnement de la fertilisation azotée. Ils ont aussi mis en place des dispositifs enherbés sur l'ensemble de BV de 320 ha. Grâce à ce dispositif, le taux de nitrates dans le Montoussé est passé sensiblement en dessous de la barre des 50 mg/l, seuil de la norme européenne de potabilité de l'eau.

Le Plan d'Action Territorialisé (PAT) Boulouze Save Lisloise Amont, qui a débuté en 2008 pour 5 ans, est porté par l'association. Il a pour but d'améliorer la qualité des eaux du point de captage, notamment par rapport aux produits phytosanitaires. Le PAT se trouve sur 21 communes et environ 150 exploitations sont présentes sur le territoire. Les surfaces agricoles sont constituées essentiellement de céréales et oléo protéagineux (75 %) (AAA 2008). Les différentes actions menées sur le territoire pour la partie agricole concernent :

- les risques de pollutions ponctuelles et diffuses par la possibilité de PVE et de MAET,
- la formation des agriculteurs au raisonnement des pratiques phytosanitaires,
- l'évaluation des risques d'érosion et adaptation des pratiques correctives dans les bassins versants prioritaires,
- la mise en valeur du rôle des zones tampons dans le ralentissement de l'érosion et la diminution des pollutions phytosanitaires.

Toutes ces mesures sont mises en œuvre grâce à la contractualisation par les agriculteurs de MAET. Des actions sont mises en place aussi pour les zones non agricoles.

1.3. Le Cemagref de Bordeaux est associé à des projets sur les coteaux de Gascogne

Le Cemagref, fondé en 1981, est un organisme de recherche spécialisé en sciences et technologies pour l'environnement. Il est à la fois dépendant du Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur ainsi que du Ministère de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Pêche. Ses activités de recherche, d'appui aux politiques publiques et d'expertise, portent sur le domaine principal de la gestion de l'eau et du fonctionnement des milieux aquatiques, ainsi que sur l'interface entre eau et gestion des territoires.

Il est organisé en trois Unités de Recherche. Une unité Ecosystèmes estuariens et poissons migrateurs amphihalins (EPBX), une unité Réseaux, épuration et qualité des eaux (REBX) et une unité Aménités et Dynamiques des espaces ruraux (ADBX). Dans le cadre de mon stage, j'ai intégré l'unité ADBX.

Dans cette unité, plusieurs travaux ont été mis en œuvre concernant les risques environnementaux à différentes échelles pour la qualité de l'eau. Plusieurs projets de recherches auxquels participe l'UR ADBX du Cemagref ont été conduits au cours des dernières années dans la zone géographique des coteaux de Gascogne mais aussi sur le bassin versant d'Auradé. Les projet IMAQUE et INSOLEVIE (Inter région Aquitaine, Midi-Pyrénées) ont permis de mettre en œuvre, par une méthode spatialisée, un indicateur pour déterminer les zones à risques de transfert de contaminant, pesticides et nitrates, à différents niveaux de bassins versants (Macary, Lavie et al. 2006). La méthode développée a permis de comparer les bassins versants entre eux et de les hiérarchiser selon le risque qu'ils représentent. (Probst 2007). Les cartes de synthèse des résultats aident les acteurs du territoire à la définition de zones prioritaires d'actions en matière de préservation de la ressource en eau.

Dernièrement le projet européen SUDOE « AguaFlash », qui fait suite aux précédents projets, a été initié en 2009. Il a pour objet le développement d'une méthode d'évaluation des risques de dégradation de la qualité des eaux dans les bassins versants agricoles au cours des crues. Cette méthode est transposable aux bassins versants du Sud-ouest européens. L'UR ADBX, dont Francis Macary, responsable d'un groupe de tache, intervient dans la détermination des zones potentielles de contamination des eaux de surface sur les bassins versants agricoles de la zone Sud-ouest de l'Europe et la construction du prototype résultant des diverses modélisations (GT5).

L'étude à laquelle je participe se situe sur le bassin versant d'Auradé, qui présente un historique de recherche intéressant. L'Association des Agriculteurs d'Auradé constitue pour nos travaux un interlocuteur idéal. En effet, la connaissance du terrain et de ses acteurs est essentielle dans le travail de prévision des risques environnementaux.

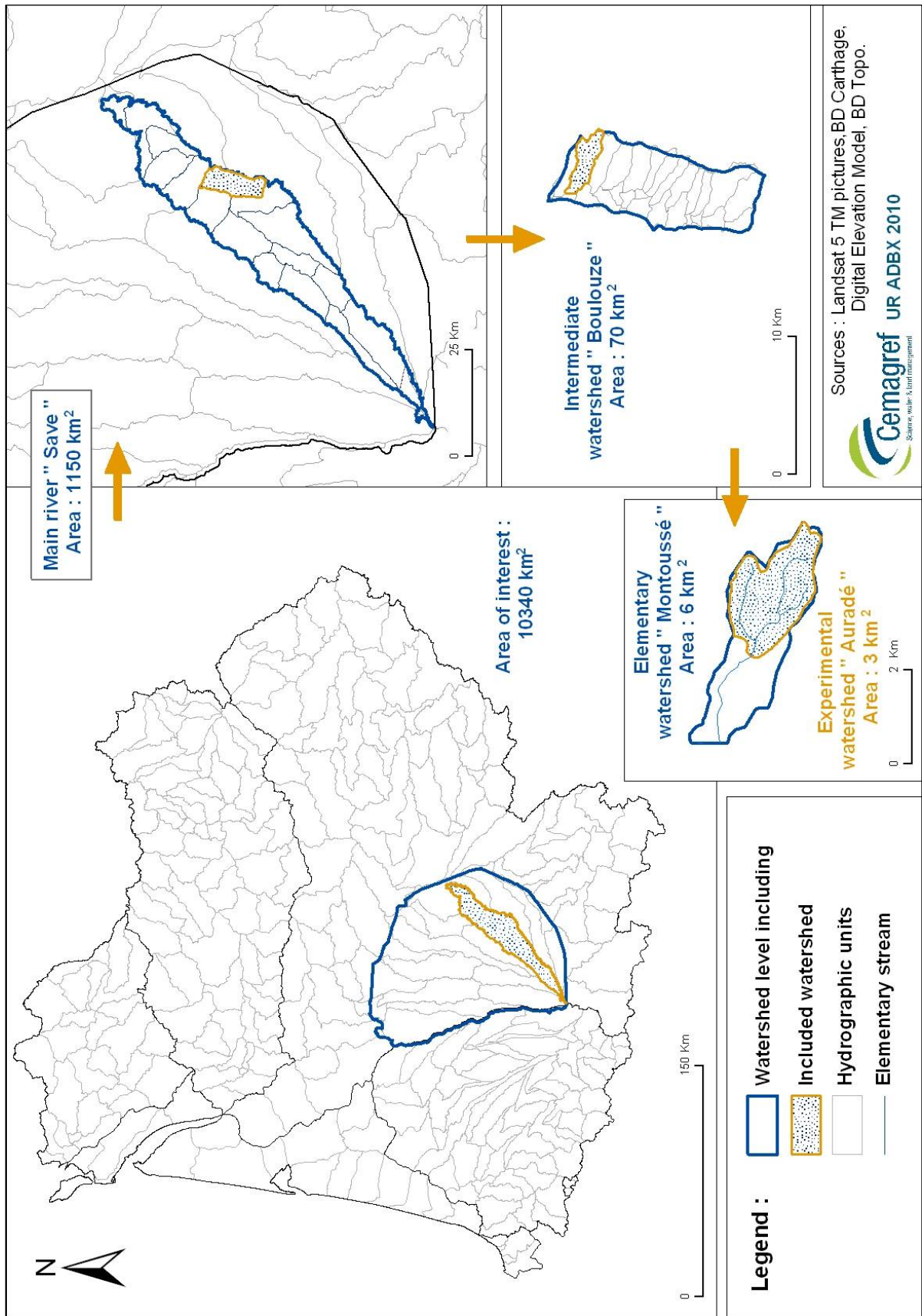


Figure 1 : Localisation du bassin-versant expérimental d'Auradé

1.4. Caractérisation du milieu physique du bassin versant expérimental d'Auradé

Cette partie permet d'avoir un aperçu du territoire d'Auradé d'un point de vue du milieu naturel et d'aborder ainsi les principales causes de vulnérabilité du bassin versant.

1.4.1. Localisation du territoire d'étude

La Save, prend sa source sur le plateau de Lannemezan, dans le piémont pyrénéen et se jette dans la Garonne au niveau de Grenade, à 30km en aval de Toulouse. Elle draine les coteaux de Gascogne sur une longueur de 150 km. Le bassin-versant présente donc une superficie de 1150 km². La Boulouze est l'un des bassins-versants emboîté de la Save qui a été identifié comme prioritaire pour le PAT. Il draine une superficie de 70 km². Le Montoussé est un bassin-versant élémentaire de la Boulouze (Lavie 2005). Le schéma ci-contre (Figure 1) présente la localisation de l'ABVE sur les différents bassins versants des coteaux de Gascogne.

Le BVE d'Auradé se situe sur la commune d'Auradé dans le Gers, et représente une portion (50%) du BV du Montoussé. Sa superficie est de 328 ha. Il est découpé en 85 parcelles appartenant à 12 agriculteurs qui font tous partie de l'Association des Agriculteurs d'Auradé.

1.4.2. Le climat

Pour caractériser le climat du territoire, nous avons utilisé les données de la station météorologique de l'Isle Jourdain, située à 7 km en aval du bassin versant expérimental d'Auradé.

Le climat dans lequel nous nous trouvons est représentatif d'un climat dit toulousain, mêlant variables océaniques, variables méditerranéennes, et spécificités locales dues à la proximité de la barrière pyrénéenne. La région d'étude, d'une part, n'est pas protégée à l'ouest des pluies fréquentes et peu intenses provenant de l'océan Atlantique, d'autre part elle est soumise au vent d'Autan, d'origine méditerranéenne, vent chaud et sec qui circule entre Massif Central et Pyrénées par le seuil de Naurouze. Ajoutons à ces deux masses d'air, les influences pyrénéennes qui apportent à la fois pluies et temps secs et doux. (Lavie 2005)

Nous pouvons constater que les pluies sont étalées de façon assez homogène sur toute l'année sans que n'apparaisse un effet de saisonnalité, à l'exception relative du printemps, légèrement plus soumis aux précipitations (Figure 2). Mais globalement, les précipitations sont assez faibles sur l'année.

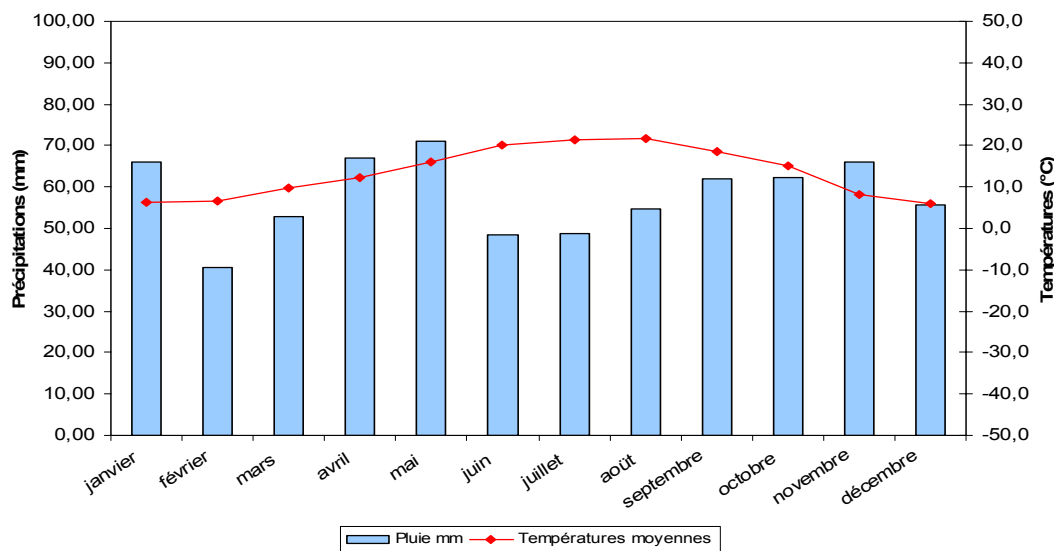


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station de l'Isle Jourdain. (Source Météo France)

Isle Jourdain : Moyenne pluviométrie 1996-2006 : **695 mm**

Moyenne température 1996-2006 : **13.5 °C**

Du côté des températures, elles sont relativement douces (13°C) et l'amplitude thermique annuelle est plutôt faible (< à 20°C), ce qui est typique d'un climat océanique. Nous pouvons conclure que le climat est plutôt sec d'où la présence sur les coteaux d'Auradé de cultures à faible besoin en eau comme le blé et le tournesol.

Enfin, les données météorologiques de la station d'Auch permettent d'évaluer une lame drainante faible de l'ordre de 120 mm. Des faibles pertes d'azote par hectare peuvent donc engendrer des concentrations en nitrates importantes dans le ruisseau.

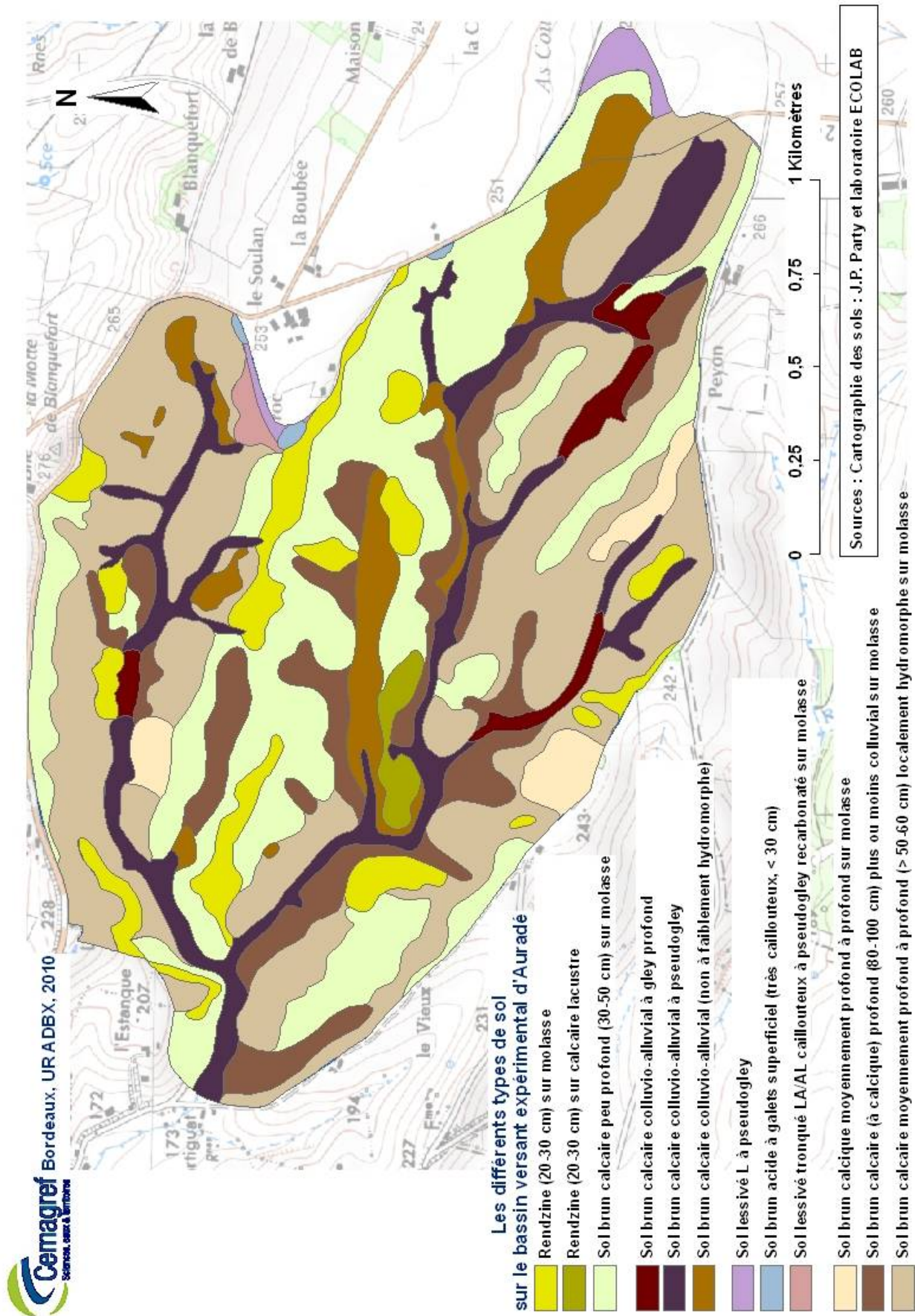


Figure 3 : Représentation cartographique des sols sur le bassin versant expérimental d'Auradé

1.4.3. Les sols

La carte ci-jointe (Figure 3), communiquée par Anne-Probst (DR CNRS au Laboratoire ECOLAB de l'INP-ENSAT à Toulouse) présente la distribution détaillée des sols du bassin-versant expérimental élaborée par J.P. Party en collaboration avec le laboratoire ECOLAB en 2005.

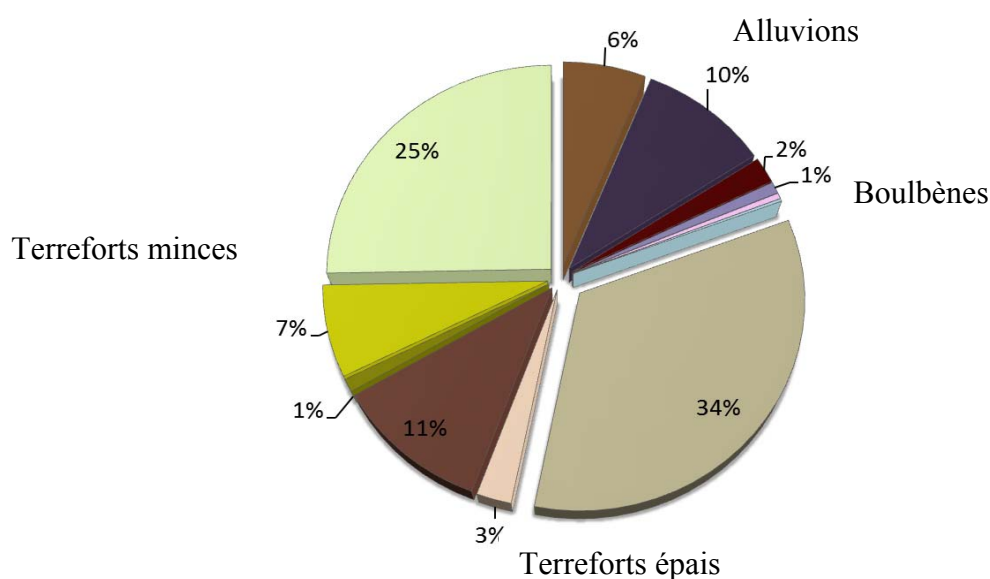


Figure 4 : Les sols du BVE, d'après la cartographie des sols de J.P Party

Les sols sont majoritairement des sols bruns calcaires (Calcosols) moyennement profonds, appelés localement Terreforts (Figure 4). Ces Terreforts présentent une forte teneur en argiles, jusqu'à 44 % pour les sols épais. Ils présentent un pH de 8 (d'après les fosses pédologiques de J.P. Party). Ces Terreforts épais représentent près de 50 % des sols du bassin-versant expérimental (figure ci-dessus).

Les Terreforts minces (Rendzines) sont situés en haut des coteaux et représentent 33 % de la surface de l'ABVE. Ils représentent une sensibilité très forte au ruissellement.

Des sols bruns colluviaux-alluviaux profonds (Fluviosols), avec des teneurs en Argile de 36 % et en limons de 40 % bordent les cours d'eau. Ces sols représentent 18 % du BVE.

Des sols bruns lessivés, (Brunisols) appelés localement les Boulbènes sont très courants dans la région, mais occupent une surface très minime sur le bassin versant expérimental d'Auradé. (1.5%).

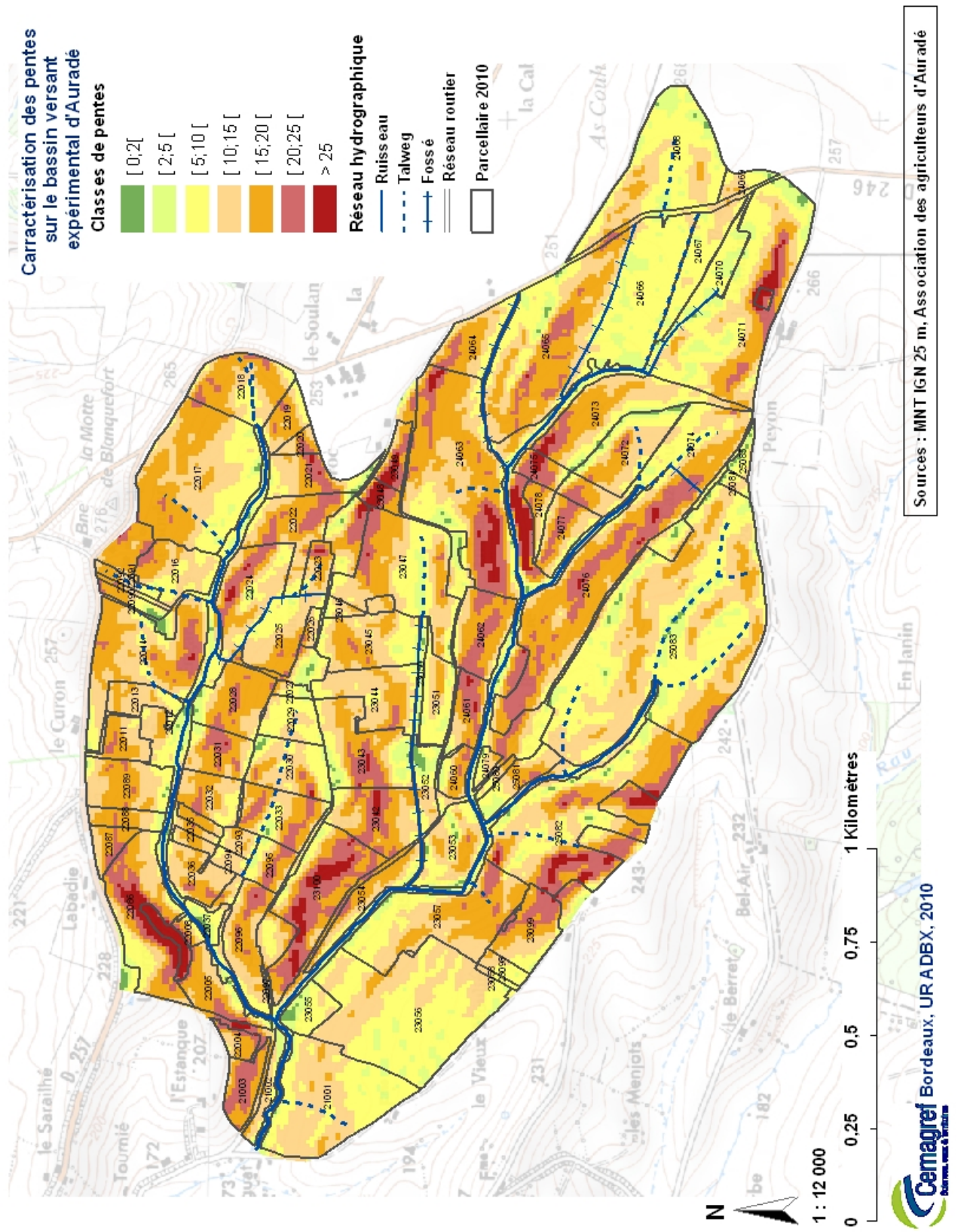


Figure 5 : Représentation cartographique du relief sur le bassin versant expérimental d'Auradé

1.4.4. Le relief

La carte ci-contre (Figure 5) donne un aperçu de la topologie du bassin versant. Il s'agit d'un territoire qui présente un relief assez marqué malgré les faibles altitudes. Le point culminant se trouve à 276 m.

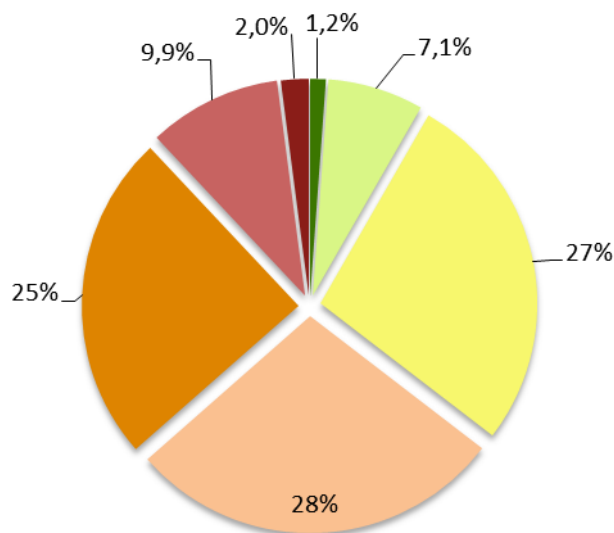


Figure 6 : Caractérisation des types de pentes sur le bassin versant, d'après MNT 25 m IGN

Le graphique ci-dessus (Figure 6) met en évidence les très fortes pentes existant sur le territoire. En effet, près de 45 % des pentes sont supérieures à 15 %. Les replats sont situés uniquement dans les bas-fonds et sont presque inexistantes. L'ensemble du territoire est pourtant cultivé, ce qui induit des risques importants de ruissellement et de transport de contaminants.

1.5. Caractérisation des pratiques agricoles sur le bassin versant

Les enquêtes menées par l'AAA tous les ans sur les pratiques agricoles, nous permettent de caractériser assez précisément l'assolement, la fertilisation apportée ainsi que les pratiques phytosanitaires. Un compte rendu détaillé des pratiques agricoles dans l'association est présenté en annexe A.

1.5.1. L'assolement

Le territoire de l'Association des Agriculteurs d'Auradé (AAA) est traditionnellement une région de culture du blé dur. Il représente 30 % de l'assolement total de l'AAA. Les agriculteurs pratiquent majoritairement une rotation blé (blé dur et blé tendre)-tournesol c'est pourquoi le tournesol est majoritaire pour toutes les années. Le blé tendre représente 18 % des surfaces et le colza 5 %. Celui-ci était en diminution depuis quelques années, mais la mesure agroenvironnementale rotationnelle tend à favoriser son implantation hivernale, afin de permettre une rotation sur 4 ans (colza-blé dur-tournesol-blé tendre) au lieu de la rotation simplifiée sur 2 ans (blé-tournesol).

Assolement 2010 du bassin versant expérimental d'Auradé

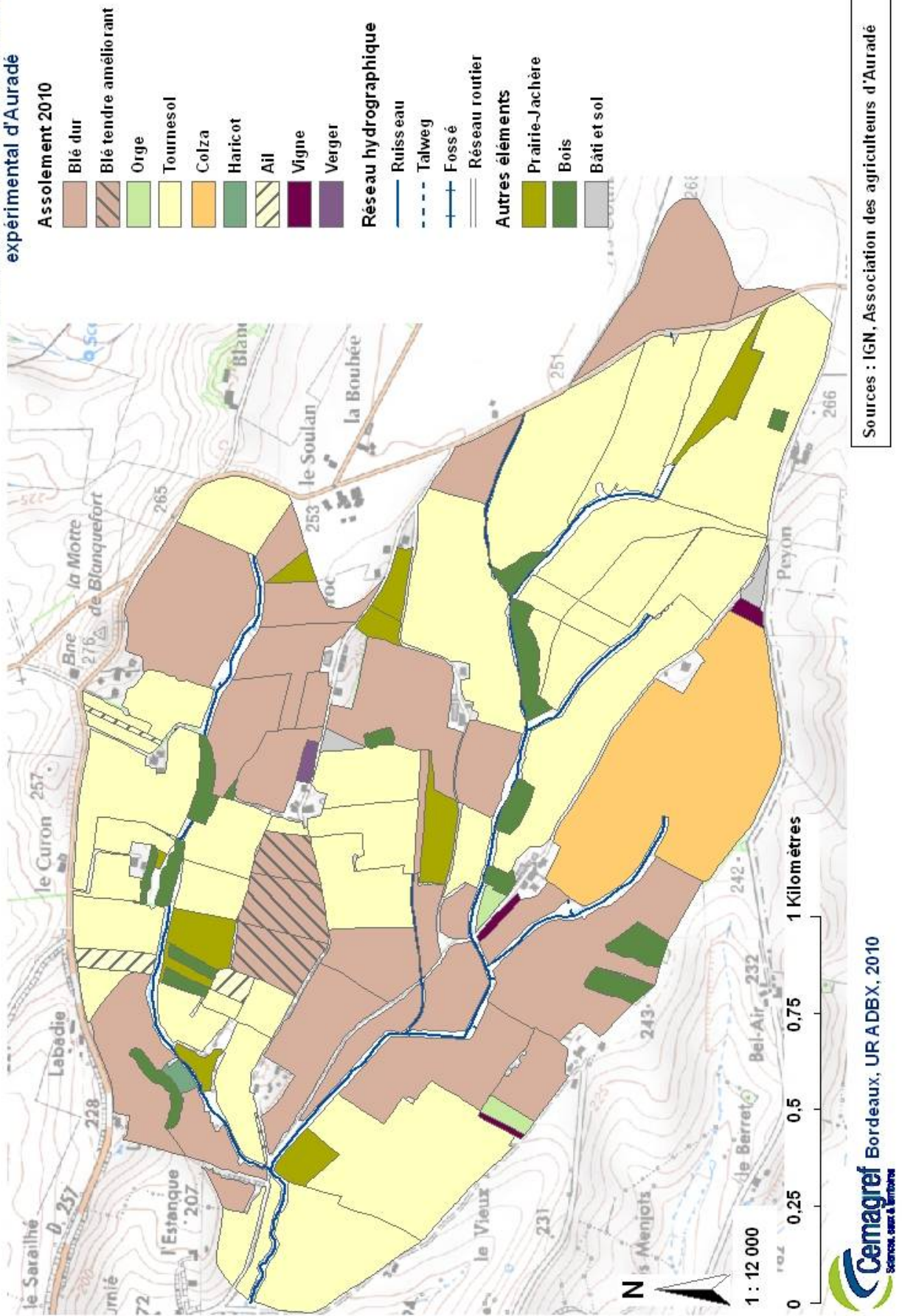


Figure 7 : Assolement 2010 du bassin versant expérimental d'Auradé

Sur le bassin-versant expérimental, le Blé dur et le Tournesol sont aussi les cultures majoritaires (Figure 7). On note aussi la présence d'une parcelle de colza de 25 ha en 2010. Les prairies ou jachères représentent 4 % de la surface totale. On remarque aussi les quelques petites parcelles d'ail qui permettent d'apporter un revenu supplémentaire aux agriculteurs. La carte ci-contre (Figure 8) permet de visualiser la répartition des différentes cultures sur le bassin versant expérimental d'Auradé.

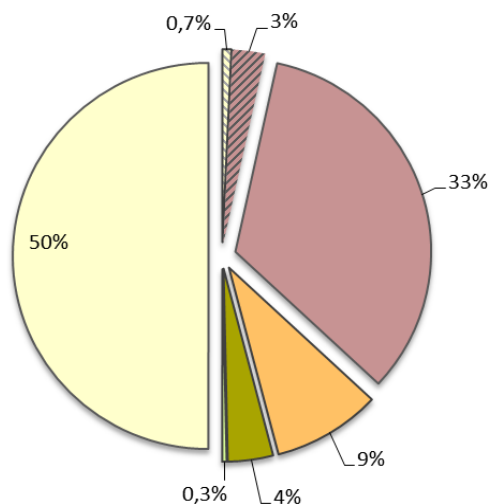


Figure 8 : Répartition de l'assolement pour la campagne 2009-2010 sur le bassin versant d'Auradé

1.5.2. Les pratiques d'utilisation des produits phytosanitaires

Pour caractériser les pratiques phytosanitaires sur le bassin-versant, nous avons utilisé l'indicateur utilisé pour le suivi du plan Ecophyto 2018, l'Indice de Fréquence de Traitement (L'IFT). Le calcul de l'IFT est précisé plus loin dans la définition des critères utilisés. La figure ci-dessous nous permet de comparer les pratiques sur le BVE, aux pratiques de l'AAA et aux pratiques de la région Midi-Pyrénées.

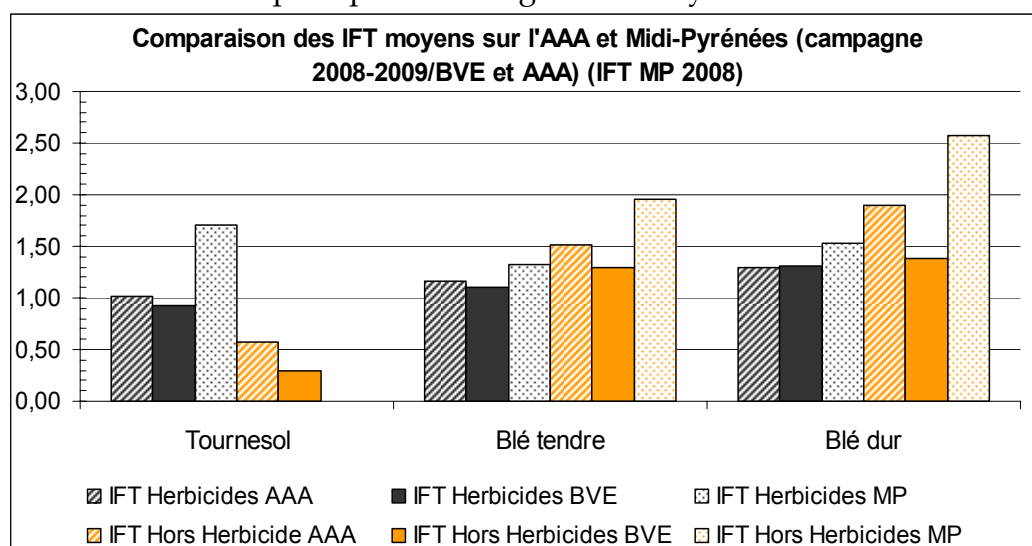


Figure 9 : Caractérisation des pratiques phytosanitaires dans l'Association des Agriculteurs d'Auradé

Nous pouvons voir que pour l'ensemble des cultures (Figure 9), l'IFT sur l'ABVE est inférieur aux moyennes observées sur le territoire de l'association AAA elle-même, et inférieure aux moyennes régionales. On peut donc conclure que l'action menée par l'association de sensibilisation aux pratiques est assez efficace. On remarque aussi que l'utilisation de produits est nettement plus faible pour le Tournesol. Nous pouvons remarquer que pour les trois cultures présentées, les agriculteurs appliquent en général un traitement herbicide. Les traitements hors herbicides correspondent en général à un ou deux traitements fongiques sur le blé. On note aussi l'utilisation courante de l'antimoule sur les parcelles de tournesol.

L'utilisation des produits phytosanitaires est raisonnée sur l'ensemble de l'ABVE. Des agriculteurs se sont engagés depuis 2008 dans une MAET de réduction de l'IFT de 20 %. D'après les enquêtes, nous constatons que les molécules herbicides sont principalement des molécules de la famille des Sulfonylurées très solubles dans l'eau (mis à part de l'Aclonifen pour le Tournesol). Les fongicides utilisés sont en majorité de la famille des Triazoles et des Strobilurines. Ils sont pratiquement insolubles dans l'eau.

1.5.3. Les pratiques de fertilisation azotée

De la même façon, nous avons pu comparer les pratiques de fertilisation dans l'association et sur la région Midi-Pyrénées.

Tableau 1: Moyenne des apports en N de l'AAA et de la région Midi-Pyrénées (source CRA, 2007)

	blé tendre		blé dur		blé améliorant		tournesol		colza	
	MP	AAA	MP	AAA	MP	AAA	MP	AAA	MP	AAA
rendement	52	55,33	42	41,79	50	52,15	23	23,42	26	26,33
Unités d'N	161	168,71	181	182,43	189	177,94	48	39,45	160	166,21

De façon générale, les pratiques de fertilisations de l'association sont très comparables de celles de l'ensemble de la région Midi-Pyrénées (2007), pour des rendements culturels quasi identiques.

Les résultats suivants donnent une indication des rendements et de la fertilisation azotée pratiquée dans l'association.

Blé dur : La majorité des agriculteurs apportent une dose d'azote comprise entre 180 et 200 unités, pour des rendements qui s'étalent de 40 à 50 Q/ha en moyenne en fonction des années.

Blé tendre : La majorité des agriculteurs apportent une dose d'azote comprise entre 150 et 170 unités pour un rendement moyen de 52 Q/ha.

Blé améliorant : La fertilisation du blé améliorant est inférieure pour l'association à celle pratiquée dans la région Midi-Pyrénées. Elle se situe aux alentours de 180 unités d'azote pour un rendement moyen de 52 Q.

Tournesol : La fertilisation du tournesol est très variable, elle peut aller de 0 à 60 unités d'azote selon les agriculteurs. Le rendement moyen est de 23 Q/ha.

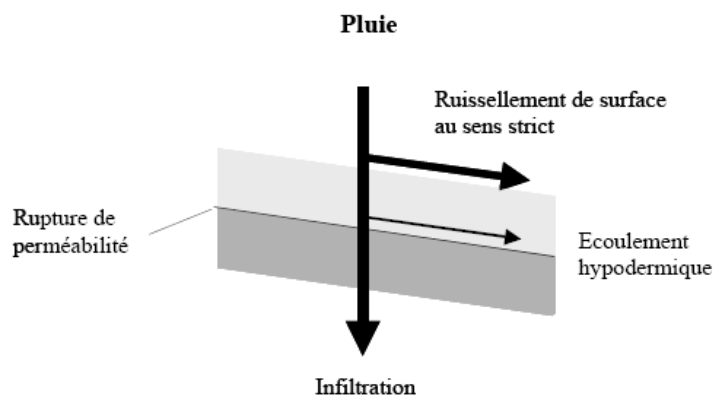
Colza : La fertilisation du colza est un peu supérieure dans l'association que la moyenne régionale. Elle se situe à environ 170 unités d'azote pour un rendement équivalent de 26 Q/ha.

1.6. Un préalable à l'étude : les mécanismes de transferts des contaminants dans un Bassin versant

Cette partie permet d'aborder les mécanismes de transferts des contaminants sur un bassin-versant. Elle me permettra de justifier les différents critères choisis pour la démarche d'analyse multicritère qui fait l'objet du chapitre suivant.

1.6.1. Les types de transferts de contaminants

Il existe trois types de transferts de contaminants. Le schéma ci-dessous nous montre les différents mécanismes. (CORPEN 1996)



- Le transfert vertical par infiltration : par entrainement dans la solution du sol, ce transfert est à l'origine des contaminations des eaux souterraines.
- Le transfert horizontal par ruissellement à la surface du sol : il a lieu en particulier sur les sols battants. Les molécules sont entrainées par les particules auxquelles elles sont adsorbées, entrainant des contaminations des eaux de surface.
- Le transfert par écoulement hypodermique lorsque le sol présente une rupture de perméabilité, entrainant un écoulement latéral sur l'horizon imperméable. Les molécules sont entrainées dans la solution du sol et participent à la contamination des eaux de surface.

Les produits phytosanitaires et les nitrates, de part leurs propriétés ne vont donc pas avoir le même comportement vis-à-vis de leur transfert.

1.6.2. Les mécanismes de transferts des nitrates

Les nitrates sont chargés négativement, ils ne sont pas fixés sur le complexe argilo-humique du sol. Ils sont donc entièrement transportés sous forme dissoute. Les nitrates n'étant pas retenus par le sol, sont lixiviés en profondeur jusqu'aux nappes. L'essentiel du transfert des nitrates vers les eaux superficielles se fait par écoulement de nappes. L'azote met plusieurs années à être restitué à la rivière du fait de sa transition par les nappes, mais il se fait aussi directement par lessivage vers les eaux de rivières. (Turpin, Vernier et al. 1997)

1.6.3. Les mécanismes de transferts des produits phytosanitaires

Le transfert des pesticides est très variable selon les molécules et leurs propriétés. Les molécules peu solubles peuvent s'adsorber sur le complexe argilo-humique, leurs transferts dans le ruisseau sera dans ce cas très liés à l'érosion, car elles seront fixées aux matières en suspension. Les molécules très solubles auront, quant à elles, un comportement proche de celle des nitrates. Elles seront donc facilement entraînées par les pluies.

Cependant, la bibliographie (Aubertot, Barbier et al. 2005) montre que les pesticides sont essentiellement transmis sous forme dissoute et colloïdale. Leur transfert est donc à mettre en lien avec le ruissellement de surface. Les plus forts transferts ont lieu lors des premiers épisodes de pluies efficaces. Pour ce qui est des pesticides, on peut dire qu'ils sont généralement présents dans les eaux de surfaces, ils ne sont que très rarement transmis par les nappes.

Le transfert des pesticides est très variable selon les années, il est très lié avec l'occurrence de la date des pluies. En effet, le délai entre la date d'application des produits et la mise en mouvement de l'eau peut varier énormément. Il faut noter le rôle important des éléments du paysage (zones humides, bandes-enherbées, ripisylve...), qui vont ralentir les écoulements.

1.6.4. Les différents paramètres concourant au risque de transfert des contaminants

Le sol

Plusieurs facteurs permettent de caractériser le sol comme étant à risque d'un point de vue du transfert des contaminants.

La granulométrie

Elle permet d'apprécier un risque d'infiltration, avec la quantité de sables et d'argiles. D'après Baize en 1988, des seuils ont été déterminés :

- en dessous de 12 % d'Argile, le sol est très filtrant et donc très sensible au lessivage,
- au-dessus de 22% d'Argile, les sols sont peu filtrants,
- au-dessus de 40 % les sols sont de texture lourde donc très peu filtrants. Ceci peut nous amener à faire une échelle de risque pour le lessivage.

L'Indice de battance

La granulométrie permet aussi de calculer l'indice de battance¹ pour le ruissellement (d'après Baize et al. 1988).

Indice de battance = $((1,5*LF+0,75*LG) / (A+10*MO)-0,2*(7-pH))$ pour un pH > 7

Indice de battance = $((1,5*LF+0,75*LG) / (A+10*MO))$ pour un pH < 7

(LF = Limons Fins ; LG = Limons Grossiers ; A = Argiles ; MO = Matière Organique)

L'indice de battance est fort lorsque IB > 1.4, très fort lorsque IB > 1.6

La réserve utile

La présence d'une réserve utile importante diminue le risque de transferts des produits phytosanitaire car les transferts verticaux sont ralentis. On peut utiliser l'épaisseur du sol pour qualifier la réserve utile :

- Epaisseur < 30 cm, risque de lessivage très important
- Epaisseur entre 30 et 60 cm, risque de lessivage important
- Epaisseur entre 60 et 90 cm, risque de lessivage moyen
- Epaisseur > 90 cm, risque de lessivage faible

Les autres facteurs

- La présence d'hydromorphie peut présenter un risque plus fort au ruissellement, car ils sont plus vite saturés en eau.
- La présence d'une rupture d'horizon augmente les transferts latéraux.
- La Nature de la roche mère pour la protection des aquifères souterraines.(CORPEN 2001)

Le relief

La pente conditionne la circulation de l'eau en surface et le temps de transfert des eaux. Elle intervient aussi dans les phénomènes d'érosion et favorise le transport de matières actives fixées sur les matières en suspension (MES). La formation de talwegs contribue aussi à la concentration du ruissellement

¹ La Battance est la dégradation de la structure du sol en surface sous l'influence des précipitations. Le résultat est une usure des mottes et la formations d'une "croûte de battance" difficile à traverser par l'eau, l'air ou les jeunes plantes qui viennent de germer. Un sol est d'autant plus sensible à la battance que sa teneur en limon est plus importante.

Les éléments anthropiques

Les fossés

Le fossé peut :

- soit accélérer l'écoulement, lorsqu'il est situé perpendiculairement aux courbes de niveaux, ce sont les fossés de transferts,
- soit ralentir l'écoulement lorsqu'il est parallèle aux courbes de niveaux, ce sont les fossés de collecte.

Dans un bassin versant la présence d'un fossé modifie les échanges la surface et le milieu sous terrain.

Le drainage

Il permet d'éliminer l'excès d'eau d'une parcelle et de rabattre la nappe de quelques cm. (Merot, 2004). Le drainage augmente le transfert vers les fossés et va donc limiter l'épuration de l'eau.

1.6.5. Mais certains éléments du paysage ralentissent ou diminuent le transfert des contaminants

Limites aux transferts de pesticides

Le rôle des dispositifs paysagers dans la lutte contre l'érosion est depuis longtemps connu. Mais leur rôle dans la limitation de la contamination des eaux par les pesticides n'est que très récemment étudié (années 90).

Plusieurs paramètres sont à prendre en compte pour juger de l'efficacité d'une bande enherbée. Elle dépend tout d'abord des caractéristiques propres liées au ruissellement : débit, concentration en substances polluante, et ensuite du type de couvert : densité, perméabilité, largeur et hauteur du couvert (Figure 10, Gouy, Gril et al. 2008).

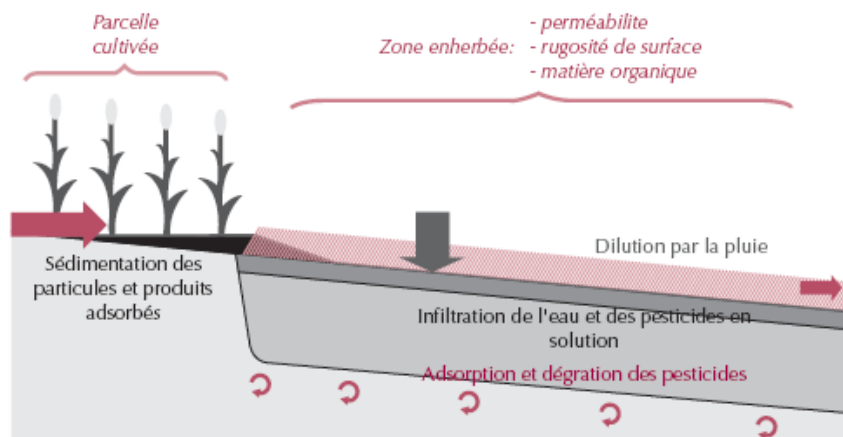


Figure 10 : Principaux processus en jeu dans le devenir des pesticides entrant par ruissellement au sein d'une bande enherbée (Lacas, 2005).

La bande enherbée intercepte en particulier la dérive de pulvérisation et les eaux de ruissellement. Cela est dû à l'augmentation de la perméabilité et de la rugosité du sol. Les capacités d'infiltration de l'eau augmente donc considérablement et encore plus lorsqu'il s'agit d'une zone boisée ancienne. On observe également la sédimentation des particules solides qui peuvent contenir des substances adsorbées. Leur capacité à limiter le transfert de pesticides est généralement supérieur à 50% voire 90% pour la majorité des substances. Cette efficacité dépend toutefois de la qualité de la bande enherbée et des caractéristiques agro-environnementales locales. (Lacas 2005)

La plupart des expérimentations donnent un ordre d'idée de la largeur efficace pour l'interception des produits phytosanitaires : elle est de 50% pour une bande enherbée de 6m et de 80-90% pour une bande enherbée de 12m. Pour ce qui est de la dérive de pulvérisation, une bande enherbée de 5 m va intercepter entre 92 et 98% de la dérive. Le maintien de la perméabilité demande 1 fauche par an (3 si l'on veut maintenir une densité importante pour la limitation des MES). La fauche avec exportation est préférable pour l'élimination des fertilisants et le broyage intéressant car il retient les produits phytosanitaires.

L'efficacité des dispositifs est moindre en période hivernale du fait de l'état hydrique du sol plus hydromorphe. Les dispositifs perdent de leur efficacité lorsque les écoulements sont concentrés (drains, fossés, rigoles.) Les zones humides peuvent alors avoir leur intérêt. L'infiltration est le processus dominant d'interception avant l'adsorption des produits sur les surfaces enherbées et boisées et la sédimentation.

L'efficacité des bandes enherbées est significative à partir de 6m (retient 70 % des produits phytosanitaire) Au-delà, l'efficacité n'est pas proportionnelle à la largeur. A 18m, plus de 85 % sont interceptés. (CORPEN 1997)

Limites aux transferts d'azote

Le nitrate, principale forme de l'azote n'est que très peu absorbé par le sol et les particules. Il est donc susceptible d'être lixivié. Le transfert de l'azote se fait peu par ruissellement, les zones tampons jouent principalement un rôle au niveau de son écoulement hypodermique. L'azote est donc absorbé et dénitrifié par les racines. (Turpin, Vernier et al. 1997; Soltner 2001). Les milieux les plus propices à la dénitrification sont ceux où les conditions d'anaérobiose sont respectées. Il s'agit souvent des prairies de bas fond. Une largeur de 10m permet une efficacité de 80%. On note aussi l'importance des zones humides pour la dénitrification.

Limites aux transferts de matières en suspension

On note une efficacité importante des bandes enherbées même avec des largeurs faibles (5 m voir 10 m avec des pentes fortes). La densité des tiges est la principale composante de la rugosité du couvert (conféré notamment par les graminées). Quand l'épaisseur du ruissellement est importante, les zones boisées sont plus efficaces (pour leur perméabilité), surtout arbustive, le plus efficace est l'association des deux (boisé en aval).

Au vu de cette synthèse bibliographique, il est évident que les phénomènes de transferts sont complexes et demandent une connaissance fine du terrain pour évaluer le risque. L'analyse de ce risque demande à la fois des données quantitatives (pentes, pression azotée) et des données qualitatives (bandes enherbées, connexion, ripisylve). C'est pourquoi, une modélisation multicritère spatialisée semble une méthode adaptée à la problématique. Une analyse cartographique résultant du croisement de couches d'information sous SIG n'est pas suffisante pour dénouer ces phénomènes complexes. La modélisation multicritère permet de prendre en compte à la fois des critères qualitatifs et quantitatifs et de comparer l'ensemble des critères pour chaque parcelle pour pouvoir l'affecter à une catégorie de risque.

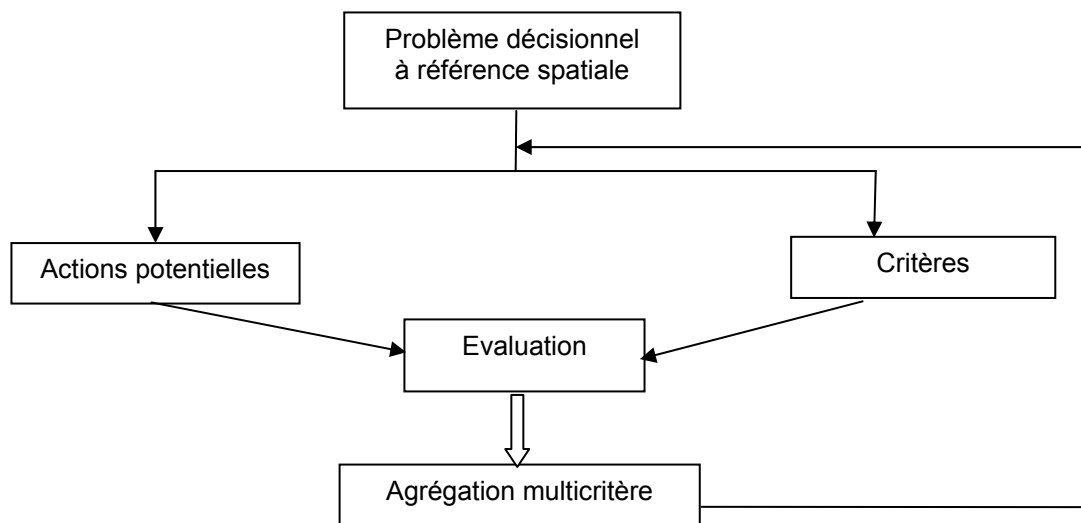
2. Méthode d'estimation des risques agroenvironnementaux par une modélisation multicritère spatialisée

L'objectif de l'étude menée sur le bassin versant d'Auradé est d'identifier les parcelles sensibles au risque de transfert de particules, de pesticides et de nitrates dans le bassin versant expérimental d'Auradé. Pour cela, la méthode utilisée est l'évaluation multicritère. Le chapitre suivant présente son fonctionnement et sa mise en œuvre sur le bassin versant.

2.1. La modélisation multicritère

La démarche a tout d'abord été utilisée dans l'aide à la décision pour permettre à des acteurs de faire un choix en prenant en compte de nombreux critères et en impliquant le décideur dans le processus décisionnel. Elle est souvent appliquée à des problématiques territoriales telles que la planification urbaine ou régionale. La modélisation multicritère est utilisée lorsque on est face à un problème complexe prenant en compte des critères quantitatifs et qualitatifs ainsi que lorsque les critères sont hétérogènes et d'inégale importance. (Laaribi 2000)

Un problème décisionnel se résout selon le schéma suivant :



Pour la démarche multicritère, une action représente l'élément de solution qui contribue à la décision, cela peut-être une région, une parcelle. Un critère est un facteur de jugement, relié aux préférences du décideur, sur la base duquel on mesure et on évalue une action. On compare ensuite les actions en mesurant leurs performances par rapport aux différents critères (Macary 2003).

La démarche multicritère a été appliquée pour la première fois à une problématique agro-environnementale d'érosion des sols par Laaribi en 2000. L'intérêt de cette démarche dans notre problématique et de pouvoir intégrer des critères qualitatifs comme celui des dispositifs enherbés. En effet ces paramètres sont difficiles à prendre en compte dans un modèle classique par exemple de calcul de

flux de pesticides ou de nitrates. Cette méthode devient intéressante à une échelle où le travail de terrain est possible et quand on détient des données à une grande échelle (parcelle). Cette méthode n'est pas applicable par exemple à l'échelle de la Save, mais elle permet en quelque sorte de valider le travail fait à plus grande échelle avec une précision liée à l'image satellitale.

La démarche multicritère a déjà été mise en œuvre dans deux bassins versants normands pour une problématique d'érosion. (Macary, Dumas, 2009) Le contexte est assez différent de notre zone d'étude car il s'agit d'une région d'élevage. Le principal problème réside en l'érosion des berges par le piétinement des animaux. Il s'agit aussi d'une région de bocage avec des très petites parcelles. (Macary, Ombredane et al. 2010) Cependant, cette démarche nous servira de modèle pour la mise en œuvre de l'analyse à Auradé.

2.1.1. La méthode ELECTRE Tri-C est adaptée à l'étude

Différentes méthodes multicritères ont été développées notamment les méthodes ELECTRE et PROMETHEE. Notre choix s'est porté sur les méthodes ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) car elles offrent des grandes possibilités de modélisation des préférences et de l'indifférence dans le surclassement des actions. Les méthodes ELECTRE ont été développées par Bernard Roy du laboratoire LAMSADE (Laboratoire d'Analyse et de Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision à l'université de Paris-Dauphine).

Dans le groupe des méthodes ELECTRE, il existe deux méthodes qui nous intéressent plus particulièrement. La méthode ELECTRE III est une méthode de classement en relatif des actions analysées (ici les parcelles agricoles). Elle permet d'introduire des pondérations aux différents critères. Elle a été utilisée sur le bassin versant de l'Oir (Macary 2009). Cette expérience de l'utilisation d'ELECTRE III a bien permis de discriminer les parcelles du bassin versant présentant un risque pour l'érosion.

La méthode ELECTRE Tri-C, permet d'affecter chaque action à une catégorie prédéfinie. Nous utiliserons cette méthode car elle présente des avantages par rapport aux problématiques agro-environnementales. En effet, un simple classement ne permet pas de dire quel est le niveau de risque de chaque parcelle, il compare simplement les parcelles les unes par rapport aux autres. Par contre dans la méthode Tri-C, nous pouvons prédéfinir des niveaux de risque en y affectant une action de référence. Dans notre cas, nous affectons une parcelle de référence pour chaque niveau de risque.

2.1.2. Principes de la méthode Electre Tri

Ce chapitre est largement inspiré de deux documents :

- *Synthèse bibliographique sur l'analyse multicritère pour l'aide à la décision dont les méthodes ELECTRE par Francis Macary*
- *ELECTRE TRI-C: A multiple criteria sorting method based on characteristic reference actions par J. Almeida-Dias, J.R. Figueira, B. Roy*

Les méthodes ELECTRE utilisent deux principes mathématiques : celui de la logique floue et de la théorie des graphes. Elles permettent de faire un classement des différentes actions en les comparant deux à deux et en déterminant celle qui est supérieure à l'autre.

La particularité d'ELECTRE Tri-C, est que chaque action est comparée à une action de référence qui caractérise une catégorie. Dans notre cas, il s'agit d'une parcelle représentant bien le niveau de risque correspondant pour chaque critère.

L'affectation des actions à une catégorie de risques est basée sur l'évaluation de chaque action selon différents critères avec trois prérequis :

- Les catégories doivent être ordonnées par exemple du moins risqué au plus risqué
- Chaque catégorie doit contenir au moins une action
- Chaque catégorie est définie par une action de référence la plus représentative possible.

La méthode ELECTRE Tri-C est intéressante surtout dans le but d'aider le décideur à affecter les actions dans une catégorie. Il s'agit d'une co-construction entre l'analyste et le décideur pour définir les critères, les seuils et les poids. (Almeida-Dias 2009)

Electre Tri-C utilise conjointement deux règles d'affectation, une ascendante et une descendante. Chacune de ces règles choisit une catégorie pour une action. L'utilisation conjointe permet de mettre en évidence la plus grande et la plus petite catégorie dans laquelle l'action peut appartenir.

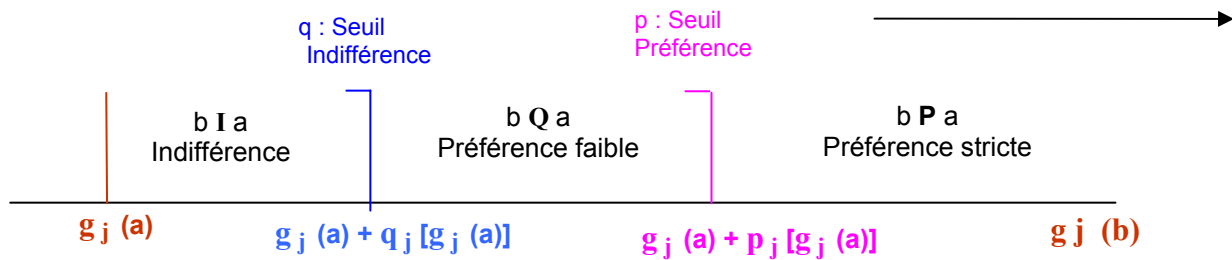
Pour chaque critère, voire pseudo-critère, sont définis un seuil d'indifférence q_j et un seuil de préférence p_j avec $p_j \geq q_j \geq 0$

Ces seuils ont été définis pour pouvoir prendre en compte l'imperfection des données notamment dans la définition des critères. Ils permettent aussi d'introduire la notion de préférence faible.

Le seuil d'indifférence Sq représente la différence de performance à partir de laquelle deux actions ne sont plus indifférentes, mais l'une bénéficie d'une faible préférence par rapport à l'autre.

Le seuil de préférence stricte Sp exprime la différence de performance à partir de laquelle une action est nettement préférée à l'autre.

Un troisième seuil : le *seuil de veto* S_v est utilisé dans la concrétisation de la notion de discordance, c'est à dire qu'il représente la différence à partir de laquelle on peut dire qu'une action b est tellement meilleure que a sur un critère j , qu'en aucun cas globalement, a ne pourra être considérée meilleure que b quelles que soient les performances de a et b sur tous les autres critères. Le schéma ci-dessous (Macary, 2003) permet de comprendre le rôle des différents seuils dans l'évaluation des actions.



= valeur de la performance de l'action a par rapport au critère j

I, Q, P , représentent les relations de préférences.

Les seuils S_q, S_p, S_v sont considérés comme des fonctions affines des performances $g_j(a)$ et sont calculés ainsi : $\text{seuil}(g_j(a)) = \alpha \times g_j(a) + \beta$.

L'utilisateur doit préciser la valeur des deux coefficients α et β par critère et pour chaque seuil.

Enfin, le poids w_j est associé à chaque critère pour prendre en compte l'importance de chaque critère dans l'évaluation du risque.

Pour l'évaluation des parcelles du bassin-versant expérimental, il est donc nécessaire de définir plusieurs paramètres (Almeida-Dias 2010).

- Les critères et leurs échelles de notation (performances de chaque parcelle)
- Le poids des critères
- Les seuils d'indifférences, de préférences et de veto si nécessaire
- Le degré de crédibilité du modèle pour l'ensemble des critères

2.2. Les différents critères retenus pour le risque de contamination des eaux de surfaces par les nitrates et les pesticides

Dans ce chapitre nous aborderons les différents critères retenus grâce à l'étude bibliographique de chaque critère. Pour chacun d'eux, nous aborderons sa définition ainsi que la façon dont il a été noté.

2.2.1. Généralités

L'objectif de notre étude est de pouvoir attribuer les parcelles du bassin versant à une catégorie de risque représentant la sensibilité au transfert de particules, de produits phytosanitaires et de nitrates vers la rivière. Il s'agit donc de pouvoir discriminer les parcelles selon des critères pertinents qui représentent à la fois la pression anthropique et la réalité du milieu physique (vulnérabilité du milieu naturel). Les critères doivent être indépendants les uns des autres. Ils ont été déterminés à partir des recherches bibliographiques résumées dans le chapitre précédent mais aussi en prenant en compte la disponibilité des données sur le territoire. Nous avons donc choisi d'utiliser les critères suivants (illustrés dans la figure 11) :

- L'effet surfacique des pentes
- la nature des sols
- la connectivité au ruisseau
- le rôle de la ripisylve
- le rôle des bandes enherbées
- la pression agricole exercée

Nous avons aussi choisi d'homogénéiser un maximum les critères avec ceux du projet Aguafash mené sur la Save. En effet cela permettra ensuite de comparer les différents résultats obtenus à différentes échelles. La présence des critères de terrain connectivité au ruisseau, ripisylve et bandes enherbées permettent d'apporter des précisions qualitatives à une échelle fine, le bassin versant expérimental de l'Auradé.

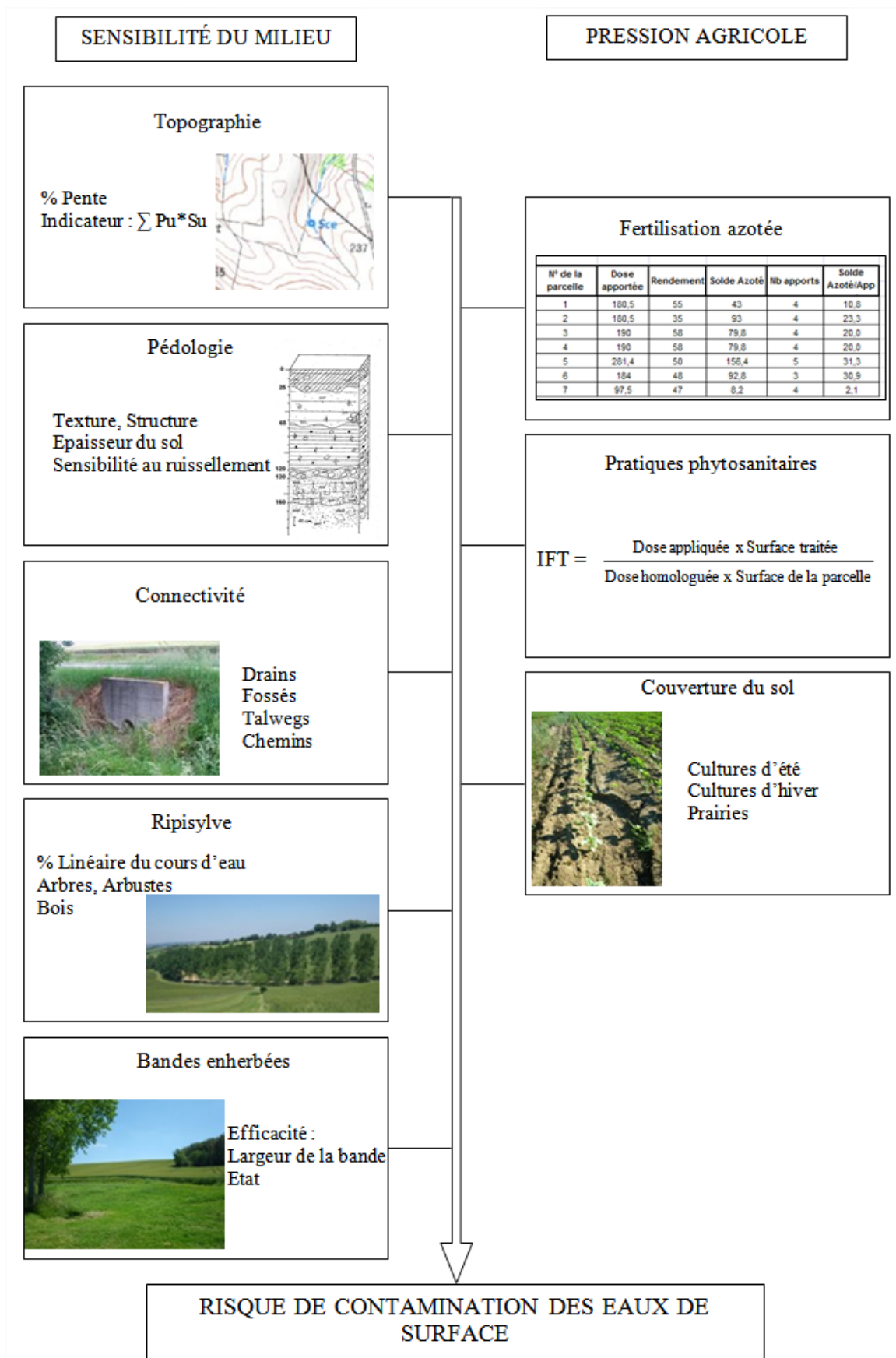


Figure 11 : Schéma synthétique des critères utilisés pour la modélisation du risque de contamination des eaux de surface

2.2.2. La vulnérabilité du milieu : les critères du milieu physique

Préalablement aux notations, nous avons défini une parcelle agricole comme une parcelle exploitée par un même agriculteur, ce qui suppose que l'itinéraire technique est uniforme. De plus, la pente est globalement orientée vers un seul ruisseau ; dans le cas contraire, la parcelle est découpée (si elle est constituée par deux versants, alors nous obtenons deux parcelles).

L'annexe B présente le détail des observations de terrains permettant les notations.

2.2.2.1. L'effet surfacique des pentes

Définition du critère

La pente a un rôle déterminant dans le transfert des contaminants car elle va jouer sur la vitesse des écoulements lors des épisodes pluvieux. Plus l'écoulement sera rapide, moins les molécules auront le temps d'être interceptées ou détruites avant l'arrivée au ruisseau.

Pour prendre en compte les variations de courbure à l'intérieur des parcelles, nous avons choisi d'utiliser l'indicateur suivant.

Pour chaque parcelle nous avons donc calculé :

$\sum p_u \cdot s_u$, où p_u = pente homogène du polygone u et s_u = sa surface.

Ce critère ainsi calculé, donne une plus grande importance aux grandes parcelles, mais il importe que l'effet surface soit bien pris en compte au niveau d'un critère de vulnérabilité. Nous avons conduit par ailleurs d'autres essais, en pondérant par exemple par la surface de la parcelle. Cela ne donnait pas satisfaction car la simple expression de la pente moyenne ne présente guère d'intérêt pour des parcelles hétérogènes de grandes tailles. En effet, une grande parcelle sera une plus grande source de transfert de particules ou de contaminants.

Pour faire ce calcul, nous avons utilisé un modèle numérique de terrain à l'échelle de 25 m de l'IGN. Le calcul des pentes a été fait à l'aide du logiciel Arcinfo et restitué à l'échelle de 10 m. Nous avons déterminé les classes de pentes à partir de la bibliographie. En effet, nous savons que le ruissellement est initié à partir d'une pente de 2 %. Au-delà de 25 %, le ruissellement est constant (communication interne par P. Bordenave). Pour le calcul de $\sum P_u \cdot S_u$, nous avons choisi d'utiliser la valeur centrale de la pente dans la classe.

Le tableau suivant (Tableau 2) montre les 7 classes ainsi constituées.

Tableau 2 : Classes des pentes pour le calcul de l'indicateur : $\sum Pu*Su$

Classes de pentes	Pente (%)
[0-2 [	1
[2-5 [	2,5
[5-10 [	7,5
[10-15 [	12,5
[15-20 [	17,5
[20-25 [	22,5
≥ 25	27,5

Notation Electre TriC

La courbe en annexe C permet de voir la distribution des valeurs obtenues pour toutes les parcelles du bassin-versant. En regardant les cassures de la courbe et en comparant avec les parcelles correspondantes sur le bassin-versant, on peut définir les classes de risques les plus pertinentes pour le tri (Tableau 3).

Tableau 3 : Les différentes classes de risques utilisées pour le traitement ELECTRE Tri- C, critère effet surfacique des pentes

		Valeur caractéristique de la classe
Niveau 1	risque très fort	1 000 000
Niveau 2	risque fort	500 000
Niveau 3	risque moyen	300 000
Niveau 4	risque faible	200 000
Niveau 5	risque très faible	100 000

Seuils d'indifférence Q et de préférence P

Les valeurs de performance des parcelles présentent une distribution linéaire. Il est donc intéressant de donner des seuils d'indifférence et de préférence variables pour ce critère. Nous avons alors choisi des seuils directement proportionnels aux valeurs des performances. La distribution des valeurs permet de déterminer les seuils suivants :

L'indifférence est déterminée pour un écart de 3.5% entre les valeurs.

La préférence est déterminée pour un écart de 5.5% entre les valeurs.

Q (0,035; 0) P (0,055, 0)

2.2.2.2. La nature des sols

Définition du critère

Pour connaître la vulnérabilité des types de sol par rapports aux transferts des contaminants, nous avons observé les indicateurs pertinents à partir de la bibliographie. Par exemple, nous avons cherché à utiliser l'indice de battance (Baïze, 1988) pour différencier les différents sols. Cet indice peut nous renseigner pour ce qui est du risque érosif mais pas les risques de lessivage. De plus l'indice de battance (Annexe D) n'a pas permis de différencier les sols entre eux.

Dans un souci d'harmonisation avec le projet Aguaflash et d'utilisation d'un seul indicateur pour l'ensemble de l'étude, nous avons décidé d'agrèger les 12 types de sols présents sur le bassin versant en 4 types globaux.

Chaque parcelle peut être constituée de un à quatre types de sols différents. Pour avoir une idée de la vulnérabilité globale de la parcelle, nous avons attribué une note à chaque type de sol selon la vulnérabilité qu'il présente par rapport au transfert de contaminants. D'après le groupe d'experts consulté pour les notations, les alluvions présentent le risque le plus faible et les terreforts minces le risque le plus élevé. Nous avons choisi d'attribuer une note plus élevée aux Terreforts minces pour discriminer le plus possible les parcelles présentant un sol à risque (Tableau 4).

Tableau 4 : Notation des différents sols du bassin versant d'Auradé

Types de sols		Note
Alluvions	A	1
Boulbènes	B	2
Terreforts épais	Te	4
Terreforts minces	Tm	8

Sur chaque parcelle nous avons ensuite calculé le pourcentage de chaque type de sol en surface S et nous avons agrégé le résultat de la façon suivante :

$$\text{Notation parcelle} = (\%S_a \times 1 + \%S_b \times 2 + \%S_{te} \times 4 + \%S_{tm} \times 8) / 100$$

Notation Electre TriC

La distribution des valeurs va de 1 pour une parcelle présentant à 100% des alluvions à 8 pour une parcelle présentant des Terreforts minces à 100%(Annexe C). De la même façon que pour le critère pente, nous avons défini des niveaux de risque pour Electre-TriC (Tableau 5).

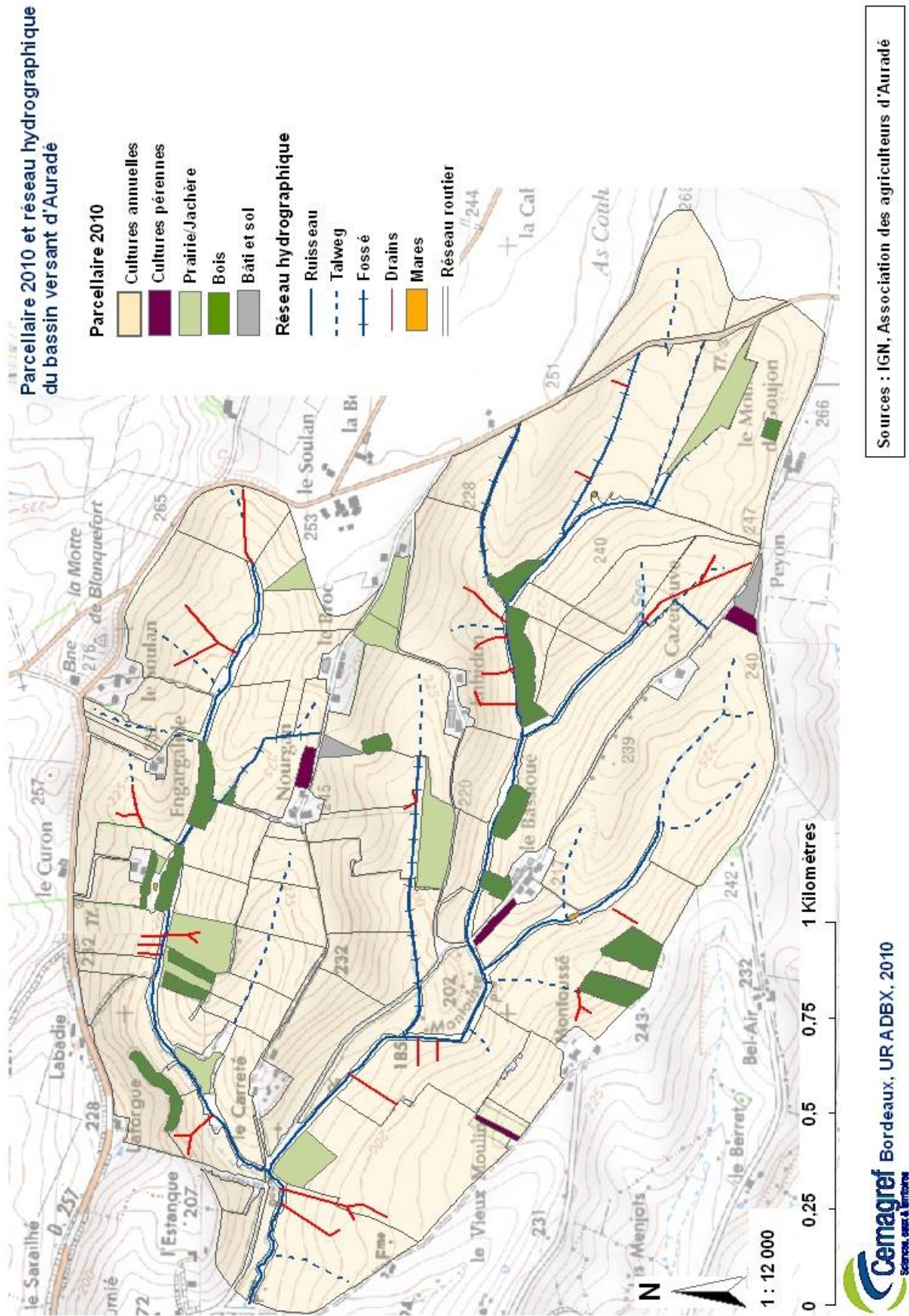


Figure 12 : Représentation cartographique du parcellaire 2010 ainsi que du réseau hydrographique du bassin versant expérimental d'Auradé

Tableau 5 : Classes de risques du critère 2 sol

		Valeur caractéristique de la classe
Niveau 1	risque le plus fort	7
Niveau 2	risque fort	5
Niveau 3	risque moyen	3
Niveau 4	risque faible	2
Niveau 5	risque le plus faible	1

Seuils d'indifférence Q et de préférence P

Nous avons donc choisi les notations de façon à traduire une différence entre chaque type de classe de sol. Aussi le seuil d'indifférence $Q = 0$ ici. Nous avons introduit une préférence faible entre les niveaux de risque 3 et 4, 4 et 5, et une préférence stricte entre les niveaux 1 et 2, 2 et 3. Ceci se traduit par $\beta = 1,9$.
 $Q(0, 0)$ et $P(0, 1,9)$

2.2.2.3. La connectivité au ruisseau

Définition du critère

La connectivité au ruisseau est un paramètre important. Nous regroupons sous ce terme les éléments des différents réseaux (hydrologique, routiers, drains...) qui peuvent accélérer les différents écoulements et ainsi avoir un impact sur le transfert des contaminants dans les eaux superficielles. Ce critère prend en compte plusieurs points :

- L'emplacement de la parcelle en bordure de ruisseau ou non, ce qui entraîne une connectivité directe.
- La présence de chemin, de route, de fossé et de talweg pouvant accélérer les écoulements vers le ruisseau.
- La présence de drains qui peuvent avoir un impact fort dans l'entraînement des molécules solubles (pesticides à faibles K_{oc}^2 et nitrates) directement au ruisseau.

La connectivité au ruisseau a été déterminée à l'aide de la cartographie du réseau hydrographique et routier de l'IGN, qui nous semblait le plus proche de la réalité. Elle a été complétée par les observations de terrain pour ce qui est des fossés et des talwegs visibles et aussi par le travail d'enquête pour ce qui est du positionnement des drains. Celui-ci pourrait cependant être amélioré car il s'agit d'un positionnement datant d'environ 20 ans, il a donc certainement évolué. La carte ci-contre (figure 12) représente les différents éléments pris en compte pour ce critère.

² Le **K_{oc}**, coefficient de partage carbone organique/ eau, donne une indication sur l'aptitude de la molécule à être adsorbée ou désorbée sur la matière organique. Il représente le potentiel de rétention de cette substance active sur la matière organique du sol.

Notation Electre TriC

Pour la matrice de performance, on note les parcelles selon une échelle de risque allant de 1 à 9 (Tableau 6). Les parcelles qui ont la note de 9 présentent le risque le plus fort de transfert de contaminants au ruisseau.

Tableau 6 : Notation terrain du critère 3 connectivité

Type de connexion		Description	Notes
Connexion très forte	a	Bord de ruisseau avec présence d'un drain	9
Connexion forte	b	Bord de ruisseau	8
Connexion forte	c	Bord de ruisseau partiellement	6
Connexion assez forte	d	Talweg, fossé	5
Connexion moyenne	e	Chemins, routes	3
Connexion faible	f	Pas ou peu de connexion	1

Pour le tri Electre, nous regroupons les résultats dans les catégories suivantes (Tableau 7) :

Tableau 7 : Notation Electre-TriC du critère 3 connectivité

		Valeur caractéristique de la classe
niveau 1	risque très fort	9
niveau 2	risque fort	8
niveau 3	risque moyen	5
niveau 4	risque faible	3
niveau 5	risque très faible	1

Seuils d'indifférence Q et de préférence P :

Les notations que nous avons choisies traduisent une différence entre chaque type de connexion. Aussi le seuil d'indifférence $Q = 0$ ici. Nous avons introduit une préférence faible entre les connexions a et b, puis c et d. Ici $\beta = 1,9$ de façon à traduire une préférence stricte entre les connexions b et c, d et e, e et f.
 $Q(0; 0)$ et $P(0; 1,9)$

2.2.2.4. Le rôle de la ripisylve

Définition du critère

La ripisylve³ constitue une protection vis-à-vis du ruisseau. Son rôle est complémentaire par rapport à la bande enherbée explicitée ci-dessous. Nous avons évalué globalement la ripisylve et le pourcentage de linéaire qu'elle occupe le long du ruisseau permanent. Nous avons noté la présence des différentes strates (arbustives, arborées) et les essences présentes (peupliers, érables, ...). La notation est faite sur une échelle de 0 à 10, suivant son importance boisée et le degré de protection qu'elle présente pour le transfert des contaminants (Tableau 8).

³ La ripisylve est l'ensemble des formations boisées, buissonnantes et herbacées présentes sur les rives d'un cours d'eau ou « zone riparienne ».

Tableau 8 : Notation du critère 4 ripisylve

Importance de la ripisylve	Description	Notes
[0 - 10 [	Aucun arbre	a 10
[10 - 25 [	Protection faible, dont rangée de peupliers	b 9
[25 - 50 [	Protection moyenne	c 7
[50 - 75 [	Protection assez forte	d 5
[75 -100 [	Protection forte	e 3
100% boisé	Protection très forte	f 2
Sans intérêt	Parcelle éloignée du ruisseau	g 0

ILLUSTRATION DU CRITERE 4 : RIPISYLVE



Parcelle 25082 : Ripisylve linéaire < 25 %, photo H. Bernert



Parcelle 23056 : Ripisylve 100% linéaire, photo F. Macary

Notation Electre Tri-C

Tableau 9 : Notation ElectreTri-C pour le critère 4 ripisylve

		Valeur caractéristique de la classe
niveau 1	risque le plus fort	9
niveau 2	risque fort	7
niveau 3	risque moyen	5
niveau 4	risque faible	3
niveau 5	risque le plus faible	2

Seuils d'indifférence Q et de préférence P

Les notations que nous avons choisies traduisent une différence entre chaque type de protection. Aussi le seuil d'indifférence $Q = 0$ ici. Nous avons introduit une préférence faible entre les notations a et b, puis e et f. Ici $\beta = 1,9$ de façon à traduire une préférence stricte entre les connexions b et c, c et d, d et e.

$Q(0 ; 0)$ et $P(0 ; 1,9)$

2.2.2.5. Le rôle des bandes enherbées

Définition du critère

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les bandes enherbées ont un rôle aujourd'hui démontré par différents travaux sur la diminution du transfert des contaminants dans le ruisseau. De même que la ripisylve, ce critère peut atténuer les effets négatifs des autres critères. Ripisylve et bandes enherbées jouent ainsi un rôle de « frein » vis-à-vis du potentiel de contamination. Les facteurs retenus pour évaluer l'efficacité des bandes enherbées sont :

- la largeur de la bande enherbée
- l'état de cette bande enherbée

Nous avons parcouru l'ensemble du réseau hydrographique et noté ces deux états pour chaque parcelle. Suivant la réglementation en cours pour l'application de l'éco conditionnalité des aides de la PAC⁴, nous avons fait le postulat qu'une bande enherbée de qualité suffisante (moyenne) doit être > 5m et en bon état. La combinaison des deux permet de noter l'efficacité de la bande enherbée. La notation a été faite selon le tableau 10 suivant :

Tableau 10 : Echelle de notation du critère 5 bandes enherbées

Largeur	Qualité	Niveau de protection	Note
≤ 3 m	Mauvaise	Très faible	15
	Bonne		14
] 3 ; 5 m [	Mauvaise	Faible	12
	Bonne		11
[5 ; 7 m [	Mauvaise	Moyenne	9
	Bonne		8
[7 ; 9 m [	Mauvaise	Forte	6
	Bonne		5
≥ 9 m	Mauvaise	Très forte	3
	Bonne		2
Parcelle éloignée du cours d'eau			0

Pour la qualité, nous avons évalué l'état de la bande de la façon suivante :

- Mauvaise : Très dégradée, graminées éclaircies et présence importante d'adventices, peu efficaces.
- Bonne : Graminées quasi essentiellement, bien fournie, bien entretenue, efficace.

⁴ PAC : Politique Agricole Commune

ILLUSTRATION DU CRITERE 5 : BANDES ENHERBEES



Parcelle 24073 : bande enherbée de mauvaise qualité
Photo H. Bernert



Parcelle 24074 : bande enherbée de bonne qualité
Photo H. Bernert

Notation Electre-TriC

Tableau 11 : Notation du risque pour le critère 5 bandes enherbées

		Valeur caractéristique de la classe
niveau 1	risque très fort	14
niveau 2	risque fort	11
niveau 3	risque moyen	8
niveau 4	risque faible	5
niveau 5	risque très faible	2

Seuils d'indifférence Q et de préférence P

Nous avons introduit une préférence faible dans chaque intervalle de largeur suivant la nature de la bande enherbée. De même, la préférence est faible entre la bande enherbée de bonne qualité la plus large et l'absence de bande pour les parcelles non riveraines du ruisseau.

Q (0 ; 0) et P (0 ; 1,9)

2.2.3. L'appréciation de la pression agricole sur le bassin versant d'Auradé

Nous avons apprécié la pression agricole sur le bassin versant d'Auradé à partir des enquêtes effectuées chaque année par l'AAA : celles-ci permettent de connaître les itinéraires techniques pratiqués annuellement au niveau de chaque parcelle culturale. Nous avons donc exploité les résultats de l'enquête 2009 pour en

tirer trois indicateurs : la couverture du sol, le solde azoté et l'indice de fréquence de traitement (IFT). Ces indicateurs ont pu être calculés à la parcelle pour l'année 2009, mais puisque la campagne 2010 n'est pas encore achevée, nous avons fait l'hypothèse que les itinéraires techniques étaient globalement semblables d'une année sur l'autre. Nous avons donc utilisé pour l'occupation du sol 2010, les valeurs moyennes des pratiques de chaque exploitation pour une culture donnée.

2.2.3.1. La couverture du sol : risque érosion

Définition du critère

La distinction du risque érosif est faite suivant la couverture du sol à différentes périodes de l'année. L'occupation du sol qui présente la plus forte couverture est la prairie, bien que peu présente sur le bassin versant. On considère ensuite la période de culture ainsi que l'écartement entre les rangs pour différencier la couverture du sol. Ainsi, les vignes non enherbées présentent le plus fort risque suivi du tournesol (Tableau 12).

Tableau 12 : Echelle de notation du critère 6a, couverture du sol

Type de culture	Culture	Note
Cultures d'été	Tournesol	8
	Maïs	8
	Soja	8
	Haricot	8
	Ail, Oignon	8
Cultures d'automne	Céréales à pailles	3
	Colza	4
Cultures pérennes	Vigne non enherbée	10
	Verger non enherbée	10
	Vigne enherbée	2
	Verger enherbée	2
	Prairie-Jachère	1

Notation Electre TriC

Tableau 13 : Notation Electre-TriC du critère 6a, couverture du sol

		Valeur caractéristique de la classe
niveau 1	risque très fort	10
niveau 2	risque fort	8
niveau 3	risque moyen	4
niveau 4	risque faible	2
niveau 5	risque très faible	1

Seuils d'indifférence Q et de préférence P

La prairie se caractérise donc par une grande stabilité de sol, les quelques lopins de vigne ou de vergers enherbés aussi : nous avons introduit une préférence faible entre ces deux catégories. Puis avec les céréales à paille, la préférence est stricte ($\beta = 1,9$) car le sol est moins couvrant. Le colza est semé à une densité moins forte que les céréales paille, ce qui justifie une préférence faible en terme de risque.

Les cultures estivales laissent un sol nu sur une plus grande période et de ce fait présentent un risque supérieur d'autant plus que l'écart inter rang est important (0,60m pour le tournesol). En revanche le soja est semé à 0,35m.

Les petites parcelles de vigne ou vergers non enherbées présentent des risques les plus importants en terme d'érosion car les intervalles travaillés inter rangs sont larges.

Q (0 ; 0) et P (0 ; 1,9)

2.2.3.2. *Apports azoté : risque de pollution par les nitrates*

Définition du critère :

Le bilan azoté est un bon indicateur des pratiques des agriculteurs. Cependant pour évaluer le risque de lessivage d'azote il est plus judicieux de prendre en compte les apports totaux sur la parcelle. En effet, nous pouvons considérer que le risque est très important juste après les apports, c'est-à-dire si la pluie intervient après un apport, avant que la plante n'ait tout absorbé. C'est à ce moment-là qu'à lieu le lessivage d'azote. On peut donc dans cette hypothèse utiliser les apports à la parcelle.

De plus, les apports peuvent être fait en plusieurs fois, le risque de lessivage des nitrates est alors plus faible. Pour prendre en compte les bonnes pratiques des agriculteurs, nous avons choisi de créer un indicateur composite qui prend à la fois en compte les apports et le fractionnement. Pour cela nous avons utilisé les apports totaux que nous avons corrigés à la baisse lorsque les apports étaient faits en plusieurs fois (Tableau 14).

Tableau 14 : Correction des apports pour prendre en compte le fractionnement

Nombre d'apports	% de l'apport total
1	100%
2	85%
3	75%
4 et plus	70%

Par exemple si on compare deux agriculteurs qui apportent une dose de 180 U d'azote sur une parcelle de blé dur. L'un apporte en deux fois, l'autre en 4 fois.

Nous obtiendrons donc les valeurs de performances suivantes :

$$1 - 180 \times 85\% = 153$$

$$2 - 180 \times 70\% = 126$$

La parcelle qui présente moins d'apports fractionnés sera donc pénalisée.

Notation Electre-TriC

Nous obtenons un rapport allant de 0 à 197 en fonction des parcelles. Nous avons donc choisi l'échelle de risque suivante (Tableau 15).

Tableau 15 : Notation Electre Tri-C pour le critère pression Azote corrigé

		Valeur caractéristique de la classe
niveau 1	risque très fort	130
niveau 2	risque fort	100
niveau 3	risque moyen	70
niveau 4	risque faible	40
niveau 5	risque très faible	20

Seuils d'indifférence Q et de préférence P

Nous choisissons une préférence faible entre les catégories de risque 4 et 5. Le seuil d'indifférence $Q = 5$. On choisit une préférence stricte entre les autres niveaux de risque. Le seuil de préférence est donc calculé pour un coefficient $\beta = 25$.

$Q(0, 5)$ et $P(0, 25)$

2.2.3.3. *Le risque phytosanitaire apprécié par l'indice de fréquence de traitement :*

Définition du critère

L'indice de fréquence de traitement est un indicateur permettant de rendre compte de l'intensité des traitements phytosanitaires sur une parcelle. Il est calculé comme suit :

$$IFT = \frac{\text{Dose appliquée} \times \text{Surface traitée}}{\text{Dose homologuée} \times \text{Surface de la parcelle}}$$

On calcul l'IFT pour chaque traitement appliquée à la parcelle.

$$L'IFT \text{ Herbicide} = \sum IFT \text{ traitement herbicides}$$

$$L'IFT \text{ Hors Herbicide} = \sum IFT \text{ traitement Fongicides, Insecticides et Anti-Limace.}$$

Pour suivre l'évolution des traitements phytosanitaires au cours du temps (Plan Ecophyto 2018), l'IFT est calculé dans chaque région, ce qui nous permet de comparer les résultats de l'Association et du Bassin versant expérimental aux moyennes de la région Midi-Pyrénées. L'IFT régional pour chaque culture a été calculé en 2008. Les IFT varient de 0.56 à 4.66 sur le bassin versant. À partir des comparaisons avec les moyennes régionales et des variations de valeurs obtenues nous avons créé l'échelle de valeur suivante (Tableau 16).

Tableau 16 : Echelle de valeur de risque pour la pression phytosanitaire

Classes d'IFT	Appréciation du risque
> 4	très fort
[2 - 4[	fort
[1 - 2[	moyen
[0.5 - 1[	faible
[0- 0.5 [	très faible

Notation Electre-TriC

Tableau 17 : Notation du critère de pression phytosanitaire

		Valeur caractéristique de la classe
niveau 1	risque très fort	4,5
niveau 2	risque fort	3
niveau 3	risque moyen	1,5
niveau 4	risque faible	0,75
niveau 5	Risque très faible	0,25

Seuils d'indifférence Q et de préférence P

On choisit une préférence faible entre les niveaux de risque 3 et 4, 4 et 5. Le seuil d'indifférence $Q = 0,25$. Pour mettre en avant les fréquents traitements phytosanitaires, on choisit une préférence stricte entre les niveaux de risque 1 et 2, 2 et 3. Le seuil de préférence est donc calculé pour un coefficient $\beta = 0,95$.

$$Q(0, 0,25) \quad P(0, 0,95)$$

2.3. Pondération des critères

La méthode Electre-TriC permet d'introduire une pondération des différents critères en fonction de leur contribution au risque de contamination. Dans cette étude, nous avons choisi de faire trois traitements successifs, un traitement pour le risque érosion, un traitement pour le risque phytosanitaire, un traitement pour le risque azote. Cependant, nous avons vu dans le chapitre précédent qu'il existe deux types de comportement des molécules phytosanitaires :

- les molécules insolubles liées aux particules ont un comportement proche de l'érosion
- Les molécules solubles dans l'eau qui ont un transfert comparable à celui de l'azote.

De plus, nous avons pu voir que la majorité des produits phytosanitaires utilisés sur le bassin versant sont plutôt solubles. Nous avons donc choisi de considérer le transfert des produits phytosanitaires comme celui des nitrates. Il en résulte deux choix de pondérations différents.

Afin d'optimiser au mieux les pondérations, après avoir testé une vingtaine de variantes, nous avons utilisé l'application SRF (Simos Roy, Figuera) (Figueira and Roy 2002). Pour chaque problématique, nous avons tout d'abord classé, avec l'aide d'un groupe d'experts du Cemagref, les différents critères selon leur ordre d'importance. Après classement, nous leur avons demandé quels étaient les écarts d'importance entre deux critères successifs, par exemple combien de fois la pente est elle plus importante que le sol pour la problématique érosion. Enfin, nous leur avons demandé quelle était la différence de poids entre le critère le plus important et le moins important. Le logiciel, avec ces informations, calcule des pondérations correspondantes. Nous retenons celles qui nous semblent satisfaisantes.

2.3.1. Problématique Erosion

Après une synthèse des différents avis et plusieurs essais sur le logiciel SRF, nous validons l'option suivante (Tableau 18) :

Tableau 18 : Pondération des différents critères pour la problématique érosion

Critère	Contribution du critère
Connectivité	6 %
Ripisylve	10 %
Bande enherbée	13 %
Pente	18 %
Sol	23 %
Pression anthropique : Couverture du sol	30 %

Selon le groupe d'experts, la couverture du sol est le critère le plus important pour ce qui est du risque érosif. En effet, si la couverture du sol est forte (exemple d'une prairie), il n'y aura pas de départ de particules. Au contraire, si le sol est majoritairement nu toute l'année (exemple d'une culture d'été), le transfert de particules sera important. Le type de sol est une donnée essentielle, par exemple, si le sol est très argileux, alors on n'observera pas de départ de particules. Il explique donc 23 % du risque.

Nous avons voulu aussi donner de l'importance aux moyens mis en œuvre par les agriculteurs pour limiter le transfert des contaminants vers le ruisseau. C'est pourquoi la bande enherbée et la ripisylve expliquent à elles deux près du quart de l'affectation des parcelles dans une catégorie de risque.

2.3.2. Problématique azote et phytosanitaire

Tableau 19 : Pondération des différents critères pour la problématique azote et produits phytosanitaires

Critère	Contribution du critère
Sol	7 %
Ripisylve	10 %
Bande enherbée	13 %
Pente	18 %
Connectivité	22 %
Pression anthropique : Azote ou IFT	30 %

De la même façon, nous avons déduit des différents échanges, que la pression agricole est le critère le plus important pour le risque azote et phytosanitaire (Tableau 19). En effet, si, par exemple, il n'y a pas d'application de produits phytosanitaires, il n'y a donc pas de risque de contamination.

Par contre, nous avons considéré que la connectivité a beaucoup plus d'importance pour les éléments solubles. En effet, par exemple, la présence de drains emmène les éléments solubles directement à la rivière. Ils empêchent donc toute dégradation de ces molécules lors du transport. De même les autres éléments de la connectivité accentuent les transferts.

2.4. Utilisation des seuils de véto pour les critères de pression

Nous souhaitons tenir compte ici du seuil de véto qui permet d'empêcher un surclassement notamment d'une catégorie de risque inférieur vers un niveau supérieur. Ainsi cela est particulièrement important pour le critère de pression agricole, phytosanitaire et azote. Car même dans le cas d'une très forte vulnérabilité, si la pression appliquée est nulle, il ne peut y avoir de risque. Cela est évident dans le cas des prairies qui sont alors affectées en catégorie C5 du niveau de risque le plus faible. Le rôle du véto permet donc de donner de l'importance à un critère minoritaire lorsqu'il est en opposition avec la majorité.

Plus le véto est proche du seuil de préférence P, plus le véto restreindra le modèle. Pour que le véto ne soit pas trop restrictif, et qu'il ne permette pas un véto entre deux catégories de risques consécutifs, il faut aussi qu'il soit supérieur à l'intervalle entre les deux valeurs caractéristiques de classes consécutives.

Nous avons donc défini les seuils de véto suivants :

- Erosion : $S_v = 5$
- Azote-apports : $S_v = 40$
- Produits phytosanitaires : $S_v = 3$

2.5. Définition du seuil de crédibilité

Avant de lancer l'analyse, il faut renseigner un dernier élément. Le taux de crédibilité du modèle λ . Ce taux permet d'indiquer à partir de quel niveau l'affectation est acceptable. λ doit être compris entre 0.5 et 1. S'il est égal à 1, la totalité du pouvoir de vote (pondération) des critères doivent être d'accord pour l'affectation dans une catégorie. S'il est égal à 0.5, la moitié du pouvoir de vote des critères doivent être d'accord pour l'affectation dans une catégorie de risque. Nous avons choisi $\lambda = 0.7$, car la somme des pondérations des trois critères principaux est égale à 70% (pente, pression, sol pour l'érosion et pente, pression et connectivité pour les matières solubles). Cela veut dire que ces trois critères doivent concorder pour permettre l'affectation.

Pour mettre en œuvre le traitement multicritère, nous avons utilisé un prototype créé par Juscelino Almeida-Dias au laboratoire LAMSADE. L'interface Excel est présentée en annexe E.

3. Résultats et discussion

La modélisation multicritère que nous avons réalisée sur le bassin versant expérimental d'Auradé avait pour objectif d'apprécier le niveau de risque environnemental de chaque parcelle culturale pour la contamination du ruisseau du Montoussé par rapport :

- aux particules et molécules phytosanitaires insolubles adsorbées,
- aux molécules solubles,
- à l'azote en excès, non prélevé par les plantes.

Deux affectations sont effectuées lors du traitement multicritère : une, grâce au surclassement ascendant, l'autre grâce au surclassement descendant. Si les deux affectations sont les mêmes, alors le modèle affecte directement les parcelles dans une catégorie de risque. Si elles sont différentes (le modèle hésite), le modèle donne un intervalle de catégories possibles. Il revient alors au décideur de choisir celle du niveau de risque final. L'annexe F, donne une explication détaillée de l'interprétation des résultats Electre Tri-C.

Tableau 20 : Résultats de la modélisation, pourcentage d'affectations directes et finales

Erosion	Produits phytosanitaires	Excédents d'azote
UC (56): 64,4%	UC (57): 65,5%	UC (53): 60,9%
ACR I (m = UC): 100,0%	ACR I (m = UC): 100,0%	ACR I (m = UC): 100,0%
ACR II (m = 87): 100,0%	ACR II (m = 87): 98,9%	ACR II (m = 87): 100,0%

Le tableau ci-dessus (Tableau 20) présente le niveau global de précision de la modélisation. Ces statistiques d'affectation des parcelles indiquent que les parcelles ont été affectées directement à une seule catégorie de risque pour plus de 50 % (ligne UC : Unique Category), qui correspond au seuil de pertinence du modèle. Ici le résultat de la modélisation est pertinent pour les trois objectifs, avec respectivement un % UC de 64,4%, 65,5% et 60,9%. Le modèle hésite un peu plus pour la problématique azote puisqu'il affecte automatiquement 53 parcelles. Pour les trois objectifs, 100% des parcelles affectée directement ont été validée par le décideur (ligne ACR I : accuracy I). Après choix d'affectation du décideur, pour l'érosion et les excédents d'azote, l'ensemble des parcelles ont été affectées à un niveau de risque proposé par le modèle (ligne ACR II : accuracy II). Pour la problématique produits phytosanitaires, une parcelle a été affectée dans une catégorie différente de celle proposée : il s'agit d'une prairie n'ayant pas reçu de pesticides que nous avons affecté en C5 et non en C4.

Nous allons maintenant détailler les résultats pour les trois objectifs.

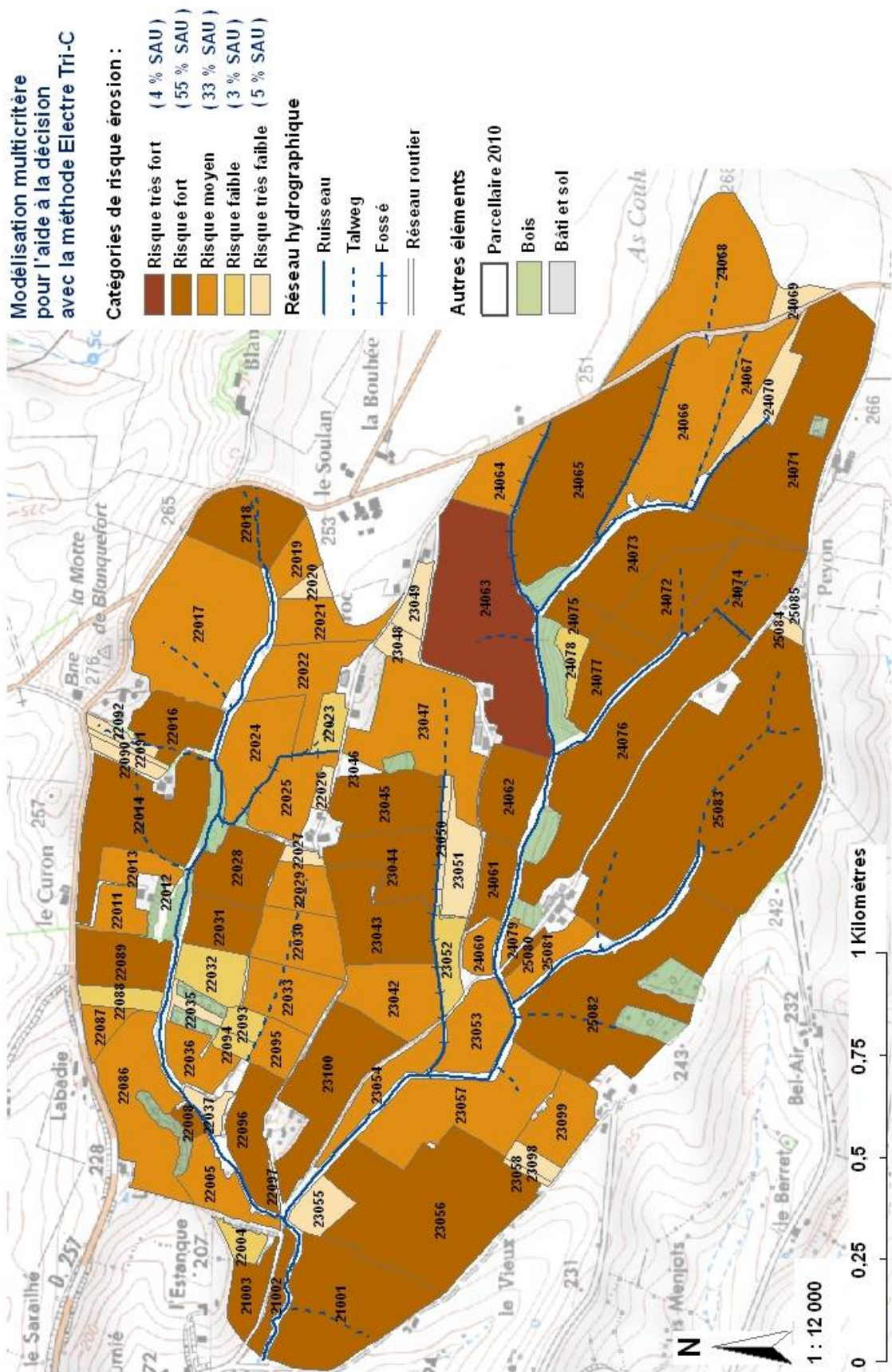


Figure 13 : Affectation des parcelles du bassin versant expérimental d'Auradé aux catégories de risque érosion

3.1. Caractérisation des parcelles par rapport au risque érosion

Nous avons affecté l'ensemble des parcelles dans la catégorie de risque proposé par le modèle. Ceci nous confirme que la construction du modèle est intéressante. La carte ci-contre (Figure 13) nous permet de voir que le bassin versant est globalement très sensible au risque d'érosion. En effet une majorité de parcelles se trouve en risque fort ou très fort. Le tableau ci-dessous (Tableau 21) permet d'apprécier le pourcentage de chaque catégorie par rapport à la Surface Agricole Utile (SAU) du bassin versant. Nous pouvons voir que les risques fort et très fort représentent 59 % de la SAU tandis que les risques faible ou très faible représentent uniquement 8 % de la SAU.

Tableau 21 : Pourcentage de la SAU affectée dans chaque catégorie de risque pour l'objectif risque érosion.

Catégories	Surface (ha)	% SAU	Nombre de parcelles
C1	11,6	4	1
C2	155,7	55	29
C3	94,2	33	29
C4	7,9	3	8
C5	13,2	5	20
Total	282,7	100	87

Une seule parcelle se trouve dans la catégorie de risque la plus élevée. Cette parcelle (n°24063) présente en effet un sol très vulnérable, une surface et une pente importante et est cultivé en tournesol. Elle se trouve en bordure du ruisseau. De plus le ruisseau est assez mal protégé à ce niveau. Cette parcelle présente donc sans hésiter un risque majeur pour ce qui est de l'érosion.

Ensuite un groupe de parcelles présentent un risque fort vis-à-vis de l'érosion (55 % de la SAU). Il s'agit en majorité de grandes parcelles de tournesol. Leur affectation semble justifiée car la couverture du sol est faible et l'effet surfacique important. Une parcelle de blé (23100) est également affectée dans cette catégorie. Cette parcelle est faiblement connectée au ruisseau mais elle présente un sol à risque et un effet de surface important. De même, la plus grande parcelle du bassin versant (n°25083) cultivée en colza malgré sa couverture du sol relativement importante présente un risque fort. Elle présente en effet une faible protection pour le ruisseau. On peut aussi observer le comportement intéressant de la parcelle 22014 occupée par du tournesol. Cette parcelle présente une pression forte. Elle est aussi vulnérable de par ses sols, sa connectivité et sa surface. Mais la présence d'une bande enherbée et d'une ripisylve de bonne qualité permet à cette parcelle d'être affectée au risque fort alors que tous les critères contribuent au risque très fort.

Modélisation multicritère pour l'aide à la décision avec la méthode Electre Tri-C

Catégories de risque Produits phytosanitaires :

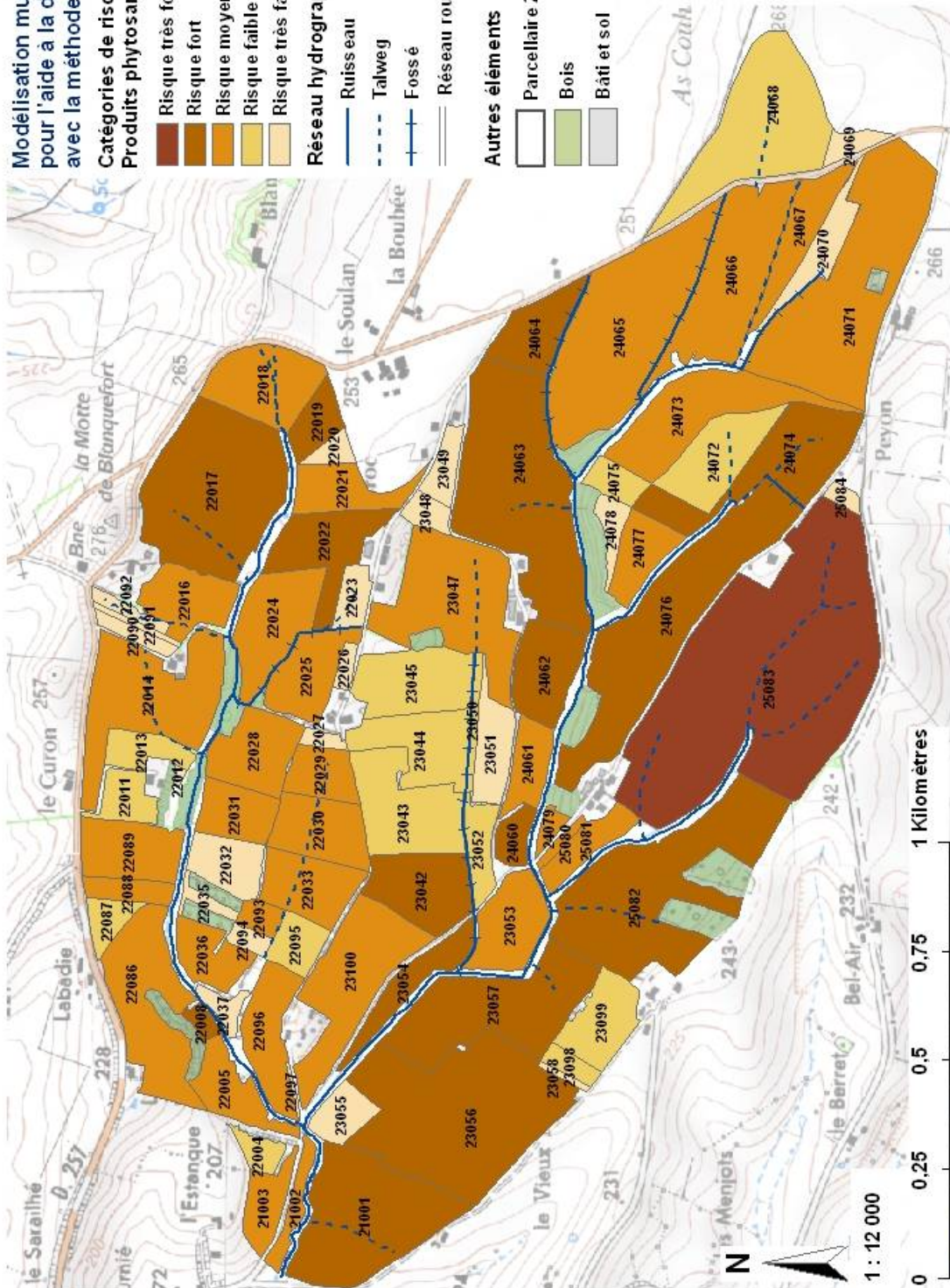
- Risque très fort (9 % SAU)
- Risque fort (33 % SAU)
- Risque moyen (40 % SAU)
- Risque faible (12 % SAU)
- Risque très faible (6 % SAU)

Réseau hydrographique

- Ruisseau
- Talweg
- Fossé
- Réseau routier

Autres éléments

- Parcellaire 2010
- Bois
- Bâti et sol



Sources : IGN, Association des agriculteurs d'Auradé

Figure 14 : Affectation des parcelles du bassin versant expérimental d'Auradé aux catégories de risque produits phytosanitaires

Les parcelles à risque moyen sont en général des parcelles de blé dur présentant une vulnérabilité plus faible de par leur effet surfacique moindre ou leur sol à risque moyen.

Les parcelles à faible et très faible risque sont des prairies ou des jachères et des petites parcelles près de la ligne de crête.

Pour cet objectif nous pouvons conclure que le modèle représente bien les éléments que nous avons voulu mettre en avant. C'est-à-dire que la pression agricole, représentée ici par la couverture du sol (pondération à 30 %), est déterminante pour l'affectation d'une parcelle à une catégorie de risque. Cette catégorie de risque est ensuite modulée par la vulnérabilité du milieu physique ainsi que par les protections mises en œuvre par les agriculteurs.

3.2. Caractérisation des parcelles par rapport au risque de transfert de produits phytosanitaires

La carte ci-contre (Figure 14) présente les résultats de l'analyse cartographiée. Pour cette analyse nous avons fait l'hypothèse que la majorité des molécules utilisées dans le bassin versant sont solubles. Nous avons donc donné plus d'importance au critère connexion dans cette modélisation.

Nous avons vu précédemment qu'une seule parcelle a été affectée par le décideur dans une catégorie de risque différente de celle proposée par le modèle. En effet, il s'agit d'une prairie (parcelle 23055) qui présente une forte vulnérabilité mais qui n'a pas reçu de produits phytosanitaires. Nous l'avons donc affectée à la catégorie 5 alors que le modèle présentait au mieux la catégorie 4, eu égard aux poids des critères de vulnérabilité.

Le tableau ci-dessous (Tableau 22) indique qu'il y a 42 % de la SAU du bassin versant qui présente un risque fort à très fort. 18 % présente un risque faible à très faible.

Tableau 22 : Pourcentage de la SAU affectée dans chaque catégorie de risque pour l'objectif risque produits phytosanitaires.

Catégories	Surface	% SAU	Nombre de parcelles
C1	25,2	9	1
C2	93,2	33	16
C3	113,3	40	33
C4	34,9	12	15
C5	16,2	6	22
Total	282,7	100	87

Ici aussi, une seule parcelle est affectée dans la catégorie de risque très fort. Il s'agit de la seule parcelle de colza de 25 ha. Pour cette parcelle tout concoure à un risque élevé. En effet, le colza est une culture qui demande beaucoup de traitements phytosanitaires, en particuliers insecticides et fongicides, elle présente donc une pression forte (IFT = 4.66), de plus la vulnérabilité de la parcelle est maximum. Enfin, la protection du ruisseau est faible.

Les parcelles ayant un risque fort présentent une pression faible à moyenne mais une grande vulnérabilité (dû en particulier à l'effet de surface). Pour la parcelle qui était classée en risque 1 pour l'érosion (24063) se comporte de façon intéressante, la vulnérabilité n'a pas changée, elle est toujours très forte, mais la pression est faible (IFT = 1.05), elle descend donc dans une classe de risque très fort. Pour cette parcelle, il suffirait d'un traitement phytosanitaire de plus pour la faire basculer en risque très fort.

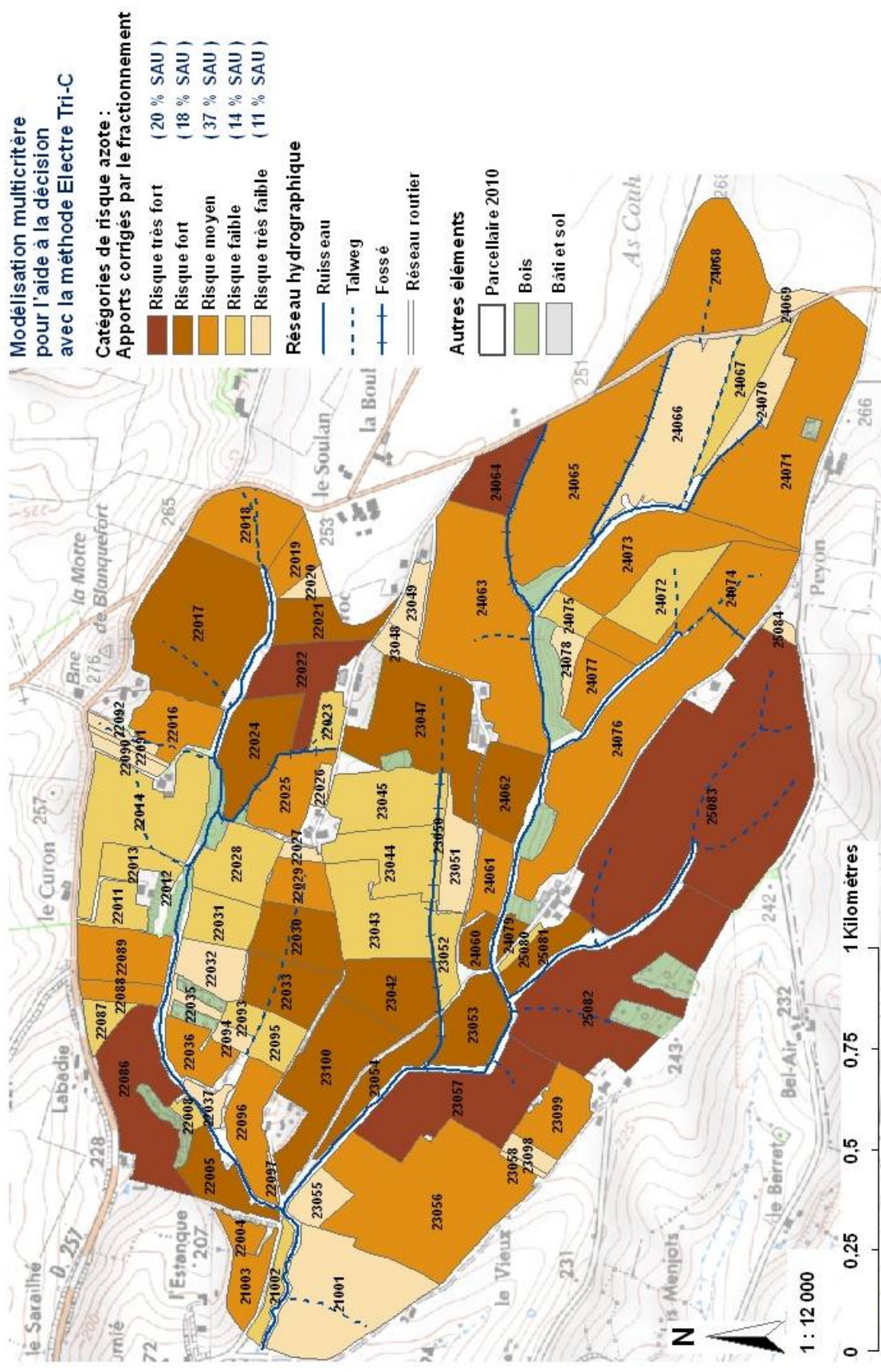
On peut remarquer que mis à part les très grandes parcelles, beaucoup de parcelles de tournesol ont diminué d'une classe de risque par rapport au risque d'érosion. Ceci s'explique par la faible quantité de produits phytosanitaires apporté à cette culture (en général un traitement herbicide).

Les prairies se sont maintenues à un niveau très faible de risque car elles ne présentent pas de traitement phytosanitaire.

Tableau 23 : Extrait de la matrice de performance pour l'évaluation multicritère du risque phytosanitaire

N° parcelle	CR1 Pentes Somme (Pu.Su)	CR2 Sols	CR3 Connectivité	CR4 Ripisylve	CR 5 Bande enherbée	CR 6 - Pression agricole (Phytosanitaires) IFT	Affectation multicritère
22022	553 518	4,55	8	9	2	2,1	Risque fort
22024	555 020	3,66	8	3	3	2,1	Risque moyen

Le tableau ci-dessus (Tableau 23) permet de comprendre la différence de notation de deux parcelles exploitées par le même agriculteur (blé dur). À vulnérabilité égale, c'est la ripisylve ici qui est de moins bonne qualité pour la parcelle 22022 et qui fait basculer celle-ci dans un risque supérieur.



Sources : IGN, Association des agriculteurs d'Auradé



Figure 15 : Affectation des parcelles du bassin versant expérimental d'Auradé aux catégories de risque excédents d'azote

3.3. Caractérisation des parcelles par rapport au risque azoté

La carte ci-contre (Figure 15) présente les résultats de l'analyse cartographiée. Les pondérations des critères utilisés sont les mêmes que pour la problématique molécules phytosanitaires.

Contrairement aux deux résultats précédents, nous pouvons voir qu'il y a beaucoup plus de parcelles qui présentent un risque très fort de transfert d'azote dans le ruisseau. En effet, il y a six parcelles affectées à la catégorie C1. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les apports en fertilisation azoté pour le blé dur sont très forts et vont même au-delà des recommandations faites par les conseillers de terrains. En effet nous avons pu voir (Annexe A, pratique des agriculteurs d'Auradé), que pour le blé dur et pour le colza, les fertilisations sont supérieures de 20 à 100 unités d'azotes. Dans ce cas, il est normal de retrouver ces parcelles en risque le plus fort d'autant plus qu'il s'agit de parcelles à forte vulnérabilité comme on l'a vu précédemment. Le tableau ci-dessous (Tableau 24) nous indique que la catégorie de risque très fort représente 20 % de la SAU. On voit aussi augmenter les risques faibles et très faibles par rapports aux résultats précédents (25 % de la SAU).

Tableau 24 : Pourcentage de la SAU affectée dans chaque catégorie de risque pour l'objectif risque produits phytosanitaires.

Catégories	Surface (ha)	% SAU	Nombre de parcelles
C1	55,1	20	6
C2	51,5	18	15
C3	104,7	37	22
C4	40,7	14	20
C5	30,6	11	24
Total	282,7	100	87

Les parcelles de blé sont, à quelques exceptions près, toutes affectées en catégories de risque très fort et fort. Le critère de pression joue donc bien son rôle principal.

Le risque moyen est dominé par des parcelles de tournesol présentant une forte vulnérabilité mais une pression faible.

Les risques faibles et très faibles sont assez bien représentés ici car l'impasse sur la fertilisation azotée pour le tournesol est assez fréquente. S'il n'y a pas d'apports d'azote on peut donc imaginer que le risque de transfert est faible. Ces parcelles de tournesol viennent s'ajouter aux prairies dans les catégories à faible niveau de risque.

Cette analyse des résultats montre bien l'importance de chaque critère dans le modèle et leur poids. La construction du modèle est là aussi assez représentative de ce que nous voulions faire ressortir par la modélisation multicritère, c'est-à-dire la prise en compte de la pression exercée par l'agriculteur sur le milieu naturel. Nous pouvons ici aussi rappeler le rôle du véto dans cette prise en compte.

Pour approfondir la réflexion sur la modélisation multicritère nous avons effectué une simulation de l'affectation des parcelles en modifiant un critère : le critère des bandes enherbées.

3.4. Effet des dispositifs agroenvironnementaux sur l'affectation des parcelles aux catégories de risque

Les agriculteurs du bassin-versant d'Auradé ont mis en œuvre depuis 20 ans des bandes enherbées le long du ruisseau. Pour mettre en évidence l'effet de ce critère sur l'affectation des parcelles dans une catégorie de risque pour l'environnement, nous avons testé le modèle en attribuant une valeur d'efficacité de la bande enherbée très faible (performance forte pour le risque). Nous avons ensuite effectué un nouveau tri des parcelles selon les trois types de pression anthropique.

Les cartes en annexe G montrent la nouvelle affectation des parcelles obtenue pour les trois types de pression. Le tableau ci-dessous (Tableau 25) permet d'évaluer les différences entre les deux affectations. Pour l'érosion, 6 parcelles augmentent leur risque d'une ou deux catégories. Les changements sont beaucoup plus importants pour les deux autres objectifs.

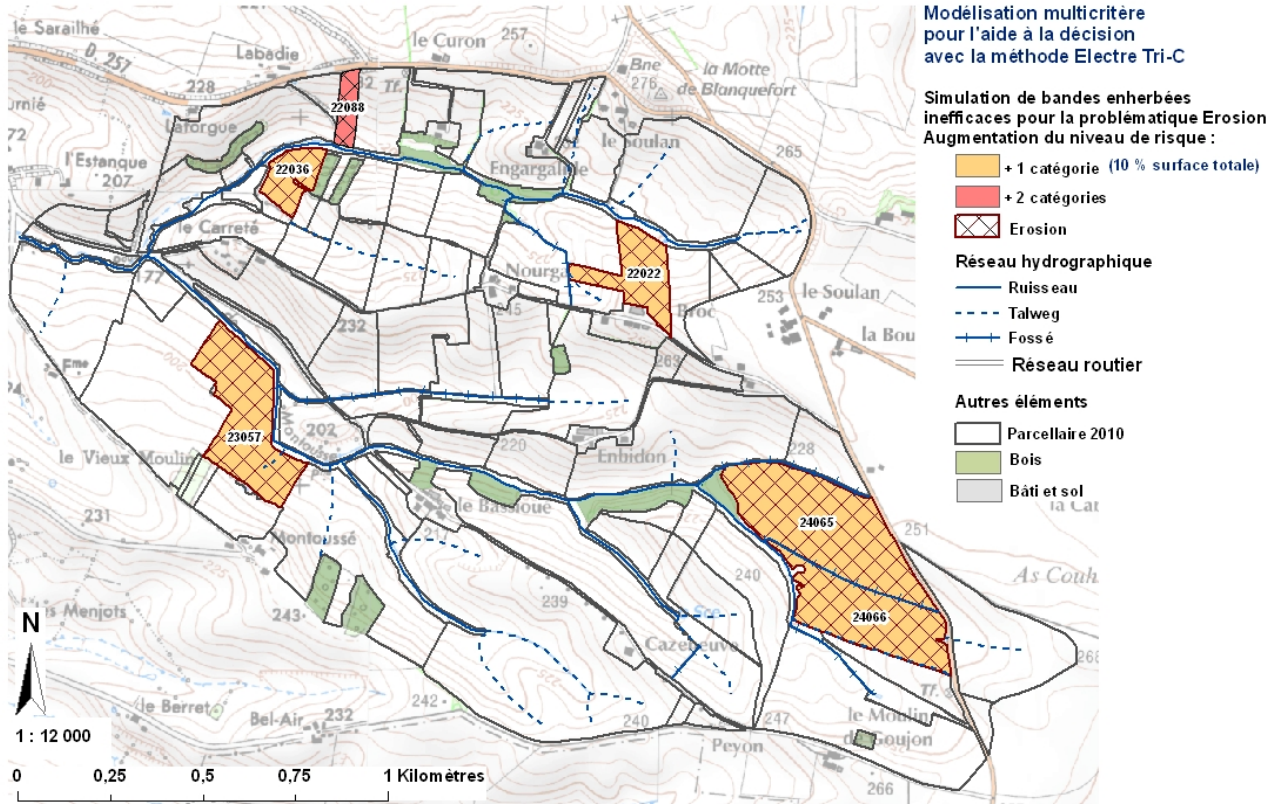
Tableau 25 : Nombre de parcelles ayant changé de catégories, effet bandes enherbées

Problématique	Erosion	Produits phytosanitaires	Azote
Nombre total de parcelles ayant changé de catégorie de risque	6	14	17
Dont 1 catégorie	5	13	17
Dont 2 catégories	1	1	0

Les parcelles qui ont changé d'affectation sont les parcelles qui possèdent en réalité une bande enherbée de bonne qualité efficace dans la protection du ruisseau. Ces parcelles ont dans la plupart des cas un risque augmenté d'une catégorie. Mais, en regardant de plus près les changements, nous pouvons dire aussi que ce sont surtout des parcelles qui présentent déjà un risque moyen à fort qui bascule dans une catégorie supérieure. Les catégories basses ne sont pas touchées par des changements d'affectation. Nous pouvons expliquer ceci par le fait que les parcelles les plus à risque sont situées près du ruisseau du fait du critère connexion. Or le critère sur lequel nous jouons affecte lui aussi uniquement les parcelles le long du ruisseau. Le critère bandes enherbées touche donc les parcelles les plus à risque le long du ruisseau.

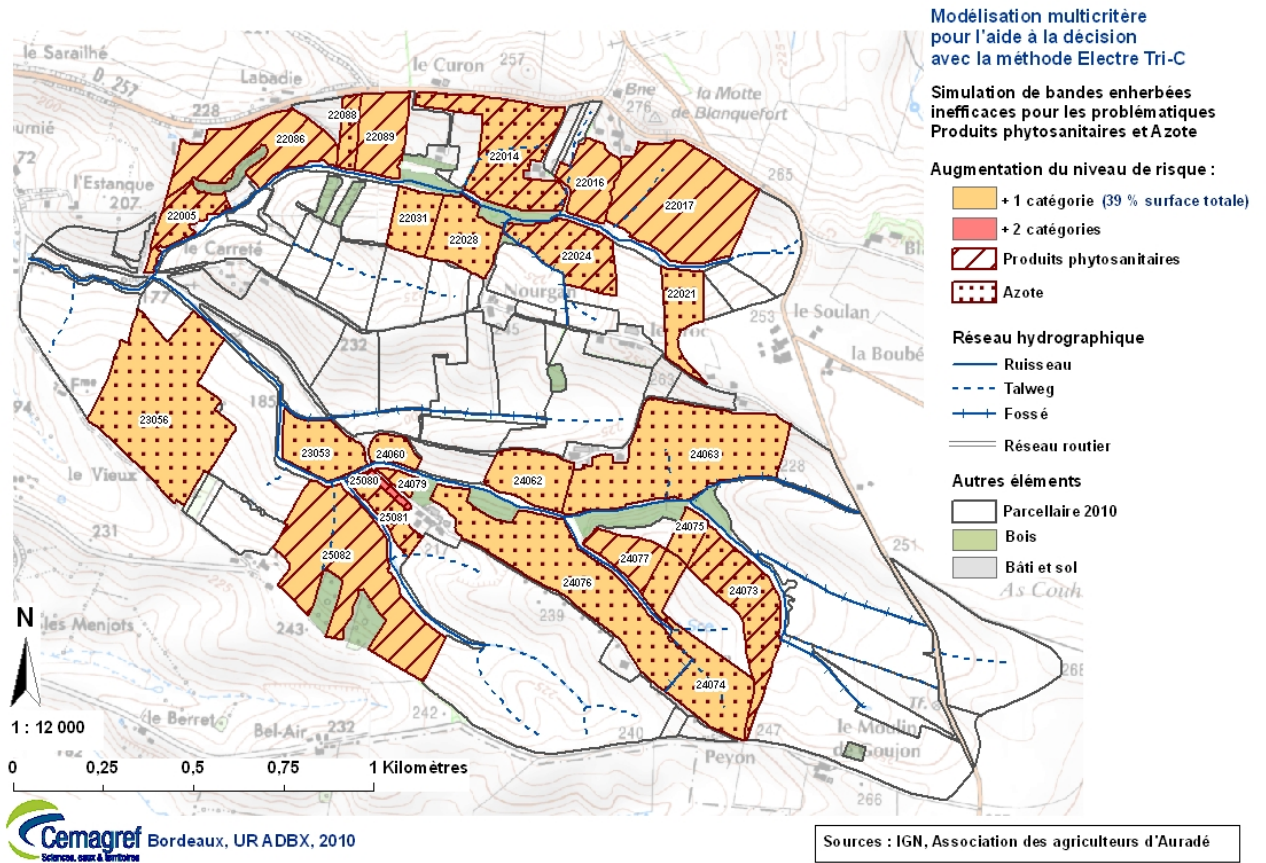
Nous pouvons voir que le modèle est très sensible car le changement d'un seul critère fait changer considérablement les affectations des parcelles situées en bordure de ruisseau. Ceci démontre encore l'importance de la précision des critères qu'il faut donner lors de la construction du modèle et notamment leurs dépendances. Ils doivent refléter le plus possible la réalité du terrain.

Parallèlement la définition des seuils d'indifférence, de préférence et le cas échéant de véto demande également un bon niveau de précision.



Cemagref Bordeaux, UR ADBX, 2010

Sources : IGN, Association des agriculteurs d'Auradé



Cemagref Bordeaux, UR ADBX, 2010

Sources : IGN, Association des agriculteurs d'Auradé

Figure 16 : Représentation des différences de catégories en simulant une bande enherbée inefficace

Les cartes ci-dessus (Figure 16) représentent les parcelles ayant augmenté leur risque en simulant une bande enherbée inefficace. Nous pouvons remarquer que ce ne sont globalement pas les mêmes suivant le type de pression observé. Une seule parcelle a changé de risque pour les trois pressions (parcelle n° 22088). Trois parcelles ont augmenté d'un niveau de risque pour le risque azote et produits phytosanitaires. Si les résultats sont différents c'est que le critère pression est prépondérant dans l'attribution de la catégorie, d'où l'importance de travailler avec des valeurs réelles des pratiques des agriculteurs, car la variabilité des pratiques à l'intérieur même d'une région est importante.

Ce résultat est très intéressant pour la communication avec les acteurs de terrain tels que les agriculteurs de l'Association des Agriculteurs d'Auradé. En effet, ces cartes permettent de montrer, avec des données réelles l'utilité des bandes enherbées pour la protection du ruisseau.

4. Discussion et perspectives

4.1.1. *La méthode présente des avantages et des inconvénients*

La problématique du Tri (affectation des parcelles dans une seule catégorie à risque prédéfinie) présente des avantages indéniables par rapport à la problématique du classement (Electre III). En effet cette méthode permet d'affecter directement les parcelles à un niveau de risque alors que le classement donne uniquement l'ordre entre les différentes parcelles par rapport à une problématique donnée. Ce tri est intéressant lorsque l'on peut donner des échelles de risques pour chaque critère. Il nous a été possible de le faire facilement sur certains critères de terrain (connectivité, bande enherbée, ripisylve, couverture du sol). L'exercice est par contre plus difficile pour des critères où nous n'avons pas trouvé de références bibliographiques pour les échelles de risque. Je pense notamment à l'indice de fréquence de traitement, nous ne savons pas à partir de quelle valeur l'IFT peut présenter un risque élevé. Nous avons donc proposé une échelle selon notre bon sens. Ces échelles sont bien sûr modifiables avec l'évolution des connaissances.

Un autre avantage de la méthode est que la modélisation laisse le choix au décideur de l'affectation finale des parcelles à chaque catégorie de risque. Il présente soit une catégorie de risque, soit un intervalle. Il s'agit donc bien d'une méthode pour l'aide à la décision du risque environnemental.

On remarque globalement que le modèle hésite sur l'affectation des plus petites parcelles. En effet l'effet surfacique auquel on a voulu donner de l'importance se reflète ici. Le modèle classe automatiquement les grandes parcelles mais hésite, comme nous, sur les petites parcelles ayant par exemple une vulnérabilité forte et une pression faible par exemple (parcelle de vigne en forte pente, en bord de ruisseau et ayant une protection faible mais ne présentant pas d'apports d'azote).

Nous avons pu voir l'importance de la définition des critères dans la modélisation multicritère et de leur paramétrage. Lorsque la construction du modèle est précise et détaillée l'affectation des actions aux différentes catégories de risque est plutôt conforme à la réalité. Il est essentiel d'avoir des critères indépendants les uns des autres pour ne pas avoir d'interférences dans la modélisation, et donc ensuite de grandes difficultés dans l'interprétation des résultats. Cette indépendance des indicateurs permet aussi d'expliquer plus facilement l'affectation des parcelles à un niveau de risque. Initialement nous pensions agréger la bande enherbée et la ripisylve. En fait leurs actions sont bien complémentaires mais différentes. Il nous aurait alors été difficile de différencier les effets de chaque élément du paysage. Nous avons par contre gardé un critère présentant deux composantes différentes. L'effet surfacique des pentes. Il est assez difficile de connaître alors l'effet des pentes qui est dominé par l'effet de surface. Mais nous n'avions pour l'instant pas créé de critère indépendant pour la surface de chaque parcelle, ce qui est important compte tenu

notamment du rôle des grandes parcelles ici. Il était plus logique d'affecter l'effet surface au critère relatif à la pente.

La mise en œuvre du modèle ELECTRE Tri-C demande une connaissance et une compréhension assez fine de son fonctionnement et de son paramétrage. L'expérience de Francis Macary dans la mise en œuvre de cette méthode sur l'Oir en Normandie (problématique érosion), a été très utile pour la définition des critères et l'élaboration des échelles de notation des performances des parcelles pour chacun des critères. Juscelino Almeida-Dias (concepteur de ce prototype) dans la cadre de sa thèse encadrée par le Pr Bernard ROY (Université de Paris-Dauphine) et le Pr José Rui-Figuéra (Université de Lisbonne) nous a aidé à parfaire les paramétrages du modèle pour définir des échelles de valeurs caractéristiques et les seuils de façon optimisée en accord avec nos objectifs.

De plus la mise en forme des données provenant de différentes sources (terrain, cartographique, enquête) est un travail assez long. Il s'ensuit que ce type de modélisation est très intéressant car il permet de retenir des critères de nature quantitative mais aussi qualitative. Toutefois, elle demande une grande rigueur et exige une bonne connaissance du terrain pour une parfaite optimisation.

Il est toujours difficile de valider des résultats notamment de type cartographique. La validation à dire d'expert est faisable pour un tel bassin versant qui présente un nombre limité de parcelles, pour les phénomènes érosifs, mais la validation s'avère beaucoup plus délicate pour les transferts d'éléments solubles. On ne dispose pas non plus d'analyses d'état de l'eau dans le cours d'eau de façon suffisamment représentative. De plus, la correspondance entre les parcelles et le point du cours d'eau est quasi infaisable.

La construction de ce modèle multicritère nous a permis de nous rendre compte des améliorations possibles pour une prochaine évaluation.

4.2. Perspectives d'améliorations du modèle

L'analyse des résultats montre qu'il serait intéressant de produire deux cartes supplémentaires avec uniquement les critères de vulnérabilité : une carte avec la pondération pour les molécules solubles et une carte pour la problématique érosion. Cette carte nous aiderait à faire la part dans le résultat entre les affections qui sont dues à la vulnérabilité et celles qui sont dictées par la pression exercée.

Nous aurions pu d'abord classer les parcelles à dire d'expert sans le modèle puis regarder la différence de classement pour permettre la validation du modèle. Dans notre cas, la validation s'est faite après classement par le modèle, en regardant quelques parcelles caractéristiques et leur affectation. Nous étions donc quand même très influencés par les résultats exposés. Néanmoins nous pouvons dire que l'affectation est bonne car pour l'ensemble des essais, nous avons accepté à près de 100% la classe proposée (ou l'intervalle de classe).

Grâce à l'apprentissage de cette modélisation, on voit qu'il semble préférable de prévoir des échelles de valeur plus grande pour les notations de terrain afin d'optimiser notamment le rôle des seuils dont celui du véto. On peut par exemple avoir une échelle de 0 à 20, plutôt que de 0 à 10.

Nous avons eu quelques difficultés pour la pression phytosanitaire à déterminer un indicateur le plus proche possible de ce qui se passe dans la réalité. Nous avons un indicateur l'IFT qui donne une idée globale des traitements effectués. En outre, les molécules phytosanitaires ont un comportement différent selon leur nature et les paramètres physico-chimiques du milieu. La solubilité du produit n'est pas le seul facteur important à prendre en compte. Le Koc, qui rend compte du potentiel de rétention de la molécule sur la matière organique du sol peut être aussi intéressant pour trier les molécules utilisées. La toxicité des molécules pour le milieu naturel est aussi une donnée à prendre en compte lorsque l'on s'attache à la qualité de l'eau. Mais la prise en compte de toutes les molécules par culture complique assez fortement la modélisation.

Enfin, nous avons aussi pu voir que le modèle est sensible, c'est-à-dire que les changements dans la notation influent sur l'affectation des parcelles. Pourtant une analyse complète de sensibilité devrait compléter ce résultat.

De plus, une analyse de robustesse serait nécessaire pour valider les résultats obtenus, en effet l'analyse de robustesse permet de mesurer l'aptitude de la méthode à résister à des « à peu près » ou à des « zones d'ignorance » dues aux choix plus ou moins aléatoires et subjectifs des paramètres du modèle (Dumas, 2009). Il faudrait donc faire varier les paramètres, comparer le résultat à l'affectation initiale et vérifier leurs similitudes, ce qui n'a pas pu être réalisé pour le moment eu égard aux délais à respecter.

4.3. Effet du redécoupage des grandes parcelles sur l'affectation des parcelles à une catégorie de risque

Nous avons vu précédemment que les plus grandes parcelles présentaient un risque plus important que les petites parcelles. Ceci représente bien la réalité : l'agrandissement des parcelles et la destruction des haies et des talus ont contribué fortement au cours du temps à l'augmentation du risque environnemental des parcelles agricoles.

Un travail a donc été entrepris pour montrer l'effet de la diminution de la surface sur le classement multicritère. Nous avons donc redécoupé quatre grandes parcelles (une par sous bassin versant) à risque fort ou très fort. Nous allons donc recalculer les critères d'effet surfacique, de sol et aussi attribuer une nouvelle notation des critères qualitatifs. Après avoir créé une nouvelle échelle de valeurs caractéristiques pour le critère d'effet surfacique des pentes (les valeurs proche de 2 000 000 n'existant plus) nous pourrons faire une nouvelle affectation des parcelles : ce travail est en cours de réalisation en ce moment.

Le résultat pourra être intéressant, tout comme celui des bandes enherbées, à présenter aux agriculteurs de l'association.

4.3.1. Comparaison de la campagne 2010 avec la campagne 2009

Une autre perspective intéressante de travail est de refaire le même traitement pour la campagne 2008-2009. En effet, les données d'itinéraires techniques ont été obtenues à partir des enquêtes 2009. Nous avons donc utilisé des moyennes par culture et par agriculteur pour les critères de pression en 2010. Nous pourrons avec le parcellaire 2009, avoir réellement les données à l'échelle parcellaire et donc affiner la modélisation.

La rotation dominante sur le bassin versant est de deux ans (blé dur (ou blé tendre)/ tournesol). L'obtention d'une affectation de chaque parcelle à une catégorie de risque environnemental sur deux années consécutives nous permettra donc d'apprécier ce risque à l'échelle de la rotation. La matrice des performances pour l'année 2009 est déjà opérationnelle et permettra d'obtenir un résultat rapidement.

Conclusion

Le contexte topographique et pédoclimatique confère au bassin versant expérimental d'Auradé une très forte vulnérabilité au risque de transfert de contaminants vers les eaux de surfaces. De plus, la rotation courte blé-tournesol, malgré les efforts fournis par les agriculteurs pour la protection du ruisseau, induisent une pression agricole importante pour la qualité de l'eau.

Pour apporter des éléments de réponses aux effets des pratiques agroenvironnementales sur le risque de transferts de contaminants dans les eaux de surfaces, l'UR ADBX du Cemagref a mis en place une démarche multicritère permettant d'affecter chaque parcelle agricole à un niveau de risque environnemental. Cette modélisation a permis d'évaluer le risque des parcelles selon trois types de pression agricole : les particules et molécules phytosanitaires insolubles adsorbées, les molécules phytosanitaires solubles, l'azote en excès non prélevé par les plantes.

La méthode ELECTRE Tri-C est un outil bien adapté à cette modélisation. En effet, l'étude d'un petit bassin versant Gascon demande une connaissance fine du terrain. Nous avons pu mettre en œuvre à la fois des critères quantitatifs et qualitatifs. Les indicateurs utilisés auront permis de prendre en compte, dans la modélisation, les éléments fins du paysage et ainsi d'avoir une appréciation proche de la réalité avec la prise en compte par exemple de la bande enherbée, qui n'est pas visible avec une approche cartographique classique.

Le modèle a pu mettre en évidence une augmentation du risque pour des bandes enherbées inefficaces. L'échelle parcellaire et de l'exploitation agricole constituent le niveau d'action local pour les problèmes agroenvironnementaux. Les cartographies obtenues peuvent s'avérer intéressante pour la communication des problèmes environnementaux avec les agriculteurs. En effet, nous pouvons ainsi montrer l'utilité des bandes enherbées, qui sont, dans ce bassin versant, mise en place depuis 20 ans. Pourtant, les représentations cartographiques nous ont montré que, malgré les efforts accomplis sur ce territoire, il subsiste un risque important de transferts de contaminants, notamment de nitrates sur le bassin versant. Les apports d'engrais azoté sont parfois au-delà des préconisations. Selon le modèle, la qualité des eaux du Montoussé est donc encore en jeu.

La mise en œuvre de la modélisation demande une connaissance fine du terrain et des différents paramètres qui le compose. De plus, la validation des résultats est complexe. Les analyses d'eau qui permettraient une validation partielle sont coûteuses ; il est difficile de relier un point d'analyse à une parcelle donnée.

La mise en œuvre de cette démarche vient compléter la modélisation multicritère faite sur le bassin versant de l'Oir. L'expérience acquise lors de ces deux constructions permet de tirer des enseignements intéressants sur les améliorations

possibles du modèle. En outre, d'autres réponses pourraient être apportées par la mise en place de la modélisation sur l'année 2009. Il s'agirait alors de pouvoir comparer les résultats obtenus avec le modèle utilisé à une plus petite échelle, l'échelle de la Save et ainsi d'avoir des éléments pour la validation de l'utilisation de ces indicateurs (pour l'azote et les produits phytosanitaires) pour le projet Aguaflash.

L'expérience du stage de fin d'étude aura été bénéfique pour mon insertion professionnelle. J'ai tout d'abord pu renforcer mes connaissances acquises au cours de ma formation en particulier au sujet des problématiques agroenvironnementales. Ce travail, m'a permis de mettre en œuvre à la fois des connaissances en géomatique, des observations scientifiques mais aussi des relations avec les acteurs concernés par la problématique.

Cette approche par modélisation multicritère pour résoudre un problème agroenvironnemental est aussi importante. Elle pourra m'être utile dans le monde professionnel.

Enfin, mon intégration au sein d'une unité de recherche a aussi été une source de nombreux apprentissages. En effet, j'ai pu renforcer mes capacités d'analyse et acquérir une rigueur scientifique nécessaire à la mise en œuvre d'un projet de recherche.

Mon passage au Cemagref, aura donc, dans des conditions d'accueil agréable, été une expérience enrichissante d'un point de vue personnel et professionnel.

Bibliographie

AAA (2008). Plan d'Action Territorial « Boulouze Save Lisloise Amont », Association des Agriculteurs d'Auradé: 56p.

Almeida-Dias, J. (2010). Extrait du manuel de thèse. , Laboratoire LAMSADE - Paris Dauphine, Institut Supérieur Technique - Lisbonne. 10p.

Almeida-Dias, J., Figueira, J.R., Roy, B. (2009). " ELECTRE TRI-C: A multiple criteria sorting method based on characteristic reference actions." *European Journal of Operational Research*.

Figueira, J. and B. Roy (2002). "Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure." *European Journal of Operational Research* **139**.

Aubertot, J. N., J. M. Barbier, et al. (2005). Pesticides, agriculture et environnement Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux, Inra-Cemagref

CORPEN (1996). "Qualité des eaux et produits phytosanitaires. propositions pour une démarche de diagnostic." 119.

CORPEN, Ed. (1997). Produits phytosanitaires et dispositifs enherbés. Paris.

CORPEN, Ed. (2001). Diagnostic de la pollution des eaux par les produits phytosanitaires. Bases pour l'établissement de cahiers des charges des diagnostics de bassins versants et d'exploitations. Paris.

Figueira, J. and B. Roy (2002). "Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure." *European Journal of Operational Research* 139.

Gouy, V., J. J. Gril, et al. (2008). "Contamination des eaux de surface par les pesticides et rôle des zones tampons pour en limiter le transfert : état des connaissances et conséquences pour l'action." *Ingénieries - E A T*(spécial Azote, phosphore et pesticides. Stratégies et perspectives de réduction des flux): 49-63.

Laaribi, A. (2000). Sig et analyse multicritère. Paris, Hermès. 169p.

Lacas, J. G. (2005). Processus de dissipation des produits phytosanitaires dans les zones tampons enherbées. Etude expérimentale et modélisation en vue de limiter la contamination des eaux de surface: 307.

Lavie, E. (2005). Agriculture et qualité des eaux. Des mesures de terrain au système d'information géographique. Application sur les nitrates dans les bassins-versants emboîtés de la Save (Boulouze et Montoussé) dans le gers: 126.

Macary, F., D. Ombredane, et al. (2010). "A multicriteria spatial analysis of erosion risk into small watersheds in the Low Normandy bocage (France) by ELECTRE III method coupled with a GIS, in " International Journal of Multicriteria Decision Making Vol 1, N°1: 25-48.

MACARY, F., J. ALMEIDA-DIAS, et al. (2010). An application of multicriteria analysis in environmental management within a Water Development and Management Scheme, in France. Using Electre Tri-C and Electre III methods, with a GIS. Séminaire n°71 du groupe européen de recherche en aide à la décision multicritère (MCDA71), 24-25/03/2010, Turin, ITA.

Macary, O., Uny (2009). "Application de la méthode ELECTRE, aide multicritère à la décision, en agroenvironnement : risque d'érosion dans le bocage du sud Manche, en France. ." 1-20.

Macary, F., E. Lavie, et al. (2006). "Méthode de changement d'échelle pour l'estimation du potentiel de contamination des eaux de surface par l'azote." Ingénieries-EAT 46: 35 - 49.

Macary (2003). "Synthèse bibliographique sur l'analyse multicritère pour l'aide à la décision dont les méthodes ELECTRE." 1-11.

Probst, J. L., coordonnateur. (2007). Rapport scientifique IMAQUE 2002-2006 (Impact des activités agricoles et rôle des dispositifs agri-environnementaux sur la qualité des sols, des eaux et des milieux aquatiques), Cemagref Bordeaux, Université Paul Sabatier Toulouse III, ENSAT/INP: 41p.

Soltner, D. (2001). Bandes enherbées et autres dispositifs bocagers pour garder les sols et filtrer l'eau, pour héberger la faune sauvage, pour maintenir les paysages. Sainte Gemmes sur Loire, Sciences et Techniques Agricoles.

Turpin, N., F. Vernier, et al. (1997). "Transferts de nutriments des sols vers les eaux - influence des pratiques agricoles - synthèse bibliographique." Ingénieries n°11: p. 3-16.

Table des Annexes :

ANNEXE A : Confère annexe jointe

ANNEXE B : Matrice descriptive des parcelles de l'ABVE.....p 74

ANNEXE C : Distribution des valeurs pour les critères effet surfaciques et sol.....p 78

ANNEXE D : Calcul de l'indice de battance pour les sols de l'ABVE.....p 79

ANNEXE E : L'application mise en œuvre par Juscelino Almeida-Dias.....p 80

ANNEXE F : Interprétation des résultats ELECTRE Tri-C.....p 82

ANNEXE G : Affectation des parcelles du BVE aux catégories de risque de contamination. Simulation du scénario : bandes enherbées très dégradées.....p 84

ANNEXE B : Matrice descriptive des parcelles de l'ABVE

N° parcelle	Occupation du sol	Critère Linéaire de Ripisylve	Critère Largeur de la Bande enherbée	Critère Qualité de la Bande enherbée	Critère connexion			Critère pression phyto IFT	Critère pression azote Solde azoté
					Bord de ruisseau	Présence de drain 1 = oui 2 = non	Autres éléments paysager		
21001	Tournesol	75%	3 m	B-moyenne	Bord de ruisseau			1	2,43
21002	Tournesol	>75%	3 m	C-Bonne	Bord de ruisseau	2		1,76	6,3
21003	Tournesol					2		1,76	6,3
22004	Blé dur					2		1,73	104
22005	Blé dur	<25% puis 50-75 % peupliers et noisetiers	7-8 m	B-moyenne	Bord de ruisseau	1		1,73	104
22008	Haricot	100% frêne, noisetier, cornouiller	6 m	A-mauvaise	Bord de ruisseau	2		x	x
22011	Tournesol					2		1,61	4
22012	Herbe					2		x	x
22013	Tournesol	parcelle entourée d'arbres, R = bois	7 m	B-moyenne	Bord de ruisseau	2		1,61	4
22014	Tournesol	100%	>8 m	C-bonne	Bord de ruisseau	1	Talweg	1,61	4
22016	Tournesol	0	10 m	C-bonne, fauchée	Bord de ruisseau	2		1,61	4
22017	Blé dur	<25 % qq peupliers	large et fourni	large et fourni	Bord de ruisseau	1		3,2	8,2
22018	Tournesol	0	pointe R4 pas de protection tw direct à la source			1		1,27	35,75
22019	Blé dur	qq peupliers <25 %	large, un peu de pente		Bord de ruisseau	2		3,2	8,2
22020	Herbe					2		x	x
22021	Blé dur	qq peupliers <25 %	large, un peu de pente		Bord de ruisseau	2		2,1	79,8
22022	Blé dur	qq peupliers <25 %	large, un peu de pente		Bord de ruisseau	2		2,1	79,8
22023	Blé dur					2		2,1	79,8
22024	Blé dur	Bois en forte déclinaison puis 75 %	0 au niveau du bois puis 10 m	B-moyenne	Bord de ruisseau	2		2,1	79,8
22025	Blé dur					2		3,23	68
22026	Verger					2		x	x

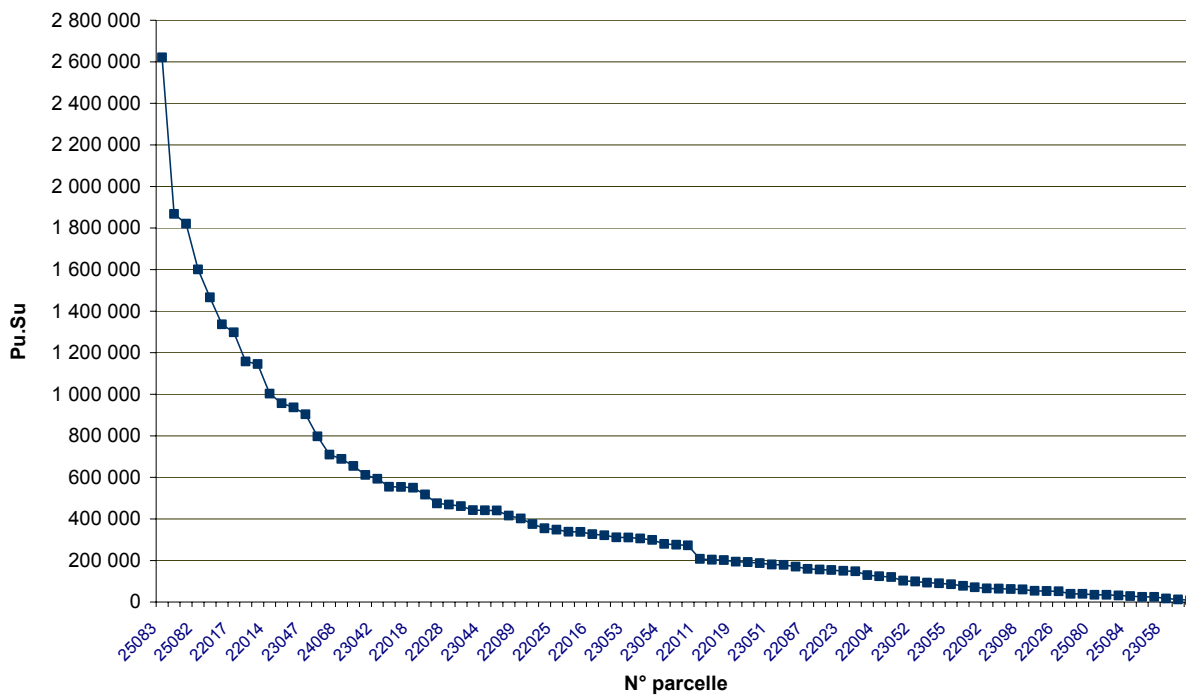
22027	Tournesol					2		0,73	8,95
22028	Tournesol	>75%	10 m	B-moyenne	Bord de ruisseau	2	en bas zone humide large, bcp de prêle tt le long	1,61	4
22029	Blé améliorant					2	Talweg	2,45	91,35
22030	Blé améliorant					2	Talweg	2,45	91,35
22031	Tournesol	>75%	plus de 8m	C-bonne	Bord de ruisseau	2		1,13	10,8
22032	Herbe					1		x	x
22033	Blé améliorant					2	Talweg	2,45	91,35
22035	Herbe					2		x	x
22036	Tournesol	<25% puis >75%	8 m puis 6m	B-moyenne	Bord de ruisseau	2		0,73	8,95
22037	Herbe					2		x	x
22086	Blé dur	50-75%	6 m puis 7-8 m	C-bonne puis moyenne	Bord de ruisseau	2	Bordée par un chemin	1,73	104
22087	Tournesol					2	Bordée par un chemin	1,13	10,8
22088	Ail	<25 %	8-10 m	B-moyenne	Bord de ruisseau	2		3,7	x
22089	Tournesol	<25 %	8-10 m	B-moyenne	Bord de ruisseau	1		1,13	10,8
22090	Tournesol					2		1,61	4
22091	Ail					2		4	x
22092	Tournesol					2		1,61	4
22093	Ail					2	Talweg	4,5	x
22094	Tournesol					2	Talweg	0,73	8,95
22095	Tournesol					2	Talweg	0,73	8,95
22096	Tournesol	Talus arboré	3m avant talus	B-moyenne	Bord de ruisseau	2		0,73	8,95
22097	Ail					2		4,5	x
23042	Blé dur	0	1 m	inexistante	Bordure talweg sec	2		3,23	68
23043	Tournesol	0	1 m	inexistante	Bordure talweg sec	2		0,73	8,95
23044	Tournesol	0	0	inexistante	Bordure talweg sec	1		0,73	8,95
23045	Tournesol	0	0	inexistante	Bordure talweg sec	1		0,73	8,95
23047	Blé dur					2	Talweg	2,1	79,8
23048	Herbe					2		x	x
23049	Herbe					2		x	x
23050	Blé dur	D-50-75 % côté C8			Talweg cultivé en Blé dur	2		3,23	68
23051	Herbe					2		x	x
23052	Blé dur	0	1m	0	Bordure talweg sec	2		3,23	68

23053	Blé dur	C- 50%, arbustes, érable, peupliers	5 m	C-bonne	Bord de ruisseau	2		2,17	87
23054	Blé dur	50-75%, sureau, peupliers, érable	4-5 m	C-bonne	Bord de ruisseau	2		3,23	68
23055	Herbe				Bord de ruisseau	2		x	x
23056	Tournesol	>75 %	6 m	D-Très bonne	Bord de ruisseau	1		1,76	6,3
23057	Blé dur	50-75%, sureau, peupliers, érable	6 m	C-bonne	Bord de ruisseau	1		2,17	87
23058	Vigne					2		x	x
23098	Orge					2		2,63	25,9
23099	Blé dur					2		1,92	92,8
23100	Blé dur	route avant ruisseau	route avant ruisseau	route avant ruisseau	Bord de ruisseau	2		3,23	68
24060	Blé dur	>75 %	5 m	C-bonne	Bord de ruisseau	2		3,23	68
24061	Tournesol	D-50-75 %	5 m	B-moyenne	Bord de ruisseau	2		0,56	6,3
24062	Blé dur	pas de ripisylve, bois de l'autre côté	6 m	B-moyenne	Bord de ruisseau	2		2,1	79,8
24063	Tournesol	<25%, quelques peupliers + érables	7-8 m	B-moyenne	Bord de ruisseau	1	Fossé	1,05	-3,2
24064	Blé dur	0	3m en bordure de talweg	C-bonne	bord de talweg	2	Fossé	3,97	156,4
24065	Tournesol	Bois en pente vers le ruisseau	6 m	C-bonne	Bord de ruisseau	1	Fossé	1,27	35,75
24066	Tournesol	R>75%	15 m	B-moyenne	Bord ruisseau	2	Mare, source + Fossé	1,6	-34,2
24067	Tournesol					2	Talweg	1,4	5,8
24068	Blé dur					2		3,97	156,4
24069	Blé dur					2		4,27	123,5
24070	Herbe					2	Mare, source + départ fossé	x	x
24071	Tournesol	Peupliers tous les 10 m le long du talweg	0	inexistante	Bord de fossé	2		2,19	33,89
24072	Tournesol	25-50 % côté cazeneuve				2	Talus en bas protège la source	1,4	5,8
24073	Tournesol	>75% côté embidon,	6m	C-bonne	Bord ruisseau	2		1,4	5,8
24074	Tournesol	25-50 %	7 m	B-moyenne	Bord ruisseau	1	Talweg + Fossé	1,05	-3,2
24075	Tournesol	R totale	7 m	B-moyenne	Bord ruisseau	2		1,05	-3,2
24076	Tournesol	C-partielle, 25-50 %linéaire, peupliers	8 m	C-bonne		2		1,76	6,3
24077	Tournesol	Noisetiers et peupliers, 25-50%	7 m	B-moyenne	Bord ruisseau	2		1,76	6,3

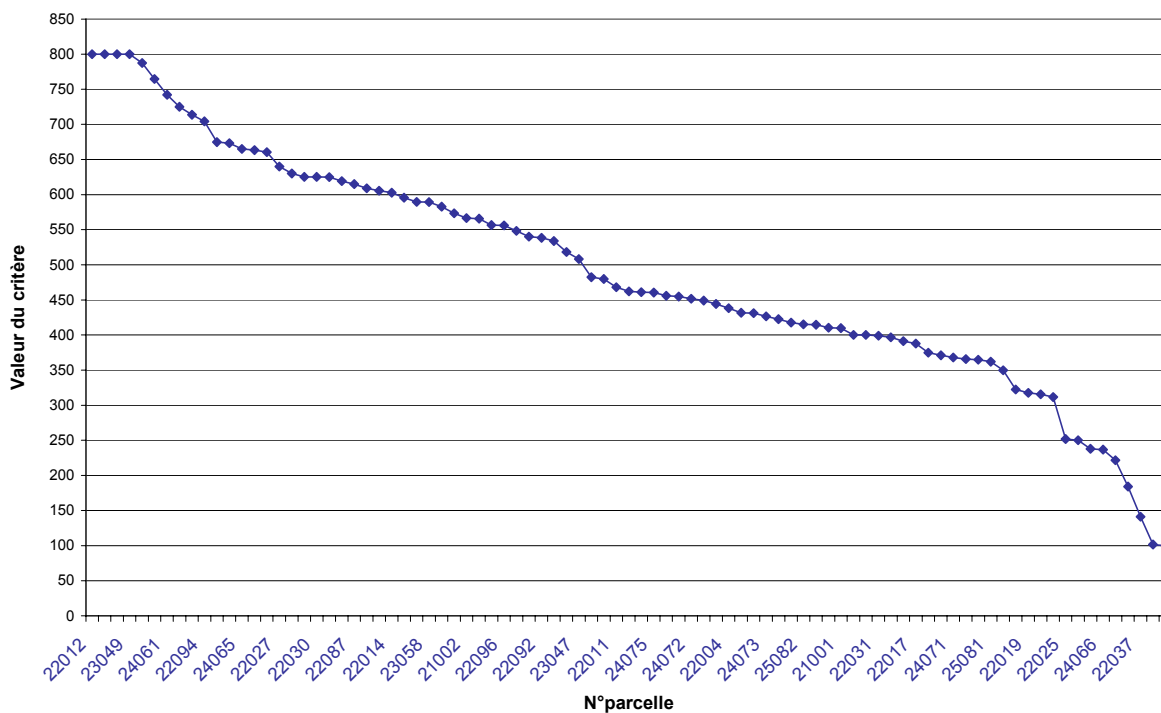
24078	Tournesol	Bois	0, direct bois	inexistante	Bord ruisseau	2		1,76	6,3
24079	Orge	>75% D			Bord de ruisseau	2		2,63	25,9
25080	Vigne	B-Partielle<25%	8m	B-moyenne	Bord de ruisseau	2		x	x
25081	Blé dur	B-Partielle<25%	8m le long de A4, fauchée	C-bonne près de la mare, B-moyenne côté vigne	Bord de ruisseau	2	Mare en bas	2,17	87
25082	Blé dur	B-Partielle<25%, peuplier tout les 5m	BH : 20 m le long du Montoussé (le long de A2) et 8 m fauché le long de A4.	QBH = B-moyenne après la mare, A-mauvaise après l'embranchement	Bord de ruisseau	1	Présence d'une mare protégée d'une BH	2,17	87
25083	Colza	B-Partielle<25%, peuplier tout les 5m	6 m	B-moyenne	Bord de ruisseau + talweg	2	Mare en bas, talwegs	4,66	68
25084	Vigne					2		x	x

ANNEXE C : Distribution des valeurs pour les critères effet surfaciques et sol

Distribution des différentes valeurs de $\sum Pu \cdot Su$ pour le critère 1 : Effet surfacique des pentes



Distribution des différentes valeurs de performances pour le critère 2 : sol



ANNEXE D : Calcul de l'indice de battance pour les sols de l'ABVE

Unité cartographique	Types de sol pour l'analyse	Type de sol détaillé	Indice de battance	Limons fins	Limons grossiers	Argiles	Matières Organiques	PH
UC 9	Terreforts épais	Sol brun calcaire (à calcique) profond (80-100 cm) plus ou moins colluvial sur molasse	0,90	25,0	13,6	43,1	1,5	7,4
UC 8 bois	Terreforts épais		0,48	24,8	11,9	42,7	5,3	6,1
UC 8	Terreforts épais	Sol brun calcique moyennement profond à profond sur molasse	0,83	24,8	12,4	44,8	2,3	7,7
UC 7	Terreforts épais	Sol brun calcaire moyennement profond à profond (> 50-60 cm) localement hydromorphe sur molasse	1,04	24,3	12,6	37,2	2,0	8,2
UC 6	Terreforts minces	Sol brun calcaire peu profond (30-50 cm) sur molasse	1,05	22,5	15,4	38,8	1,7	8,2
UC 5	Terreforts minces	Rendzine (20-30 cm) sur molasse	1,70	32,5	12,9	25,6	1,5	8,3
UC 4	Terreforts minces	Rendzine (20-30 cm) sur calcaire lacustre	1,08	15,7	9,0	14,9	2,1	8,2
UC 3	Boulbènes	Sol brun acide à galets superficiel (très caillouteux, < 30 cm)	1,28	26,6	23,0	30,2	1,5	7,1
UC 1	Boulbènes	Sol lessivé L à pseudogley	1,52	23,2	24,6	22,1	1,3	5,6
UC 11	Alluvions	Sol brun calcaire colluvio-alluvial à pseudogley	1,07	25,2	15,2	36,9	2,1	8,1

ANNEXE E : L'application mise en œuvre par Juscelino Almeida-Dias

L'application que nous allons utiliser pour le traitement multicritère est un prototype sous Excel programmé par Juscelino Almeida-Dias. Ce prototype est organisé de façon simple.

Un premier onglet permet de paramétrer le modèle, c'est-à-dire de donner les différents critères, les différents seuils correspondant, les pondérations choisies et aussi à indiquer si les critères sont à minimiser (on recherche la performance la plus petite) ou à maximiser (on recherche la performance la plus grande). Ici, on choisit de minimiser le risque (pour être en accord avec le traitement effectué sur l'Oir). La Figure ci-dessous nous donne un aperçu de l'interface de paramétrage.

Exemple de l'interface ELECTRE-TRiC Excel, onglet paramétrage, J. Almeida-Dias

	CR1_Pente	CR2_Sol	CR3_Conn	CR4_Ripis	CR5_Bande	CR6_Phyto_S		
w_j	min	min	min	min	min	min		min or max
	18	6	23	10	13	30		100,000
q_j	0,035	0	0	0	0	0,25		
p_j	0,055	1,9	1,9	1,9	1,9	0,95		
v_j						3		

Assumptions:

- (1) Indifference and preference thresholds are constant for criteria $g_j, j = 2, \dots, 10$.
- (2) Variable indifference and preference threshold as affine functions for criterion g_1 .
- (3) Veto threshold is ignored, if its value is less than the preference threshold.

Un deuxième onglet permet de renseigner les différentes actions caractéristiques pour chaque classe de chaque critère. Les catégories sont notées C1, C2...C5, les actions de références de b1 à b5. La figure ci-dessous illustre cet onglet.

Exemple de l'interface ELECTRE-TRiC Excel, onglet actions de références, J. Almeida-Dias

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1			min	min	min	min	min	min	
2			CR1_Pente	CR2_Sol	CR3_Conn	CR4_Ripis	CR5_Bande	CR6_Phyto_S	.
3	b1	C1	1 000 000	7	9	9	14	4,5	
4	b2	C2	500 000	5	8	7	11	3	
5	b3	C3	300 000	3	5	5	8	1,75	
6	b4	C4	200 000	2	3	3	5	0,75	
7	b5	C5	100 000	1	1	2	2	0,25	
8		.							
9		.							
10	q =	5	Number of categories						
11	$\lambda^b =$	0,00	Minimum required credibility level (B)						
12			Assumptions:						
13			(1) The two particular actions b_0 and b_{q+1} are not taken into account.						
14			(2) C_1 is the worst category (most risky, for instance).						
15			(3) C_q is the best category (less risky, for instance).						
16									

Nous pouvons introduire la matrice des performances dans le troisième onglet (set of actions).(Figure 13)

Exemple de l'interface ELECTRE TRi-C, onglet série d'actions, J.Almeida-Dias

	A	D	E	F	G
1		min	min	min	min
2		CR3_Conn	CR4_Ripis	CR5_Bande	CR6_Phyto_S
12	22014	9	2	2	1,61
13	22016	8	9	2	1,61
14	22017	9	9	2	3,2
15	22018	5	0	0	1,27
16	22019	8	9	2	3,2
17	22020	3	0	0	0
18	22021	8	9	2	2,1

ANNEXE F : Interprétation des résultats ELECTRE Tri-C

La figure ci-dessous nous montre un exemple de résultats du traitement multicritère. Il nous renseigne sur plusieurs plans.

Exemple de l'interface ELECTRE TRI-C, onglet résultats, J.Almeida-Dias

ELECTRE TRI-C Assignment Results											
Decision aiding context:										ABVE 2010 :: Phyto	
$\lambda =$	0,70	Chosen credibility level		UC (97):		65,5%					
$\lambda^* =$	0,00	Minimum required credibility level (B)		ACR I (m = UC):		100,0%					
q =	5	Number of categories		ACR I (m = 87):		65,5%					
m =	87	Number of actions		ACR II (m = 87):		98,9%					
	b1	b2	b3	b4	b5	.	.	DESC	ASC	C _h	DM
22088	a P b	a Q b	a R b	a R b	b P a	.	.	C2	C4	[C2,C4]	3
22089	a P b	a P b	b P a	b P a	b P a	.	.	C3	C3	C3	3
22090	a P b	a P b	a P b	a R b	a R b	.	.	C4	C5	[C4,C5]	5
22091	a P b	a P b	a R b	a R b	a R b	.	.	C3	C5	[C3,C5]	5
22092	a P b	a P b	a P b	a R b	a R b	.	.	C4	C5	[C4,C5]	5
22093	a P b	a R b	a R b	a R b	a R b	.	.	C2	C5	[C2,C5]	3
22094	a P b	a P b	a P b	a Q b	a R b	.	.	C5	C5	C5	5
22095	a P b	a P b	a P b	a I b	b P a	.	.	C4	C4	C4	4
22096	a P b	a P b	a R b	b P a	b P a	.	.	C3	C3	C3	3
22097	a P b	a R b	a R b	a R b	a R b	.	.	C2	C5	[C2,C5]	4
23042	a P b	a Q b	b P a	b P a	b P a	.	.	C2	C2	C2	2
23043	a P b	a P b	a P b	b Q a	b P a	.	.	C4	C4	C4	4
23044	a P b	a P b	a P b	b Q a	b P a	.	.	C4	C4	C4	4

La colonne A indique le numéro de parcelle. Les colonnes B à F nous indiquent le classement de la parcelle observée dans chaque catégorie de risque. La colonne DESC nous indique le choix de catégorie de risque dans la relation de surclassement descendant et la colonne ASC le choix de catégorie de risque du modèle dans le surclassement ascendant. Si les deux classements sont identiques, l'affectation dans une catégorie de risque est immédiate. Si les deux classements diffèrent, le modèle laisse le choix au décideur entre un intervalle de catégorie.

Extrait du résultat de classement multicritère pour le risque produits phytosanitaires

	b1	b2	b3	b4	b5	.	.	DESC	ASC	C _h	DM	
8												
60	23051	a P b	a P b	a P b	a P b	a I b	.	.	C5	C5	C5	5
61	23052	a P b	a P b	a Q b	a R b	b P a	.	.	C3	C4	[C3,C4]	4

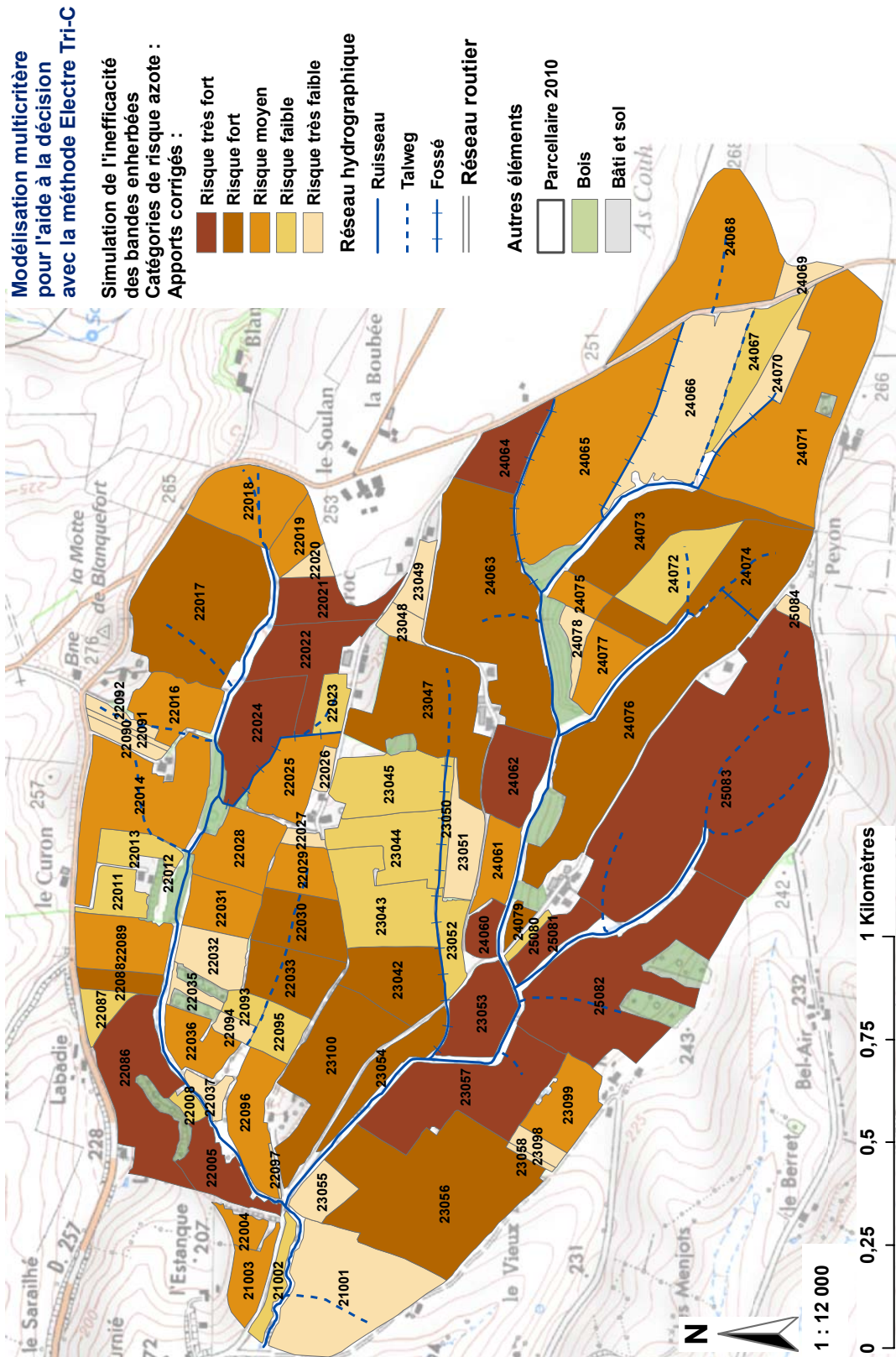
Par exemple, pour la parcelle 23051, on peut lire que l'action a est préférée à l'action de référence b pour la catégorie C1 (aPb, c'est-à-dire a est meilleure que b, dans le sens a est moins à risque que b), de la même façon pour les catégories C2, C3 et C4. On peut lire a est indifférente à b pour la catégorie C5 (aIb). Cela signifie que l'action observée est très proche de la catégorie 5. Le modèle affecte donc dans la même catégorie pour le surclassement ascendant et descendant. La colonne C_h indique donc directement la catégorie C5. Pour la parcelle 23052, aPb pour C1 et C2, bPa pour C5. Par contre a est faiblement préférée à b pour C3 (aQb) et a et incomparable à b pour C4 (aQb). Le modèle propose deux catégories

différentes, C3 et C4. Le décideur peut donc décider dans la colonne DM (Decision maker), la catégorie qui lui paraît la meilleure.

D'autres indications nous sont données pour le classement :

- UC : ceci nous indique que 65.5 % des parcelles ont été affectées directement à une catégorie pour le modèle (57 parcelles).
- ACRI : ceci nous indique que pour les 57 parcelles affectées directement, 100 % ont été validés par le décideur.
- ACRII : 98.8 % des 87 parcelles ont été affectées par le décideur à une catégorie proposée par le modèle. En effet, nous avons affecté une parcelle à une catégorie différente de celle proposée.

ANNEXE G : Affectation des parcelles du BVE aux catégories de risque de contamination. Simulation du scénario : bandes enherbées très dégradées



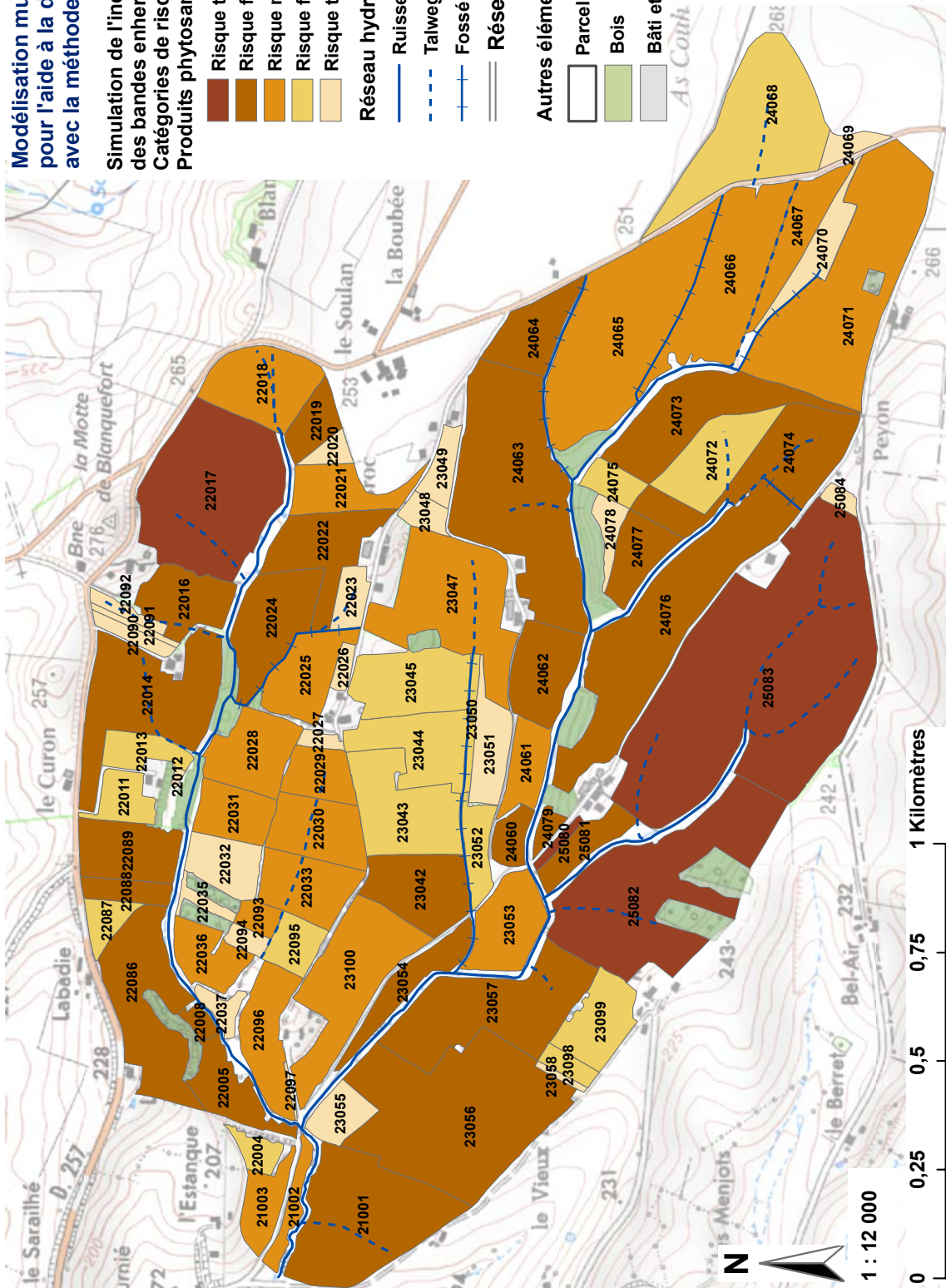
Sources : IGN, Association des agriculteurs d'Auradé

Modélisation multicritère pour l'aide à la décision avec la méthode Electre Tri-C

Simulation de l'inefficacité des bandes enherbées
Catégories de risque
Produits phytosanitaires :

- Risque très fort
- Risque fort
- Risque moyen
- Risque faible
- Risque très faible
- Réseau hydrographique**
- Ruisseau
- Talweg
- Fossé
- Réseau routier

- Autres éléments**
- Parcelle 2010
 - Bois
 - Bâti et sol



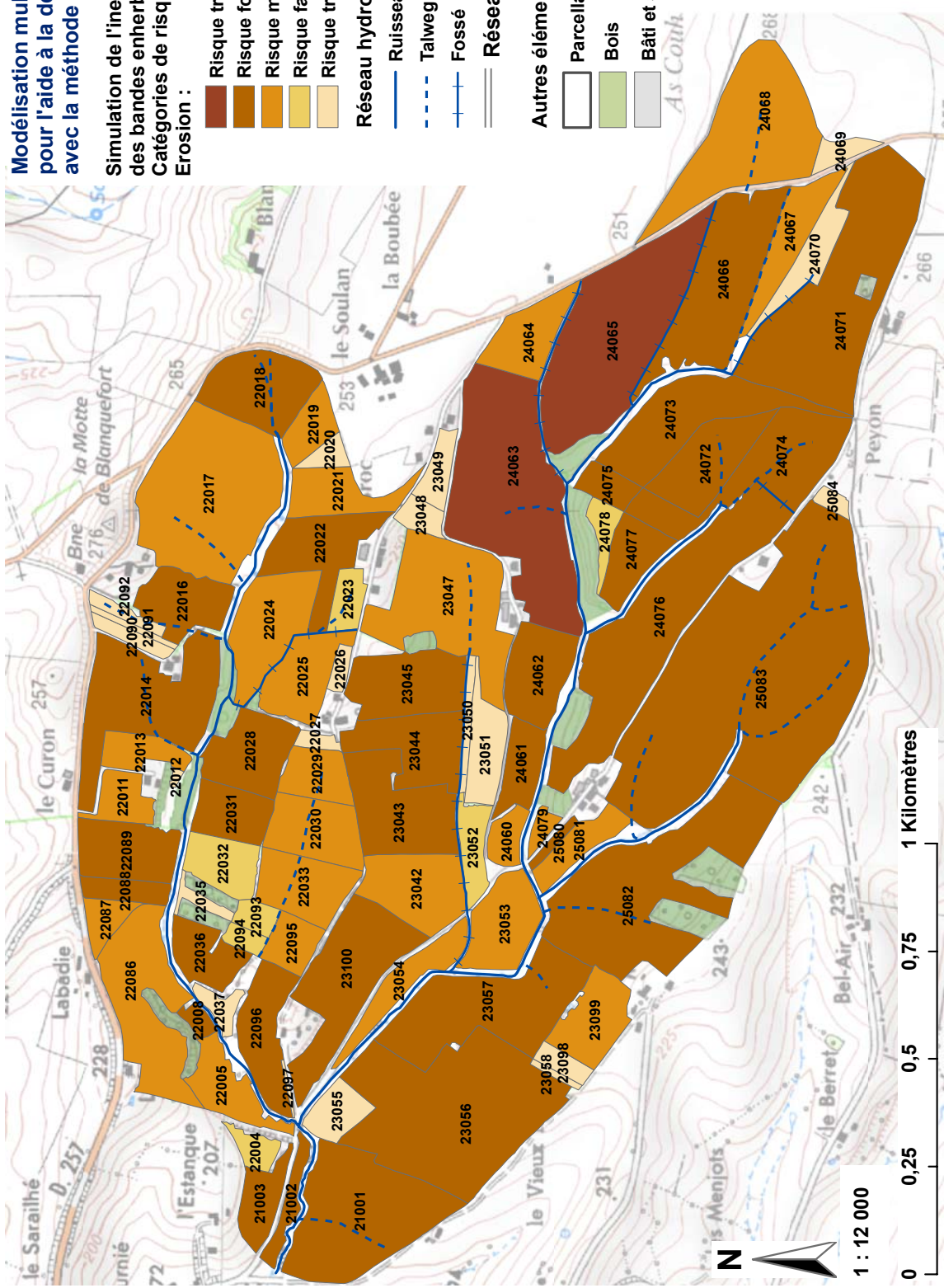
Sources : IGN, Association des agriculteurs d'Auradé

Modélisation multicritère pour l'aide à la décision avec la méthode Electre Tri-C

Simulation de l'inefficacité des bandes enherbées
Catégories de risque
Erosion :

- Risque très fort
- Risque fort
- Risque moyen
- Risque faible
- Risque très faible
- Réseau hydrographique**
- Ruisseau
- Talweg
- Fossé
- Réseau routier

- Autres éléments**
- Parcelle 2010
 - Bois
 - Bâti et sol



Sources : IGN, Association des agriculteurs d'Auradé

