



Projet SURGE

SOLIDARITE URBAIN-RURAL POUR LA GESTION DE L'EAU

Etude de cas « Pays de Caux »

Rapport de la tâche 3

Responsable du cas: Véronique Souchère¹

Avec les contributions de : Juliette Anglade^{1,2}, Anne-Laure Beraud^{1,2}, Anne Dray, Patrice Garin², Mathias Mailliard^{1,2}, Nils Saubes¹

Juillet 2012

¹ INRA UMR SADAPT

² IRSTEA, UMR G-EAU

Sommaire

Index des figures	3
Index des tableaux	4
Introduction : La question centrale des risques liés au ruissellement érosif dans les enjeux de solidarité urbain-rural en Seine Normandie	5
1. Phénomènes de ruissellement érosif et dynamiques agricoles et péri-urbaines en pays de Caux	9
1.1. Origine du ruissèlement érosif.....	9
1.2. Les trois types de risques engendrés par le ruissèlement érosif	11
1.3. Une vulnérabilité croissante liée aux importantes mutations de l'occupation du sol	14
1.4. La prise en compte des enjeux de ruissellement dans le SAGE Cailly-Aubette-Robec	17
2. Principes de la modélisation d'accompagnement et mise en œuvre dans le projet	21
2.1. Principe de la modélisation d'accompagnement	21
2.2. Mise en œuvre sur la problématique du ruissellement dans le Haut Cailly	23
2.3. Le modèle conceptuel ARDI	26
3. Le modèle sous-jacent au jeu de rôle Ruis'eau (Ruissellement, Eau potable, Agriculture, Urbanisation).....	33
3.1. Modélisation du ruissellement érosif.....	33
3.2. Modélisation de la turbidité	47
4. Le jeu de rôle Ruis'eau	50
4.1. Les joueurs et leurs actions.....	50
4.2. Les supports de jeu	52
4.3. Le déroulement de la partie	56
4.4. Tests de jouabilité du jeu Ruis'eau.....	57
5. Modèle informatique support du jeu de rôles Ruis'eau	59
5.1. Architecture du modèle	59
5.2. Actions et interactions	60
5.3. Les indicateurs :.....	65
6. Le jeu de rôles Ruis'eau : un support pour initier des apprentissages et discuter de solidarités sur le ruissellement érosif	69
6.1 Présupposés sur les processus d'apprentissage	69
6.2 Protocole d'évaluation de la démarche.....	71
6.3 Test du protocole d'évaluation des apprentissages lors de la session avec la communauté de pratique montpelliéraine.....	72
7. Conclusion	74
Bibliographie.....	76
Annexes	79

Index des figures

Figure 1: stades de dégradation de la surface des sols et formation d'une croute de battance (Sources : INA-PG, 2004 repris dans N. Saubes 2010)	10
Figure 2 : exemples de sols sur lesquels s'est formée une croute de battance (Sources : INA-PG, 2004)	10
Figure 3: Périodes durant lequel la production de ruissellement est la plus importante (Sources: Auzet et al, 1990)	10
Figure 4: le triple risque lié au ruissellement érosif en Seine Maritime (Sources : d'après Guilbault, 1992, modifié par N. Saubes 2010).....	11
Figure 5: érosion diffuse sur une parcelle agricole. Les dépôts sont nettement visibles au premier plan. (Cliché: Le Bissonnais, <i>in</i> Leguédois, 2003: 7).....	12
Figure 6: formes d'érosion linéaire. a) rigoles le long du linéaire de travail de la parcelle. b) ravine en fond de talweg. (Clichés: chambre d'agriculture de Seine-Maritime cités par N. Saubes 2010)	12
Figure 7: inondations catastrophiques à St Martin de Borscheville en 1997 (a) et à St Valéry en Caux en 1999 (b). (Clichés: Vasseur N., AREHN).....	13
Figure 8: exemples de bétoires, qui correspondent à de petits avens reliés au réseau karstique. (Clichés: DISE cité par Saubes 2010)	13
Figure 9 : Echanges d'actifs dans le pays entre Seine et Bray - 2006 (source Scot).....	15
Figure 10 : Les trois zones d'expansion ruraine dans la région au Haut-Cailly	16
Figure 11: Les différentes phases d'une démarche de modélisation d'accompagnement (Source: Souchère, 2009)	22
Figure 12: Graphe montrant le positionnement des acteurs sélectionnés par rapport à la question traitée (Sources : Souchère, 2009, modifié par Saubes 2010)	24
Figure 13 : participation des différents acteurs	25
Figure 14: diagramme des acteurs. En noir : acteurs directs ; Colonne de droite en bleu : acteurs indirects ; Colonne du milieu : incertitude pour savoir si direct ou indirect ; En orange : unités de gestion des acteurs (Sources : Souchère et Saubès, 2010).....	26
Figure 15: graphique montrant les acteurs considérés comme les plus importants par les participants de la réunion (source : Souchère et Saubès, 2010)	27
Figure 16 : Diagramme d'interactions issu des séances de modélisation d'accompagnement (Saubes 2010).....	29
Figure 17 : schéma de fonctionnement global du modèle STREAM (Anglade 2011)	33
Figure 18 : Carte d'occupation des sols du bassin fictif d'estampeville-Bellemarre (Anglade 2011).....	35
Figure 19: Carte du relief du bassin versant d'Estampeville-Bellemarre (MNT à 25 m)	36
Figure 20 : Cartes de concentration du ruissellement a) et de l'érosion b) pour une crue décennale.....	41
Figure 21: Cartes de sensibilité à l'érosion a) et au ruissellement b). (Anglade 2012)	43
Figure 22 : Efficacité des aménagements d'hydraulique douce dans Ruis'eau (Anglade 2011)	44
Figure 23 : Bassins de rétention en fonctionnement et bassin de rétention colmaté.....	45
Figure 24 : Réorganisation du parcellaire pour lutter contre le ruissellement érosif. (Anglade 2010).....	46
Figure 25 : Hydrogrammes de crues décennales avant et après le scénario de remise enherbe du bassin (Anglade 2011).....	47
Figure 26 : Modèle conceptuel de transfert du ruissellement de surface via une bétoire et mécanismes de transport souterrain (Anglade 2011)	48
Figure 27 : Exploitations agricoles des 9 joueurs actifs du bassin versant d'Estampeville-Bellemarre	51

Figure 28 : Organisation théorique de l'espace pour les sessions de jeu (photos prises lors du test avec du jeu avec des chercheurs).....	52
Figure 29 : Diagramme d'actions et moyens dans Ruis'eau.....	53
Figure 30 : Cartes imaginées pour la négociation et la prise de décisions.....	54
Figure 31 : Indicateurs sous la forme de cartes imagées.....	55
Figure 32 : Réunion entre les maires des trois communes du bassin et l'animateur du syndicat.....	58
Figure 33 : Utilisation des supports de jeu.....	59
Figure 34 : Digramme de classe du modèle.....	62
Figure 35 : interfaces du modèle Ruis'eau.....	64
Figure 36 : Axes majeurs de concentration du ruissellement au sein du bassin versant.....	64
Figure 37 : Accumulation du volume ruisselé lors d'un événement pluvieux standard (a) ou catastrophique (b).....	65
Figure 38 : Carte des aménagements installés.....	65
Figure 39 : Carte des niveaux de gravité d'incision des parcelles.....	66
Figure 40 : Carte du PLU (en rouge : parcelles déjà en zone AU, en orange : nouvelle parcelle en zone AU).....	66
Figure 41 : carte des zones urbanisées après vente des parcelles (en bleu : lot 2500 m ² , en jaune : lot 625 m ²).....	66
Figure 42 : Schématisation du cycle d'apprentissage de Kolb.....	70

Index des tableaux

Tableau 1 : Orientations et plans d'actions du SAGE Cailly-Aubette-Robec, liés à la gestion du ruissellement et des inondations (d'après livret 2 SAGE 2005, en italique les citations in extenso).....	18
Tableau 2: ressources citées par les participants.....	28
Tableau 3: dynamiques citées par les participants.....	29
Tableau 4 : occupation du sol sur le bassin virtuel d'Estampeville-bellemarre.....	35
Tableau 5: Synthèse des caractéristiques morphométriques.....	37
Tableau 6 : Formules empiriques de détermination du temps de concentration, D: temps de montée de l'hydrogramme SOCOSE.....	37
Tableau 7: Paramétrages des scénarios pluviométriques du modèle Ruis'eau et principaux résultats.....	40
Tableau 8 : Capacités d'infiltration des cultures d'été sur le bassin d'Estampeville-Bellemarre.....	42
Tableau 9 : Scénario de remplissage sédimentaire d'un bassin de rétention.....	45
Tableau 10 : Taux de dilution apparents observés entre la perte du Bébec et la source du Hannebot.....	49
Tableau 11 : Simulations de pics turbides au captage AEP d'Estampeville-Bellemarre.....	50
Tableau 12 : Ensemble des indicateurs fournis à chaque joueur et à chaque pas de temps annuel.....	68
Tableau 13 : Questionnaire destiné à qualifier les apprentissages au cours du jeu de rôle Ruis'eau.....	72

Introduction : La question centrale des risques liés au ruissellement érosif dans les enjeux de solidarité urbain-rural en Seine Normandie

La Seine Maritime est caractérisée par une importante activité agricole. Les principaux centres urbains de la région sont Le Havre, à l'extrémité occidentale, et Rouen au sud est. Le département comprend différentes petites régions agricoles, dont le Pays de Caux, la plus grande, à l'ouest. A l'est et au Sud Est, plusieurs petites régions agricoles moins renommées assurent la transition vers la Picardie, le pays de Bray et le Vexin. Il s'agit en particulier de la petite région agricole dénommée « entre Caux et Vexin » où se focalise notre étude (Annexe 1). Toutes ces petites régions partagent un enjeu commun, celui du risque de ruissellement érosif qui concerne à la fois les territoires agricoles et les espace urbanisés

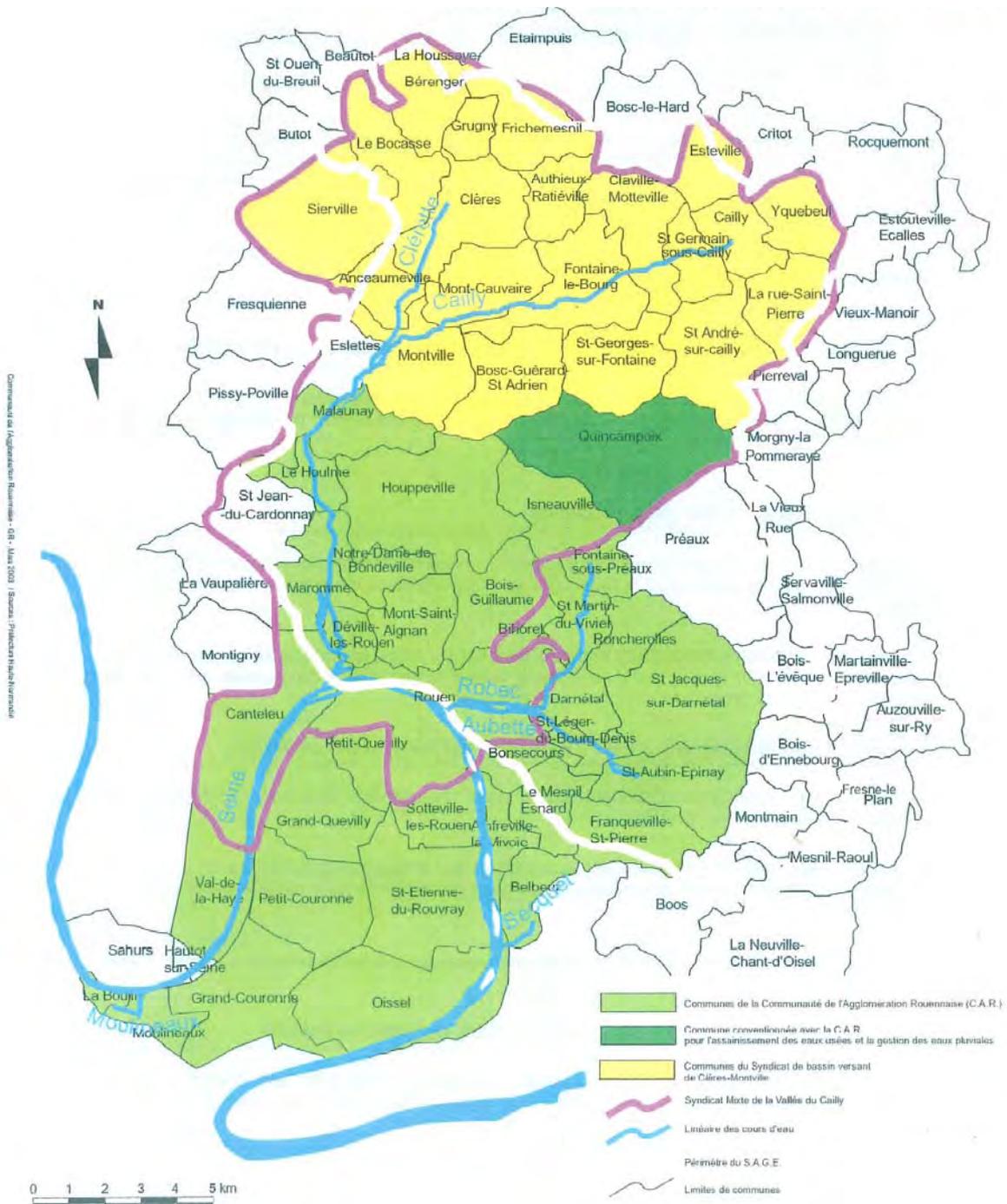
Cette petite région « Entre Caux et Vexin » couvre l'essentiel de l'amont des bassins versants du SAGE « des bassins du Cailly, de l'Aubette et du Robec » (Annexe 3). Au sein du bassin versant du Cailly, le Haut Cailly regroupe 25 communes rurales couvrant 16 000 hectares (Annexe 2). L'aval de ce SAGE, couvre le nord de la communauté urbaine de Rouen-Elbeuf-Austreberthe (CREA).

Le territoire de ce SAGE qui couvre 71 communes sur 402 km² traverse ainsi différents territoires d'actions publiques qui interfèrent dans la mobilisation de liens de solidarités pour lutter contre le ruissellement, qui est sa première orientation stratégique (Carte 1) :

- 3 petites régions agricoles (Caux, entre Caux et Vexin, les Vallées de la Seine) sur 3 cantons « ruraux » au nord (Clères, Darnetal, Buchy) et 6 cantons urbains ou rurbains autour de Rouen (Rouen, Bois Guillaume, Maromme, Notre dame de Bondeville, Boos) (Annexe 1).
- 3 intercommunalités « rurales » au Nord (Portes Nord ouest de Rouen, Moulins d'Ecalles, Plateau de Martainville) dont les limites épousent imparfaitement les limites cantonales ci-dessus, ceinturant en partie la Communauté d'Agglomération de Rouen-Elbeuf-Austreberte (CREA), qui concerne l'essentiel, mais pas l'intégralité, des 6 cantons urbains ou rurbains cités (Annexe 1 et Annexe 3)
- Deux SCOT, celui du Pays entre Seine et Bray qui associe les 3 intercommunalités rurales citées et celui de la CREA
- 18 syndicats d'eau, la plupart sous forme de syndicats intercommunaux (Annexe 4)
- Un syndicat de bassin versant de Clères-Montville créé en 1985, sur le bassin du Cailly et la Communauté de l'agglomération Rouennaise qui ont compétence en matière d'ouvrage de stockage-restitution pour lutter contre le ruissellement

A ces territoires spécifiques s'ajoutent le Département, la Région et l'espace d'action de l'Agence de l'eau Seine Normandie. Sur ces différents territoires, des acteurs tentent de faire valoir leur propre sens du commun autour d'objectifs partagés, de valeurs, de vision de leur devenir, de projets collectifs.

De manière schématique, historiquement et jusqu'au début des années 70, l'aménagement de cet espace s'est réalisé dans le cadre d'une faible concertation entre les communes amont et aval des bassins hydrographiques. Les cartes des intercommunalités, des pays et des SCOT attestent de communautés d'intérêts ruraux versus urbains, dans une opposition de fait amont-aval à l'échelle des bassins-versants. Dans ces intercommunalités, les élus font vivre des formes de solidarités territoriales ou sectorielles diverses : authentique, opportune, calculée, intéressée ou imposée. Des coulées boueuses, coupures d'eau et inondations catastrophiques répétées depuis les années 1970 vont imposer dans les discours une solidarité à l'échelle de bassin. Mais cette dernière peine à se traduire dans des politiques de prévention du risque de ruissellement érosif (Cartier 2002).



Carte 1 : structures intercommunales ayant compétences en matière de ruissellements et d'entretien des rivières (source Livret 2 - SAGE 2005)



Carte 2 : Nombres de déclaration de catastrophes naturelles par communes liées au ruissellement (Source Livret 2 du Sage)

La mobilisation politique sur les enjeux de ruissellement date des années 70³ et s'appuie d'abord sur le registre de la solidarité calculée puis imposée, ainsi qu'une solidarité providentielle étatique (subventions, dispositif CatNat) après que des épisodes catastrophiques aient touché certaines communes plusieurs années de suite : Tout d'abord ce sont les maires qui élèvent la voix, face à des dégâts dont les coûts s'avèrent être très élevés pour leur commune. Ils se tournent rapidement vers les services de l'Etat. Au niveau du Conseil Général de Seine-Maritime, un système de subventions s'est mis en place pour aider à financer la construction d'ouvrages structurants sur les communes touchées. En septembre 2004, on comptait 148 bassins de rétention pour un total de 500 000 m³ installés à l'amont

³ Des ruissellements érosifs de grande ampleur sont relatés du moyen âge au XIX^{ème}, mais il s'agit d'évènements extrêmes donc relativement peu fréquents et ne mobilisant pas l'action publique, contrairement aux répétitions des drames des années 70 et début 80 (CARTIER 2002).

des zones urbaines les plus vulnérables, ainsi que des digues pour retenir ou canaliser les eaux ruisselées (Livret 2 du SAGE, 2005). Mais ces actions de limitation de la vulnérabilité des zones urbaines sans réduction des causes de ruissellement ne suffisent pas et n'empêchent pas la répétition de catastrophes durant les années 1990. Ces catastrophes touchent particulièrement les zones urbaines de la CREA mais aussi les villages « ruraux » des vallées (Carte 2). Le préfet impose alors une solidarité de bassin en 1999, par la création de Syndicats de Bassin Versant afin de considérer les problèmes de manière cohérente à cette échelle. Ces instances de bassin sont dotées des compétences relatives à la gestion du ruissellement et des inondations sur la quasi-totalité du territoire de Seine-Maritime.

Parallèlement, le monde agricole fait preuve de bonne volonté en s'engageant dans l'action préventive afin de réduire le ruissellement à la source, au moins pour celui qui naît dans les espaces cultivés (cf Chap 2, Cartier 2002). Nous discuterons ultérieurement du caractère altruiste, authentique ou opportuniste de cet engagement solidaire, mais dans les faits, la Chambre d'Agriculture et les services de l'Etat ont fait remonter le problème au niveau du Ministère de l'Agriculture afin de voir ce qui pouvait être fait pour réduire le ruissellement érosif dans les zones agricoles⁴. En 1985, le Ministère décide de lancer trois opérations pilotes en France (Pas-de-Calais, Lauragais et Seine-Maritime) pour étudier les problèmes de ruissellement-inondations. Contrairement aux deux autres secteurs, il a été choisi en Seine-Maritime de créer une association dédiée à l'appui aux maîtres d'ouvrage dans la prévention des risques de ruissellement (Association Régionale pour l'Etude et L'amélioration des Sols - AREAS). Cette association mène des actions d'appui technique, d'expérimentation et de formation sur les dispositifs antiérosifs, de prévention des inondations et des risques de turbidité dans les captages d'eau potable, c'est-à-dire sur l'ensemble des conséquences du ruissellement (cf chap 2). Son conseil d'administration est dirigé aujourd'hui par un représentant de la Chambre d'Agriculture et les autres membres sont des élus des principaux maîtres d'ouvrages pour la lutte contre le ruissellement (syndicats de bassins versant, syndicats intercommunaux). Son principal financeur était à la base le Conseil Général, auquel s'est ajouté l'Agence de l'Eau. L'association a donc petit à petit pris sa place dans le paysage institutionnel local et elle est maintenant en charge de conseiller et d'orienter les politiques de ses deux principaux financeurs en matière de gestion des problèmes liés au ruissellement érosif. Elle est une des marques de l'institutionnalisation d'une solidarité entre territoires qui partagent les mêmes risques liés au ruissellement et qui s'étend au-delà de la Seine Maritime.

Le SAGE Cailly-Aubette-Robec est une autre forme d'institutionnalisation d'une solidarité territoriale de bassin autour de ces enjeux. Son périmètre a été approuvé par arrêté préfectoral le 23/12/2005 :

- Sa première orientation concerne la sécurisation des biens et des personnes face aux risques d'inondation et de ruissellement.
- La seconde aborde la gestion quantitative et qualitative de la ressource pour l'alimentation en eau potable malmenée par les risques de turbidité.

Cette ambition de gestion intégrée de la qualité de l'eau et des causes et conséquences du ruissellement érosif a conduit à la mise en place d'un nouveau maître d'ouvrage, un Syndicat

⁴ D'après les définitions de (Bots, 2007)

- solidarité **altruiste** : la seule motivation de l'action est les bénéfices qu'elle apporte à l'autre quel qu'il soit
- solidarité **authentique** : l'action est motivée par ce qu'elle va apporter à l'autre, par rapport à des objectifs que je partage avec lui.
- solidarité **opportuniste** : l'action va apporter à l'autre, par rapport à des objectifs que je partage avec lui, mais me sera profitable
- solidarité **calculée** : l'action va apporter à l'autre, par rapport à des objectifs que je partage avec lui, mais j'en attends explicitement un retour.
- solidarité **intéressée** : l'action va apporter à l'autre par rapport à des objectifs qui lui sont propres, mais elle est motivée par ce qu'elle va apporter à mes propres objectifs
- solidarité **imposée** : l'action ne repose pas sur une motivation personnelle, elle est le résultat d'un contrat ou d'une règle sociale.

Mixte à l'échelle du périmètre du SAGE, qui regroupe l'ensemble des maîtres d'ouvrages « sectoriels » de l'eau évoqués précédemment. Il s'agit d'une véritable rupture dans les modalités d'actions, afin qu'émerge une gestion communautaire des risques liés à l'eau, qui ne soit plus seulement fondée sur des mesures structurelles de réduction de l'exposition à l'aléa (i.e bassins de rétention) ou de ses impacts (usines d'ultrafiltration, maillage des réseaux pour éviter les ruptures de services en cas de turbidité). Les plans d'actions définis au sein de ses orientations affichent une volonté de prévention des risques « en amont », c'est-à-dire d'une part s'attaquer à l'origine du ruissellement et d'autre part à la vulnérabilité des zones habitées.

Pour mieux saisir l'intrication des actions à mener tant vis-à-vis des acteurs agricoles que ceux de l'urbain, il nous faut présenter la nature des phénomènes érosifs et leurs interactions avec les dynamiques agricoles et urbaine dans la zone (Chap 1). Nous expliciterons ensuite la manière dont nous avons co-construit un support de discussion sur les enjeux agricoles et rurbains liés au ruissellement (Chap 2), ainsi que les différents modèles retenus pour représenter les dynamiques bio-physiques et économiques en cause (Chap 3). Ce support de discussion consiste à mettre ceux qui doivent agir ensemble contre le ruissellement, dans une situation virtuelle d'aménagement d'un territoire de 2000 ha, en jouant les rôles de maires, d'agriculteurs ou de responsables de syndicats d'eau et de bassin-versant (Chap 4). Au cours de ce jeu de rôle, les scénarios d'aménagement choisis par les joueurs peuvent être évalués en temps réel par un modèle informatique représentant le fonctionnement de ce territoire (Chap 5). Le temps du projet Surge n'a pas permis d'aller jusqu'à l'usage de ce support avec des agriculteurs et des maires de la région – programmé hiver 2012-2013 – mais il a été testé avec des chercheurs à Montpellier et avec les acteurs institutionnels de Seine Normandie avec lesquels l'architecture de ce jeu de rôle informatisé a été co-construite (Chap 6).

1. Phénomènes de ruissellement érosif et dynamiques agricoles et péri-urbaines en pays de Caux

1.1. Origine du ruissèlement érosif

Le nord du département de Seine Maritime constitue un vaste plateau karstique crayeux drainé par des cours d'eau légèrement encaissés dans des vallées débouchant dans la Manche ou dans la Seine. Sur les plateaux, le massif crayeux est recouvert d'une épaisse couche de limons d'origine lœssique (Annexe 6) d'une granulométrie très faible. L'expansion de systèmes de culture mécanisées laissant de longues périodes de sols nus dans une telle configuration morpho-pédologique s'est avérée particulièrement favorable aux phénomènes de ruissellement érosif par altération de la perméabilité des sols (tassement lié au travail agricole, tassement dû aux précipitations précédentes, dégradation de l'état de surface par apparition d'une « croute de battance ») (Boiffin et al. 1988 ; Blanchard et al, 1999 ; Le Bissonnais et al, 2003).

Le phénomène de battance correspond à un état de dégradation de la surface du sol sous l'action de la pluie : l'impact des gouttes de pluies (effet « splash ») entraîne une désagrégation des mottes de terre ainsi qu'un tassement des particules. Cela a pour effet d'estomper les microreliefs de la surface du sol et d'en diminuer la perméabilité (Figure 1 et Figure 2). L'infiltration est réduite de manière drastique, puisqu'elle peut passer de 30-60 mm/heure en situation normale, à moins de 1 mm/heure lorsque la croute de battance s'est formée (Auzet 1987 ; Le Buissonnais et al. 1996). L'absence de couverture végétale du sol (avant levée et pendant les phases d'intercultures) et les fortes intensités pluviométriques favorisent ce phénomène. Sur prairie, la vitesse d'infiltration, par contre, peut atteindre 80 mm par heure, contre 20 mm/h pour un labour, et 1 mm/h après récolte des céréales.



Figure 1: stades de dégradation de la surface des sols et formation d'une croûte de battance (Sources : INA-PG, 2004 repris dans N. Saubes 2010)



Figure 2 : exemples de sols sur lesquels s'est formée une croûte de battance (Sources : INA-PG, 2004)

Le ruissellement érosif intervient ensuite par arrachement des particules limoneuses des sols et par transport sur des distances plus ou moins importantes. Le ruissellement qui est généré s'écoule en nappe (écoulement aréolaire ou « sheet wash ») le long des versants, et a un faible pouvoir érosif. Il peut tout de même provoquer un phénomène d'érosion diffuse. Un réseau de collecte draine en amont une aire de captage de l'eau de pluie et génératrice de ruissellement, qui alimente des collecteurs linéaires situés en aval dans les talwegs, au sein desquels le ruissellement va atteindre une puissance suffisante et gagner un fort pouvoir érosif (Monnier et al. 1986 ; Auzet en al. 1995).

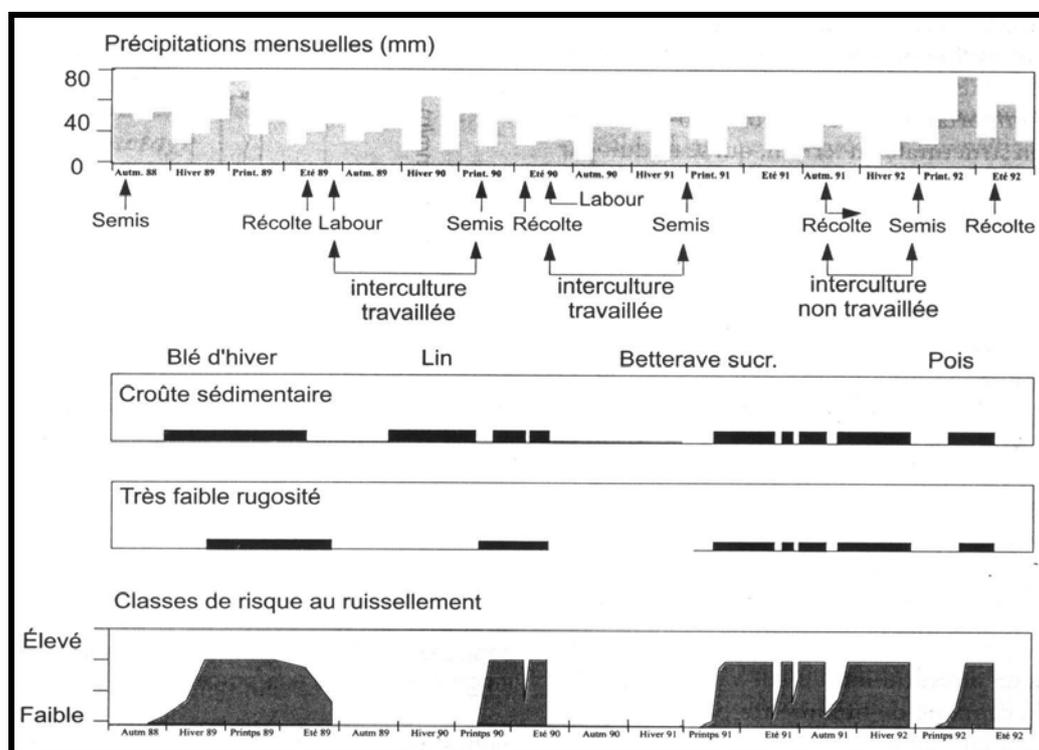


Figure 3: Périodes durant lequel la production de ruissellement est la plus importante (Sources: Auzet et al, 1990)

Deux périodes sont favorables à la production de ruissellement érosif (Figure 3).

- De mai à juillet, les précipitations sont plutôt orageuses avec des intensités supérieures à 30 mm/h, ce qui peut vite mener à un dépassement des possibilités d'infiltration des sols, surtout pour les parcelles en culture de printemps en phase de levée ;
- De novembre à février, l'accumulation de grandes quantités d'eau précipitée sur plusieurs jours peut dépasser les capacités d'infiltration des sols, d'autant qu'en cas de culture d'hiver, la végétation est encore très clairsemée et les parcelles sont exposées à l'effet « splash ».

1.2. Les trois types de risques engendrés par le ruissellement érosif

Le ruissellement érosif est à l'origine de trois types de risques spatialement distribués (Figure 4) : l'érosion en zone agricole, les inondations et coulées boueuses et enfin les pollutions de l'eau.

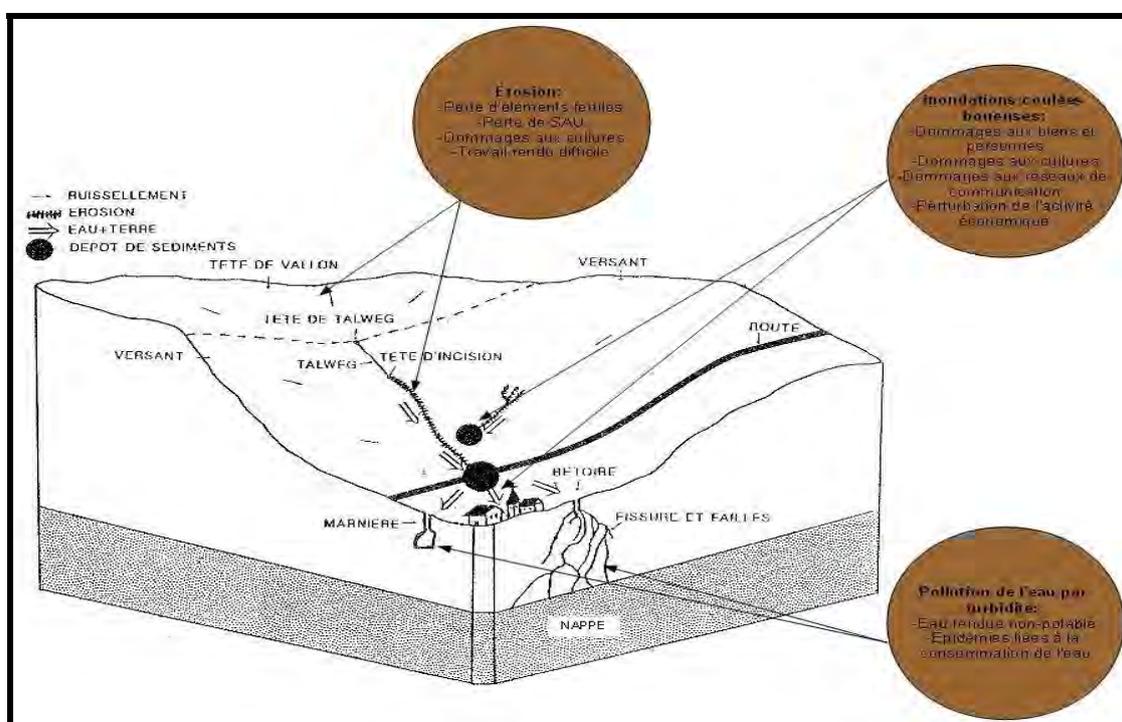


Figure 4: le triple risque lié au ruissellement érosif en Seine Maritime
(Sources : d'après Guilbault, 1992, modifié par N. Saubes 2010)

1.2.1. Les dégâts liés à l'érosion dans le milieu agricole

Dans le pays de Caux, l'érosion oscille en moyenne autour 7 tonnes par hectare et par an, mais elle peut atteindre 70 tonnes/ha/an, dans les situations critiques (5% de la surface agricole) (AREAS 2008). Environ un tiers des phénomènes érosifs consistent en de l'érosion diffuse, et les deux autres tiers correspondent à de l'érosion linéaire concentrée dans les talwegs.

Les principaux dommages agricoles liés à l'érosion diffuse consistent en la perte d'éléments fertiles du sol par lessivage, ainsi qu'en la perte de cultures, notamment dans la zone de dépôt : les végétaux cultivés peuvent en effet être recouverts, sur la partie aval de la parcelle, par les matériaux transportés et déposés par un ruissellement s'écoulant en nappe (Figure 5).

L'érosion linéaire, et surtout celle concentrée sur les talwegs a plus d'ampleur et génère plus de dommages. Traces de roues des tracteurs, rayage dû au labour, lits de semences, etc., forment autant de microreliefs qui canalisent le ruissellement, ce qui a pour conséquence de favoriser l'érosion le long de ces linéaires (Figure 6). Les dommages sont alors principalement la perte de SAU et la destruction des cultures. De plus, le travail de l'agriculteur est rendu plus difficile, puisque le passage des engins agricoles est perturbé, voire rendu impossible. Il sera donc nécessaire de reboucher la ravine avant de commencer le travail.



Figure 5: érosion diffuse sur une parcelle agricole. Les dépôts sont nettement visibles au premier plan. (Cliché: Le Bissonnais, *in* Leguédois, 2003: 7)



a)



b)

Figure 6: formes d'érosion linéaire. a) rigoles le long du linéaire de travail de la parcelle. b) ravine en fond de talweg. (Clichés: chambre d'agriculture de Seine-Maritime cités par N. Saubes 2010)

1.2.2. Les inondations et coulées boueuses

L'écoulement turbide issu du ruissellement érosif généré sur les parties amont des bassins versant peut-être à l'origine de catastrophes importantes s'il atteint les zones vulnérables situées plus en aval ou dans les fonds de vallées : habitations, centres urbains, infrastructures, réseaux, etc.

Ces inondations boueuses génèrent des dégâts principalement dans les zones urbanisées. Les temps de concentration des écoulements dans les bassins élémentaires étant généralement très réduits, cela donne un caractère brutal et peu prévisible à ces phénomènes. Saint-Valéry-en-

Caux en 1999 et Saint-Martin-de-Boscherville en 1997 constituent des exemples emblématiques de catastrophes liées à des crues turbides (Figure 7).

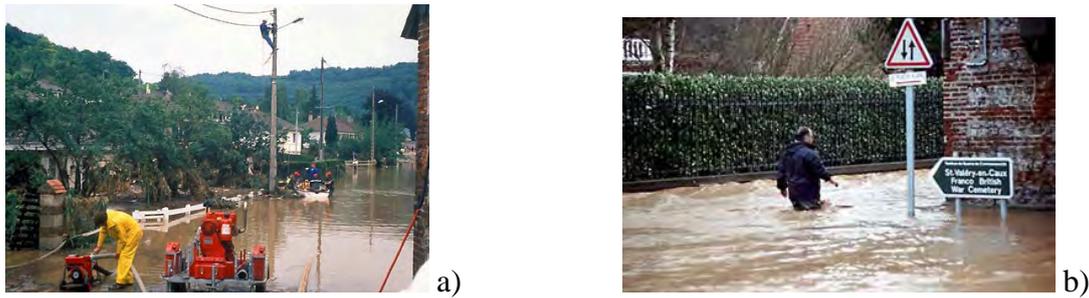


Figure 7: inondations catastrophiques à St Martin de Borscheville en 1997 (a) et à St Valéry en Caux en 1999 (b). (Clichés: Vasseur N., AREHN)

1.2.3. La pollution de l'eau par turbidité

De nombreux avens parsèment ce massif crayeux. Appelés plus communément « bétoires ». Ils permettent à l'écoulement turbide provoqué par le ruissellement érosif de s'infiltrer à l'intérieur du réseau karstique (Figure 8). L'eau chargée de particules solides, limons et substances chimiques provenant des intrants agricoles, migre par le biais des réseaux de failles et fissures jusqu'aux aquifères souterrains.



Figure 8: exemples de bétoires, qui correspondent à de petits avens reliés au réseau karstique. (Clichés: DISE cité par Saubes 2010)

La pénétration de l'eau turbide peut aussi se faire par le biais des marnières. Celles-ci sont d'anciens puits d'extraction de craie, utilisée pour l'amendement des terres agricoles. Pour la majorité d'entre elles, elles ont été creusées entre 1840 et 1930, abandonnées, puis comblées au fil du temps par des sédiments et autres débris (bois, etc.).

Etant donné le faible pouvoir filtrant des aquifères karstiques, l'infiltration d'eau turbide et polluée est particulièrement importante pendant et après de fortes pluies. La pollution des nappes sur lesquelles sont installés les captages pour l'alimentation en eau potable pose donc un véritable problème en Seine-Maritime et dans toute la Haute-Normandie. Cela donne régulièrement lieu à des interdictions de consommer l'eau du robinet, qui peuvent durer plusieurs semaines et affecter des dizaines de milliers de personnes (Cartier, 2002). La présence de particules en suspension dans l'eau peut enrayer les opérations de traitement et de désinfection de l'eau, car celles-ci peuvent constituer pour les pathogènes un abri contre les désinfectants. Le dépôt de ces particules au sein du réseau de distribution contribue à la création d'une fine pellicule pouvant potentiellement stocker des pathogènes fécaux.

1.3. Une vulnérabilité croissante liée aux importantes mutations de l'occupation du sol

Sur le territoire du SAGE, en 1997 (fond cartographique Corine LandCover) les espaces urbains et péri-urbains couvraient 15 % du territoire, les cultures 40%, les prairies 23 % comme les forêts (SAGE livret 2, 2005). La multiplication des catastrophes dues au ruissellement érosif au cours des dernières décennies est à mettre en relation avec les changements d'occupation du sol qui ont augmenté à la fois l'aléa et la vulnérabilité aux trois types de risques associés :

- les profonds changements dans les pratiques agricoles et l'organisation du parcellaire ont amplifié le ruissellement érosif, notamment dans les zones amont ;
- l'expansion urbaine et périurbaine en particulier dans les zones de passages d'eau a aggravé l'exposition des populations aux risques et amplifié les écoulements par un accroissement de l'imperméabilisation des sols.

1.3.1. Les changements dans le monde agricole

Avant 1970, l'agriculture de cette zone nord de Seine Maritime était caractérisée par un modèle polyculture-élevage dominé par l'élevage bovin, que ce soit pour la production laitière ou de viande. A partir des années 1970 ce système a évolué vers un système de grandes cultures : blé, maïs, betterave, lin, pommes de terre avec un agrandissement des exploitations et du parcellaire grâce à la mécanisation (Cartier, 2002) :

- Les surfaces toujours en herbe (STH) qui étaient particulièrement importantes dans les zones de talweg ont ainsi drastiquement diminué (moins 23,5% entre 1988 et 2000 - RGA, 2000 sur la zone du Haut Cailly) au profit des terres cultivées, qui ont une capacité d'infiltration 4 fois moindre (juste après le labour) voire jusqu'à à 50 fois inférieure (juste après la levée des cultures).
- L'agrandissement des parcelles et l'allongement des sillons de labour, l'homogénéisation des états de surface et la suppression des éléments paysagers qui jouaient un rôle hydrologique majeur (haies, bordures enherbées, mares...) concourent à une aggravation du ruissellement et des ravines (Souchère et al, 2003).

Ces transformations sont des conséquences directes ou indirectes des évolutions de la Politique Agricole Commune (PAC) plus favorable aux grandes cultures (céréales d'abord, colza parfois) qu'à l'élevage bovin depuis 1980. Depuis les réformes de 1992 et 2000, des mesures « agro-environnementales » (dont bandes enherbées, cultures de couverture, soutien au maintien des prairies) sont financées sans toutefois modifier le rapport de force économique très favorable aux grandes cultures par rapport à l'élevage en récession.

Ce contexte économique global incitant à l'expansion des cultures, des pratiques et des formes de parcellaire toujours plus favorables au ruissellement érosif explique une mobilisation contradictoire de la profession agricole. On voit d'une part la gestion active de quelques agriculteurs très concernés et d'autre part des résistances fortes des instances professionnelles à accepter des remises en cause fondamentales des modèles agricoles intensifs dominants au non de la rentabilité et du maintien des emplois agricoles. Certains voient ainsi dans les multiples expérimentations techniques et organisationnelles menées depuis le début des années 1980, mais sans diffusion généralisée, le résultat d'une stratégie d'anticipation des récriminations de la société vis-à-vis du monde agricole : tester pour montrer sa bonne volonté mais aussi les contraintes économiques afin d'obtenir des dédommagements et la prise en charge collective du coût de la sécurité (Cartier 2002).

1.3.2. Le développement urbain et périurbain

La zone a connu une phase d'expansion de l'urbanisation et périurbanisation commune à beaucoup de zones rurales en proximité d'agglomération de taille moyenne du type de celle de Rouen, agglomération qui est la principale zone d'activités de la région (cf Figure 9):

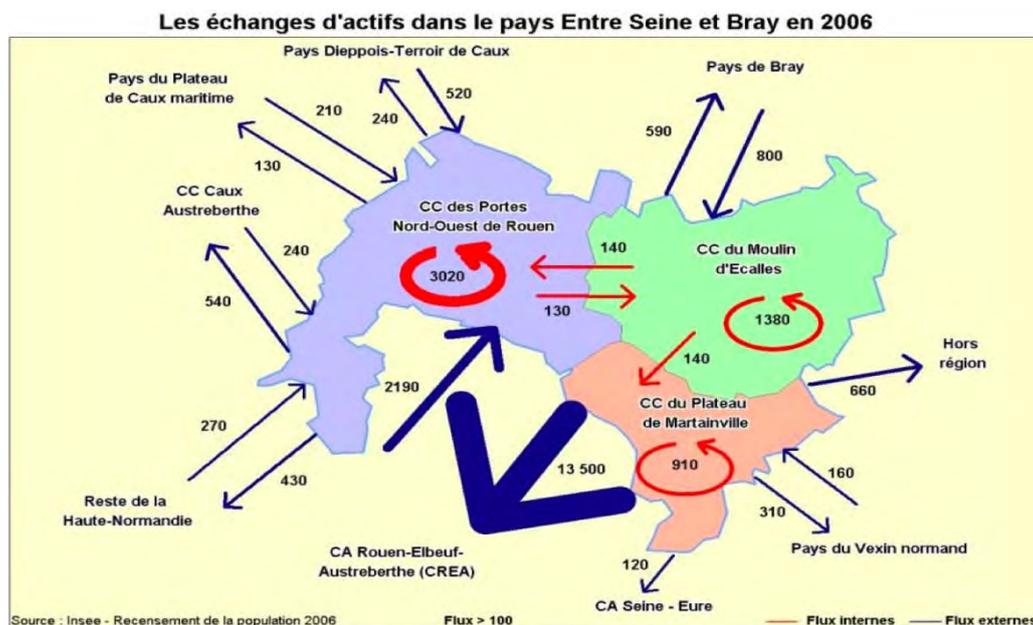


Figure 9 : Echanges d'actifs dans le pays entre Seine et Bray - 2006 (source Scot)

L'attractivité de cette zone d'influence immédiate de Rouen profite d'un réseau autoroutier dense (entre l'A29, L'A28, l'A151) et d'une desserte ferroviaire importante (Cf Annexe 5). Cette attractivité nourrit une dynamique urbaine et périurbaine active au sein d'une petite région agricole en pleine transformation. Sur le seul territoire de la CREA, la consommation d'espaces nouveaux par l'urbanisation entre 1999-2008 a été de 800 hectares, dont 130 sur les espaces forestiers, 340 sur les espaces agricoles et 330 sur les prairies. Cette expansion ne ralentit pas, la consommation moyenne annuelle de 80 ha est analogue à la tendance observée sur les périodes précédentes (source : rencontre régionale des SCOT de Haute Normandie – mai 2010).

Dans la zone du Haut Cailly, éloignée d'une quinzaine de km de Rouen, la pression urbaine est sensible, bien qu'atténuée comparée à celle de la CREA (Béraud, 2010 ; Cf. Figure 10) :

- Dans les années 70, le modèle de développement d'habitat par maison individuelle affecte l'auréole en proximité immédiate de la ville de Rouen (sud de la zone du Haut Cailly – communes de Monteville, Quincampoix par exemple), la population y augmente rapidement (> 2% par an alors que la population de la communauté de Rouen croît d'à peine 0.3 % l'an). Puis l'expansion a tendance à ralentir à partir des années 2000, voire à se stabiliser, faute de foncier disponible, sauf dans certaines communes qui promeuvent la transformation des pavillons des années 60-70 en petits collectifs (croissance de 0 à 7 % l'an). Deux types de villages sont aujourd'hui présents : les centres ruraux entre 3 et 5 000 habitants et les petits villages autour de 800 habitants, avec un minimum de services (écoles primaires, services publics, commerces...);

- La pression foncière avec ses répercussions sur les prix et la disponibilité des terres à urbaniser a transféré une partie de cette dynamique de rurbanisation vers une couronne plus éloignée de Rouen (exemple Clères, Cailly), avec un accroissement démographique de l'ordre de 1 à 2 %. Trois types de villages se distinguent : des très petits aux alentours de 300 habitants, sans service, des villages à 800 avec quelques services et deux villages à 1500 âmes, mieux pourvus en commerces ;
- une troisième couronne, plus éloignée a été plus épargnée par cette dynamique (croissance de 0.2 à 0.3 % - type Bosc le Hard), malgré la densité du réseau de desserte, le temps de transport ayant sans doute découragé les projets d'installation.

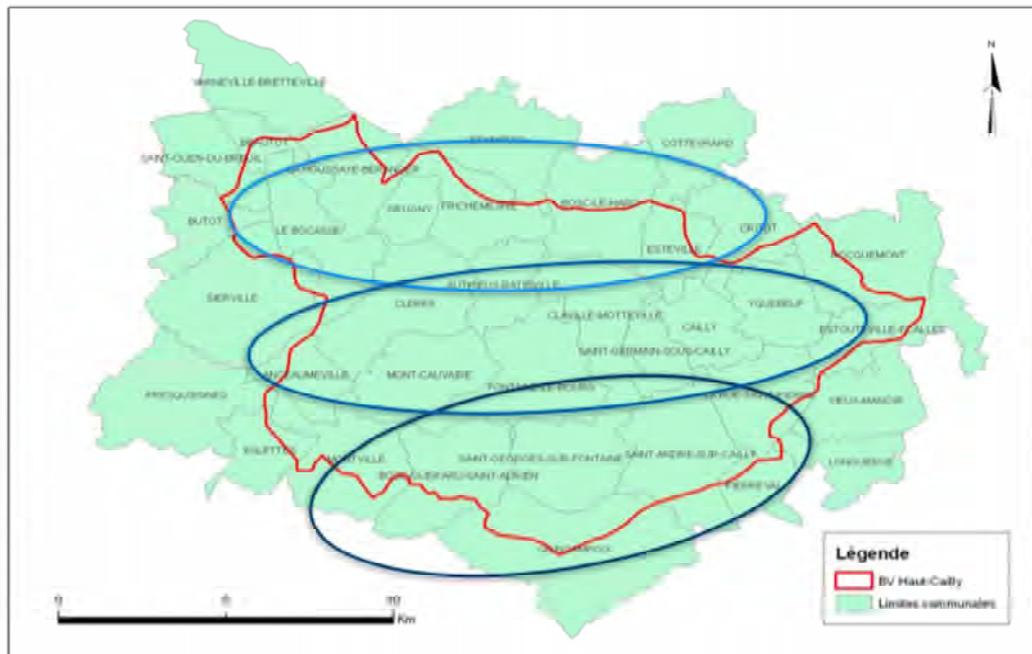


Figure 10 : Les trois zones d'expansion rurbanie dans la région au Haut-Cailly

Les maires et conseils municipaux ont voie au chapitre dans ces dynamiques. Ils matérialisent dans les PLU les politiques d'accueil et de développement de leur commune, avec des choix plus ou moins explicites de maîtrise de l'expansion rurbanie par un compromis entre objectifs parfois antagonistes :

- Maintenir ou développer des services de proximité (écoles, autres services publics, commerces) par l'accueil de nouveaux habitants ;
- Maîtriser les couts d'investissements sur le long terme dans les équipements publics (écoles, services d'eau et de déchets, voiries) ;
- Maintenir un cadre de vie rural en facilitant l'installation de jeunes agriculteurs et limitant le mitage du territoire par l'urbanisation ;
- Ne pas obérer le capital des agriculteurs en fin de carrière, dont les revenus à la retraite sont dépendants de plus values réalisées lors de vente de foncier agricole.

Ces compromis sont apparents dans les objectifs déclarés par les maires interrogés, qui convergent vers un souhait de mener une « urbanisation raisonnable » avec une croissance soutenue du nombre de leurs administrés :

- Montville : atteindre les 5 000 habitants sur 10 ans, sans les dépasser (En 2007 = 4 564 habitants) ;
- Cailly : atteindre les 1 000 habitants sur 20 ans (En 2007 = 733 habitants) ;
- Bosc Guérard Saint Adrien : atteindre 1 200 habitants sur 20 ans (En 2007 = 829 habitants) ;

- Fontaine Le Bourg : atteindre les 2 000 habitants sur 15-20 ans (En 2007 = 1 453 habitants) ;
- Le Bocasse : accueillir une 100aine d'habitants en 5 ans ;
- Mont Cauvaire : accueillir environ 130 habitants en 10 ans ;
- Yquebeuf : atteindre les 300 habitants sur 15 ans (En 2007 = 242 habitants).

On retrouvera ces dynamiques d'expansion sur 3 types de villages (300 – 800 – 1500 habitants) dans le support d'animation développée dans le cadre du présent projet.

1.4. La prise en compte des enjeux de ruissellement dans le SAGE Cailly-Aubette-Robec

Les éléments de diagnostic précédents sont largement repris et argumentés dans le document dressant l'état des lieux et définissant les orientations du SAGE Cailly-Aubette-Robec (livret 2 du SAGE 2005 – cf Tableau 1) :

- son orientation principale porte sur la sécurisation « *des biens et des personnes face aux risques d'inondation et de ruissellement* » ;
- sa seconde orientation porte sur la garantie de « *pérennité en qualité et en quantité de la ressource en eau* » mentionne 2 actions majeures en lien avec le ruissellement :
 - o i) « *mettre en place des périmètres de protection opérationnels* » et
 - o ii) « *mieux gérer les ruissellements pour prévenir les risques de turbidité* »

Le diagnostic met aussi en exergue les limites des politiques précédentes, focalisées sur la réduction de l'exposition au ruissellement par la construction de bassins de rétention de grande capacité et de digues de protection qui ne « *font que résoudre les conséquences (...) sans éviter l'aggravation progressive globale de la situation* ». Ces politiques résultaient d'un « *manque de cohérence amont/aval et de cohésion partenariale* », façon de disqualifier un défaut de solidarité à l'échelle du bassin, qui perdure dans les projets territoriaux. On peut citer comme illustration un SCOT urbain à l'aval jouxtant deux SCOT en amont regroupant des communes rurales ; une communauté urbaine – la CREA – à coté d'intercommunalités rurales ; la multiplicité de syndicats d'eau de petite taille etc...). Ces politiques étaient aussi la conséquence d'une difficulté à concilier la somme des intérêts individuels et des intérêts locaux avec l'intérêt général à l'échelle du bassin :

« Comment conjuguer le souhait pour un maire de voir sa commune se développer, pour un aménageur de réaliser l'opération immobilière la meilleure et pour un particulier d'acquérir une parcelle au meilleur prix avec la nécessité de prendre en compte la problématique des ruissellements et des inondations ? En effet cette nécessité technique peut aller à l'encontre des intérêts de chacun car elle peut parfois rendre inconstructibles certaines parcelles, obliger l'aménageur d'utiliser un lot pour créer un bassin de régulation des eaux pluviales et augmenter sensiblement le prix d'acquisition d'une parcelle (Livret 2 – SAGE 2005)

Ces plans d'actions du SAGE ont été traduits dans un Contrat d'Objectifs de Gestion de l'Eau (2006-2010) – GAGE- signé par l'ensemble des 16 maîtres d'ouvrages concernés par l'eau sur le bassin (structures intercommunales d'adduction d'eau potable, syndicat mixte du Sage, syndicats de bassin versant, Communautés de Communes, Communauté d'Agglomération Rouennaise, communes en régie pour l'eau), l'Agence de l'Eau Seine Normandie et le Département de Seine Normandie. L'Agence et le Département s'engagent à co-financer les actions, les maîtres d'ouvrage à la réalisation de celles qui relèvent de leur mission, ainsi qu'informer la cellule d'animation du SAGE qui se voit confier aussi un rôle de coordination et de suivi des opérations.

Tableau 1 : Orientations et plans d'actions du SAGE Cailly-Aubette-Robec, liés à la gestion du ruissellement et des inondations (d'après livret 2 SAGE 2005, en italique les citations in extenso)

Orientation et Approche	Plans d'actions
<p>Prévenir les ruissellements</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Actions préventives permettant de limiter au maximum l'émergence de ruissellements liés à l'urbanisation et à l'agriculture</i> - <i>Réaliser des aménagements « légers » au plus près des aires de production</i> - <i>Maîtriser l'urbanisation dans le lit majeur des rivières</i> 	<p>1 <i>Prendre en compte la problématique ruissellement dans les projets d'urbanisme :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Prévoir une gestion intégrée des eaux pluviales dans le nouveau bâti</i> - <i>Interdire projet d'urbanisme dans zone de ruissellement concentré</i> - <i>Sensibiliser les services concernés, maires, aménageurs, agriculteurs</i> - <i>Identifier / cartographier précisément / porter à connaissance zones à risque sur le bassin</i> - <i>Aider les communes à réviser leur PLU en conséquence</i> <p>2 <i>Préserver la ceinture verte de la CREA et surtout ses zones boisées</i></p> <p>3 <i>Mettre en place une occupation des terres agricoles générant moins de ruissellement</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Inciter les agriculteurs à modifier leur pratiques culturales (sens du travail du sol, maintien des bandes enherbées, couverture du sol en hiver, gestion du parcellaire ...)</i> - <i>Se rapprocher de la Chambre d'Agriculture pour mettre en œuvre les actions d'animation ad hoc</i> - <i>Inciter les agriculteurs à conserver voire étendre les surfaces en herbe, notamment sur les parcelles se trouvant sur les axes de ruissellement. Infléchir la baisse de surface en herbe</i> <p>4 <i>Aménager sur l'ensemble des bassins le cheminement hydraulique du ruissellement résiduel, en optant pour des aménagements légers le plus en amont permettant le stockage et l'infiltration des eaux (petits bassins de rétention, mares, haies fossés) en concertation avec les communes et agriculteurs concernées</i></p>
<p>Préserver et améliorer la qualité de la ressource en eau</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mettre en place des périmètres de protection des captages opérationnels - Mieux gérer les ruissellements pour prévenir les risques de turbidité 	<p>1 <i>Lancer les DUP pour « protéger les captages des pollutions bactériologiques et accidentelles</i></p> <p>2 – <i>En plus des actions citées précédemment pour lutter contre le ruissellement en zone agricole « traiter les points d'engouffrement (bétoires) se trouvant sur les axes de ruissellement »</i></p> <p>3 – <i>Adopter un schéma global d'alimentation en eau potable à l'échelle du SAGE, en renforçant notamment les interconnexions des secours entre syndicats</i></p>

Si on assiste ainsi à une forte mobilisation institutionnelle sur des objectifs de transformations concomitantes de dynamiques agricoles et urbaines sur les zones donnant naissance aux ruissellements en amont, la manière d' enrôler ceux qui doivent accomplir ces changements (agriculteurs, maires, propriétaires fonciers etc...) n'est évoquée que par les termes animation, information, sensibilisation. En comparaison des autres enjeux de l'eau (sécurisation des services d'eau potable et d'assainissement par un schéma départemental) ou d'urbanisation et de développement (SCOT, intercommunalités) le ruissellement peine donc à institutionnaliser des relations de solidarités fortes.

Une analyse de l'expérience de syndicats de bassins déjà engagés dans ce type d'action d'animation a été menée en 2008 (bassin d'Yerres – Epices 2008). Ses conclusions mettent en avant de nombreuses difficultés, en particulier le faible potentiel de mobilisation sur les registres de la solidarité et de la coordination à l'échelle de territoires. En effet :

- L'érosion n'est pas perçue par les agriculteurs comme un problème public à appréhender à l'échelle habituelle des territoires d'action (communes, bassin versant, bassin d'approvisionnement des filières..) mais comme un incident de « voisinage », entraînant des désagréments ponctuels (ravines dans une parcelle donnée, coulée de boue sur telle portion de route ou de lotissement) ;
- L'érosion ne fait pas l'objet d'un diagnostic partagé sur ses causes, ses conséquences et son ampleur au sein même du monde agricole (50 % des agriculteurs estime par

exemple qu'il s'agit d'un enjeu purement agricole, 20 % purement urbain, seulement 30% d'un enjeu mixte) ;

- Une grande majorité d'agriculteurs voit l'accroissement du ruissellement sur les terres agricoles comme une « fatalité », conséquence de facteurs externes (expansion des grandes cultures en réponse à la PAC, agrandissement des parcelles et des exploitations, régression de l'élevage pour motif économique, remembrement...) contre lesquels ils ne peuvent rien ni « collectivement localement » ni « individuellement » ;
- Chacun, à titre personnel, estime ne pas être responsable, car ayant déjà engagé des adaptations de ses pratiques (simplification des façons culturales, déchaumage, couverture du sol par des CIPAN essentiellement) ;
- Les manifestations considérées comme tangibles et gênantes du ruissellement pour l'agriculture sont les ravines, dont la responsabilité est entièrement rejetée sur le /les agriculteurs voisins en amont qui n'ont pas su le maîtriser ;
- L'érosion et le ruissellement ne sont que très rarement discutés dans les réseaux professionnels les plus actifs : filières, CUMA, Groupement de Développement Agricoles. Les rares échanges portent sur les ajustements de techniques culturales pour atténuer ponctuellement le ruissellement (CIPAN, travail minimal) (Epices, 2008).

En outre, les agriculteurs se montrent très dubitatifs sur la réduction attendue en termes de ruissellement à partir des haies et des petits bassins de rétention, dont ils soulignent les inconvénients (coûts d'entretien, perte foncières). Ils ne connaissent pas les fascines. Peu sensibles aux conséquences directes du ruissellement sur leurs propres parcelles, ils abandonnent rapidement les pratiques contribuant à la réduction de l'érosion – notamment les CIPAN – dès lors que les incitations économiques qui les soutiennent sont abandonnées ou réduites. (Epices 2008).

De leur cotés élus et acteurs de l'eau du même bassin avouaient leur désarroi pour mener des actions de prévention du ruissellement sur des territoires pertinent, en coordination avec les agriculteurs (Epices 2008).

Ce diagnostic de 2008 corrobore les conclusions antérieures de Cartier sur les difficultés de maîtriser le ruissellement érosif en pays de Caux (Cartier 2002). Ceci dénote peu de progression dans le processus de socialisation autour des nuisances engendrées par le ruissellement érosif, hormis l'écriture du SAGE lui-même. Parmi les conclusions de Cartier 2002, on relève ainsi :

- Spontanément, les agriculteurs n'établissent pas de liens entre leurs pratiques et les conséquences du ruissellement en aval, souvent lointaines et peu visibles (p 61) ;
- Quand la connaissance des phénomènes est plus aiguisée, la démonstration de la complexité des interdépendances et des difficultés de maîtriser le ruissellement avec des techniques simples et robustes en des sites facilement repérables induit un scepticisme sur l'efficacité de l'engagement dans une amélioration individuelle (p 53) ;
- L'individualisme des agriculteurs, particulièrement fort et traversant l'histoire depuis le moyen âge, a gêné l'émergence de groupes professionnels puissants, où se discuteraient les aspects techniques, économiques et organisationnels de l'érosion. Les agriculteurs individuels restent démunis en moyens économiques et en connaissance pour innover efficacement. Quand ces proximités professionnelles se structurent (Cuma par exemple) ce n'est pas sur une logique spatiale et il y a très peu d'échanges et d'entraide entres voisins. La faiblesse du dialogue local est amplifiée par la diversité

des systèmes de production et par une proportion importante d'agriculteurs ne résidant pas sur place (agriculteurs « forains »). De l'avis même des agriculteurs, une réflexion locale et collective sur l'assolement est une utopie (p. 113 et suivantes).

- S'il y a consensus social pour que les élus et les administrations prennent en charge ce qui relève de la sécurité de la sécurité des biens et des personnes, si les discours convergent vers une nécessaire gestion par bassin versant, la mobilisation concrète des élus reste problématique. Les oppositions amont /aval, donc urbain / rural, perdurent avec un amont refusant de n'être qu'exécutant de mesures définies par et pour l'aval. Aux yeux des élus locaux, le ruissellement n'entre par dans le champ du politique car c'est d'abord une gêne pour l'ensemble des intérêts locaux, dont les moteurs principaux sont « externes » (politiques agricoles, aléas climatiques) (p. 143 et suivantes).
- Les élus, très sollicités en zones vulnérables avales, manquent de certitudes scientifiques (quelles mesures seraient efficaces à coup sûr pour enrayer le ruissellement érosif à sa source ?) et morales (quelle légitimité à imposer à l'amont des changements de pratiques alors que le coût social de cette injonction à transformer les systèmes serait élevé ?). Ils misent donc d'abord le curatif, visible électoralement et judiciairement, puis délèguent aux services de l'Etat et experts le soin de définir et mettre en œuvre les actions préventives (p 170).
- Le territoire est maillé en communes de petite taille, héritées des paroisses du moyen âge, ayant peu de tradition d'aménagement coordonné (pas de réseau de fossé ou de drainage organisé, très peu de contrat de rivières, petites intercommunalités pour l'eau potable et l'assainissement) et de fortes hétérogénéités de moyens financiers amont-aval donc urbain-rural (p 150.)
- La disjonction entre les préoccupations agricoles et les autres s'accélère avec la rurbanisation. « *Là où la population est la plus urbanisée, elle doit laborieusement accomplir des apprentissages* » (p. 152). Dans les bourgs (2-5000 hab) les agriculteurs, progressivement exclus des conseils municipaux habitent les hameaux périphériques et les élus voient dans les nuisances du ruissellement des « *petits désagréments* » contre lesquels il n'y a pas de place pour l'action locale. Dans les petites villes, les élus engagent des experts et privilégient les solutions curatives ou de protection (bassins, système de filtration pour l'eau potable) visibles pour les électeurs. Les sites d'expérimentation de mesures préventives sont marqués par une mixité sociale « agriculteurs » « rurbains » dans les conseils municipaux, souvent sur le domaine du maire agriculteur.
- L'intercommunalité est peu active jusqu'au début des années 2000, avec 4 attitudes : i) de l'ignorance à la passivité, notamment en amont ; ii) de la passivité à l'inaction où les multiples pressions pour intervenir, dont le risque de mise en accusation sur le plan juridique se heurte au déni de la capacité d'agir localement sur le ruissellement ; iii) de l'inaction à la mobilisation conditionnelle, par des actions curatives qui se voient pour ne pas être mis en accusation et par la mobilisation du principe de réciprocité entre communes dans les divers dossiers gérés par l'intercommunalité iv) de la mobilisation conditionnelle au volontarisme, sur quelques sites pilote, où domine le doute sur les actions qui exigent des sacrifices sans compensation. « *La concertation acceptée exige une méta-réciprocité qui dépasse le ruissellement et justifie la répartition des charge* » (p 157). Dans cette solidarité calculée, l'enjeu est alors de trouver une entente sur les principes de justice à mobiliser dans la répartition de ces charges.

C'est dans ce contexte qu'une démarche de modélisation d'accompagnement a été lancée afin de proposer un support d'animation sur les enjeux de ruissellement à l'échelle d'un petit

bassin versant, afin i) de mettre en visibilité les phénomènes d'érosion et les effets de divers aménagements à l'échelle de la parcelle mais aussi dans leurs continuité amont-aval ii) de souligner les interactions entre dynamiques agricoles et urbaines ; iii) de susciter des débats sur les possibilités /contraintes de différentes formes de solidarité pour réduire les risques d'érosion.

2. Principes de la modélisation d'accompagnement et mise en œuvre dans le projet

2.1. Principe de la modélisation d'accompagnement

La modélisation d'accompagnement ou « companion modelling » est une démarche développée depuis le milieu des années 1990. C'est une démarche participative qui utilise des outils de modélisation pour appréhender des systèmes socio-écologiques complexes, dont la gestion comporte d'importants facteurs d'incertitude. Il s'agit en fait d'une posture, à une attitude par rapport à la manière d'aborder un terrain (Etienne et al, 2008). Elle a été présentée sous la forme d'une charte (Collectif ComMod, 2006) stipulant que la démarche s'intègre dans un cadre de recherche-action, c'est-à-dire une recherche impliquée dans la résolution de problèmes touchant notamment à la thématique de la gestion des ressources naturelles et de l'environnement. Elle est supposée répondre à deux grands objectifs :

- L'amélioration des connaissances sur les environnements complexes
- L'accompagnement des processus collectifs de décision dans de tels environnements

La démarche consiste à construire de manière participative un modèle des interactions entre les sociétés et la nature, qui est ensuite implémenté de manière plus ou moins informatisée, pour être utilisé soit comme support pour des jeux de rôles (JDR), ou comme outil pour réaliser des simulations à partir de scénarios d'évolution du territoire (Bousquet et Trébuil, 2005).

Le but de la démarche, et ce qui est entendu par le terme « accompagnement », n'est pas de faire de la prospective à plus ou moins long terme, mais plutôt de venir en appui à la prise de décisions collectives dans une situation présentant de nombreuses incertitudes (Collectif ComMod, op. cit.). Cet appui se fait notamment par la mise en commun des différents points de vue des acteurs du territoire concernant les ressources et leur utilisation, et la construction d'une représentation commune du fonctionnement du territoire.

L'hypothèse sous-jacente est que cette construction d'une représentation partagée permet de faciliter la concertation et la coordination des efforts entre les différentes parties prenantes dans la prise de décision en situation d'incertitude. La démarche de modélisation d'accompagnement se situe donc clairement dans le champ des approches participatives entre usagers et gestionnaires du territoire, mais aussi élus, scientifiques, etc. Barnaud et al. (2008) résumant les objectifs de la démarche de modélisation d'accompagnement à l'apprentissage collectif, la facilitation de la négociation et l'innovation institutionnelle, dans le cadre de problématiques liées à la gestion des ressources naturelles et à l'environnement.

Le déroulement de la démarche de modélisation d'accompagnement se fait en plusieurs étapes, en alternant phase de terrain et phase de travail en laboratoire, de la définition d'une problématique environnementale, à la définition de scénarios avec les acteurs du territoire (Etienne et Bousquet, 2009 (Figure 11) :

- Sensibilisation des porteurs de projet à la démarche, et définition d'une question, d'une problématique précise, à laquelle la démarche tentera d'apporter des réponses. Cette question peut soit avoir pour origine une demande sociale clairement exprimée,

soit il peut s'agir d'une question de recherche formulée par un ou des chercheurs, en partenariat avec les porteurs de projet (Daré et al, 2009).

- Co-conception du modèle conceptuel de fonctionnement du territoire, de manière participative avec les acteurs locaux. Le modèle intègre donc divers types de savoirs : techniques, juridique, empirique, scientifique, etc. Le modèle est ensuite validé avec les acteurs locaux pour s'assurer de sa cohérence avec la réalité locale, et de sa pertinence par rapport à la question posée.
- Le modèle est ensuite généralement informatisé par les chercheurs. Cette étape consiste à traduire le modèle conceptuel construit de manière participative avec les acteurs locaux, en langage informatique, afin d'automatiser le modèle.
- Des scénarios sont ensuite définis avec les acteurs locaux, et des simulations exploratoires peuvent être réalisées grâce au modèle. Le modèle peut aussi servir de support à la création de jeux de rôles (JDR) faisant participer les acteurs locaux. Les JDR permettent une mise en situation de ces derniers, ainsi que l'exploration de nouvelles pratiques ou comportements. Cela permet d'ouvrir la discussion et peut amener à une réflexion collective sur une problématique donnée.
- Les effets de la démarche sur les pratiques et comportements des participants dans le monde réel sont ensuite évalués.
- Les acteurs locaux peuvent ensuite, à leur demande, être formés à l'utilisation de ces outils.

Une démarche en 12 phases

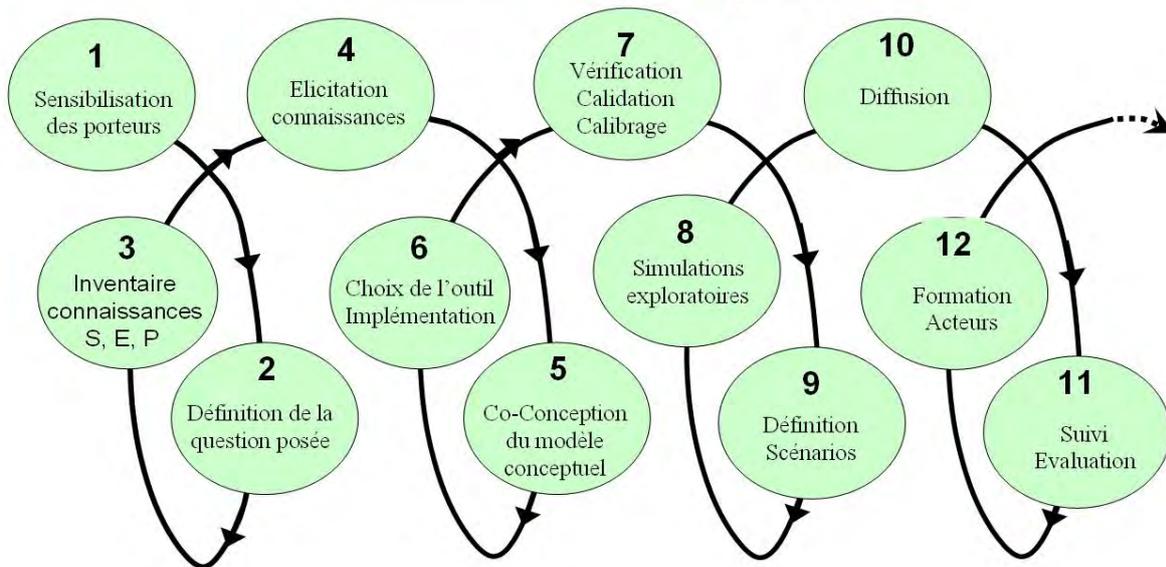


Figure 11: Les différentes phases d'une démarche de modélisation d'accompagnement
(Source: Souchère, 2009)

Ces phases constituent un enchaînement type, une sorte de modèle complet de la démarche de modélisation d'accompagnement. Néanmoins, elles ne sont pas systématiquement mobilisées, ou elles peuvent aussi se succéder dans un ordre différent.

Dans le cas du projet SURGE, la voie choisie a été celle de l'informatisation d'un modèle co-construit avec des acteurs de terrain permettant d'explorer, lors de sessions de jeux de rôles, des scénarios d'aménagements d'un territoire sensible au ruissellement érosif. Nous avons pu

mener la démarche jusqu'à l'étape 8 de définitions des scénarios et programmer la 9^{ème} avec un groupe d'agriculteurs et de maires de la zone, fin septembre 2012.

2.2. Mise en œuvre sur la problématique du ruissellement dans le Haut Cailly

Les acteurs du territoire porteurs de la démarche de recherche-action au côté du groupe de chercheurs sont au nombre de deux :

- L'animatrice agricole du syndicat mixte du SAGE Cailly-Aubette-Robec
- Un chargé de projet de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, division territoriale Seine-Aval, basée à Rouen

Ces porteurs de projets n'ont pas été directement commanditaires de la démarche, mais suite à l'exposé de la démarche, ils ont montré un vif intérêt pour la tester sur leur territoire d'action et ont dégrossi l'enjeu sociétal sur lequel la démarche a ensuite été engagée avec un ensemble d'acteurs beaucoup plus large. Ils avaient déjà été impliqués dans un précédent projet de recherche comportant une démarche de modélisation d'accompagnement : CauxOpération (Echeverria, 2006 ;; Levinson, 2007).

Deux réunions entre ces porteurs et les chercheurs ont conduit au choix de la gestion des risques liés au ruissellement érosif, priorité du SAGE Cailly-Aubette-Robec.

Le questionnement s'est affiné au cours des deux réunions :

- Dans un premier temps le questionnement a porté sur la protection des zones de captages d'eau potable, l'alimentation en eau potable d'une partie de l'agglomération rouennaise reposant en partie sur les captages du Haut-Cailly.
- Puis la problématique liée au ruissellement érosif s'est imposée. De nombreux ouvrages structurants, visant à écrêter les ruissellements et à réduire les risques d'inondation et de turbidité de l'eau au captage, étaient en cours de réalisation sur le Haut-Cailly. D'autres étaient en attente. Selon l'animatrice du syndicat mixte du SAGE, il y avait un défaut de supports de discussions entre tous les acteurs concernés par l'implémentation des mesures préventives sur ces territoires amont – et notamment à l'hydraulique douce – en complément de ces mesures curatives à l'aval. Ces mesures étaient d'autant plus importantes que les financements pour les ouvrages structurants en aval étaient conditionnés, dans le SAGE, par la réalisation de mesures préventives en amont.
- La demande finale a donc porté sur un support de mobilisation des acteurs des territoires amont autour des risques d'érosion, d'inondations boueuses et de turbidité des eaux aux captages. L'aspect eau potable intéressant particulièrement l'Agence de l'Eau a été conservé, mais seulement sous l'aspect turbidité.

La question a été présentée ainsi à l'ensemble des acteurs durant les ateliers participatifs suivant :

« Comment mettre en œuvre des aménagements d'hydraulique douce sur le territoire du Haut-Cailly, afin de limiter les problèmes de ruissellement érosif et de turbidité des eaux aux captages, en complément des ouvrages structurants réalisés par les collectivités ? »

Une liste de structures les plus pertinentes à inviter aux ateliers de co-construction du modèle a été déterminée en fonction de deux facteurs :

- Leur capacité à influencer la question traitée
- Leur niveau d'intérêt par rapport à cette question

Les structures ont été listées grâce aux connaissances des porteurs de projets, et elles ont été positionnées relativement les unes par rapport aux autres sur un graphe présentant ces deux facteurs en abscisse et en ordonnée (Figure 12). Les porteurs de projet ont ensuite identifié un ou des interlocuteurs au sein de ses structures afin de les inviter à participer aux ateliers de construction participative d'un modèle d'interactions entre acteurs et ressources sur le Haut-Cailly. Lorsque les structures étaient suffisamment importantes pour avoir plusieurs personnes potentiellement concernées par le sujet, les porteurs de projets en accord avec l'équipe scientifique ont décidé d'envoyer une invitation à chacune des personnes concernées. Une lettre à l'entête de l'Inra a ensuite été conjointement rédigée par l'équipe scientifique et les porteurs de projets afin de présenter l'enjeu du projet, de préciser les modalités de leur participation et fournir le lieu et la date de la première réunion. A chaque réunion, un temps a été consacré à la recherche de plusieurs dates compatibles avec les emplois du temps des personnes présentes. Ces dates ont ensuite été proposées par courriel aux personnes absentes afin de fixer la date du prochain atelier participatif rassemblant le plus de participants potentiels.

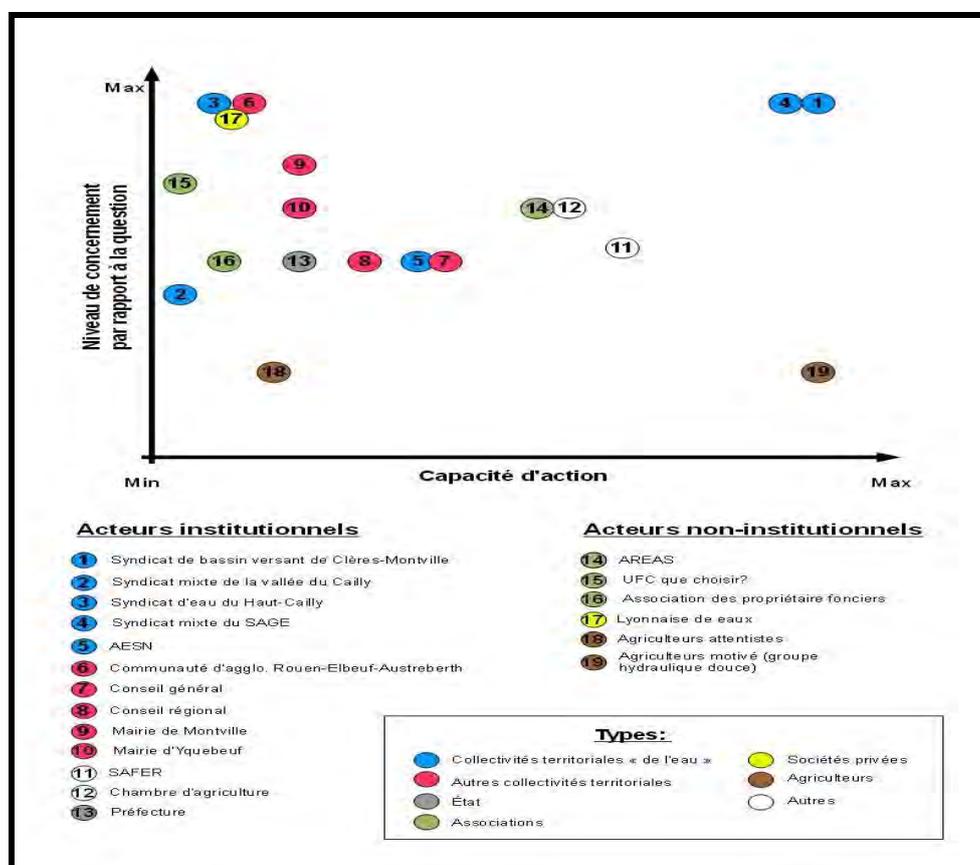


Figure 12: Graphe montrant le positionnement des acteurs sélectionnés par rapport à la question traitée (Sources : Souchère, 2009, modifié par Saubes 2010)

Au final, 30 interlocuteurs ont été conviés à participer à chacun des quatre ateliers participatifs dédiés à la co-conception du modèle d'interactions entre acteurs et ressources. Ces interlocuteurs représentent des organismes financeurs (AESN, conseil général, conseil régional, Etat), des maitres d'ouvrages (Syndicats mixtes, collectivités locales), des acteurs issus du monde du conseil (Chambre d'agriculture, AREAS, etc.) et des agriculteurs. On retrouve aussi des acteurs associés à la réglementation : Etat, Syndicat mixte du SAGE. En termes spécialisation, on retrouve plusieurs champs : gestion de l'eau (syndicat de bassin versant, syndicat d'eau, AESN, SAGE, Lyonnaise de eaux etc.), agriculture (agriculteurs, chambre d'agriculture), urbanisme (collectivités locales), gestion foncière (SAFER,

association de propriétaires), réglementation, etc. Concernant les communes, les porteurs de projet et l'équipe scientifique ont décidé d'en choisir deux : une située à l'amont du bassin versant, plus rurale (Yquebeuf) et une située à l'aval et plus urbaine (Montville), afin de mobiliser l'aspect solidarité urbain-rural. Cependant, étant donné que les syndicats d'eau ou les syndicats de bassins versants sont souvent présidés par des élus, c'est au final des élus de 5 communes différentes du bassin du Haut Cailly qui ont été conviés. En ce qui concerne, les agriculteurs, il a été décidé d'inviter essentiellement des agriculteurs ayant participé à une opération de mise en place d'aménagements d'hydraulique douce menée par la chambre d'agriculture avec le soutien de la fédération de chasse. Ce petit groupe de 6 agriculteurs comportaient en effet des acteurs plus ou moins motivés pour la mise en œuvre de solutions.

En termes de participation, il faut noter que nous n'avons jamais réussi à avoir l'ensemble des participants invités à chaque atelier. Seulement 20 interlocuteurs sont venus au moins une fois à un des ateliers. Certains acteurs ont été systématiquement absents. C'est le cas par exemple des agriculteurs. La période des réunions (printemps) était peu favorable étant donnée la diversité des activités les retenant au champ (travail du sol, semis des cultures, traitement, etc.). Leur travail ne leur a pas permis de participer à des réunions de 3 ou 6h selon les ateliers, d'autant que la plupart de celles-ci ont été organisées à Rouen, c'est-à-dire à 10 ou 20 km du terrain d'étude. Même l'atelier organisé sur le terrain d'étude (commune d'Yquebeuf) pour favoriser leur venue, n'a pas entraîné une participation plus importante des agriculteurs. L'absence de ces derniers peut être perçue comme nuisible au projet, puisqu'ils tiennent un rôle central dans la problématique du ruissellement érosif, de même que dans la question posée dans le cadre de cette démarche de modélisation d'accompagnement (hydraulique douce, conflits autour du foncier). Néanmoins leurs points de vue sur la question ont été recueillis au cours d'entretiens individuels pendant lesquels ils ont exprimé leur intérêt pour le sujet. Ensuite, ces points de vue ont pu être mis sur la table par l'équipe scientifique et débattu par le collectif lors des ateliers suivants les entretiens, afin d'être intégrés au modèle. D'autres acteurs comme les représentants de la préfecture, de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer Seine-Maritime ou du Conseil Régional de Haute-Normandie ne sont pas non plus venus aux réunions.

La participation la plus forte a été atteinte lors du premier atelier durant lequel 16 participants étaient présents. Pour les trois autres ateliers, 12, 11 et 12 personnes ont respectivement participé. La Figure 13 met en évidence les inégalités entre acteurs en termes de participation aux ateliers. Elle permet de voir pour chaque temps fort collectif, le nombre d'ateliers auxquels a participé chacun des acteurs présent à au moins un atelier (nb tfc), ainsi que le nombre d'heures durant lesquelles chacun s'est impliqué dans le projet. Certains acteurs d'une même structure (Conseil Général par exemple) ont essayé de s'organiser avec plus ou moins de succès pour se succéder aux différents ateliers en fonction de leur disponibilité.

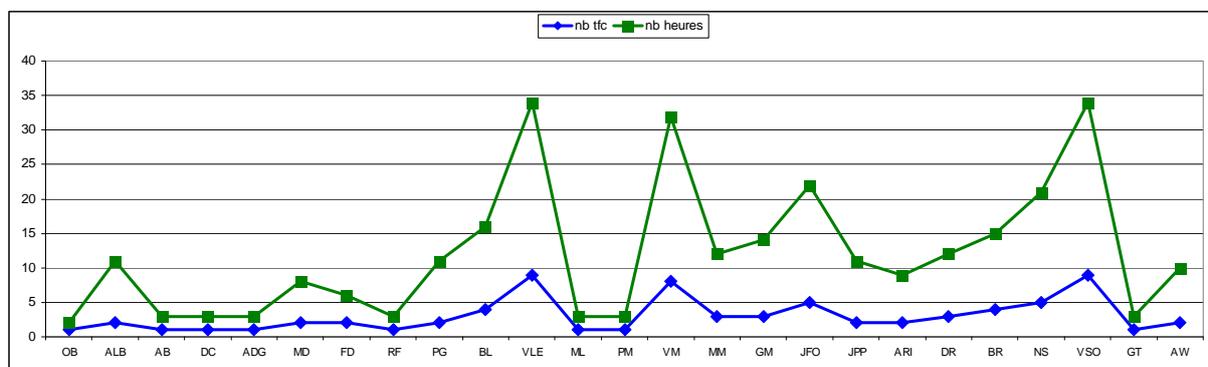


Figure 13 : participation des différents acteurs

2.3. Le modèle conceptuel ARDI

2.3.1. Acteurs, ressources et dynamiques

Les trois premiers ateliers participatifs ont consisté à recenser les acteurs, ressources et dynamiques que l'on retrouve sur le territoire du Haut-Cailly en rapport avec le ruissellement.

- *Les acteurs*

Des acteurs directs ou indirects ont été distingués. Les premiers correspondent à ceux dont les pratiques ont un effet direct sur la dynamique de certaines ressources, alors que les seconds sont ceux dont les actions vont influencer les pratiques des acteurs directs (Etienne, 2006). Ensuite les entités de gestion associées à chacun des acteurs retenus ont été définies. Les entités de gestion correspondent généralement à l'échelle spatiale à laquelle agit l'acteur : commune, bassin versant, exploitation agricole, par exemple. Au fur et à mesure de l'avancement de la réunion, les acteurs ont été rajoutés sur une diapositive d'un diaporama PowerPoint projeté et visible par l'ensemble des participants (Figure 14).

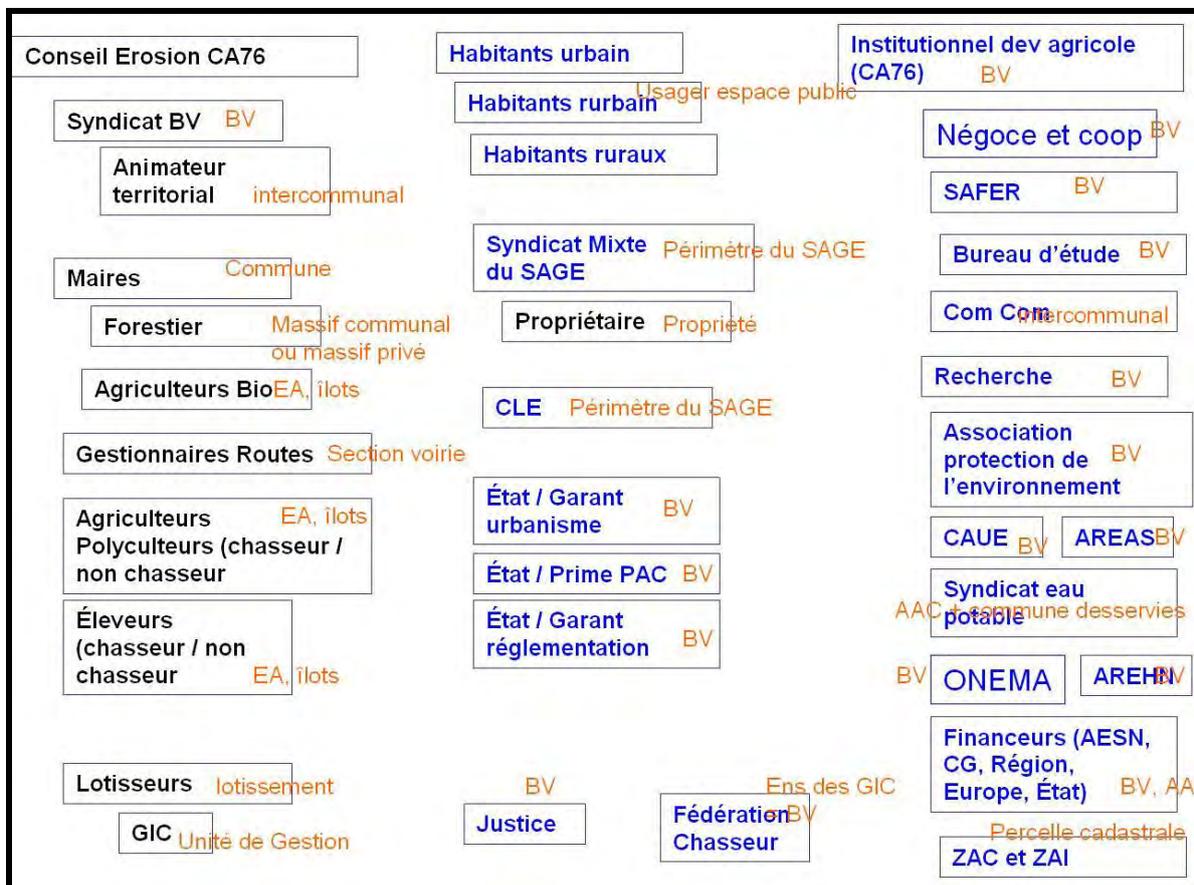


Figure 14: diagramme des acteurs. En noir : acteurs directs ; Colonne de droite en bleu : acteurs indirects ; Colonne du milieu : incertitude pour savoir si direct ou indirect ; En orange : unités de gestion des acteurs (Sources : Souchère et Saubès, 2010)

On note que ces participants « experts » où à minima familiers des différents services de l'Etat restent perplexes sur le rôle de l'Etat vis-à-vis de phénomènes qui mettent en jeu la sécurité des biens et des personnes. En effet, la définition de politiques publiques (agriculture, urbanisme) s'opère de plus en plus à des niveaux supra nationaux. Quoiqu'il en soit la mention d'un nombre très significatif de services et de missions de l'Etat concorde bien avec le désir d'impliquer des acteurs supposés garant de l'intérêt général, souligné par Cartier (2002).

Un nombre important d'acteurs a été listé, reflétant bien la complexité de la situation relative à la gestion des problèmes liés au ruissellement érosif. Afin de satisfaire à un besoin opérationnel de simplification, il a ensuite été demandé à chacun des participants de choisir les cinq acteurs (parmi ceux déjà cités) les plus importants à leurs yeux, et de les lister par ordre décroissant d'importance (Figure 15). Ce graphique prend en compte le nombre de fois que l'acteur a été cité parmi les 10 personnes nous ayant retournés leur classement. Cette valeur est pondérée par la position à laquelle chaque acteur a été placé par chacun des participants. Un score de position a été attribué de 5 (première position) à 1 (dernière position).

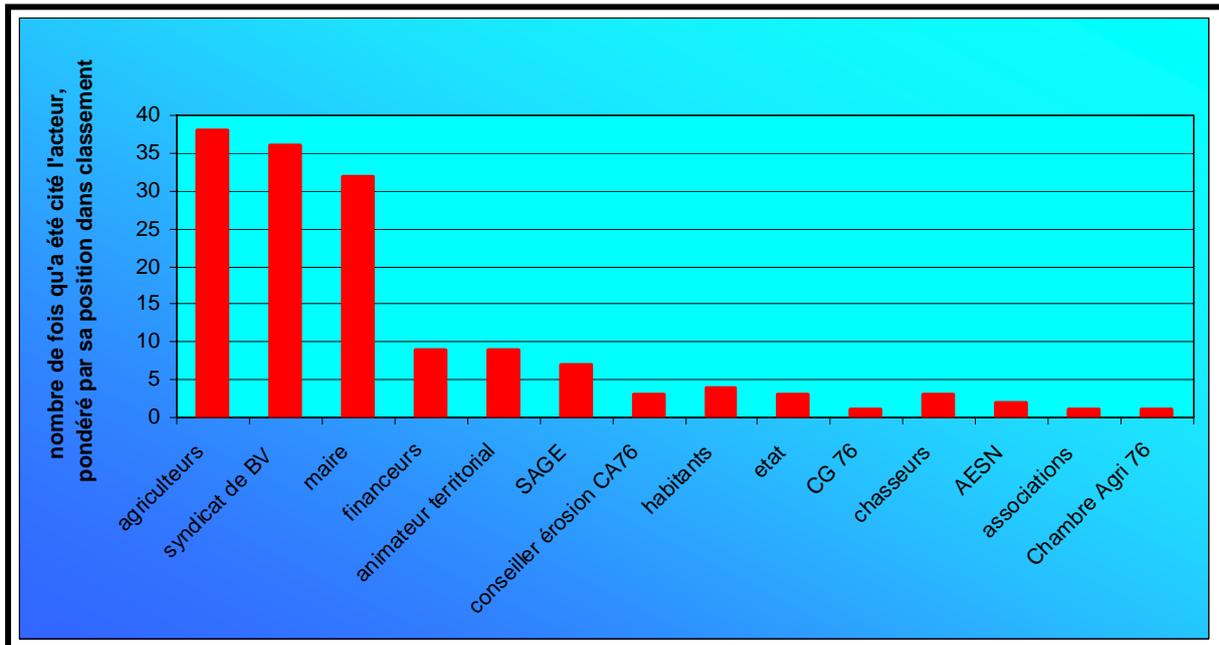


Figure 15: graphique montrant les acteurs considérés comme les plus importants par les participants de la réunion (source : Souchère et Saubès, 2010)

Un trio d'acteurs arrive largement en tête, composé par les agriculteurs, les syndicats de bassin versants et les maires. L'appel à chaque acteur renvoie à des formes d'action sur le ruissellement distinctes :

- Les agriculteurs influencent directement la production de ruissellement. Les éleveurs valorisant des surfaces en herbe ont été différenciés de ceux spécialisés dans les grandes cultures, qui ont un impact plus important en termes de ruissellement. L'aspect chasse a été mise en avant, puisque les agriculteurs pratiquant cette activité peuvent être plus enclins à réaliser des aménagements d'hydraulique douce, en raison de leur impact positif sur la préservation du gibier (perdrix, lapin).
- Les syndicats de bassin versant sont perçus comme les principaux vecteurs institutionnels de solutions à mettre en place. L'acteur « animateur territorial » a été rajouté afin de signifier que l'ensemble du territoire (notamment autour de l'agglomération de Rouen) n'est pas couvert par des syndicats de bassin versant si bien qu'un autre type d'intercommunalité peut être en charge de la compétence ruissellement-inondation (communauté de commune par exemple). L'« animateur territorial » correspond donc à l'animateur de la structure ayant ces compétences.
- Les maires sont, quant à eux, garants de l'urbanisation à l'échelle de la commune, qui est à la fois potentiellement productrice mais aussi réceptrice de ruissellement.

Les participants ont décidé de classer ces trois types d'acteurs comme « directs ». Parmi les autres acteurs retenus on retrouve les financeurs, composés principalement de l'AESN et du

Conseil Général, et secondairement par l'Etat et l'Union Européenne. Un autre acteur qui a été défini comme direct, et qui a pris plus d'importance dans les discussions au cours des réunions suivantes a été cité : le lotisseur ou aménageur foncier. Celui-ci a en effet un rôle important en zone rurale, comme c'est le cas sur le Haut-Cailly, dans le développement des zones urbanisées et plus particulièrement les lotissements.

Le syndicat mixte du SAGE et la CLE (commission locale de l'eau) ont été classés en indirects, puisque leur rôle est de définir une politique, une réglementation.

- *Les ressources*

Le second atelier a consisté à répertorier les ressources disponibles directement liées à la nature (à l'eau, à la forêt, par exemple), soit relever de l'action anthropique (bâti, agriculture, industrie, par exemple). Des indicateurs quantitatifs leurs sont associés, ainsi qu'un indicateur temporel, si la ressource est soumise à une période de retour ou à une certaine cyclicité (Tableau 2).

Tableau 2: ressources citées par les participants

Ressources	Indicateurs quantitatif	Indicateurs temporel
Pluie ruisselante	mm/jours, mm/an, intensité (mm/h), coefficient de ruissellement	Année hydrologique
Pluie efficace	mm/an	Année hydrologique
Zones humides	Surface (ha), type (banale ou patrimoniale)	Année hydrologique
Cours d'eau	Débit, temps de concentration, variabilité du débit, SEQ eau	Année hydrologique
Eau potable	Turbidité : nb de jours avec une turbidité supérieure à la norme, nb de captages abandonnés/nb captages total, % d'assainissements aux normes	année hydrologique
Faune aquatique	Nb de poissons, diversité des poissons, bio indicateurs	Année hydrologique
Massifs boisés	Nb d'hectares, mètres linéaires	Annuel
Petit gibier de plaine	Nb de couples de perdrix aux 100 ha, nb de lièvres/km ²	annuel
STH	Hectares, euros versés/hectare (mae ⁵)	Année culturelle
Elevage herbivore	Nombre d'Ugb ⁶ /ha, nb d'ugb/sth (chargement), nb d'animaux par exploitation, sth ⁷ /sfp ⁸	Année culturelle
Cultures de printemps	Nb d'hectares de chaque culture, prix du marché, aides PAC, surfaces sous certification	Année culturelle
Cultures d'hiver	Idem culture de printemps	Année culturelle
Sols agricoles fertiles	Rendements, diversité des cultures, valeur vénale, pertes en terres	Bail agriculteur, année culturelle
Sols constructibles	Hectares	Documents d'urbanisme
Sols qui s'urbanisent	Ha/an, nb de parcelles	Année civile
ZAI, ZAC	Nb d'emplois, surface	annuel
Voiries	Mètres linéaires, surface	
Ouvrages hydrauliques structurants	Nb d'ouvrages, capacité de stockage (m3/ha), m3/ha de surface potentiellement ruisselante	Année hydrologique
Périmètres de protection captage AEP	Ha/an, surfaces en DUP	
Aides environnementales	Volume financier, nb d'agriculteurs inscrits dans une démarche environnementale	Année PAC, année culturelle
Temps disponible	Nb d'ha/exploitant, nb d'uth ⁹ /100ha, uth/sau, uth/ugb	Année culturelle
Eléments fixes du paysage	set ¹⁰ /sau	Année PAC
Paysage-cadre de vie	Nb de gîtes/km ² , nb de chemins de randonnée	annuel

⁵ Mesure agro-environnementale

⁶ Unité gros bovins

⁷ Surface toujours en herbe

⁸ Surface fourragère principale

⁹ Unité de travail humain

¹⁰ Surface équivalent topographique

- *La gestion du ruissellement-érosion et les ouvrages d'hydraulique douce*

Le syndicat de bassin versant a une position centrale. Il est concerné par l'écrêtement structurel des eaux de ruissellement, que ce soit par le biais d'ouvrages d'hydraulique douce ou structurante :

- Il a une activité d'animation auprès du monde agricole, afin de sensibiliser ce dernier et inciter les agriculteurs à implanter des éléments fixes de paysages. Il peut aussi signer une déclaration d'intérêt général (DIG), et ainsi être porteur de projets d'implantation d'aménagements d'hydraulique douce.
- Il met aussi en place des ouvrages d'hydraulique structurants (bassins de rétention, prairies inondables, trouver des financements, auprès du Conseil Général et de l'AESN en particulier, et obtenir le foncier nécessaire à la mise en place de ces aménagements dont l'emprise est parfois importante. la SAFER¹³ peut être missionnée pour dégager des terres : elle possède un droit de préemption pour cela.

Il est moins central dans la dynamique d'urbanisation : il n'est que consulté pour chaque projet d'urbanisation et doit émettre un avis simple sur chaque demande de permis de construction.

Le syndicat d'eau doit résoudre les problèmes de turbidité de l'eau aux captages : soit en se portant maître d'ouvrage pour réaliser des ouvrages d'écrêtement, soit en concertation avec le syndicat de bassin versant.

- *L'urbanisation*

L'urbanisme est dépendant des maires au travers des documents d'urbanisme (PLU, SCOT, carte communale) définissent les zones à urbaniser dans le futur. Les lots à urbaniser ont une surface comprise entre 500m² (à l'aval, plus proche de Rouen) et 2000m² (à l'amont, plus rural) et majoritairement entre 600 et 1200 m², bien que les SCOT recommandent de limiter la consommation d'espaces naturels et agricoles. Dans l'esprit des participants, la plupart des parcelles retenues pour les projets d'urbanisation sont des parcelles agricoles, et préférentiellement des prairies, puisque celles-ci ont une valeur agricole moindre (élevage est moins rentable que les cultures, terres de moindre qualité donc difficilement cultivables), alors que dans les diagnostics de SCOT, cette expansion se fait autant au détriment des surfaces labourables (source : rencontre régionale des SCOT de Haute Normandie – mai 2010). Les documents d'urbanisme prennent en compte les risques liés au ruissellement-érosion via une étude hydraulique (passages d'eau, zones de production de ruissellement, etc.). Le passage d'une parcelle d'un statut agricole à un statut constructible permet le captage d'une rente foncière importante, puisque le rapport du prix d'un terrain agricole par rapport à un terrain constructible peut être de 1 à 100. Cette spéculation foncière peut pousser les propriétaires (agriculteurs ou non) de terres agricoles à influencer les élus dans leurs réflexions sur le plan de développement de leur commune, document de base fondant le PLU. Puis lors de l'enquête publique tenue sur la proposition de PLU, les habitants peuvent donner leur avis sur la proposition des élus. Dans le modèle nous avons représenté cette concertation par une discussion entre maire et agriculteurs sur le PLU.

Lorsque les terres passent en zones à urbaniser futures, cela ne signifie pas qu'elles vont être construites sur le champ. Les parcelles doivent d'abord être vendues à un aménageur foncier ou un lotisseur, ou bien à un particulier, qui eux vont lancer un projet de construction dessus.

¹³Société d'aménagement foncier et d'établissement rural

Là aussi la SAFER intervient pour réguler la transaction. Le propriétaire peut lui aussi avoir un projet de construction, mais c'est plus rare sans vente de la parcelle. Le lotisseur n'a pas été représenté dans le modèle, et il a été considéré qu'à partir du moment où une parcelle était vendue par le propriétaire (« sols urbanisables »), elle devenait automatiquement du « sol urbanisé ».

- *Le monde agricole*

Les agriculteurs ont été divisés en deux catégories : les éleveurs bovin et les polyculteurs (céréaliers, cultures industrielles, etc.). Les premiers peuvent valoriser des surfaces en herbe intéressantes pour limiter le ruissellement. Les seconds génèrent potentiellement plus de ruissellement et peuvent aussi être plus impactés par l'érosion dans leurs parcelles labourées.

Le contexte politico-économique n'étant pas très favorable à l'élevage, et plus particulièrement l'élevage laitier (quotas laitiers, DPU¹⁴ favorables aux cultures, activité consommatrice de temps, etc.), la tendance va plus vers un développement des exploitations de grandes cultures au détriment de celles d'élevage. Cela a pour conséquence une baisse des Surfaces toujours en herbe (STH) puisque des prairies sont retournées.

L'activité agricole peut aussi être influencée par un ensemble d'acteurs issus du domaine du conseil ou de l'animation : coopératives agricole, entreprise de négoce, chambre d'agriculture, syndicat de bassin versant, d'eau, ou autres. Ce conseil peut être de nature variée : les entreprises de négoce et les coopératives vont plutôt apporter un conseil au niveau de la production, mais la chambre d'agriculture et le syndicat de bassin versant apportent aussi un conseil en matière de gestion des problèmes de ruissellement-érosion (pratiques culturales, hydraulique douce). Les agriculteurs peuvent aussi prendre volontairement l'initiative d'implanter des ouvrages d'hydraulique douce : haies, fascines, mares, noues, etc. Ils peuvent pour cela obtenir une aide financière de la part du Conseil Général ou de l'AESN.

Les agriculteurs qui sont propriétaires de leurs terres peuvent aussi être intéressés par le changement de statut de celles-ci, afin de capter la rente foncière générée par ce dernier. Il se peut alors qu'à ce moment là, ils interagissent avec des élus, si un document d'urbanisme est en cours de révision ou d'élaboration.

- *Les aides pour l'hydraulique douce*

Les deux principales sources de financement mobilisables pour mettre en place des aménagements d'hydraulique douce en Seine-Maritime sont l'AESN et le Conseil Général. Il existe des aides versées directement aux agriculteurs, qui rentrent pour la plupart dans le cadre du PDRH¹⁵. La mesure 121 (Plan végétal pour l'environnement) permet d'octroyer une subvention pour la mise en place de haies à hauteur de 40% des coûts engendrés pour l'agriculteur. La mesure 216 attribue une aide à hauteur de 60 à 80% pour mettre en place des fascines, noues, talus ou mares. Enfin il y a la mesure 214, qui prend la forme d'une MATER¹⁶, et qui est liée à de la remise en herbe et à du maintien de surfaces herbagères.

Il existe ensuite des aides versées directement aux collectivités (il s'agit souvent des syndicats de bassin versant), si celles-ci possèdent les compétences et prennent une déclaration d'intérêt général (DIG). La subvention s'élève à 100%, prise en charge par plusieurs financeurs désignés durant les réunions du CTQE¹⁷ au niveau du département, sur un projet donné concerné par l'hydraulique douce. L'AESN propose aussi aux collectivités une aide pour le

¹⁴ Droits à paiement unique : subventions de la PAC

¹⁵ Plan de développement rural hexagonal

¹⁶ Mesure agro-environnementale territorialisée

¹⁷ Conseil technique pour la qualité de l'environnement

rachat de foncier dans le cadre de remise en herbe stratégique, qui s'élève à 60%, plus 40% prêtés à taux 0. Il existe enfin une aide spécifique provenant de l'AESN (40%) et du Conseil Général (60%). Cette aide est attribuée au travers d'un syndicat de bassin versant, mais les agriculteurs doivent faire une demande individuelle en parallèle.

2.3.3. *Échelles d'espace et de temps*

Durant les ateliers de co-conception, la discussion a aussi porté sur les échelles spatiales et temporelles qu'il serait pertinent de mobiliser pour mener une réflexion sur la question posée, et pour concevoir un jeu de rôles qui répondrait aux besoins de la concertation.

- Concernant l'aspect spatial, le bassin versant a rapidement été mis en avant comme étant l'unité la plus appropriée. Il met en exergue les dynamiques géophysiques (ruissellement, érosion, engouffrement dans les bétouilles) influencées par les actions anthropiques (pratiques culturales, occupations du sol, aménagements, urbanisation). Le rôle du syndicat de bassin versant apparaît être au cœur du modèle. L'idée de représenter plusieurs communes a fait l'unanimité afin de voir dans quelle mesure un dialogue entre élus pourrait s'établir. Il a donc été décidé de représenter trois communes, sur un bassin versant d'environ 2000 hectares.
- Pour l'activité agricole, l'exploitation semblait être l'échelle la plus adaptée pour représenter différentes orientations d'occupation du sol, de transfert de parcelles à l'urbanisation, de stratégies d'action contre le ruissellement.
- L'échelle de la parcelle est l'unité de base au niveau de laquelle les décisions agricoles se matérialisent et influencent l'évolution de l'occupation du sol, avec des impacts différents en termes de ruissellement et d'érosion.
- Pour la problématique liée à la turbidité de l'eau potable, il a été décidé de représenter un captage d'eau potable, géré par un syndicat d'eau englobant les trois communes du bassin versant. La matérialisation d'une bétouille particulièrement active, directement reliée à la nappe prélevée par le captage, permet de faire apparaître des problèmes de turbidité.

Pour ce qui est de l'aspect temporel, il fallait pouvoir illustrer des effets de stratégies de gestion des risques de ruissellement sur le long terme en tenant compte de la lenteur des effets des aménagements, de la diversité des années climatiques, de la vitesse de progression de l'urbanisation. Un compromis a été trouvé avec un modèle simulant une évolution sur 8 ans du bassin versant, comprenant des décisions annuelles d'aménagement, une communication annuelle des dégâts d'érosion et de turbidité, et une succession d'années climatiques contrastées comprenant 4 années avec des orages hivernaux ou estivaux violents afin de susciter le plus de réflexions possibles sur ces enjeux. Ces 8 ans seraient en fait composée de 2 périodes : deux phases d'aménagement (une première sur une base volontaire subventionnée à 80%, une seconde où l'hydraulique douce serait imposée par une DIG avec financement à 100%) coïncidant avec une négociation d'un PLU avec un ajustement à mi parcours.

3. Le modèle sous-jacent au jeu de rôle Ruis'eau (Ruissellement, Eau potable, Agriculture, Urbanisation)

Pour construire le jeu de rôles Ruis'eau, on propose à partir de la vision simplifiée des acteurs un modèle qui s'articule selon deux modules, l'un en lien avec les processus physiques (ruissellement, érosion, turbidité) et l'autre avec les processus décisionnels qui résultent des conditions socio-économiques. Il existe des phénomènes de rétroaction entre les deux compartiments du modèle qu'il faut parvenir à coupler

3.1. Modélisation du ruissellement érosif

3.1.1. Structure du module de ruissellement et d'érosion

Depuis quelques années les modèles de calcul du ruissellement et de l'érosion sont en mesure de prendre en compte les évolutions spatiales et temporelles des états de surface. C'est le cas (pour les sols limoneux) du modèle STREAM (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion in relation with Agricultural Management) développé par les équipes de Sciences de sol de l'INRA et de l'UMR SAD APT de Grignon. Connue de plusieurs acteurs locaux et calibré dans la région c'est le modèle qui a été choisi. Il s'agit d'un modèle distribué défini à l'échelle de l'événement pluvieux et qui permet de quantifier le ruissellement (de type Hortonien) et l'érosion, en localisant les zones où se produisent ces phénomènes. Les résultats des simulations sont aisément visualisables, puisque le modèle a été intégré dans un SIG (sous l'interface ArcGis). Il est catégorisé comme un modèle de type expert. En effet, il se base sur des processus physiques connus (infiltration, ruissellement) desquels sont extraits des paramètres clés dans la représentation des mécanismes et utilisés ensuite dans des règles de décisions. L'hypothèse de base du modèle vient du constat selon lequel sur la plupart des sols à texture limoneuse le ruissellement et l'érosion résultent de la diminution de l'infiltrabilité en lien avec la dégradation structurale de la surface des sols, sous l'action des précipitations (croûte de battance), l'influence de la rugosité (pratiques culturales) et le couvert végétal (voir 2.2.1).

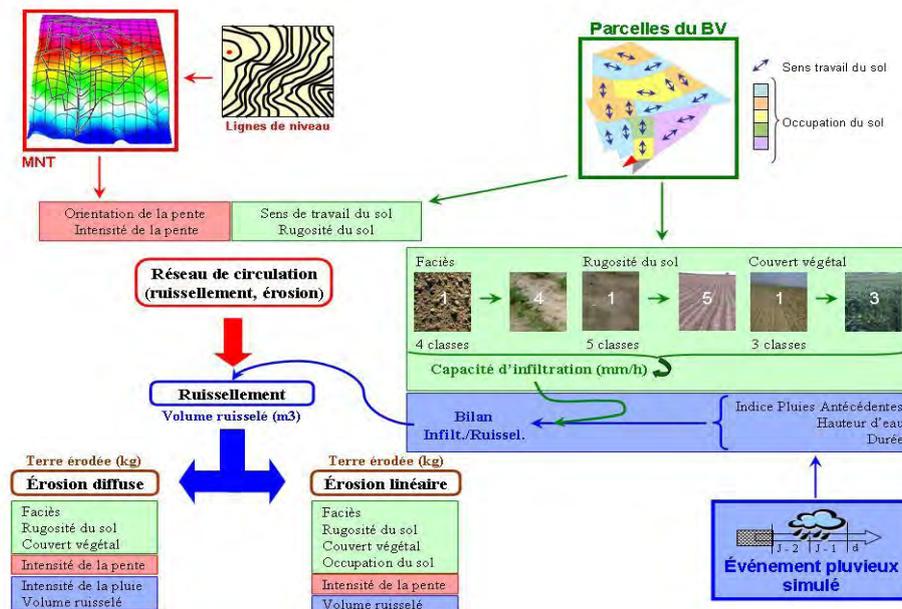


Figure 17 : schéma de fonctionnement global du modèle STREAM (Anglade 2011)

Quatre modules composent l'architecture du modèle (Figure 17): trois pour représenter la fonction de production (ruissellement, érosion diffuse et érosion linéaire) et un pour représenter la fonction de transfert (écoulement ou réseau de circulation).

- *Module infiltration (Cerdan et al., 2002)*

A l'échelle de la maille, la hauteur d'eau ruisselée ou infiltrée est calculée par un simple bilan { partir des caractéristiques de l'épisode pluvieux (hauteur de pluie, durée efficace), de la pluie d'imbibition (hauteur de pluie nécessaire pour atteindre la saturation) et de la capacité d'infiltration.

$$B = PC - PI - (CI \times D)$$

B : bilan en mm ; PC : hauteur de pluie cumulée sur 48 heures mm ;

PI : pluie d'imbibition mm ; CI : capacité d'infiltration mm/h ; D : durée efficace h

Afin de calculer ce bilan infiltration-ruissellement, chaque parcelle se voit allouer une capacité d'infiltration qui résulte de la combinaison des paramètres d'état de surface (faciès, rugosité et couverture végétale), qu'il faut renseigner.

- *Module écoulement*

Le module écoulement permet de calculer la direction des flux au niveau de chaque pixel et de transférer les lames d'eau accumulées. Les méthodes de calcul de ce transfert s'appuient sur des règles de décisions qui intègrent en sus de la topographie (obtenue par MNT), les conséquences des actions anthropiques qui influencent le trajet de l'eau : pratiques agricoles (sens de travail du sol, traces de roues, dérayures, fourrières) et éléments du paysage canalisant l'écoulement (routes, haies, fossés...) (Souchère, 1995 ; Souchère, 1998). En effet, en perturbant la rugosité de surface, le travail du sol peut forcer les directions d'écoulement. En cas de forte rugosité dans le sens perpendiculaire au travail du sol, l'écoulement suit les sillons, donc le sens du travail du sol. Sinon, les directions d'écoulement sont déterminées grâce à une fonction discriminante qui intègre l'intensité de la pente et l'angle entre l'orientation de la pente et celle du travail du sol. Quant aux éléments linéaires du paysage ils créent des chemins préférentiels de l'eau. Ainsi, s'il existe une dérayure (sillon), le module d'écoulement établit la direction de flux selon le sens et la pente de la dérayure.

- *Module érosion diffuse*

Les états de surface, la rugosité, le couvert végétal ainsi que l'intensité maximale de pluie ({ 6 minutes) ont une influence sur la concentration potentielle en sédiments du ruissellement (Cerdan, 2002b). Selon, différentes combinaisons des précédents facteurs, des classes de concentration potentielle des sédiments sont regroupées dans un tableau de décision à entrées multiples. Ce tableau résulte de la formalisation de résultats essentiellement qualitatifs obtenus pour la plupart en milieu naturel (Cerdan, 2002a) à partir des mesures de concentrations sédimentaires sous différentes conditions climatiques, états de la surface du sol, couvertures végétales... Cette concentration potentielle en sédiments s'exprime à l'échelle de la parcelle. A l'échelle du bassin versant, les sédiments sont transportés proportionnellement aux volumes ruisselés, et des processus de dépôts sont pris en compte. Ils surviennent lorsque la charge sédimentaire contenue dans le ruissellement excède sa capacité de transport. Cette dernière diminue en fonction des variations topographiques (convexité verticale et intensité de la pente) et/ou du couvert végétal. Les seuils de concentration maximum en sédiments ont été déterminés expérimentalement.

- *Module érosion concentrée (Souchère, 2003)*

Les facteurs prépondérants retenus pour modéliser l'érosion concentrée sont le volume ruisselé et la vitesse critique d'incision du sol qui combine un facteur de friction et un facteur de cohésion. De sorte que pour chaque pixel, une sensibilité à l'érosion concentrée est calculée selon la formule :

$$\text{Sensibilité} = \text{Pente} \times \text{volume d'eau ruisselé} \times \text{facteur de friction} \times \text{facteur de cohésion}$$

3.1.2. Représentation de l'environnement : caractéristiques du bassin versant (morphométrie, occupation du sol)

Des discussions de la phase d'élaboration du modèle conceptuel a émergé un jeu d'échelles imbriquées pour la gestion du ruissellement érosif: la parcelle, l'exploitation agricole, et le bassin versant (qui est l'échelle la plus appropriée pour visualiser les interdépendances).

En raison de la complexité des phénomènes de ruissellement érosif et de la dégradation de la qualité de l'eau, la mise en discussion des solidarités de bassin, ne peut se faire qu'à partir d'une représentation « juste » ou du moins la plus réaliste possible des mécanismes « naturels » en jeu. En effet, afin de faire comprendre les conséquences globales sur l'environnement de décisions souvent individuelles, il s'agit de parvenir à simuler techniquement les processus de ruissellement érosif pour générer des ravines, des risques d'inondations, et des problèmes de turbidité.

Le modèle doit permettre d'organiser plusieurs sessions de jeu sur le territoire du SAGE Cailly-Aubette-Robec, au sein duquel, les systèmes de productions agricoles sont assez proches et les enjeux de protection de la ressource partagés (érosion, turbidité). Il s'agit donc de recréer un bassin versant « fictif » mais suffisamment réaliste pour que des enseignements pertinents pour l'action sur le terrain soient tirés du jeu.

Le territoire a été créé par SIG en référence au territoire du Haut-Cailly mais sur un territoire plus petit pour limiter les contraintes de calcul. Le groupe d'acteurs a discuté les positions des routes et villages le type d'agriculture ainsi que le pourcentage de terres arables, de bois et de prairies (Figure 18). Les surfaces potentiellement ruisselantes représentent 65 % du bassin, ce qui fait des agriculteurs les principaux aménageurs du territoire en termes de surface.

Tableau 4 : occupation du sol sur le bassin virtuel d'Estampeville-bellemarre

Occupation du sol	Bois	Prairies	Terres cultivées	Voirie et zones urbanisées
surface	292.8	561.2	1507.92	78.08

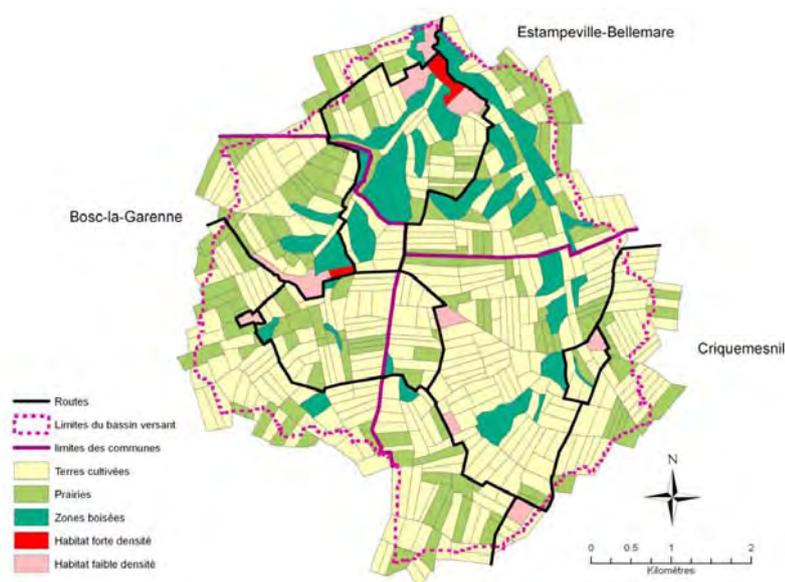


Figure 18 : Carte d'occupation des sols du bassin fictif d'estampeville-Bellemarre (Anglade 2011)

Classiquement, on considère que les caractéristiques physiographiques d'un bassin influencent fortement sa réponse hydrologique. Ici, (Figure 19), des caractéristiques morphométriques similaires à celles du Haut Cailly (en particulier la forme du réseau hydrographique) ont été reproduites à partir du traitement SIG du modèle numérique de terrain du bassin versant du Dun d'une surface de 24,4 km².

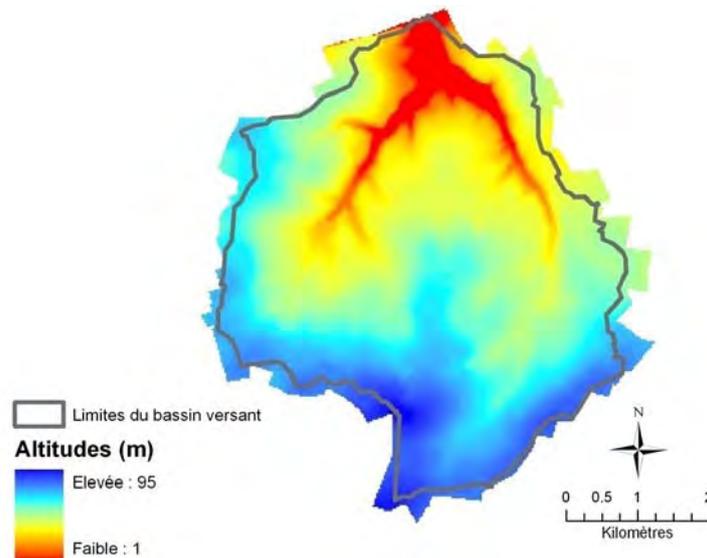


Figure 19: Carte du relief du bassin versant d'Estampeville-Bellemare (MNT à 25 m)

Les écoulements sont influencés par le relief, d'une part par la variation des paramètres hydrométéorologiques avec l'altitude et d'autre part du fait du lien entre vitesse d'écoulement et pente. La répartition hypsométrique fournit une vue synthétique du relief. Elle rend compte de la superficie du bassin en fonction de son altitude. Le dénivelé utile est de 47 mètres (amplitude qui correspond à 90 % de la surface en négligeant les 5 % les plus hauts et plus bas du bassin : $D = Z_5 - Z_{95}$). On peut alors accéder à une représentation simplifiée du bassin sous la forme d'un rectangle dit « équivalent », c'est-à-dire un rectangle qui possède la même aire, le même périmètre et la même répartition altitudinale que le bassin versant considéré. Le rapport du dénivelé utile à la longueur du rectangle équivalent du bassin permet d'obtenir l'indice global de pente I_g . Une seconde représentation simplifiée de la forme du bassin consiste à calculer un indice de compacité, le coefficient de Gravelius (KG: rapport du périmètre du bassin à la circonférence du cercle de même superficie). Il est ici égal à 1,27 et témoigne donc d'un bassin très ramassé (Tableau 5).

Un dernier élément déterminant pour traduire le comportement du bassin lors des précipitations est le temps de concentration. Il correspond au temps mis par une goutte d'eau tombée à l'extrémité du bassin versant pour rejoindre l'exutoire. Le temps de concentration du bassin a été calculé à partir des caractéristiques morphométriques (indice de compacité, indice de pente, longueur du rectangle équivalent, superficie) du bassin déterminées sous ArcGis et de plusieurs formules empiriques (Tableau 6). Les différences entre ces formules rappellent qu'on ne peut en principe pas accorder de valeur unique au temps de concentration qui varie notamment selon l'intensité de la pluie.

Tableau 5: Synthèse des caractéristiques morphométriques

Paramètres	Formules empiriques	Résultats
KG	$0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	1,27
A (km ²)		24,40
P (km)		22,40
Z max		98,00
L (km)	$\frac{K\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K}\right)^2} \right]$	8,11
Ig (m/km)	$\frac{D}{L}$	5,80
z95 (m)		2,00
z5 (m)		49,00
D= Z ₅ -Z ₉₅		47,00

(KG : coefficient de Gravelius, A : Aire, P : périmètre, Z : dénivelé, L : longueur du rectangle équivalent, Ig : Indice global de pente, z95 : 5^{ème} centile, z5 : 95^{ème} centile D : dénivelé utile)

Tableau 6 : Formules empiriques de détermination du temps de concentration, D: temps de montée de l'hydrogramme SOCOSE

	Formules empiriques	Résultats
Ventura (mn)	$76,3 \left(\frac{\sqrt{A}}{\sqrt{I}} \right)$	156,3
Passini (mn)	$64,8 \left(\frac{(L \cdot A)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{I}} \right)$	145,1
D Cemagref (mn)	$\text{Exp}(0,375\ln(A)+3,729)$	138,00

3.1.3. Paramétrage des simulations

Détermination des événements d'occurrence décennale

La Seine Maritime est soumise à un climat de type océanique, doux et pluvieux toute l'année. Deux types d'événements pluvieux en particulier sont générateurs d'inondations: les longues pluies d'hiver et les orages violents d'été. C'est pourquoi, initialement, un pas de temps biannuel (décembre et juin) avait été choisi avec les acteurs pour le calcul du ruissellement et de l'érosion. Il s'agit de deux périodes de l'année associées à un risque climatique important, tandis que les conditions de surface du sol sont relativement stables avec peu de changement dus aux activités agricoles. Néanmoins, suite à un premier test de l'outil avec une communauté de pratique (pour des raisons de simplification notamment du fait de la durée des ateliers), seuls les violents orages d'été ont été retenus. Cette décision se justifie également par le fait que les acteurs locaux n'ont pas souhaité que le modèle intègre les décisions d'assolement et le choix des itinéraires techniques, cet aspect faisant déjà l'objet d'un support d'animation dédié et spécifique (jeu Caux-opération – Souchère et al. 2009).

Ruis'eau est conçu pour simuler des problèmes fréquents pour lesquels un aménagement concerté du bassin pourrait apporter des solutions. En d'autres termes on ne traite pas des crues de fréquence exceptionnelle dont les conséquences relèvent de la gestion de crise, mais l'on cherche à représenter les conséquences d'une crue d'occurrence décennale, qui alternera

avec des périodes sans désordres hydrologiques. Deux questions de modélisation se posent alors :

- 1) Qu'elle est la crue de période de retour dix ans sur notre bassin fictif ?
- 2) Quelles sont les caractéristiques de l'événement pluvieux pouvant la générer ?

Pour répondre à ces questions, on propose une analyse comparée des résultats issus des modèles pluie-débits classiques, du modèle distribué STREAM et des dire d'experts régionaux

- *Modèles pluie-débit*

En hydrologie, l'évaluation d'une crue d'occurrence décennale est un problème classique. Pour les bassins versants sans observation hydrométriques, deux méthodes sont plus particulièrement utilisées en France : CRUPEDIX et SOCOSE (Ministère de l'Agriculture Français, 1980-1982). La méthode CRUPEDIX possède l'avantage d'être simple d'utilisation. Elle est applicable pour des bassins versants de surface comprise entre 10 et 2000 km². L'hypothèse principale est celle d'une corrélation significative entre le débit décennal maximal instantané, la superficie et la pluie journalière décennale selon la formule suivante :

$$QIX = R \cdot S^{0,8} \cdot \left(\frac{P}{80}\right)^2$$

P : pluie décennale journalière en mm ; S : superficie du bassin versant en km ; R : coefficient régional

Les conditions locales renvoient à une pluie journalière décennale de 51 mm (http://www.seine-maritime.gouv.fr/IMG/pdf/plaquette_p13770.pdf) et à un coefficient régional de 2,552 (communication AREAS).

Le débit de pointe journalier (débit maximal pour une précipitation donnée) s'exprime:

$$QIX = 1.037 \cdot SPR^{0,8}$$

SPR : Surfaces potentiellement ruisselantes

Sur notre bassin, le débit de pointe décennal obtenu s'élève à 9,46 m³/s.

Un des inconvénients de cette méthode est qu'elle ne permet pas d'accéder à une durée caractéristique de crue et donc, par conséquent, à un hydrogramme de projet. Pour accéder à un volume de crue on a recours à l'hydrogramme de SOCOSE (Ministère de l'Agriculture Français, 1980-1982). L'hydrogramme unitaire de la méthode SOCOSE a été développé par le CEMAGREF pour l'estimation des crues sur les petits bassins versants ruraux (2 à 200 km²). Il permet de définir un temps caractéristique afin d'évaluer le volume de crue décennal. Le temps de montée de l'hydrogramme $t_m = D$ représente la durée pendant laquelle le débit est supérieur à la moitié du débit de pointe de la crue décennale.

$$Q(t) = \left(\frac{2,35}{D}\right) \cdot \left[\frac{\left(\frac{t}{D}\right)^4}{1 + \left(\frac{t}{D}\right)^8} \right]$$

$$D = \exp(0,375 \cdot \ln(S) + 3,729)$$

Q(t): Débit à l'instant t (m³/s); S : Surface (km²)

Ici, D = 138 mn. On remarque que sur notre bassin de petite taille, D est peu différent des temps de concentration déterminé avec les formules empiriques.

La méthode SOCOSE nous permet de prévoir un volume ruisselé de 66 359 m³.

- *STREAM*

Une seconde méthode pour évaluer le volume de crue décennal consiste à utiliser le logiciel STREAM. Pour renseigner les paramètres caractéristiques de l'événement pluvieux, on consulte les experts régionaux (AREAS, AESN, SAGE), qui donnent une référence locale de 31 mm en deux heures (soit une durée proche du temps de concentration du bassin d'Estampeville-Bellemare). On vérifie cet ordre de grandeur avec les données statistiques Météo France de la station Rouen-Boos. Les coefficients de Montana associés à une période de retour 10 ans pour un temps de concentration de deux heures sont $a = 12,310$ et $b = 0,811$. La formule de Montana nous permet alors d'accéder à une hauteur de pluie décennale régionale en deux heures de :

$$H = a.t^{1-b} = 30,4 \text{ mm}$$

H: Hauteur de pluie (mm); t : pas de temps (mn) ; a et b : coefficients de Montana

Il faut également renseigner l'intensité maximale de pluie et les conditions d'humidité antérieure. A nouveau d'après l'expertise des acteurs locaux, on fixe l'intensité maximale à 60 mm. Enfin, on considère arbitrairement une pluie antécédente de 0 mm (pluie nulle des 48 h précédentes), pour simuler les conséquences d'un orage d'été survenant sur sol sec.

On simule alors sur notre bassin virtuel quatre années d'occupation du sol en recourant au logiciel LandSFACTS Landscape Scale Functional Allocation of Crops Temporally and Spatially) (Castellazzi et al., 2010) pour tenir compte de la rotation des assolements. On obtient à l'exutoire un volume de $64\,493 \text{ m}^3 \pm 874 \text{ m}^3$.

Remarque : En paramétrant ainsi l'événement pluvieux, on a fait la même hypothèse forte que pour les modèles pluie-débit, qui consiste à considérer qu'une pluie décennale est à l'origine d'une crue décennale.

- *Confrontation du modèle avec les « observations »*

Les résultats du modèle STREAM et de la méthode SOCOSE sont très proches, avec un volume de crue à l'exutoire de l'ordre de $65\,000 \text{ m}^3$. On cherche à savoir si ce résultat s'avère compatible avec les observations de terrain menées par l'AREAS. Pour cela il est nécessaire de raisonner non plus en m^3 mais en lame d'eau ruisselée car cela permet de s'affranchir des effets de surfaces. En 2003, l'Association Régionale d'Etude et l'amélioration des sols a produit un rapport (Helloco, 2003) pour la mise en place d'un système d'anticipation des désordres hydrologiques en Seine Maritime. Il est basé sur la comparaison entre des moyennes climatiques sur la période 1970-2000, la base d'événements CatNat (qui recense les inondations et dégâts liés au ruissellement), ainsi que des coupures de presse. Parmi les conclusions de ce rapport, des dégâts importants ont été observés pour des lames d'eau ruisselées supérieures à 3 mm. Lors de la crue exceptionnelle de 1999 (de l'ordre de la cinquantennale), l'expert régional de l'AREAS rapporte une lame d'eau généralisée de 10 mm. Ces résultats nous fournissent les bornes d'un intervalle à ne pas dépasser pour simuler des désordres hydrologiques d'une période de retour de 10 ans cohérent avec les observations locales. Sur notre bassin, les surfaces potentiellement ruisselantes (hors bois et prairies) représentent 65% de l'occupation du sol soit 1586 ha. Avec un volume simulé de $65\,000 \text{ m}^3$ qui correspond à une lame d'eau de 4,1 mm, les choix de paramétrage du modèle STREAM (couverture végétale, rugosité, faciès, sens du travail du sol, rugosité, hauteur et durée de la pluie, humidité antérieure) fournissent un résultat plausible.

Détermination des événements d'occurrence biennale

La structure du jeu de rôle fait alterner sur 8 années des séquences où le ruissellement et l'érosion ne constituent pas de danger envers les biens et les personnes et d'autres qui sont représentatives des crues décennales observées dans la région. Cette construction offre ainsi

une alternance de phases de sensibilisation des acteurs (événements climatiques « graves ») ; de concertation et d'action (sans événement grave) et d'évaluation/réaction (suite à un nouvel événement climatique grave). La justification de ce séquençage sera détaillée en chapitre III. La répétition de 4 événements d'occurrence décennale en 8 ans sert les objectifs du jeu, mais reste possible statistiquement (une crue de période de retour 10 ans ayant chaque année une probabilité d'apparition de 0,1).

Le calibrage des événements catastrophiques a été présenté dans le paragraphe précédent. De la même façon, pour définir les caractéristiques des événements « standards », on se réfère dans un premier temps aux statistiques pluviométriques locales ainsi qu'aux observations.

A la station de Boos-Rouen, pour une période de retour de deux ans et un temps de concentration de deux heures, les coefficients de Montana sont $a = 6,057$ et $b = 0,757$. La formule de Montana nous permet d'accéder à la lame d'eau précipitée, on obtient :

$$H = a.t^{1-b} = 19,3 \text{ mm}$$

H: Hauteur de pluie (mm); t : pas de temps (mn) ; a et b : coefficients de Montana

Pour cette pluie biennale sur sol sec, et sur 4 années de simulation, le modèle STREAM renvoie un volume moyen de $8741 \text{ m}^3 \pm 258 \text{ m}^3$. L'écart moyen résulte du changement d'occupation des sols en lien avec la rotation des cultures. Ce volume de 8741 m^3 correspond à une lame d'eau généralisée de 0,55 mm sur les surfaces potentiellement ruisselantes. On vérifie que cette valeur est bien inférieure à la valeur seuil de 3 mm génératrice de désordres hydrologiques à l'origine des déclarations de catastrophes naturelles.

3.1.3. Principaux résultats de la modélisation du ruissellement érosif

On fournit ici un récapitulatif des choix de paramétrages de la séquence d'événements pluvieux qui servent à rythmer le jeu et des résultats du ruissellement et de l'érosion qui en résultent (Tableau 7).

Tableau 7: Paramétrages des scénarios pluviométriques du modèle Ruis'eau et principaux résultats

		Etés « Standards »	Etés « catastrophiques »
Pluviométrie	Hauteur (mm)	19,3	31
	Durée (h)	2	2
	Antécédent (mm)	0	0
	Intensité à 6 min (mm)	60	60
Ruissellement	Volume moyen (m^3)	8741	64493
	Ecart moyen (%)	10	0,4
	Lame Ruisselée (SPR) (mm)	0,55	4,1
	Coef. ruissellement (%)	1,9	8,5
Erosion	Erosion totale moyenne (T)	447	9124
	Ecart moyen (%)	10	0,9
	Erosion totale (T/ha)	0,18	3,7
	Erosion diffuse moyenne (T)	11,9	276

Le volume d'eau associé à une pluie « catastrophique » de période de retour dix ans est environ sept fois plus élevé que le volume généré par une pluie « standard » d'occurrence biennale. L'érosion (diffuse et concentrée) étant fonction du volume d'eau ruisselé, la masse de terre à l'exutoire augmente dans le même sens que le volume ruisselé. Quantitativement, l'érosion diffuse ne représente que 3 % de l'érosion totale, mais spatialement, l'écoulement en nappe est généralisée sur toutes les portions ruisselantes du bassin, alors que l'érosion linéaire se concentre dans des ravines d'au plus quelques mètres de large (Figure 20). On note par

ailleurs que pour les étés catastrophiques l'écart moyen entre les 4 scénarios d'assolement élaborés sous LandsFact est inférieur à 1 %. On pourrait penser que cela signifie que le changement d'occupation du sol dû uniquement aux rotations culturales influe peu sur le ruissellement et l'érosion car les types d'agriculture sont peu variés. Mais ce résultat pourrait aussi provenir d'un effet de lissage, en lien avec un ruissellement généralisé du bassin, par dépassement des capacités d'infiltration de toutes les cultures.

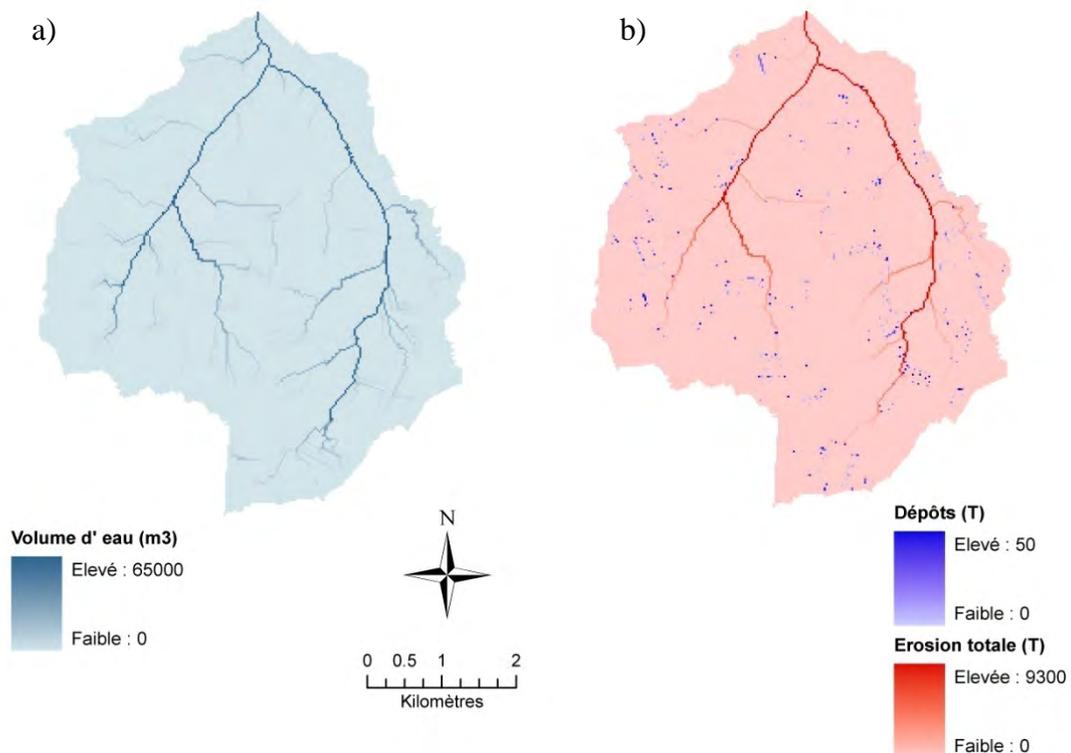


Figure 20 : Cartes de concentration du ruissellement a) et de l'érosion b) pour une crue décennale

Ces résultats auraient pu être obtenus avec de nombreuses autres combinaisons de paramètres, comme en diminuant la hauteur précipitée et en augmentant l'humidité du sol, ou en changeant les états de surface. La pluralité des méthodes employées pour obtenir le calibrage des scénarios de pluie ne doit pas disqualifier le modèle, dans la mesure où au contraire elle est l'acceptation du principe d'équifinalité présent dans tous les modèles distribués en hydrologie (Beven, 2001 ; Beven et al., 2001). Et bien que les modèles distribués aient une vocation descriptive des phénomènes, les simplifications nécessaires au processus de modélisation éloignent d'une représentation « vraie » des phénomènes. C'est pourquoi, on accepte de s'écarter des approches réalistes et des critères de vérité, pour se rapprocher d'une posture relativiste (Feyerabend, 1975) et d'un critère de fécondité. Car, finalement, ce qui est mis en discussion avec les acteurs ce sont les résultats du modèle. On notera tout de même que dans une volonté de concilier prédictivité et descriptivité, on ne recherche pas un optimum paramétrique mathématique mais un optimum paramétrique « physique », c'est-à-dire compatible avec les observations.

3.1.4. Pistes de réflexion et éléments de modélisation pour l'aménagement du bassin versant

Identification des zones à risque : aléa et vulnérabilité

L'identification des zones dites à risque est un élément clé dans la gestion intégrée du bassin. Un risque est élevé lorsque le produit de l'aléa et de la vulnérabilité est élevé. L'aléa ruissellement érosif est principalement lié à l'occupation des sols (majoritairement agricoles),

et aux caractéristiques pédologiques (sensibilité à la battance). Dans un contexte d'accroissement démographique, la diminution de la vulnérabilité liée aux inondations et coulées boueuses est complexe ; il est principalement question de parvenir à ne pas augmenter cette vulnérabilité aux travers de documents d'urbanisme (PLU et SCOT). Pour la vulnérabilité associée aux enjeux d'eau potable, les solutions comme l'interconnexion des réseaux ou la construction d'usines d'ultrafiltration sont également difficiles à mettre en place pour des petites et moyennes communes rurales. C'est pourquoi, une grande partie des efforts est concentrée sur la maîtrise de l'aléa. Les caractéristiques pédologiques et les conditions climatiques étant des facteurs naturels inchangeables, c'est l'occupation agricole du sol qui est mise en discussion dans cette partie. Chaque culture présente une sensibilité différente au ruissellement, ce qui se traduit par des capacités d'infiltration variables (Tableau 8).

Tableau 8 : Capacités d'infiltration des cultures d'été sur le bassin d'Estampeville-Bellemare

Cultures	Blé, Orge, Escourgeon	Colza	Lin	Maïs	Pomme de terre
CI (mm/h)	10	20	5	5	2

Il n'est pas possible d'accéder directement à une vision synthétique des principales zones qui favorisent le ruissellement à partir des capacités d'infiltration, en raison de la rotation culturale. En revanche, selon les types d'exploitations agricoles, les cultures et rotations diffèrent, et l'on peut donc imaginer attribuer à certaines parcelles des propriétés plus ou moins ruisselantes en fonction du type d'agriculture qui y est pratiqué. Ainsi, on élabore un indice de sensibilité au ruissellement qui synthétise par parcelle les rotations culturales sur 8 ans. L'indice construit est à base de points. Une capacité d'infiltration seuil de 5 mm/h a été fixée au dessous de laquelle une culture est considérée comme ayant un risque de ruissellement trop important ; un point est alors attribué. La somme des points sur huit années rend compte du degré de sensibilité au ruissellement (Figure 21).

Ce zonage permis par l'indicateur est révélateur du fait qu'un travail d'animation doit également porter sur les zones amont du bassin, dans des exploitations peu touchées par les dégâts (ravines) liés au ruissellement érosif (Figure 21), où le ruissellement n'est pas directement visible (pas de talweg) et qui pourtant y contribuent largement. Et c'est là l'un des objectifs majeur de l'outil Ruis'eau : rendre visible et responsabiliser tous les acteurs afin d'initier les voies possibles de la négociation. En pratique, les moyens de cette négociation sont l'implantation d'aménagements hydrauliques et/ou la réorganisation du parcellaire (échanges fonciers, remise en herbe).

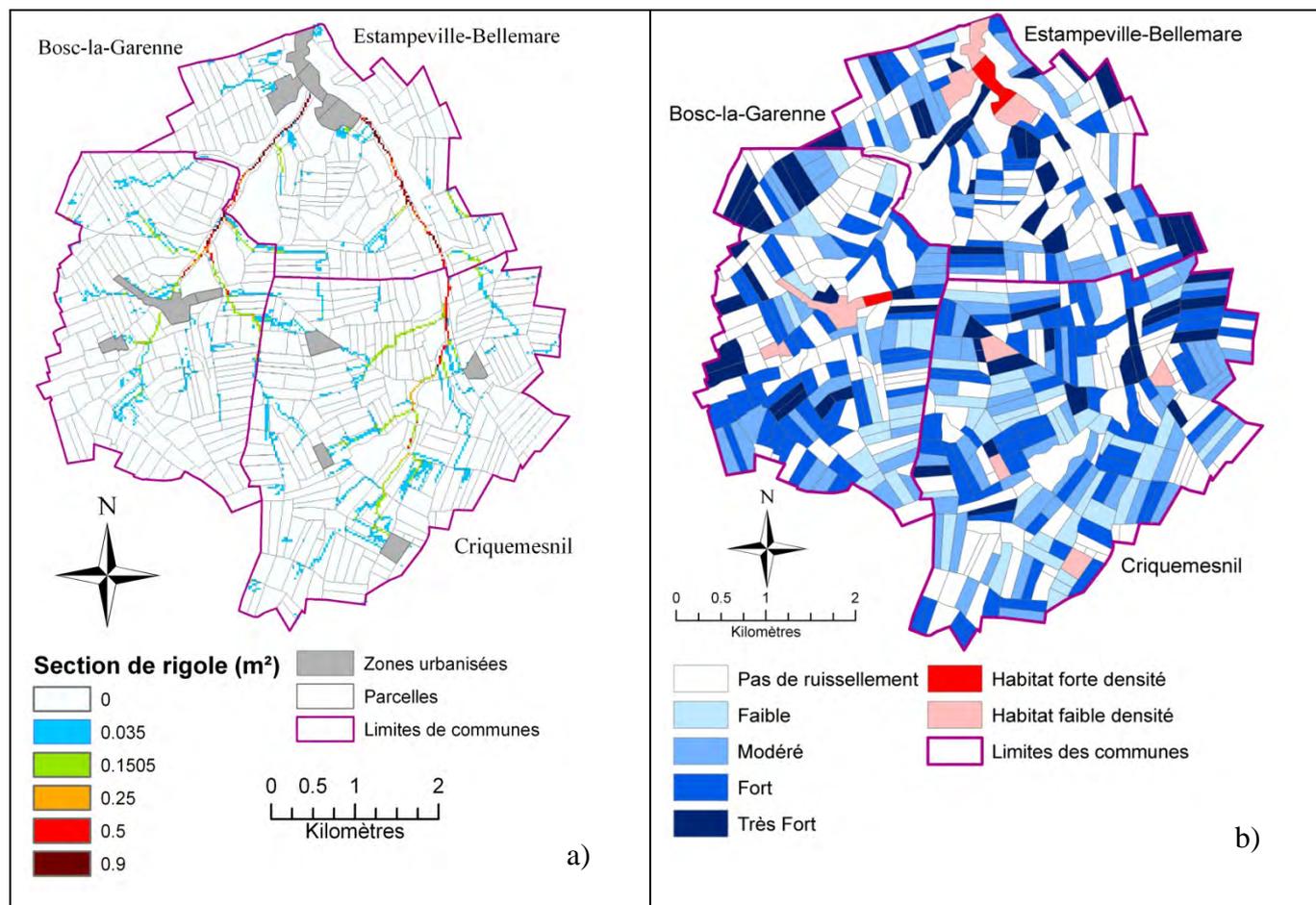


Figure 21: Cartes de sensibilité à l'érosion a) et au ruissellement b). (Anglade 2012)

Effets de l'aménagement du bassin versant sur le ruissellement et l'érosion dans Ruis'eau

Trois types d'aménagements sont possibles : les techniques dites *d'hydraulique douce* dans les parcelles des agriculteurs, les bassins de rétention considérés comme des *aménagements structurants* et enfin la *transformation des terres labourables en prairies*.

Aménagements d'hydraulique douce

Les acteurs ont la possibilité de modifier la quantité d'eau ruisselée et la masse de terre érodée via la mise en place d'aménagements. Dans le modèle, trois types d'ouvrages couramment utilisés sont mobilisables.

- **Zones enherbées**

Les bandes enherbées en bordure de parcelles et les chenaux enherbés en fond de talweg sont des surfaces couvertes par un enherbement pérenne couramment utilisées pour impacter sur le ruissellement et l'érosion. Elles sont considérées comme la solution la plus efficace pour limiter les ravines car, dans les fonds de vallons (zones les plus sensibles à l'érosion linéaire), elles permettent de protéger le sol de l'incision liée au ruissellement. Dans l'herbe, les écoulements sont ralentis et par effet « peigne » la terre transportée est déposée. La capacité d'infiltration d'une zone enherbée peut atteindre 200 mm/h, mais celle-ci est fortement réduite en cas de compaction liée au travail agricole ou même au piétinement des animaux qui pâturent. On notera par ailleurs que ces aménagements ont une action bénéfique sur les pollutions diffuses, en ralentissant le transfert des produits phytosanitaires et en accélérant leur dégradation.

- **Haies**

La haie constitue un obstacle perméable au ruissellement. Le ruissellement est ralenti par les tiges, ce qui favorise l'infiltration et la sédimentation des particules. En effet, au voisinage de la haie, l'infiltration est favorisée du fait de la forte perméabilité du sol en lien avec la teneur en matière organique et la présence de racines. Cet aménagement peut être positionné dans l'amont du bassin versant, avant que les ruissellements ne se concentrent ; mais il peut également être installé en fond de vallon où l'eau s'étale.

- **Fascines**

Une fascine forme un écran de banchage (5 à 10 m) par la constitution de fagots positionnés entre des pieux ou des arbres (fascine vivante). Elle se place en travers du ruissellement et permet de les freiner et de provoquer la sédimentation (en filtrant les sables et limons transportés). De surcroît, en réduisant la vitesse de l'eau, l'aménagement permet de limiter l'érosion sur plusieurs dizaines de mètres en aval.

La question de la quantification de l'efficacité des aménagements est délicate et relativement peu traitée. L'A.R.E.A.S mène actuellement des expérimentations de terrain et de laboratoire afin de déterminer empiriquement, les capacités d'infiltration de différents aménagements : haies, fascines, bandes enherbées, bois, fossés, mares tampons et leurs effets sur la rétention des matières en suspension (MES).

En se basant sur ces travaux (<http://www.areas.asso.fr/content/category/52/72>) complétés par un entretien avec Jean François Ouvry, président de l'AREAS), on retient pour les trois types d'aménagements les valeurs suivantes (Figure 22).

Fascine	Haie	Zone enherbée
		
<p>Sédimentation : 75 % des MES Infiltration : 460 mm/h (par mètre)</p>	<p>Sédimentation : 50 % des MES Infiltration: 700 mm/h (par mètre)</p>	<p>Sédimentation : 70 % des MES Infiltration : Bande enherbée en talweg: 200 mm/h (375 m²) Bande enherbée en fourrière : 20 mm/h (375 m²)</p>

Figure 22 : Efficacité des aménagements d'hydraulique douce dans Ruis'eau (Anglade 2011

Du point de vue informatique dans Ruis'eau chaque pixel de 625 m² se voit attribuer une nouvelle capacité d'infiltration qui tient compte de l'emprise surfacique de l'aménagement et de la surface laissée en culture. On procède de même façon pour la capacité de rétention des MES, avec une zone du pixel sans aménagement sur laquelle on applique les règles de transfert et de dépôt du module érosion diffuse de STREAM et une zone avec aménagement où les dépôts sont définis par le ratio de sédimentation de l'aménagement simulé.

Aménagement d'hydraulique structurante

L'implantation d'aménagements d'hydraulique douce sur les parcelles agricoles est freinée par : i) la perte de SAU générée par les aménagements, ii) la faiblesse de l'estimation par les agriculteurs des pertes de revenus agricole imputables à l'érosion, iii) la faiblesse des gênes

occasionnés par l'érosion dans la conduite des cultures, iv) des coûts et temps d'entretien, v) un scepticisme des agriculteurs sur les effets bénéfiques des aménagements sur leur parcelle (EPICES, 2008).

Très généralement, les communes optent pour la construction de bassins de rétention enherbés juste en amont des zones urbanisées afin de protéger directement les biens et personnes des inondations et coulées boueuses.

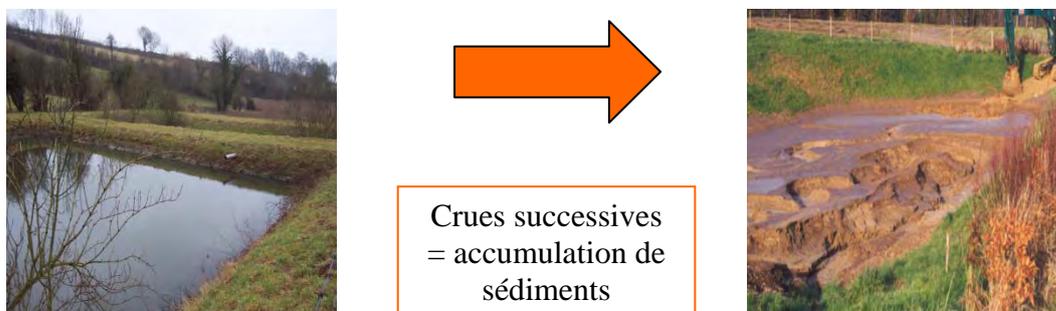


Figure 23 : Bassins de rétention en fonctionnement et bassin de rétention colmaté

Dans le modèle, selon l'emprise surfacique et la hauteur de l'ouvrage implanté, on attribue une capacité volumique de rétention. On exprime le volume occupé par l'accumulation des sédiments issus de l'érosion comme le rapport de la masse érodée (en T) par la densité apparente du sol (prise égale à 1.3). Lorsqu'un bassin ne possède plus que les deux tiers de sa capacité volumique de rétention, il est impératif de procéder à son curage. Selon les scénarios de crues décennales définis préalablement, un bassin de rétention d'environ 20 000 m³, qui permettrait de protéger des inondations le village situé à l'exutoire, serait comblé aux deux tiers au bout de seulement 4 années. Une fois le volume total occupé par des sédiments, le bassin devient complètement inefficace dans sa fonction de laminage des volumes de crue (eau et sédiments) (Tableau 9).

Années simulées	Masse érodée (T)	Densité apparente du sol	Volume de sédiments produit (m ³)	Volume stocké dans le bassin (m ³)
1	~ 200	1.3	154	154
2	~ 9000	1.3	6923	7077
3	~ 200	1.3	154	7231
4	~ 9000	1.3	6923	14154
5	~ 9000	1.3	6923	20000

Tableau 9 : Scénario de remplissage sédimentaire d'un bassin de rétention

Après une politique de subventionnements qui a longtemps favorisé les solutions curatives, le problème du curage des bassins de rétention est devenu une question centrale en Seine-Maritime (Figure 23). Son coût est extrêmement élevé (environ 10 % du coût d'installation du bassin), et entièrement à la charge des maîtres d'ouvrages (collectivités ou syndicats de bassins versants). Afin de limiter l'envasement des bassins de rétention, les éléments d'hydraulique douce se révèlent à nouveau très utiles.

Scénario de conversion de terres cultivées en prairies

Aussi bien pour la protection de la qualité de l'eau que pour la limitation du ruissellement et de l'érosion des sols, les surfaces enherbées constituent un élément clé de l'aménagement du bassin. L'effet de ces zones enherbées (et des bois) sur l'infiltration dépend non seulement de

leur superficie mais aussi de leur positionnement dans le paysage. Le jeu doit pouvoir faire débattre des possibilités de préservation des prairies ou de mise en herbe de parcelles en position stratégique dans le bassin versant. Il peut s'agir d'accord à l'amiable (via des échanges fonciers) ou des mesures contractuelles (mesures agro-environnementale (MAE) « remise en herbe », baux environnementaux...), ou encore des servitudes imposées par le syndicat d'eau potable sur le périmètre de protection rapproché (et rapproché satellite) du captage pour l'AEP.

En utilisant le logiciel STREAM, on propose de quantifier l'efficacité du « bon » positionnement de prairies sur le ruissellement. Pour cela, on change l'occupation du sol de chaque parcelle sélectionnée en attribuant aux pixels des parcelles pâturées une capacité d'infiltration de 50 mm/h et aux parcelles des périmètres de protection rapprochés une capacité de 200 m/h (efficacité maximale d'une prairie d'infiltration inexploitée). L'intensité de l'événement pluvieux qui a été fixée afin d'engendrer une crue décennale sur le bassin (31 mm en 2 heures) est inférieure à la capacité d'infiltration des prairies qui sont donc amenées à agir comme des zones tampon efficaces. La réduction du ruissellement est d'autant plus importante que les zones de réinfiltration sont situées sur les axes d'écoulement, c'est pourquoi la plupart des parcelles sélectionnées pour la simulation ont été positionnées dans cette configuration. On choisit également de mettre en place des prairies sur les zones amont du bassin qui contribuent au ruissellement. Au total, on propose de convertir 105 ha de terres arables en prairies, soit 4.3 % de la surface totale du bassin versant (Figure 24). En comparaison, du fait du recul de l'élevage et donc de la transformation de surfaces toujours en herbe en terres cultivées, la superficie en prairie a diminué de 23.5 % entre 1988 et 2000 dans la zone du SAGE (Saubes, 2010).

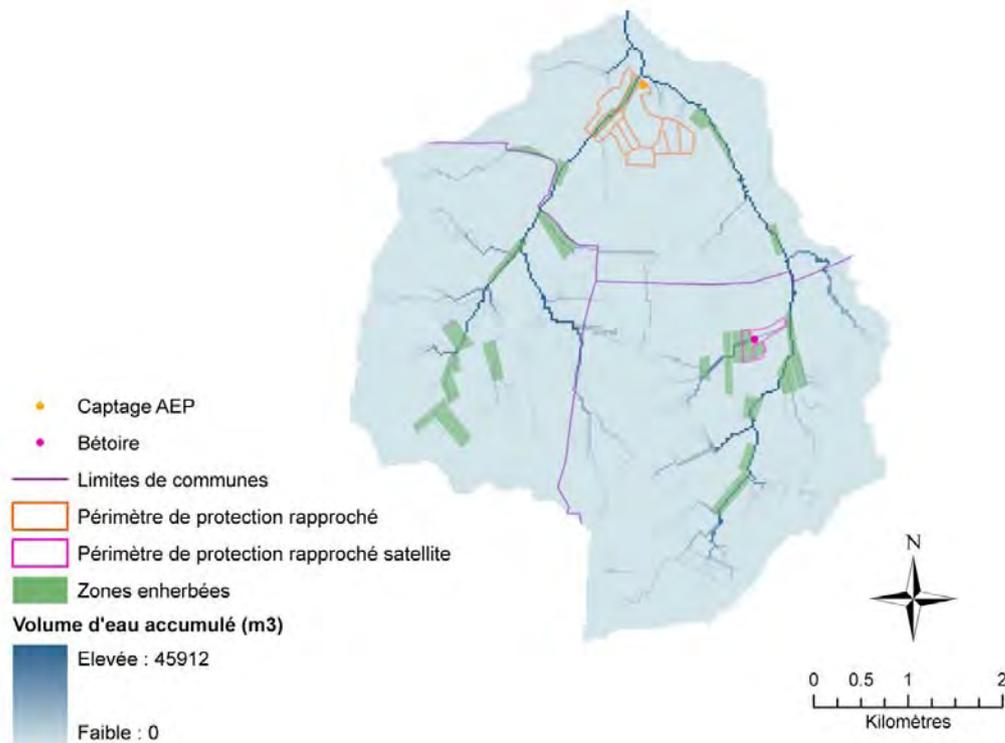


Figure 24 : Réorganisation du parcellaire pour lutter contre le ruissellement érosif. (Anglade 2010)

Les modifications de l'occupation du sol d'un tel scénario affecteraient peu le réseau d'écoulement mais elles impliqueraient une variation des volumes ruisselés en tout point. De sorte qu'à l'exutoire près de 30 % du volume de crue décennal serait laminé (Figure 25).

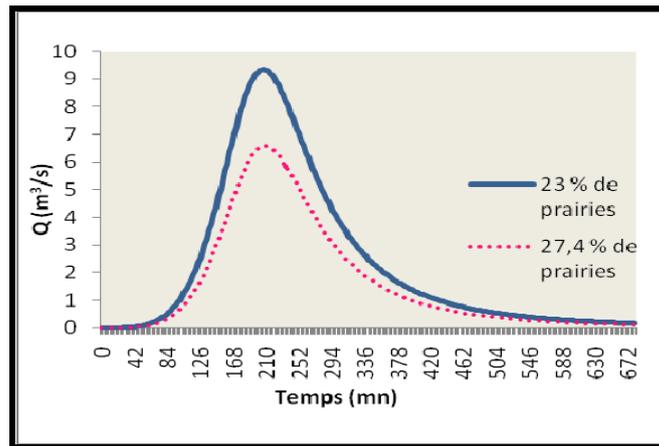


Figure 25 : Hydrogrammes de crues décennales avant et après le scénario de remise enherbe du bassin (Anglade 2011)

On rappelle que le volume seuil à partir duquel des inondations et coulées boueuses importantes sont susceptibles de se produire à été fixé à $47\,000\text{m}^3$ (lame d'eau de 3 mm sur une surface potentiellement ruisselante de 1586 ha).

De la même façon pour le village de Bosc-la-Garenne, le scénario proposé de remise en herbe du bassin permettrait de laminer efficacement le volume de crue décennal en atteignant un volume ruisselé de 9083m^3 , en dessous du seuil de dégâts (lame d'eau de 3 mm sur une surface potentiellement ruisselante de 303 ha, soit 9090m^3).

En conséquence, une faible augmentation des zones en prairies de 23 % initialement à 27.3 % de la SAU totale du bassin permettrait de réduire efficacement le ruissellement érosif et de protéger les zones porteuses d'enjeux sociaux et matériels des inondations et coulées boueuses.

Enfin, en agissant sur les causes du ruissellement érosif, on améliorerait considérablement la qualité de l'eau, et notamment de l'eau souterraine destinée à l'alimentation en eau potable. En effet, on peut noter sur la Figure 24 qu'un captage destiné à l'alimentation en eau potable est positionné et que l'on a délimité deux périmètres de protection rapprochés de ce captage (dont un « satellite ») à partir de l'étude du réseau des mailles « contributives » sur le logiciel Stream et en s'appuyant sur le cadastre défini. En milieu karstique, la prise en compte d'objectifs trop larges de protection de la ressource (intégrant la réduction des pollutions diffuses) pour déterminer les périmètres conduit souvent à des zonages surdimensionnés difficilement acceptables sur le plan socio-économique. C'est pourquoi, on opte pour la délimitation d'un périmètre de protection satellite, institué par la réglementation, pour protéger les zones de forte vulnérabilité. Ici, c'est une bétouille qui constitue la source de vulnérabilité, car elle peut entraîner des épisodes turbides de l'eau souterraine et en conséquence affecter la qualité des paramètres organoleptiques et bactériologiques de la ressource destinée à l'alimentation en eau potable.

3.2. Modélisation de la turbidité

L'exercice de modélisation de la turbidité est relativement complexe dans la mesure où il est question de simuler des événements turbides dans les eaux de captage en réponse à différents volumes de crue mais aussi en réponse aux décisions d'aménagements des participants. Cela signifie qu'il n'est pas possible de construire un modèle purement prédictif de type boîte noire qui résulterait d'un calage entre des données d'entrée de pluie et une réponse en terme de turbidité. Aussi doit-on nécessairement intégrer une dimension descriptive. Cela se traduit dans la démarche de modélisation par une première étape d'étude du milieu, basée sur un

bilan de littérature afin d'appréhender les mécanismes en jeu. Il s'ensuit un travail d'interprétation qui conduit à une conception d'un modèle simplifié qui puisse être intégré au bassin versant d'étude puis validé après une phase de calage.

On propose ici une modélisation conceptuelle d'une connexion bétoire/captage qui fournit une réponse turbide à une quantité de matières en suspension contenue dans les eaux de ruissellement. L'hypothèse de reproduction d'un milieu karstique souterrain a très vite été écartée après discussion avec les acteurs de terrain, compte tenu des enjeux du territoire mis en discussion dans lesquels la gestion quantitative de la ressource n'intervient pas. On propose donc une analyse systémique très simple, qui permet de se figurer l'effet au premier ordre d'une bétoire située sur un plateau crayeux sur les eaux brutes d'un captage en fond de vallée (Figure 26). Du fait de la complexité des phénomènes de transport particulaire à l'échelle de la crue, on ne modélisera pas les phénomènes de dépôts et de remobilisation des sédiments intra karstiques mais l'on propose une fonction de transfert qui intègre indistinctement ces deux mécanismes de transport. On ne représente donc qu'un taux de restitution « apparent » du maximum de turbidité à l'engouffrement.

On a donc en entrée du système une charge particulaire issue du ruissellement amont qui s'engouffre dans la bétoire, puis une fonction de transfert qui permet d'engendrer une réponse turbide au captage.

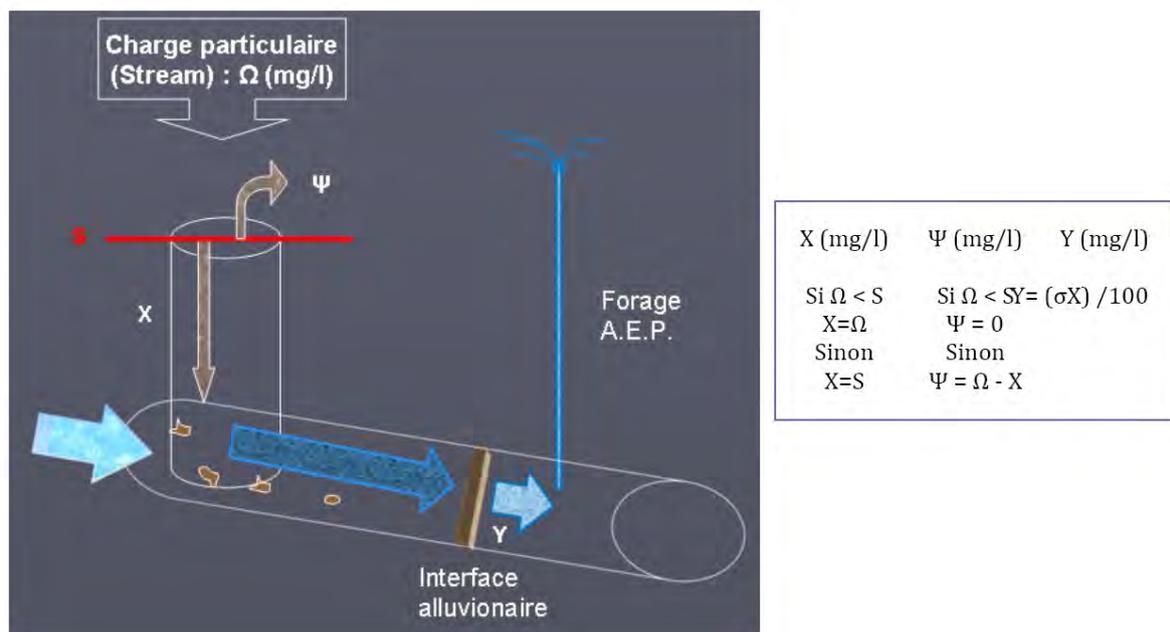


Figure 26 : Modèle conceptuel de transfert du ruissellement de surface via une bétoire et mécanismes de transport souterrain (Anglade 2011)

Remarque : Pour aboutir à un tel modèle nous avons dû poser de nombreuses hypothèses de simplification

- 1) Transfert de masse et transfert de pression sont assimilés à un seul processus de transfert « apparent »
- 2) D'une crue sur l'autre, on ne tient pas compte de la masse décantée dans la bétoire
- 3) On associe à un événement pluvieux un seul pic turbide
- 4) On néglige l'influence des conditions aux limites sur le transport de matière : variations tidales, débit de pompage ...

Néanmoins, on légitime ces hypothèses car il est ressorti des entretiens avec les experts locaux que ces dernières semblent avoir très peu d'influence sur la représentation du phénomène au premier ordre.

Pour calibrer notre modèle (paramètre Y), on se réfère au taux de dilution apparents observés au forage du Hannebot (Massei, 2001).

Tableau 10 : Taux de dilution apparents observés entre la perte du Bébec et la source du Hannebot.

Evénements	déc-99	12-avr-00	14-avr-00	15-avr-00	22-nov-00	24-déc-00
% Dilution apparent	30	40	42	33	20	28
% Eau souterraine	70	60	58	67	80	78

Sur notre bassin, la très forte charge sédimentaire transportée par le ruissellement abondant d'une crue décennale et qui s'écoule jusqu'à la bétoire, génère au captage des pics turbides trop importants (environ un ordre de grandeur) pour que les actions de négociations menées dans le jeu pour réduire le ruissellement érosif puissent être efficaces. C'est pourquoi, nous introduisons deux éléments qui viennent légèrement complexifier la représentation conceptuelle du modèle :

- 1) Une fonction seuil (S) liée à une capacité d'infiltration maximum de la bétoire que l'on fixe à 50 l/s (soit 180 m³/h) comme la source du Bébec (Massei, 2001). Informatiquement, cela se traduit par un changement de la capacité d'infiltration du pixel sur lequel se situe la bétoire que l'on fixe à 288 mm/h. Lorsque le seuil est dépassé, le flux est transféré au pixel aval.
- 2) Un positionnement du captage à une interface craie/alluvion (comme c'est fréquemment le cas pour limiter la vulnérabilité du captage par rapport à une interception directe d'un conduit karstique). Un tri granulométrique s'opère à l'interface, de sorte que le taux de restitution observé se situe seulement entre 1 et 10 % de la charge initialement engouffrée.

En sortie de ce système on accède à une concentration en matière en suspension MES contenue dans l'eau souterraine qu'il faut parvenir à convertir en unité néphélogométrique NFU afin de comparer le résultat aux normes de potabilité. Il s'agit donc de passer d'une mesure massique de la charge particulaire (fonction de la densité du matériel transporté) à une mesure optique du trouble de l'eau. En période de crue, le matériel transporté est de nature disparate (agrégats pédologiques, floccs organo-minéraux ...) (Fournier, 2008), et il existe alors par effet masque une relation linéaire du type :

$$[MES] = A_x NFU \quad 1 < A < 5$$

A=5 correspond à de fortes crues. C'est donc la valeur que l'on choisit pour évaluer la turbidité lorsque l'on simule des crues décennales. Le paramètre σ de la Figure 26 est fixé à 1. Cette valeur de 1 a été obtenue par calibrage après avoir testé plusieurs actions possibles des joueurs pour l'aménagement du bassin qui soient en mesure d'être efficaces. Ainsi par exemple, le scénario de remise en herbe permet d'éliminer une large partie de la pollution particulaire.

Pour les 4 crues décennales générées dans le modèle à partir de l'occupation initiale du sol (sans aucun aménagement), on obtient les résultats suivants :

Tableau 11 : Simulations de pics turbides au captage AEP d'Estampeville-Bellemare

Années	2	4	5	8
Turbidité eaux brutes du captage (NFU)	14	22	15	18

Les dépassements fréquents des normes de potabilité sont générés par de la turbidité des eaux brutes en lien avec le ruissellement érosif mais aussi le résultat de la qualité des installations de traitement. Car en effet, lorsque la captation des eaux brutes est associée à un simple traitement par sable (comme c'est le cas pour la plupart des installations de Seine Maritime), la référence (0,5 NFU) de qualité et la limite de qualité (1 NFU) ne peuvent être obtenues que si les eaux brutes en entrée de l'étape de filtration ne dépassent pas respectivement 3 et 6 NFU. On notera par ailleurs, qu'à partir de 5 NFU, la turbidité commence à être perceptible à l'œil nu, ce qui gêne fortement les consommateurs, en plus des problèmes de goûts et d'odeur liés aux débris d'algues et à la réaction du chlore avec les liaisons insaturées, les groupes phénoliques et les groupes azotés des matières organiques. Au-delà de 20 NFU, les filtres se colmatent ce qui entraîne la fermeture des stations afin de rétablir la qualité des filtres et distribuer une eau sans danger pour la santé humaine.

Les communes rurales ou syndicats desservant moins de 5000 abonnés, n'ont pas les moyens financiers de recourir à des dispositifs de traitement plus évolués, comme les technologies membranaires, et sont donc extrêmement dépendantes de l'implantation d'aménagements d'hydraulique douce sur le bassin.

4. Le jeu de rôle Ruis'eau

Le jeu de rôles Ruis'eau est conçu afin de rendre perceptible le risque de ruissellement érosif et de responsabiliser les acteurs sur l'aménagement du territoire en pointant les éléments clés des décisions à prendre. Il s'agit également de pouvoir discuter des formes de solidarité mobilisables au sein d'un bassin en mettant en lumière les interdépendances entre amont et aval et dynamiques rurales et urbaines, sur la genèse la propagation et les dégâts du ruissellement.

L'objectif du jeu de rôles est de parvenir à une gestion concertée du territoire joué afin de maîtriser les inondations et coulées boueuses dans les zones urbaines, supprimer les ravines sur les terres agricoles et améliorer la qualité de l'eau potable. Une partie du jeu est informatisée et comprend trois modèles : un modèle de calcul du ruissellement et de l'érosion, un modèle pour la qualité de l'eau et un modèle décisionnel qui permet de modéliser les effets physiques et sociaux des décisions des joueurs. Les joueurs doivent planifier de concert l'aménagement du territoire sur huit années.

4.1. Les joueurs et leurs actions

Pendant les sessions, on a choisi de reproduire un tissu social complexe en faisant intervenir 13 joueurs : 8 agriculteurs, 1 maire-agriculteur, 1 maire-président de syndicat de bassin versant, 1 maire-président de syndicat d'eau, 1 animateur de syndicat de bassin versant et 1 animateur de syndicat d'eau. Le jeu est conçu pour 13 joueurs mais peut être éventuellement joué à 10 joueurs, en prévoyant l'absence de 3 agriculteurs. Avec moins de joueurs, le jeu ne pourrait pas illustrer les interactions en jeu sur le bassin versant amont –aval / agriculture-

urbanisation-eau potable-inondation urbaine. Les actions de chaque joueur peuvent influencer ou être influencées par le risque de ruissellement érosif.

Pour des raisons pratiques de jouabilité du jeu, seulement 9 agriculteurs sont physiquement présents lors de la partie, cependant le bassin versant d'Estampeville-Bellemare comprend 22 exploitations agricoles (Figure 27). Pour les 13 agriculteurs restant, on parle d'agriculteurs robots, c'est-à-dire que leurs décisions sont « jouées » par l'ordinateur selon des règles de décisions automatisées. Les exploitations agricoles sont représentatives des 4 grands types de systèmes de cultures ou de production du Haut-Cailly : polyculteurs-éleveurs (lait et lait+viande), éleveurs (lait et lait+viande), céréaliers, cultures industrielles. Aucun système n'est à l'abri des enjeux érosifs, l'ensemble des exploitations est concerné même si certaines cultures sont considérées comme davantage à « risque ». Les agriculteurs des trois communes du bassin sont incités à installer sur leurs parcelles des aménagements afin d'atténuer les dégâts d'érosion. Ils peuvent également profiter des opportunités de vente foncière lors de la création et de la révision des plans locaux d'urbanisme.

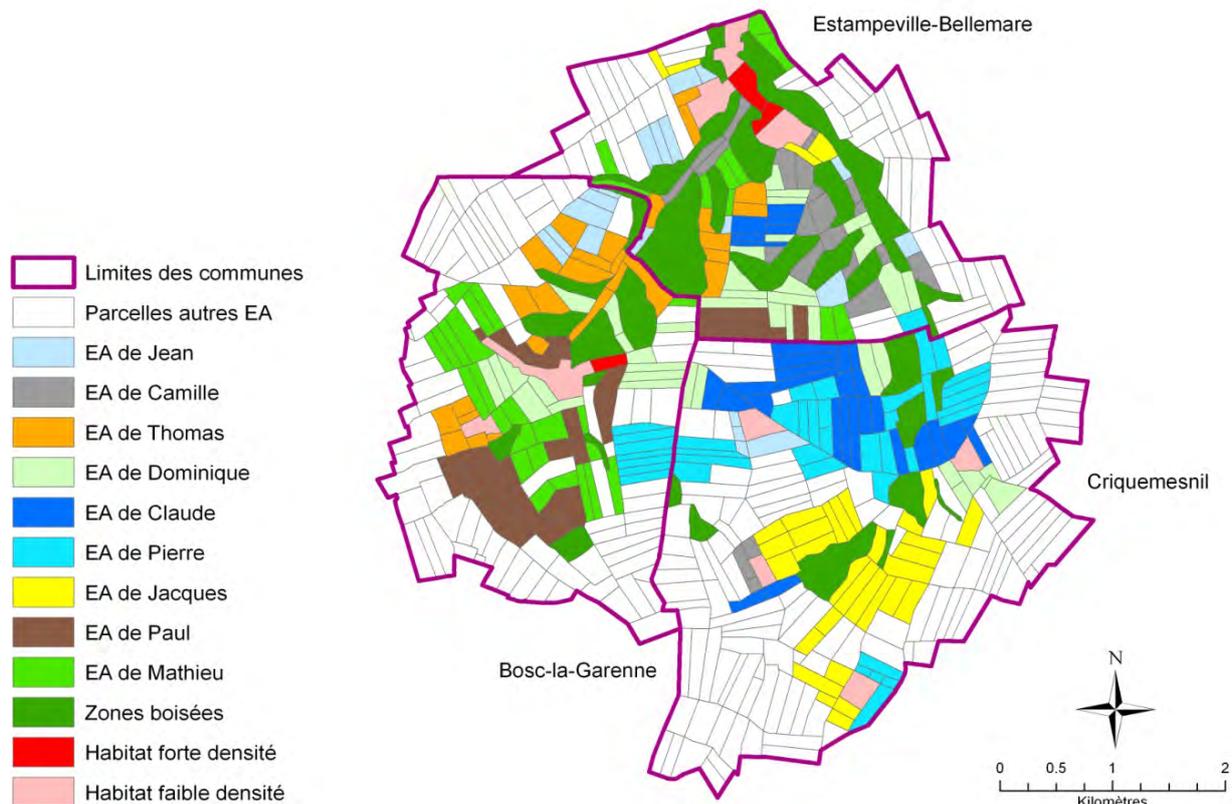


Figure 27 : Exploitations agricoles des 9 joueurs actifs du bassin versant d'Estampeville-Bellemare

Pour planifier et négocier la mise en place d'aménagements d'hydraulique (douce ou structurante) à l'échelle du territoire, un rôle d'animateur de bassin versant a été créé. Ce dernier élabore ses stratégies avec le président du syndicat de bassin qui a également le rôle de maire de la commune d'Estampeville-Bellemare située à l'exutoire du bassin. L'efficacité de l'action du syndicat dépend de sa capacité à mobiliser et à sensibiliser les exploitants en proposant des outils techniques et économiques adaptés et en se saisissant des synergies possibles avec le contexte local (évolution du contexte réglementaire et incitatif, schéma de substitution des terres avec la SAFER ...).

La distribution d'une eau brute de qualité constitue le mandat de l'animateur du syndicat d'eau. Il doit veiller d'une part à limiter la turbidité en négociant des aménagements autour de la bétail, et d'autre part à protéger le captage des inondations en menant une stratégie d'aménagement sur les périmètres de protection du captage. Il mène ses actions en collaboration avec le maire-président du syndicat d'eau.

Les maires ont à gérer les secours et les dégâts sur les routes et bâtiments publics en cas de coulées de boue et sont garants de la salubrité publique en matière d'eau potable. Ils sont également responsables de la définition des Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) afin de satisfaire les demandes de terrains à bâtir en lien avec les dynamiques démographiques identifiées.

4.2. Les supports de jeu



Figure 28 : Organisation théorique de l'espace pour les sessions de jeu (photos prises lors du test avec du jeu avec des chercheurs)

L'environnement de jeu est sensé être similaire au territoire dans lequel évoluent les agriculteurs, mais il ne s'agit pas de la représentation exacte d'un site particulier. L'objectif est de saisir les processus dominants et le plateau est censé être utilisé sur différents bassins versants du SAGE. Tous les joueurs disposent de cartes du territoire avec les informations qui leur sont utiles : cadastre pour le maire, étude hydraulique pour le syndicat de bassin versant, limites des périmètres de protection pour le syndicat d'eau, positionnement des parcelles et du corps de ferme de chaque agriculteur ... En plus de ces cartes, la présence d'une maquette du bassin permet d'accéder à une représentation tridimensionnelle de l'environnement. L'attention portée à l'environnement est particulière car l'on cherche à développer un sentiment de proximité et d'appartenance à ce territoire joué (Measham, 2006). En connectant les joueurs au territoire, on espère créer un contexte d'apprentissage qui permette une mise en

lumière des liens entre systèmes écologiques et sociaux. Dans la salle où se déroule la session de jeu, on s'efforce de reproduire à grand traits les conditions d'interactions réelles des différents acteurs. Ainsi, on dispose d'une table centrale pour les réunions collectives, et de 14 postes individuels : 3 communes, syndicat d'eau et syndicat de bassin versant, et 8 agriculteurs situés à proximité de la commune sur laquelle se trouve leur siège d'exploitation (Figure 28). Les espaces de négociation peuvent ainsi être collectifs ou individuels selon les stratégies des uns et des autres.

La facilitation des processus de négociation est permise par de larges possibilités d'actions pour les différents joueurs. On peut positionner ces moyens d'action dans un espace à 4 dimensions, et envisager de possibles synergies (Figure 29).

Ce schéma met en évidence le fait que l'on cherche à axer l'outil de concertation sur le volet préventif (incitatif et réglementaire). Les agriculteurs peuvent réaliser des aménagements de leur propre initiative, sans concertation ou incitation. Mais la mise en place de mesures agricoles incitatives nécessite la compréhension de leur bien fondé et leur acceptation par les agriculteurs, ce qui demande un travail d'animation spécifique qui peut être multilatéral (cercles concentriques). Cependant, la régulation préventive des comportements, est de plus en plus confrontée aux logiques économiques de court terme des individus, et lorsque la mobilisation des exploitants agricoles sur les mesures d'hydrauliques douce est trop problématique, il devient nécessaire d'envisager le recours à la maîtrise foncière (DPU, prescriptions) ou à l'outil réglementaire sur certaines zones prioritaires (ZSCE, utilisation de la Déclaration d'Intérêt Général dans certains cas de blocage ...). Pour rendre l'action plus efficace on attribue au syndicat de bassin versant une compétence étendue à l'interface de multiples dimensions (curatif-préventif, incitatif-réglementaire). Avec l'extension des compétences du syndicat, l'action des communes est limitée à la communication d'informations (qualité de l'eau notamment) et à une conception attentive dans les plans locaux d'urbanisme du risque d'inondations et coulées boueuses (bien que le syndicat de bassin versant intervienne également ici en émettant un avis sur l'urbanisme réglementaire).

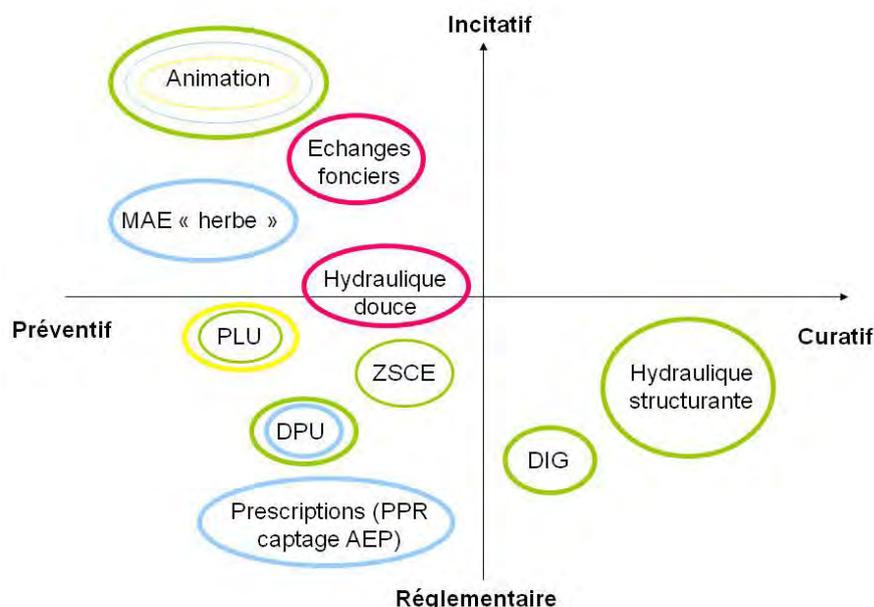


Figure 29 : Diagramme d'actions et moyens dans Ruis'eau

Rose : Agriculteurs ; Vert : Syndicat de bassin versant ; Bleu : Syndicat d'eau ; Jaune : Maires. / MAE : Mesure Agro Environnementale, PLU : plan local d'urbanisme, ZSCE : Zone Soumise à Contrainte Environnementale, DPU : Droit de Préemption Urbain, DIG : Déclaration d'Intérêt Général, PPR : Périmètre de Protection Rapproché, AEP : Alimentation en Eau potable

Pour faciliter le processus de négociations et la mise en place de relations contractuelles, les animateurs disposent de cartes imagées (Figure 30).

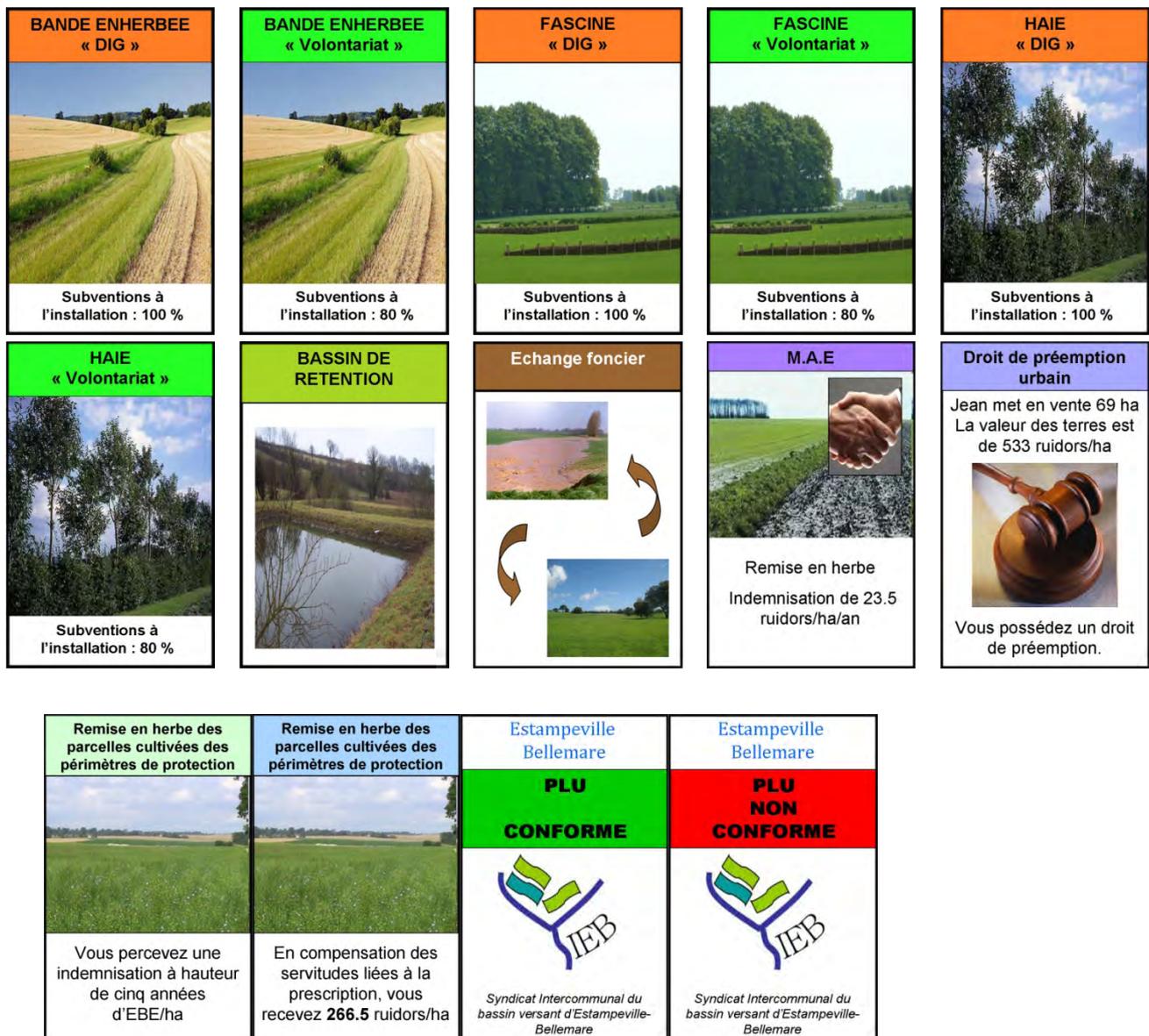


Figure 30 : Cartes imagées pour la négociation et la prise de décisions

La multitude d'outils est un élément de complexité dans le jeu, mais qui paraît nécessaire pour fournir une vision transversale sur le cumul des outils mobilisés dans la réalité à l'échelle du bassin versant. Même s'il s'agit d'un territoire fictif, ces outils de gestion sont réels ; et une difficulté à les manipuler pourrait être révélatrice du manque de connaissances sur certains aspects techniques, organisationnels ou législatifs, soulignés par Cartier (2002). En pratique, pour le moment, les principaux moyens d'action utilisés font appel à un civisme providentiel étatique qui débloque des subventions ou des fonds d'indemnisations en cas de catastrophes naturelles.

Des feuilles de décisions (parcelle concernée, la mesure prise, l'emprise au sol) servent à consigner les accords. L'accès aux informations techniques utiles pour la prise de décision se fait par un certain nombre de fac-similés contenus dans les fiches de poste de chacun des joueurs : résumés d'études hydrauliques et hydrogéologiques, fiches techniques sur

l'efficacité des aménagements d'hydraulique douce...). Les autres données qui entrent en compte dans les processus délibératifs, de nature sociologique, économique, ou encore cynégétique, sont communiquées au travers d'indicateurs. Ils permettent de rendre les problèmes visibles.

Grâce au modèle informatique, on est en mesure de fournir des indicateurs de résultats (proportion de prairies de la SAU, réalisation physique d'aménagements, taux d'accueil des nouveaux habitants) et des indicateurs d'effets (évolution du nombre de ravines, évolution dégâts d'inondations et coulées boueuses, de qualité de l'eau). La plupart des indicateurs sont distribués sous forme imagée (Figure 31).

<p>Les haies sont propices à la nidification des perdrix</p> <p>100 m haies = 1 couple de perdrix grises</p> 	<p>Niveau 1</p>  <p> RIGOLES</p>	<p>Niveau 2</p>  <p> RAVINES</p>	<p>Niveau 3</p>  <p> LARGES RAVINES</p>	<p>AVERTISSEMENT</p> <p>Le captage est inondé</p>  <p>Le service de distribution d'eau potable connaît des dysfonctionnements</p>
<p>AVERTISSEMENT</p> <p>Des sédiments se sont accumulés dans le bassin de rétention.</p>  <p>La capacité de stockage a diminué de 2/3. Le coût du curage est d'1 ruidor/m³</p>	<p>AVERTISSEMENT Bosc-la-Garenne</p> <p>Des coulées de boues ont engendré quelques dégâts dans certaines infrastructures communales.</p> 	<p>AVERTISSEMENT Bosc-la Garenne</p> <p>Certaines infrastructures communales ont été très affectées par d'importantes coulées boueuses.</p> 	<p>AVERTISSEMENT Estampeville-Bellemare</p> <p>Des coulées de boues ont engendré quelques dégâts dans certaines infrastructures communales.</p> 	<p>AVERTISSEMENT Estampeville-Bellemare</p> <p>Certaines infrastructures communales ont été très affectées par d'importantes coulées boueuses.</p> 
<p>En 8 ans:</p> <p> Impôts locaux</p> <p>Inondations boueuses répétées</p> <p>↓</p> <p>Déficit budget communal</p> <p>↓</p> <p>Augmentation d'impôts</p> 	<p>En 8 ans:</p> <p> Prix de l'eau</p> <p>Politique foncière pour garantir la qualité de l'eau potable</p> 	<p>AVERTISSEMENT</p> <p>La turbidité diminue l'efficacité de la chloration.</p> <p>Risque bactériologique élevé</p>  <p>Restriction de consommation pour les femmes enceintes et nourrissons</p>	<p>AVERTISSEMENT</p> <p>Turbidité eau brute > 5 NFU</p> <p>Dépassement de la norme de potabilité au robinet</p>  <p>Mauvaise qualité de l'eau distribuée (couleur, goût, odeur)</p>	<p>AVERTISSEMENT</p> <p>Turbidité > 20 NTU</p> <p>Fermeture provisoire du captage</p>  <p>10 jours d'interruption de la distribution d'eau potable</p>

Figure 31 : Indicateurs sous la forme de cartes imagées

Le jeu est volontairement construit autour d'une dimension économique, identifiée comme le principal frein à l'émergence des solidarités lors des entretiens. Les coûts et revenus des différentes activités sont calibrés afin de respecter les proportions rencontrées dans la réalité¹⁸ :

¹⁸ Les calibrations sont élaborées à partir d'expertise des acteurs de terrain co-concepteurs du jeu, d'enquêtes technico-économiques récentes sur le fonctionnement des exploitations agricoles (Souchère et al. 2009)

- Les agriculteurs doivent sécuriser leur revenu et les joueurs institutionnels équilibrer leurs dépenses budgétaires. Les revenus des agriculteurs (EBE : Excédent Brut d'Exploitation) sont calculés en fonction du type d'exploitation (produit brut animal, produit brut végétal, aides PAC, charges de structures, charges de fonctionnement, annuités ...). Ces revenus varient selon les assolements, mais aussi selon la taille des ravines créées par l'érosion concentrée, l'emprise foncière des aménagements d'hydraulique douce, le versement de servitudes liées à l'expropriation ou encore selon les transactions foncières réalisées.
- Les syndicats d'eau et de bassin versant ne disposent pas d'un budget illimité pour réaliser leurs aménagements et sont amenés à effectuer des choix prioritaires. Pour le syndicat d'eau, l'endettement se traduit par une augmentation du prix de l'eau. Toutes les opérations techniques ont un coût qui varie en fonction du type d'aménagement et du type de convention passée avec l'agriculteur (MAE, DIG ...).
- Le budget des communes est impacté par les dégâts liés aux inondations. En cas de déficit, les maires peuvent soit taxer des plus-values foncières lors de la vente de terrains, soit augmenter les impôts locaux.

La dimension économique doit permettre de relativiser le manque à gagner et de décentraliser l'argumentaire sur les contraintes technico-économiques. Ces dernières peuvent en partie être levées par les dispositifs incitatifs et compensatoires mais tout aménagement générera cependant toujours des contraintes justifiant un refus dans le cadre d'une démarche uniquement volontaire. L'aspect financier permet également que chaque partie soit véritablement consciente de ses propres intérêts. Il s'agit d'une condition nécessaire lorsque l'on associe à la négociation délibérative une notion de justice, dont Cartier (2002) avait souligné l'importance pour les élus. Le jeu présente l'originalité de mettre sur le même plan la situation économique des agriculteurs et celle des collectivités, pour favoriser une compréhension mutuelle des contraintes de chacun.

4.3. Le déroulement de la partie

Le séquençage du jeu a été pensé afin de rythmer les alternances entre des actions individuelles, la visualisation de leurs effets sur la gestion de la ressource, et des temps de réflexion collective. En particulier, on développe les capacités de réflexivité sur les phénomènes érosifs en proposant des temps de réunion collectifs qui permettent le partage de points de vue et l'échange d'informations en cours de jeu et un débriefing collectif après le jeu. L'agir ou expérimentation active sont renforcés par la création de cycles d'objectifs associés à des simulations pour suivre la performance de la réalisation.

Une partie se déroule sur environ trois heures, dont une phase de prise en main du jeu (1h), la simulation de 8 années de cultures (1h) et une phase de débriefing (1h).

Pendant la phase d'initialisation les règles du jeu sont énoncées par le maître du jeu et les rôles sont distribués. Chaque joueur dispose de fiches de poste pour prendre connaissance des caractéristiques principales du rôle qu'il aura à mener : statut social, objectifs et moyens. Une année représente un tour de jeu. Il y a donc au total 8 tours de jeu ce qui laisse du temps aux apprenants pour la pratique répétitive et pour développer ainsi une certaine expérience. Chaque année, les assolements d'été sont automatiquement calculés par l'ordinateur. La fin de l'année est marquée par un événement pluvieux plus ou moins fort. En années, 2, 4, 5 et 8 on provoque des crues décennales. Le jeu est séquençé en deux périodes. Pendant les 4 premières années les animateurs initient des négociations d'aménagements principalement sur la base du volontariat des agriculteurs. En seconde période, la négociation cède le pas à un cadrage

réglementaire plus strict, qui permet notamment aux syndicats de recourir au droit de préemption urbain lorsqu'une parcelle est en vente ou encore à des DIG.

A chaque tour, les joueurs disposent d'un intervalle de temps pour prendre des décisions individuelles ou interagir. Les interactions permises dans ces intervalles sont inspirées de celles existant dans la réalité : négociations entre les animateurs de bassins versants et les agriculteurs, réunion d'information ou de concertation en mairie, ouverture d'une enquête publique lors de la réalisation des plans locaux d'urbanisme ... Par rapport aux interactions qui se déroulent « dans la vraie vie » dans ces opérations, nous avons privilégié les éléments qui peuvent donner lieu à débat sur les intérêts individuels et collectifs (valorisation du patrimoine foncier versus protection des habitations, coûts des aménagements versus intérêt pour lutter contre le ruissellement etc...)

A la fin d'un tour, les décisions des joueurs sont implémentées dans le modèle. Le calcul du ruissellement et de l'érosion est mis à jour. Les dommages engendrés (inondations, ravines, turbidité) sont communiqués aux joueurs concernés via divers indicateurs comme la qualité de l'eau du captage, la présence de ravines dans les parcelles des agriculteurs, des avertissements en lien avec les inondations ... A la fin de chaque année, les informations économiques sont également restituées ; les budgets et revenus sont actualisés en lien avec les actions ou non actions des joueurs: dégâts relatifs au ruissellement, perte de revenu lié à l'implantation d'aménagements, vente de parcelles, plus values foncières ...

En fin de partie une phase de débriefing met en discussion les choix de gestion des différents acteurs et leurs implications. Il est prévu une phase de débriefing à chaud, en fin de jeu et des entretiens avec quelques joueurs plusieurs jours après la session.

Le premier objectif de ce débriefing sur lequel nous reviendrons dans le chapitre 6 est de qualifier des apprentissages initiés par le jeu. Cartier (2002) puis le bureau d'étude EPICES (2008) ont souligné le besoin d'apprentissage de tous les acteurs locaux dans les bassins, tant sur le plan des phénomènes physiques (quels effets des pratiques sur le ruissellement, importance des interactions entre ruissellements agricoles et dynamiques urbaines, qu'est ce que peuvent amener les aménagements vis-à-vis du ruissellement...) que sur les aspects économiques, juridiques et institutionnels des politiques d'intervention. Le jeu donne une occasion d'aborder concrètement ces différents aspects, d'imaginer et d'explorer des alternatives et de mettre en discussion les principes et modalités d'une solidarité de bassin afin de maîtriser le ruissellement.

Le second objectif de ces débriefing consiste en une discussion sur la réalité du territoire de vie des participants, sur leurs perceptions des opportunités et difficultés de mise en œuvre d'un aménagement concerté local, sur la manière dont le jeu leur a permis de réfléchir ou non à l'évolution de leur territoire.

4.4. Tests de jouabilité du jeu Ruis'eau

Le jeu a été testé deux fois afin d'ajuster la jouabilité du jeu, en calibrant les étapes successives, et en vérifiant les effets des règles et le temps d'une session. Un premier test a réuni des personnes extérieures à l'action de recherche sur Caux donc peu au fait des phénomènes physiques et du contexte socio-économique, mais experts des processus participatifs (la « Communauté Montpelliéraine de la Participation »

(<http://www.particip.fr/>)¹⁹ . Un second a réuni à Rouen une partie des acteurs locaux ayant participé à la démarche de modélisation d'accompagnement

Les dynamiques et les interactions mises en visibilité ont été validées ainsi que le protocole du jeu. Les sessions se sont révélées efficaces pour stimuler des discussions et des échanges de point de vue entre les joueurs (Figure 32).



Figure 32 : Réunion entre les maires des trois communes du bassin et l'animateur du syndicat

Ces tests ont surtout souligné la nécessité de simplifier les informations mises à disposition des joueurs (avant le jeu et au cours du jeu) en se focalisant sur les données directement utiles au jeu, afin d'accélérer les tours de jeu.

Il a aussi été proposé d'organiser à « mi-jeu » une réunion entre agriculteurs devant la maquette du bassin sur laquelle seraient positionnés les aménagements réalisés. L'objectif de cette réunion est que les exploitants agricoles débattent de leur choix et explicitent leur stratégie vis-à-vis des incitations à aménager sur leurs parcelles.

Tous les joueurs ont exprimé une opinion positive sur le plateau de jeu, les cartes à jouer et les nombreuses informations contenues dans les fiches de poste (Figure 33), faisant de Ruis'eau un jeu extrêmement réaliste, peut-être un peu trop En effet, l'appropriation des rôles s'est faite avec difficultés pour les membres de la Communauté de Pratiques, surtout pour les rôles d'animateurs de syndicat d'eau et de syndicat de bassin versant qui nécessitent un grand nombre de connaissances préalables (notamment basées sur l'expérience). Ce constat conduit à imposer que, lors des vraies séances de jeu, ces rôles soient effectivement tenus par des professionnels de l'eau.

¹⁹ La communauté rassemble des chercheurs et des praticiens sur les thèmes des démarches participatives et de la concertation territoriale, sur la base d'une implication volontaire. Les objectifs sont multiples, avec comme motivation principale: l'amélioration des processus d'interactions complexes. Il est ainsi question d'accompagner les projets et de développer des capacités pratiques pour faciliter ces travaux de groupes afin de les rendre efficaces et satisfaisants. La communauté de pratique offre donc un espace pour tester le jeu de rôles développé, dans une optique de co-ingénierie (c'est-à-dire, focalisée sur la pratique et non le débat académique). La devise de la communauté est : « pratiquer ce qu'on prêche ».



Figure 33 : Utilisation des supports de jeu

En outre, certaines interactions non prévues dans le séquençage du jeu ont eu lieu; comme une réunion entre l'animateur du syndicat de bassin versant et le maire de la commune avale (Estampeville-Bellemare) pour établir le co-financement d'un bassin de rétention sur la parcelle d'un agriculteur. Il est important de laisser de telles libertés avec le jeu car ces imprévus dénotent le désir d'exploration des joueurs, qui fait partie des fondements d'une démarche d'apprentissage (cf chap 6).

5. Modèle informatique support du jeu de rôles Ruis'eau

Le modèle développé est un modèle dynamique qui inclue explicitement des hypothèses et des règles liées à l'évolution dans le temps de notre système de référence. Il est utilisé comme support informatique du jeu de rôles co-élaboré avec les partenaires normands et permet de donner collectivement à voir aux acteurs l'évolution progressive du système sous l'effet de conditions et de pratiques énoncées que ce soit d'un point de vue technique ou économique.

5.1. Architecture du modèle

Le diagramme de classe UML de la Figure 34 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre l'architecture du modèle et son intégration dans la plateforme Cormas tout en précisant pour chaque classe du modèle, la classe dont elle hérite, ses attributs et ses méthodes.

Le modèle comporte 6 classes :

- La classe **Ruis'Eau** dont les méthodes et attributs servent à initier et conduire la simulation
- La classe **Cell** dont les méthodes et attributs permettent de gérer les processus biophysiques (ruissellement Hortonien, érosion diffuse et concentrée sur les parcelles et turbidité des eaux du captage d'eau) ainsi que l'influence des aménagements sur les processus biophysiques.
- La classe **Parcelle** dont les méthodes et attributs permettent d'affecter automatiquement les cultures aux parcelles de chaque exploitation tous les ans et de placer également automatiquement les aménagements sur les parcelles indiquées par les joueurs.
- La classe **Agriculteur** dont les méthodes et attributs permettent de calculer les revenus des agriculteurs en fonction des surfaces des cultures récoltées chaque année (les pertes liées à l'érosion ou à l'implantation d'aménagement sont défalquées), des indemnités ou primes perçues pour l'implantation d'aménagements et des ventes éventuelles de leurs parcelles classées en zone urbanisable.
- La classe **Commune** dont les méthodes et attributs permettent de gérer l'urbanisation des communes (offre / demande), d'évaluer les dégâts subis à cause des coulées

boueuses liées au ruissellement érosif et d'en calculer les coûts économiques pour les communes.

- La classe *Syndicat* dont les méthodes et attributs permettent pour le syndicat d'eau et le syndicat de bassin versant de gérer la mise en place des aménagements et de calculer les coûts liés à leur installation ainsi qu'à leur entretien.

5.1.1. Entités spatiales

L'espace du bassin versant utilisé pour la simulation est représenté par une carte constituée de 78408 (297x264) cellules de forme carrée, chaque cellule représentant 625 m². Le choix de la forme résulte de la nécessité d'avoir pour chaque cellule un voisinage déterminé de 8 cellules pour calculer la circulation du ruissellement en tout point du bassin. Par ailleurs, le choix de la surface représente un compromis entre une surface compatible avec la taille des lots à urbaniser en Haute-Normandie et une surface assez grande pour limiter le nombre de cellules et donc les temps de calcul. Le choix de cette surface a cependant comme conséquence de surestimer fortement la largeur des aménagements d'hydraulique douce (haie, fascine, bande enherbée) puisqu'ils ont tous une largeur de 25 mètres (taille du côté de chaque cellule). Ceci à l'avantage de permettre en retour une visualisation plus aisée de leur localisation sur le territoire. Même si, cette largeur est surestimée sur la carte, dans les calculs biotechnique et économique, ce sont leur largeur réelle qui sont prise en compte.

Dans le modèle, les cellules forment également des agrégats qui servent à reconstituer les parcelles de chaque exploitation agricole. A ces deux découpages de base (cellule et parcelle), est associé un autre découpage de l'espace en 3 communes. Ces niveaux de découpages servent non seulement pour modéliser les processus biophysiques mais aussi pour évaluer les conséquences environnementales et économiques des actions envisagées par les joueurs lors d'une session du jeu de rôles Ruis'eau.

5.1.2. Entités sociales

Suite à la phase de co-conception du jeu, plusieurs agents ont été créés au niveau du modèle informatique. Compte tenu de la taille du territoire (environ 2500 ha), 22 exploitations agricoles ont été créées mais seulement 9 agriculteurs au maximum seront physiquement présents lors des sessions de jeu. Les 13 autres exploitations sont donc gérées par le système informatique. La localisation de ces agriculteurs « robots » sur le territoire (dans l'amont des sous-bassins versants, loin des talwegs érodables et des zones déjà urbanisées) a été faite de façon à fortement limiter les besoins d'interactions avec eux. Trois agents maires ont également été créés ainsi qu'un animateur de syndicat de bassin versant et un animateur de syndicat d'eau.

5.2. Actions et interactions

Plusieurs actions ont été informatisées pour chaque type d'acteur, avec des simplifications dans les objectifs et modalités d'action qui seront discutées lors des débriefings à chaud.

Nous avons fait l'hypothèse simplificatrice que dans le jeu, l'objectif principal des agriculteurs joués est de maintenir ou accroître leur revenu tout en limitant le ruissellement érosif sur leur exploitation. Pour cela les agriculteurs peuvent donc accepter d'implanter des aménagements (haie, fascine ou bande enherbée) sur leurs parcelles en suivant les conseils de l'animateur du syndicat de bassin versant soit vendre du terrain constructible, soit accepter des servitudes. Ils peuvent également remettre de l'herbe sur une parcelle avec une faible

compensation financière ou essayer, via des échanges amiables, de relocaliser de l'herbe dans les zones à risque tout en maintenant leur outil de production c'est-à-dire leur surface en culture de vente. Ils ont la possibilité de chercher à négocier avec les maires, le classement de leur parcelle en zone à urbaniser (AU) pour pouvoir les vendre s'ils le souhaitent au cours du jeu. Chaque agriculteur possède une partie de ses terres en propriété et une autre partie en location excepté les agriculteurs robot dont l'ensemble des parcelles est en location. Selon le type de parcelle, l'agriculteur peut ou non vendre une parcelle. De la même façon, un agriculteur locataire ne pourra pas s'opposer à la mise en place d'un aménagement. Cependant une règle fournie lors des réunions de co-conception du jeu limite les possibilités d'action de l'animateur du syndicat de bassin versant sur les terres en location. En effet, une parcelle en location classée en zone à urbaniser n'est en général jamais utilisée pour y mettre un aménagement. Une règle de refus intégrant ce comportement a donc été mise dans le modèle informatique qui gère l'ensemble des parcelles en location.

Les agents-maires ont comme objectif d'accueillir une certaine proportion de nouveaux habitants (variable selon les 3 communes) tout en essayant de limiter les risques de coulées boueuses sur leur territoire. Ils doivent réaliser un Plan Local d'Urbanisme (PLU) et faire apparaître des zones AU sur le territoire en choisissant les surfaces concernées (nombre d'hectare), leur type (prairie ou culture) et en fixant le type de lot à bâtir (625 m² ou 2500 m²). Ils doivent faire attention à ne pas augmenter le risque de ruissellement érosif sur leur territoire et aider à la concertation autour des aménagements anti-érosifs.

L'agent-animateur de syndicat de bassin versant est en charge de réduire les problèmes de ruissellement érosif au sein du bassin versant via la mise en place d'aménagements dont il négocie l'implantation avec les agriculteurs. Il doit aussi émettre un avis consultatif sur les PLU proposés par chaque maire. L'agent-animateur de syndicat d'eau est quand à lui en charge de réduire les problèmes de turbidité via des interventions (remise en herbe) sur les périmètres de protection du captage qu'il négocie avec les agriculteurs. Il peut préempter les parcelles les plus importantes à ces yeux pour lutter contre le ruissellement, dans la 2^{ème} phase règlementaire du jeu. Les deux agents animateurs doivent cependant rester dans une enveloppe budgétaire qui leur est allouée pour les 8 ans.

Pour permettre l'enregistrement et la prise en compte des actions des joueurs, plusieurs interfaces de saisie ont été implémentées (**Figure 35**).

L'interface « PLU » permet aux maires d'indiquer au modèle les parcelles qui passent de l'état de zone agricole à l'état de zone à urbaniser dans chacune des trois communes.

L'interface « Aménagements » permet d'indiquer au modèle la localisation et le type d'aménagement à positionner sur les parcelles. Pour simplifier le travail des joueurs aux cours des sessions de jeu, nous avons décidé de les aider en développant des procédures informatiques de positionnement automatique des aménagements au sein des parcelles indiquées. Ces procédures effectuent aussi le changement d'occupation du sol, la mise à jour des comportements vis-à-vis de la production de ruissellement et d'érosion et recalculent les budgets des joueurs en fonction des aménagements et des pertes de surface de culture.

- Pour les bassins de rétention, l'animateur doit seulement donner le numéro de la parcelle et la capacité du bassin de rétention parmi 3 possibilités (3000, 9000 ou 18000 m³) auxquelles nous avons associées un nombre de pixel fixe (3, 9 ou 18 pixels). La procédure informatique recherche ensuite dans les pixels de la parcelle, ceux qui sont identifiés comme des axes de concentration du ruissellement ou talweg d'après la Figure 36. Dans le sous-ensemble de pixels « talweg », la procédure informatique repère ensuite le pixel le plus en aval qui sera considéré comme l'exutoire du bassin. Enfin, 2, 8 ou 17 pixels limitrophes à ce dernier sont ensuite sélectionnés en fonction de la capacité choisie précédemment pour constituer l'emprise totale du bassin de rétention. Comme dans la réalité, une parcelle qui ne serait pas traversée par un axe de concentration ne peut donc pas recevoir un bassin de rétention.
- Pour les bandes enherbées, deux localisations possibles ont été implémentées : dans le talweg ou en bordure de parcelle. Dans le premier cas, le joueur indique seulement le numéro de la parcelle et tous les pixels identifiés comme des pixels de talweg d'après la Figure 36 vont devenir des pixels de bande enherbée. Dans le second cas, il doit préciser non seulement le numéro de la parcelle où il souhaite implanter une bande enherbée mais également le numéro de la parcelle ou des parcelles limitrophes afin que la procédure informatique repère la bordure qui doit être enherbée.
- Pour les haies, la procédure est identique à celle d'une bande enherbée en bordure de parcelle.
- Pour les fascines, le joueur indique seulement le numéro de la parcelle. La procédure informatique va de nouveau explorer les pixels de talweg de la parcelle pour repérer celui qui est localisé le plus au centre de la parcelle. C'est ce dernier qui sera considéré comme le pixel fascine.

L'interface « foncier » permet d'enregistrer les échanges amiables de parcelle entre les joueurs. Elle permet également d'enregistrer les prescriptions ou les préemptions de parcelle faites par les animateurs. Enfin elle est utilisée pour savoir quelles parcelles en zone AU sont vendues par les agriculteurs et connaître les intentions des différents maires en terme de taxation des ventes de parcelle.

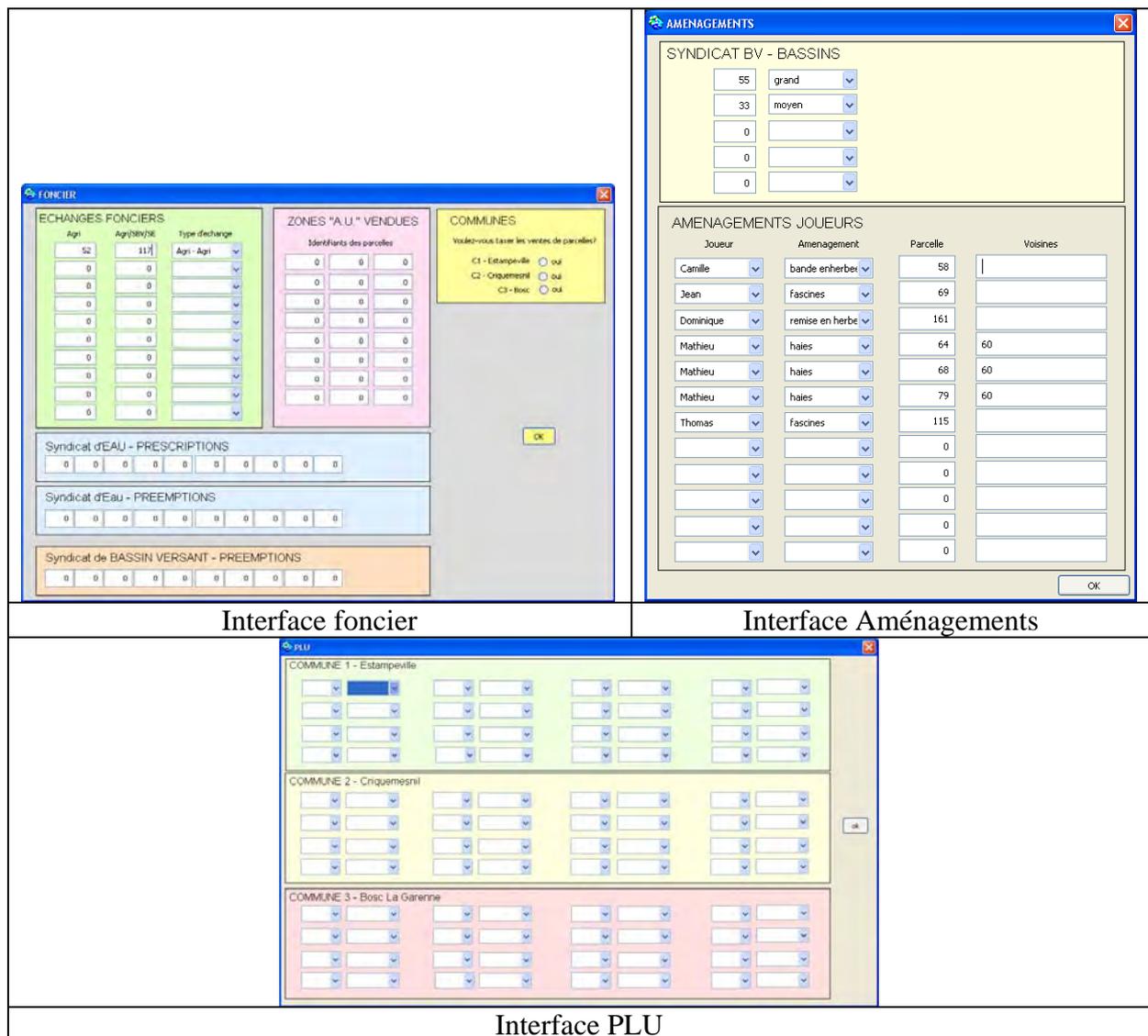


Figure 35 : interfaces du modèle Ruis'eau

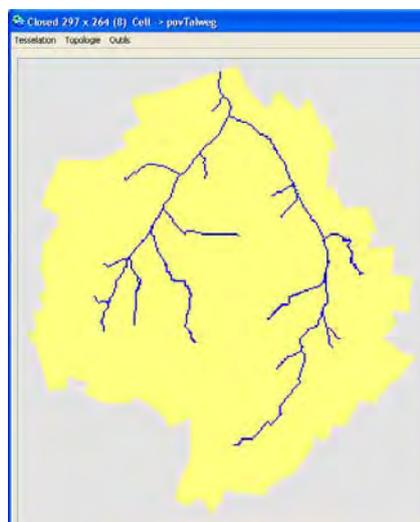


Figure 36 : Axes majeurs de concentration du ruissellement au sein du bassin versant

5.3. Les indicateurs :

Afin de faciliter la prise de décision des joueurs plusieurs points de vue cartographiques ont été implémentés. Ils sont complétés par des informations écrites ou présentées sous forme de carte imagée (Figure 30, Figure 31).

A chaque pas de temps, plusieurs cartes sont générées pour aider à visualiser les problèmes de ruissellement érosif sur le territoire. La Figure 37 présente un exemple de carte qui permet aux joueurs de localiser les passages d'eau et leur gravité avec l'intensité de la couleur. Cette carte est complétée par des données numériques qui informent précisément l'animateur du syndicat de bassin versant des volumes d'eau à l'exutoire du bassin et des tonnes de terre exportées par érosion diffuse ou concentrées.

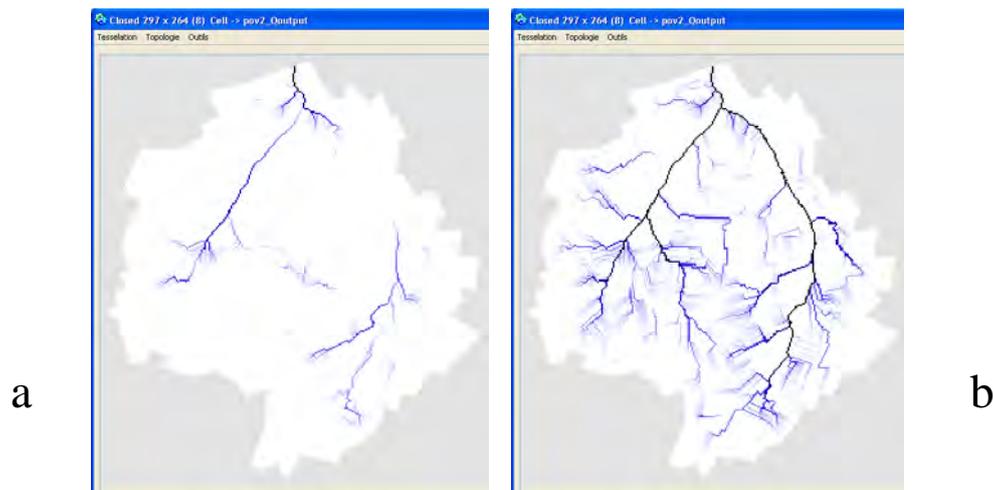


Figure 37 : Accumulation du volume ruisselé lors d'un événement pluvieux standard (a) ou catastrophique (b)

Une carte des aménagements implantés est disponible également et mise à jour à chaque pas de temps en fonction des décisions des joueurs (Figure 38).

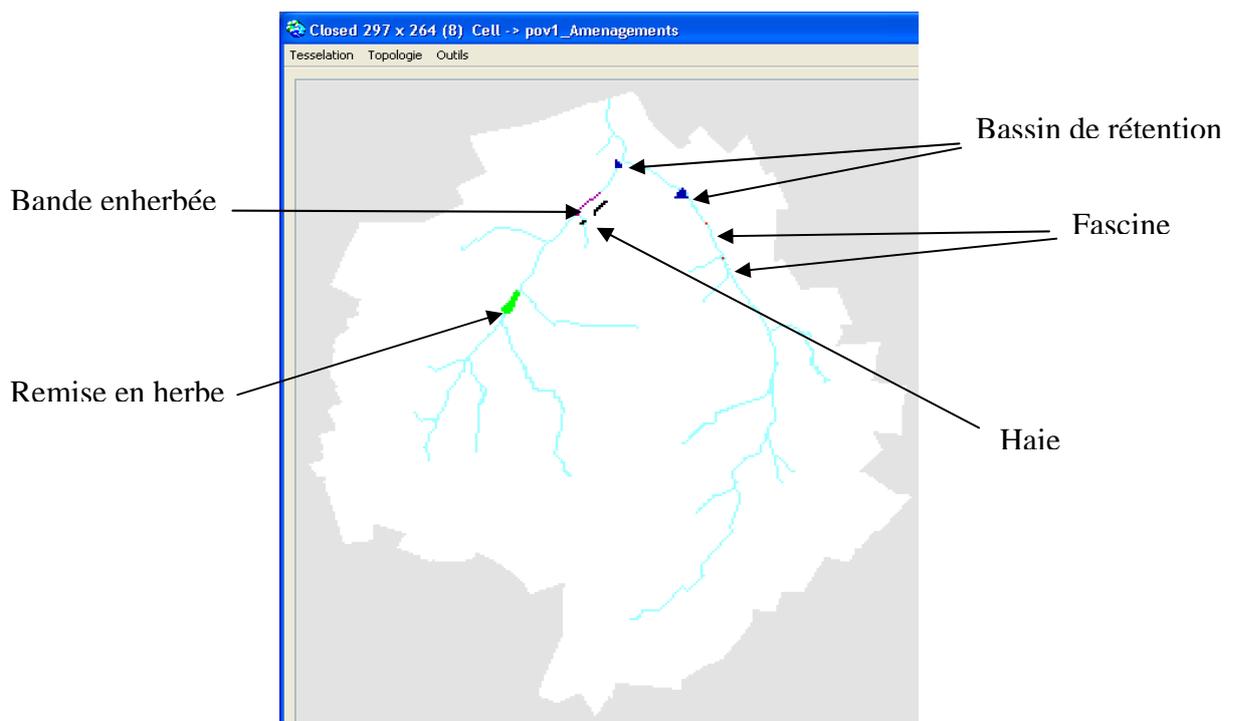


Figure 38 : Carte des aménagements installés

Pour faciliter aussi la visualisation des parcelles érodées, une carte avec 3 niveaux de gravité d'incision est disponible à chaque pas de temps, les parcelles en rouge étant les plus érodées (Figure 39). Chaque agriculteur reçoit en plus la liste des numéros de ses parcelles qui sont classées au niveau 3 afin de les aider à cibler au mieux leurs actions.

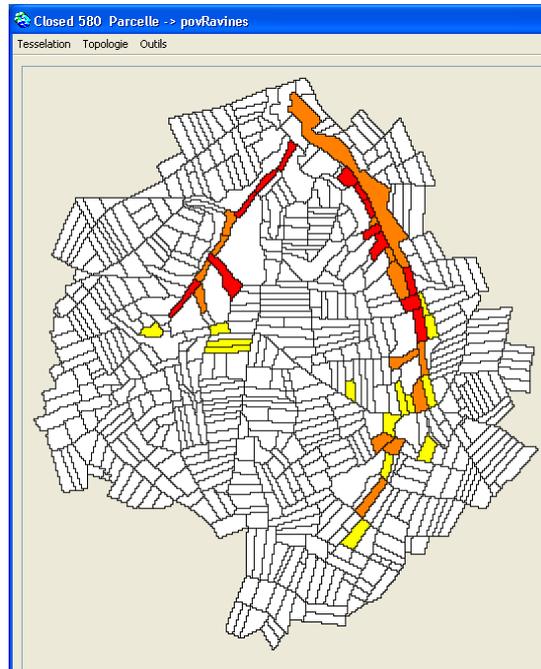
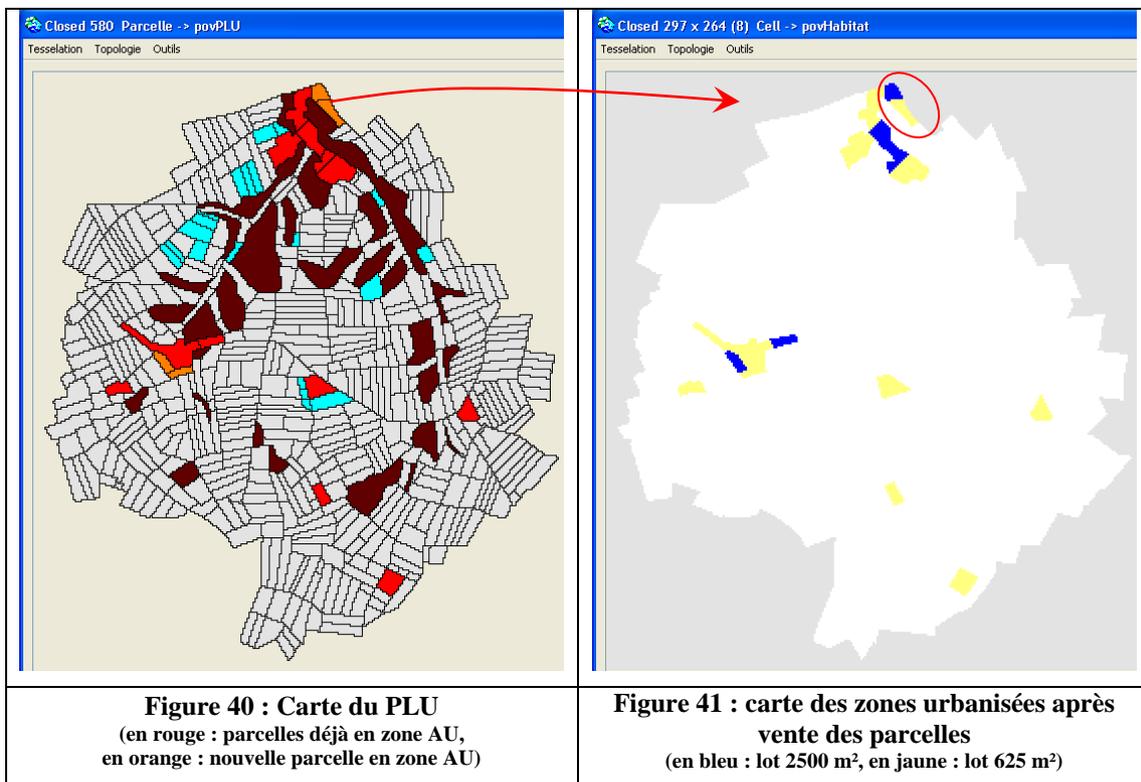


Figure 39 : Carte des niveaux de gravité d'incision des parcelles

Pour aider les maires, une carte visualisant le PLU est élaborée au cours du jeu et éditée (Figure 40). Elle est complétée par une carte qui permet de voir la progression des zones habitées en fonction des ventes des parcelles réalisées par les agriculteurs (Figure 41).



A chaque pas de temps, chaque joueur reçoit des informations non seulement techniques mais aussi économiques sous la forme d'une impression papier. Le Tableau 12 liste l'ensemble des informations fournies aux différents joueurs ainsi qu'au maître du jeu qui distribue à chaque pas de temps les cartes imagées (Figure 30, Figure 31).

A ce stade du développement de la démarche (deux tests du jeu avec des chercheurs et avec les co-concepteurs de la démarche) cette liste des indicateurs est longue. Cette complexité est inhérente à la multitude des enjeux et des angles de vue possibles selon les intérêts des acteurs. Les premières vraies séances de jeu avec des acteurs de terrain devraient aider à spécifier parmi cet ensemble les indicateurs qui paraissent les plus pertinents pour la prise de décision.

Tableau 12 : Ensemble des indicateurs fournis à chaque joueur et à chaque pas de temps annuel

<p>Année 5 – Dominique (Agriculteur)</p> <p>EROSION</p> <ul style="list-style-type: none"> - parcelles avec ravines profondes: 152, 179, - surface productive perdue (m2): 2289 - pertes EBE par érosion (rui): 14 - pertes EBE aménagements: 0 <p>FONCIER</p> <ul style="list-style-type: none"> - parcelles vendues/échangées: - parcelles acquises: - parcelles prescrites: - parcelles MAE: 161, <p>AMENAGEMENTS</p> <ul style="list-style-type: none"> - cout installation: 0 - cout entretien: 0 - cout total: 0 - haies (ml): 0.0 - fascines (ml): 0.0 - bande enherbée (m²): 0.0 - bassin (m3): 0.0 - remise en herbe (m²): 2.375 <p>BILAN ECONOMIQUE</p> <ul style="list-style-type: none"> - ebe (rui): 3702 - revenu (rui): 2147 - épargne (rui): 1354 - revenus des ventes de parcelles (rui): 0 - revenus des ventes de zones A.U. (rui): 0 - indemnités des parcelles MAE (rui): 56 - indemnités des prescriptions (rui): 0 - indemnités des bassins (rui): 0 	<p>Année 5 - SYNDICAT EAU</p> <p>FONCIER</p> <ul style="list-style-type: none"> - parcelles DPU ou échangées: - parcelles prescription - superficie prescriptions (ha): 0 - superficie MAE (ha): 0 <p>BILAN ECONOMIQUE</p> <ul style="list-style-type: none"> - solde annuel (rui): 3438 - budget restant (rui): 2063 - cout DPU (rui): 0 - cout prescriptions (rui): 0 - cout MAE (rui): 0 <p>Année 5 - SYNDICAT BASSIN VERSANT</p> <p>EROSION - RUISSELLEMENT</p> <ul style="list-style-type: none"> - ruissellement exutoire (m3): 13956.9 - érosion totale exutoire (t): 48.3596 <p>FONCIER - AMENAGEMENTS</p> <ul style="list-style-type: none"> - parcelles achetées ou échangées: - haies (ml): 400.0 - fascines (ml): 20.0 - bande enherbée (m²): 8125.0 - bassin (m3): 27000.0 <p>BILAN ECONOMIQUE</p> <ul style="list-style-type: none"> - solde annuel (rui): 0 - budget restant (rui): 3500 - cout DPU (rui): 0 - cout haies (rui): 0 - cout fascines (rui): 0 - cout bande enherbée (rui): 0 - cout bassin (rui): 0 - cout entretien bassin (rui): 8100 - cout curage bassin (rui): 0 - couts tot. aménagements (rui): 8100
<p>Année 5 - COMMUNE 3</p> <p>URBANISATION</p> <ul style="list-style-type: none"> - lots a construire: 0 - parcelles urbanisées: 274, 297, - bonus plus-value: 338.35 <p>BILAN ECONOMIQUE</p> <ul style="list-style-type: none"> - solde annuel (rui): -1630 <p>DEGATS</p> <ul style="list-style-type: none"> - dégâts érosion: Niveau fort - cout érosion (rui): 1111 	<p>Année 5 - MAITRE DE JEU</p> <p>FONCIER</p> <ul style="list-style-type: none"> * parcelles en zone SAFER: 18, 22, 45, 48, 50, 69, 93, 96, 95, 105, 119, 125, 124, 129, 132, 135, 167, 322, 340, 345, 357, superficie SAFER (ha): 68.9375 * parcelles en zone A.U: 1, 6, superficie A.U. (ha): 8.4375 <p>EROSION - RUISSELLEMENT</p> <ul style="list-style-type: none"> - ruissellement (m3): 13956.9 - érosion diffuse (t): 5.13464 - érosion concentrée (t): 43.225 - érosion totale (t): 48.3596 - NFU captage: 15 <p>DEGATS</p> <ul style="list-style-type: none"> - commune 1 - Estampeville: Pas de dégâts - commune 2 - Criquemesnil: Pas de dégâts - commune 3 - Bosc: Niveau fort

6. Le jeu de rôles Ruis'eau : un support pour initier des apprentissages et discuter de solidarités sur le ruissellement érosif

Le recours à un jeu de rôle pour animer le dialogue entre acteurs à propos du ruissellement érosif répond à deux objectifs : i) un apprentissage sur les conséquences de comportements individuels et de dynamiques territoriales sur ces nuisances à l'échelle d'un bassin versant élémentaire ; ii) une opportunité de débat ouvert, en particulier lors des débriefings, sur les conditions et limites d'une action concertée contre l'érosion.

6.1 Présupposés sur les processus d'apprentissage

Le recours au jeu de rôle emprunte aux présupposés de la théorie de l'apprentissage social (Bandura, 1997) : l'adoption d'un nouveau comportement serait favorisé si le sujet développe une capacité de rétention (en se souvenant ce qu'il a observé), de reproduction (capacité à reproduire le comportement), et une motivation à changer (bonnes raisons). Les jeux de rôles peuvent agir sur ces trois éléments dans des contextes d'incidences complexes de comportements individuels et collectifs. On n'envisage pas un simple transfert de connaissances scientifiques. Il s'agit de rendre les phénomènes complexes perceptibles en aidant les personnes à reconstruire des réalités au travers de l'expérimentation sur une situation virtuelle, du discours et de l'observation.

On postule qu'en expérimentant, même virtuellement, les individus peuvent améliorer leurs connaissances et accroître leurs motivations à s'engager dans le monde réel. D'un point de vue théorique, le processus de réflexion itérative survient lors du partage d'expériences et d'idées avec d'autres, selon deux modes : l'apprentissage transformatif (Mezirow, 1995, et l'apprentissage expérientiel (Kolb, 1984) :

- L'apprentissage transformatif est une altération des perceptions et de la conscience individuelle par un processus de réflexion et d'engagement critique. Cette forme d'apprentissage inclus l'apprentissage instrumental (orienté vers une tâche) et l'apprentissage communicatif (capacité à examiner et réinterpréter les significations, intentions et valeurs associées aux actions).
- L'apprentissage expérientiel (« learning-by-doing » « processus selon lequel la connaissance se crée par la transformation de l'expérience ») est issu des théories constructivistes, selon lesquelles les connaissances se construisent à partir du vécu. Il est dans la lignée de la cognition sociale conçue par Vygotsky's (1978) pour l'élaboration d'un savoir social dans lequel l'apprentissage se rapporte à une transaction entre la personne et l'environnement social.

L'apprentissage expérientiel est un processus qui permet de construire un savoir par la mise en tension de quatre modes d'action : expérimenter, réfléchir, penser, agir (Figure 42).

Structurellement, ces quatre modes constituent les étapes successives d'un cycle qui se réfère aux processus par lesquels les individus, équipes et organisations réalisent et comprennent leurs expériences et modifient leurs comportements :

- L'expérience concrète (expérimenter) constitue la phase d'immersion du sujet dans la réalisation de sa tâche. Lors de cette phase, habituellement, il ne réfléchit pas sur la tâche.
- Ensuite, lors de la phase d'observation réfléchie (réfléchir), le sujet réfléchit sur ce qui a été fait et vécu. Ce qui est compris par le sujet ou ce qu'il rapporte dépend alors de ses aptitudes dans le domaine de l'observation et de la communication. Les valeurs et attitudes du sujet peuvent ici avoir une influence sur les éléments remarquables.

- La phase suivante est consacrée à la conceptualisation abstraite (penser), qui consiste à interpréter les événements remarquables et à essayer de les intégrer dans un système théorique.
- Enfin, l'expérimentation active (agir) est la mise en application d'une nouvelle compréhension pour essayer de prédire ce qui pourrait subvenir à la lueur de la théorie nouvellement élaborée.

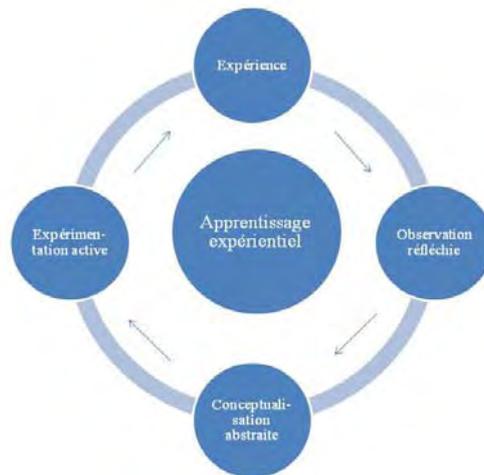


Figure 42 : Schématisation du cycle d'apprentissage de Kolb

Concrètement, au cours du jeu on favorise la réflexivité par l'utilisation d'indicateurs pour rendre les problèmes visibles, des résultats économiques transparents, des situations d'observations permettant d'établir des inférences, et des situations d'échange d'informations et d'expériences entre les apprenants. Pour cela on s'efforce de créer un équilibre entre les temps d'action, de réflexion, d'expérimentation et de conceptualisation. L'espace fourni doit être hospitalier ce qui signifie caractérisé par le respect de tous. Il se doit d'être sécurisant et encourageant, mais aussi porteur de défis. Le recours à des arguments d'autorité est limité, mais les avis d'experts peuvent être mobilisés pour assister les expériences et l'analyse des résultats

Le débriefing à chaud doit permettre en particulier d'amplifier les étapes de réflexion et de conceptualisation, à partir des expérimentations sur ce bassin virtuel :

- La première partie est consacrée à des questionnements sur des logiques individuelles, des systèmes des valeurs et des comportements relativement aux autres joueurs ;
- Puis il s'agit d'évaluer collectivement les résultats, de discuter des dynamiques du groupe, des négociations mises en place ou avortées
- S'ensuit une discussion sur d'éventuelles incompréhensions des processus naturels, des données techniques, des dynamiques sociales et économiques du territoire et d'une appréciation de l'intérêt et des limites de la concertation et des négociations.

Une quatrième étape clos cette discussion par une invitation à expliciter les possibilités de développer des moyens de lutte contre le ruissellement sur le « vrai » territoire de vie des participants. Des questions de relance mettent en critique la pertinence des simplifications opérées dans les comportements joués.

Cependant, il s'agit d'une séance courte de 3 à 4 heures et il serait présomptueux de prétendre à faire plus qu'initier ce processus d'apprentissage expérientiel – sur les origines multiples du ruissellement, ses conséquences, les moyens de lutte. Selon la capacité de conceptualisation et de réflexivité des participants, cette séance de jeu pourrait initier un apprentissage transformatif - sur la capacité à examiner et réinterpréter leurs propres terrains d'action.

Il faudra évidemment beaucoup plus que la participation ponctuelle à un jeu de rôle pour passer de ce début de prise de conscience individuelle et collective à l'engagement dans l'action solidaire, concrète sur un territoire par la transformation des comportements réels et des valeurs. La définition d'une telle stratégie d'animation complète sort des objectifs envisageables dans le temps limité du projet Surge.

6.2 Protocole d'évaluation de la démarche

Les pistes d'observation et d'analyse des séances de jeu reposent sur l'identification de la nature des apprentissages initiés et sur l'expression, par les joueurs des conditions et contraintes à l'action concrète sur le terrain, lors des débriefings.

Concrètement, nous nous appuyerons sur des supports d'analyse à chaud, avec les participants et à froid après les sessions.. Les échanges entre joueurs sont enregistrés (table commune, table des animateurs de syndicats). Toutes les actions formelles (définition des PLU, ventes foncières, implantations d'aménagements) sont conservées en mémoire du dispositif informatique et également en version papier sur des feuilles de décisions.

Pour cibler le plus objectivement possible les apprentissages initiés, les participants sont invités à compléter le même questionnaire en début et fin de session (Tableau 13). En effet, d'après Bateson (1977), l'apprentissage se révèle par une réponse de l'apprenant qui est différente de celle donnée dans une situation antérieure. Le questionnaire de début sert ainsi de référence.

Dans ce questionnaire on choisit d'aborder 3 grands thèmes :

- la perception des enjeux érosion, ruissellement, turbidité ;
- les actions conduites en matière de lutte ;
- la connaissance et les perceptions des actions des différents acteurs du territoire. Les perceptions sur les enjeux érosion, ruissellement, turbidité, couvrent à nouveau trois éléments :
 - o la conscience du problème (visibilité et caractérisation du problème) ;
 - o la dépendance au problème (impacts de l'érosion ou du ruissellement) ;
 - o la responsabilité individuelle (sentiment de responsabilité individuelle et de sensibilisation au problème, volonté d'améliorer la situation par un engagement personnel).

Ces différents points renvoient à différentes échelles d'analyse (parcelle, exploitation agricole, commune, bassin versant) afin d'identifier les représentations que se font les acteurs du phénomène de ruissellement érosif en matières de cause, de lieux d'origine et de lieux de manifestation.

En résumé, les 7 questions du questionnaire devraient permettre d'aborder les connaissances sur les aspects techniques (moyens de lutte), sur les processus et sur les aspects plus stratégiques de gestion du territoire. Il doit être très court pour ne pas pénaliser la phase de jeu déjà longue.

En complément de ce questionnaire, des entretiens individuels à froid après les sessions de jeu seront réalisés auprès des participants les plus volubiles d'une part et les moins engagés d'autre part, pour appréhender une palette la plus large possible d'attitudes. On s'efforcera de repérer les transformations personnelles, en enquêtant les participants sur la conception qu'ils avaient avant et après la séance, de leurs propres intérêts, de l'intérêt de leur groupe local, de l'intérêt d'autres groupes, de l'intérêt des communes, et des solidarités possibles entre tous ces intérêts.

Tableau 13 : Questionnaire destiné à qualifier les apprentissages au cours du jeu de rôle Ruis'eau

1) Selon vous, avec quelle gravité le ruissellement érosif affecte-t-il les secteurs suivants, dans votre région (entourez le niveau de gravité) :					
i.	Exploitations agricoles :	pas du tout	peu	fort	Ne sait pas
ii.	Les services communaux :	pas du tout	peu	fort	Ne sait pas
iii.	Les services d'eau potable :	pas du tout	peu	fort	Ne sait pas
iv.	Les communes amont des bassins:	pas du tout	peu	fort	Ne sait pas
v.	Les communes à l'aval des bassins :	pas du tout	peu	fort	Ne sait pas
2) Y a-t-il selon vous un lien entre le ruissellement érosif et la qualité de l'eau souterraine destinée à la consommation ? Si oui expliciter ce lien ?					
3) Selon vous, l'urbanisation des terres agricoles est-elle (entourez) :					
i.	Un facteur aggravant les causes du ruissellement érosif:	Oui	Non	Ne sait pas	
ii.	Un facteur aggravant les dégâts du ruissellement érosif:	Oui	Non	Ne sait pas	
iii.	Une opportunité de dialogue entre agriculteurs et non agriculteurs pour agir collectivement contre le ruissellement érosif:	Oui	Non	Ne sait pas	
4) Quelles solutions connaissez-vous pour lutter contre le ruissellement érosif ?					
5) Quelles sont celles qui vous semblent les plus adaptées à votre zone (classez par ordre décroissant) et pourquoi ?					
6) Quelles sont les principales contraintes à la mise en place d'une gestion du ruissellement érosif ?					
7) Quelles sont les solutions que vous avez mises en œuvre ou envisagez de mettre en œuvre sur votre zone et pourquoi ?					

6.3 Test du protocole d'évaluation des apprentissages lors de la session avec la communauté de pratique montpelliéraine

Le test de jouabilité de Ruis'eau avec la Communauté de Pratique a été doublé d'un test du questionnaire conçu pour évaluer les apprentissages.

Les réponses au questionnaire ont été analysées avec beaucoup de précautions car les participants, contrairement aux acteurs locaux, n'avaient qu'une connaissance très partielle de la problématique locale (après un bref exposé en début de séance). Or d'après Barreteau (2003), les participants d'un jeu de rôles interagissent en utilisant leur expérience de la réalité et non en suivant simplement les règles. Cependant, on relève plusieurs éléments qualitatifs qui nous fournissent des amorces de discussion sur l'effet du modèle.

Il semble que le jeu se soit révélé efficace dans la mise en lumière des tensions de gestion en lien avec les différentes activités sur le bassin et les intérêts divergents des joueurs. On note en effet un certain nombre de propos de même nature chez 9 des 13 participants, dans l'évocation des principales contraintes de gestion du bassin (question 6). Cette compréhension accrue des phénomènes de gestion résulte principalement de la prise de conscience des interdépendances et des problèmes organisationnels de partage des compétences entre les deux syndicats, et entre les syndicats et les communes. Ainsi, le maire d'Estampeville-Bellemare, après avoir incriminé exclusivement dans le questionnaire initial (Q6) la mauvaise volonté des agriculteurs et des communes amont, reconnaît que les problèmes sont liés à une gestion désordonnée des contraintes des uns et des autres. A cette même question, l'agriculteur Jacques répond en fin de partie difficultés rencontrées sont liées à la capacité des

différents acteurs à « agir ensemble ». Les réponses des agriculteurs se rejoignent autour de la lourdeur des procédures administratives et une fois encore les courts-circuits dus à l'enchevêtrement des compétences des uns et des autres. Ainsi pour Thomas « Les choses ne sont pas claires. Le Syndicat d'Eau raconte certaines choses et propose des MAE, les maires proposent d'autres choses ».

Ensuite, sur les solutions envisagées (Q7), le maire d'Estampeville-Bellemare adopte initialement une position de victime en exprimant une impuissance face aux phénomènes qui se produisent dans sa commune alors qu'il perçoit les communes amont et les agriculteurs comme responsables. En fin de session, il se sent prêt à agir, et à adopter n'importe quelle solution et à n'importe quel prix « pourvu qu'il puisse urbaniser ». Cette attitude révèle que le jeu répond bien aux attentes de ses concepteurs, qui est de reproduire les tensions liées à la dynamique d'urbanisation. La position du syndicat sur l'urbanisme réglementaire (validation des PLU) met en porte-à-faux les élus des trois communes qui perçoivent qu'ils ne peuvent pas prendre totalement en main leur politique foncière. En lien avec cette pression urbaine, on voit émerger les aspects liés à la concurrence d'usage des parcelles, à la fois dans les réponses aux questionnaires et dans les interactions de jeu où le foncier est au cœur des processus de négociation.

Concernant la perception du phénomène du ruissellement érosif et de ses conséquences sur la qualité de l'eau (Q1, Q2), la réponse de Thomas montre aussi des apprentissages. En effet, initialement il déclarait ne pas savoir si les services d'eau potable de la commune pouvaient être touchés, puis modifiait en fin de session sa réponse pour un service fortement affecté. Quant au processus de dégradation de la qualité de l'eau souterraine destinée à la consommation, il passe d'une position d'ignorance à une connaissance tacite, mais non explicite « l'expert hydrogéologue l'a dit ».

Sans exagérer l'importance de ce test du protocole d'apprentissage auprès d'une communauté bien différente des habitants du pays de Caux la modification de la conscience discursive des participants au cours de cet essai permet d'espérer que des changements de perceptions s'opèreront dans les « vraies sessions » sur le terrain. Les maires et agriculteurs situés sur les lieux sources ont a priori peu d'intérêt à agir puisqu'ils ne sont pas matériellement touchés. C'est ce qu'il s'est effectivement passé pendant la session, les propriétaires terriens préfèrent exploiter les terres agricoles ou les proposer à l'urbanisation. Mais l'on peut s'attendre avec les acteurs locaux à l'émergence d'une certaine forme de solidarité motivée par la pression et les normes sociales, car ils ont à faire face à un problème réel. En effet, d'après Chenard et Parkins (2010), les normes sociales jouent un rôle dans le processus de prise de décision en influençant les réponses coopératives. Il peut s'agir de normes collectives, marquées par une sanction de la part des autres, ou de normes perçues ou subjectives qui sont une interprétation des normes collectives, de la pression sociale renforcée par des émotions personnelles comme la honte, la culpabilité ou la fierté. La reconnaissance des pairs et de la communauté constitue une incitation puissante.

7. Conclusion

Depuis les années 70 des crises successives et les limites des solutions curatives ou de protection (bassin de rétention, endiguement, systèmes de filtration de l'eau potable...) ont conduit à une prise de conscience collective de la complexité de la gestion du risque de ruissellement érosif. Mais « *le ruissellement est exemplaire des difficultés à adopter une gestion solidaire. La globalité des interactions conduit à rechercher une gestion à l'échelle des problèmes physiques* », c'est-à-dire le bassin versant. « *Cependant l'individualisme des pratiques freine la constitution d'une démarche collective. Outre les antagonismes d'intérêts la fragmentation et l'évolution rapide des pratiques rendent difficiles l'ajustement* » (Cartier 2002 p. 321). « *L'interdépendance ne suscite pas spontanément la solidarité qui repose sur une appartenance et des normes communes. L'abondance des discours sur la nécessaire concertation témoigne de l'atomisation des relations dans le bassin versants et de la difficulté d'une solidarité spontanée entre agriculteurs ou entre municipalités* » (Cartier 2002 p 349).

De nombreux éléments de ce constat pessimiste, issus d'analyses de la fin des années 90 perdurent dix ans après.

De multiples mobilisations publiques peinent à engager les acteurs sur la base d'une rhétorique préventive dans les SAGE, les SCOT, les PLU, les syndicats de bassins. Elles agissent d'abord dans le registre des solidarités imposées soit via des prescriptions règlementaires, soit via des mesures globalisées financées par l'impôt. La volonté des élus et l'administration repose notamment sur la peur d'actions en justice d'éventuelles victimes en cas d'inaction.

De nombreuses expérimentations ont pourtant eu lieu et sont mises en visibilité sous forme de sites pilote. Des capacités d'expertises locales ont été développées afin de préciser les techniques de lutte préventive du ruissellement. Cependant la généralisation de la prévention du ruissellement se heurte à de nombreuses difficultés : i) les effets de changement des pratiques ne sont perceptibles qu'à long terme ; ii) ses résultats sont fragiles car il est difficile d'imposer des modifications à la multitude de ceux qui sont impliqués sur les sites exposés ; iii) l'action préventive interpelle les notions de justice et d'équité puisqu'elle met en exergue de nouvelles « inégalités d'exposition ou d'efforts à consentir » à différentes échelles (entre agriculteurs en zones amont, entre habitants des zones exposées aval, entre amont / aval, entre secteurs d'activité. Comme le souligne Cartier (2002), dépasser ces contraintes passe par l'élaboration d'un accord collectif sur le territoire entre activités, les interdits pour chacune d'elles, les conditions sociales et financières d'une augmentation des contraintes subies de manière inégale ; en d'autres termes mobiliser les acteurs sur un bassin autour de solidarités calculées ou opportunes pour des objectifs partagés. Or les organisations territoriales marquent encore nettement la permanence de rapports de forces défavorables à celle mobilisation à l'échelle des bassins versants : la séparation amont / aval et urbain/ rural perdure très fortement dans la définition des pays, des communautés de communes rurales versus urbaines, dans la myriade de petits syndicats d'eau etc...).

En outre la mobilisation de la population, notamment du monde agricole se heurte au fait que l'érosion n'est toujours pas vécue comme un problème public mais comme une « gêne » d'ordre privé ou de simple voisinage entre agriculteurs, ou entre agriculteurs et rurbains. De plus cette thématique de ruissellement érosif est peu abordée dans les réseaux professionnels agricoles, peu actifs et de toute façon assez indépendants des relations de voisinages dans cette zone de fortes hétérogénéités entre systèmes de production (Epices 2008).

Malgré les sites « pilote » et les références locales sur la lutte contre le ruissellement érosif, les différentes études soulignent la méconnaissance des élus et des agriculteurs de ses aspects techniques, règlementaires et économiques. « *Pour éviter le découragement et le déni de*

responsabilité des décideurs locaux (...) la formation à la compréhension des phénomènes et à la pluralité des solutions envisageables représente une première nécessité pour sortir du silence coupable ou de solutions curatives aussi surdimensionnées que provisoires » (Cartier 2002, p 349). Ce constat a été réitéré dans les documents du SAGE (2005). Le Jeu de rôle Ruis'eau a été conçu pour aider les acteurs d'un petit bassin versant à explorer les conséquences des pratiques agricoles conjuguées à des dynamiques d'urbanisation sur le ruissellement érosif, puis à évoquer les conditions d'une mobilisation collective locale pour prévenir ses nuisances.

Le parti pris a été une démarche de modélisation d'accompagnement, c'est-à-dire d'une co-construction d'une représentation des phénomènes à considérer avec des acteurs du territoire impliqués à titre divers par les enjeux du ruissellement érosif. Elle aboutit à un jeu de rôle couplé à un modèle informatique avec lequel des joueurs peuvent explorer le devenir d'un petit bassin versant de 2000 ha environ soumis à des modalités d'aménagement qu'ils choisissent. Sur ce petit bassin virtuel, en jouant des rôles simplifiés de maires, d'agriculteurs, d'animateurs de bassins ; les participants peuvent visualiser les conséquences physiques (ruissellement) économiques (coûts des nuisances et des aménagements) sociales (protestation des autres joueurs) de choix qu'ils opèrent à titre individuel ou collectif. Ils sont invités ensuite à débattre de leurs comportements individuel et collectif durant cette parenthèse virtuelle, puis à ramener la réalité de leur vécu afin de prolonger le débat sur les conditions d'une approche solidaire de la lutte contre le ruissellement érosif. Un protocole de suivi est proposé pour qualifier les apprentissages initiés au cours de cette animation prévue pour durer environ 3 heures. Jeu et protocole ont été testés mais n'ont pu être utilisés sur le terrain avec de vrais agriculteurs et maires pour des contraintes de calendrier.

Néanmoins, la qualité éducative de la participation à ce type d'atelier est plus facilement associée au gain d'une compétence qu'à des dispositions solidaires. Ce que l'on « apprend » en participant, n'est-il pas plus une compétence qu'une disposition ? Cultiver des compétences, n'est pas la même chose que cultiver des dispositions (Dahl, 1992). Si pour initier un changement, les acteurs doivent comprendre le problème et être conscients des enjeux, à l'inverse, une bonne perception et connaissance du problème ne signifie pas se sentir prêt à agir et encore moins s'engager dans l'action concrète. Il existe en effet deux catégories d'apprentissages, les apprentissages qui amènent les gens à réfléchir et les apprentissages qui résultent en de véritables transformations. Il est très difficile de mesurer l'hypothèse d'une transformation personnelle (vers une attitude plus solidaire par exemple). Or, pour instaurer de façon efficace et durable une « hydro-solidarité », le travail sur la transformation des mentalités est primordial, comme l'a souligné Cartier (2002). A supposer que les ateliers utilisant Ruis'eau favorise l'émergence d'une empathie et un certain sens des responsabilités vis-à-vis du ruissellement, rien ne dit qu'ils perdureront au-delà de l'espace et du temps de discussions.

Bibliographie

- Anglade, J. 2011. Ruis'eau : un outil d'aide à la concertation pour la gestion des risques liés au ruissellement érosif en Seine Maritime. Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie Parcours Hydrologie-Hydrogéologie. Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris & École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts. 50p.
- AREAS, 2008, ruissellement, érosion, inondation, pollution : comprendre les phénomènes et les différents facteurs afin de mieux analyser les marges de manœuvre, présentation power point support de formation technique, en ligne : www.areas.asso.fr/images/formations/processus.pdf.
- Auzet A.V., 1987, L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : Aspects agronomiques, CEREG, 60 p.
- Bandura, A., 1977. Social Learning Theory. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Barnaud C., Trébuil G., Dumrongrojwathana P., Marie J., 2008, Area study prior to companion modelling to integrate multiple interests in upper watershed management of northern Thailand, Southeast Asian Studies, Vol. 45, No. 4, pp. 559-585
- Barreteau et al., 2003. A role-playing game in irrigated system negotiation: between play and reality. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, vol. 6, no.3.
- Bateson, G., 1977. Vers une écologie de l'esprit. Tome 1, Paris Le Seuil
- Béraud, A.L., 2010. Analyse du développement des territoires alsacien et normand et des relations entre la gestion du territoire et la gestion de l'eau. Rapport du projet « SURGE ». Irstea Montpellier.
- Beven, K., 2001. Tribune Libre : L'unicité de lieu, d'action et de temps. Rev. Sci. Eau. 14 (4) : 525-533.
- Beven, K., 2001. How far can we go in distributed hydrological modelling? Hydrology & Earth System Sciences, Vol 5,1-12.
- Blanchard E., King C., Le Bissonnais Y., Bourguignon A., Souchère V., Desprat JF., Maurizot P., 1999, Paramétrisation du potentiel de ruissellement des bassins versants au moyen de la télédétection et des systèmes d'information géographiques, Etude et gestion des sols, vol. 6, no. 3, pp. 181-199
- Boiffin J., Papy F., Eimberck M., 1988, Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I : analyse des conditions de déclenchement de l'érosion, Agronomie vol. 8, no. 8, pp. 663-673
- Bousquet F. et Trébuil G., 2005, Introduction to companion modeling and multi-agent systems for integrated natural resources management in Asia, in Bousquet F, Trébuil G, Hardy B (eds.), Companion modeling and multi-agent systems for integrated natural resource management in Asia. International Rice Research Institute, Los Baños (Philippines), pp. 1-17
- Bots, P. W. G. (2007). Benchmarking in Dutch Urban Water Management: An Assessment. In C. Pahl-Wostl, P. Kabat & J. Moltgen (Eds.). Adaptive and Integrated Water Management: Coping with Complexity and Uncertainty (pp. 277-300). Berlin: Springer
- BRGM, 1998. Vallée du Haut Cailly (Seine-Maritime). Relations nappe/rivière. DRIRE Haute Normandie
- Bull et al., 2008. Social learning from public engagement : dreaming the impossible ? Journal of Environmental Planning and Management. Vol. 51, No. 5, 701-716.
- Cartier, S., 2002. Chronique d'un déluge annoncé. Crise de la solidarité face aux risques naturels. Eds Grasset & Fasquelle. Paris. 373 p.
- Cerdan et al., 2002. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management. Catena, 46: 189-205
- Cerdan et al., 2002a. Modelling interrill erosion in small cultivated catchments. Hydrological Processes, 16 (16), 3215-3226.
- Cerdan et al., 2002b. Sediment concentration in interrill flow: interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall. Earth Surface Processes and Landforms, 27 (2), 193-205

- Chenard, C., Parkins, J., 2010. Social norms and wetland drainage on Farmland in Western Canada: A literature review and research prospectus. Linking Environment & Agriculture Research Network (LEARN).
- Collectif ComMod, 2006. Modélisation d'accompagnement. In : Amblard, F., Phan, D. (Eds.), Modélisation et simulation multi-agents : applications aux sciences de l'homme et de la société. Hermès Sciences, Londres, pp. 217-228.
- Communauté de l'Agglomération Rouennaise, 2005. SAGE des bassins du Cailly, de l'Aubette et du Robec, 2005. Livret 2. Diagnostic et Orientations. Rouen. 217p.
- Daré W., Ducrot R., Botta A., Etienne M., 2009, repères méthodologiques pour la mise en œuvre d'une démarche de modélisation d'accompagnement, Carderes, Lirac (30), 127 pp.
- Dahl, R., 1992. The problem of civic competence. *Journal of Democracy*, 3 (4), 45-59.
- Echeverria J., 2006, Modélisation d'accompagnement et gestion des problèmes de ruissellement érosif en Haute-Normandie, Mémoire de master, université Paris 10
- EPICES 2008. Analyse des freins et moteurs à la mise ne place de pratiques anti-érosives sur le bassin de l'Yères. Syndicat Intercommunal du Bassin Versant de l'Yères et de la Cote. Rapport Final. 71 p.
- Etienne et al., 2008. ARDI : A co-construction method for participatory modelling in natural resources management. In: Sanchez-Marre, M., Bejar, J., Comas, J. Rizzoli, A., Guariso, G. (Eds.). *International Congress on Environmental Modelling Software: Integrating Sciences and Information Technology for Environmental Assesment and Decision Making*, Vol. 2, 866-873, Barcelone
- Feyerabend, P., 1975. *Against method : Outline of an anarchist theory of knowledge*. New Left Books, London, UK
- Fournier, M. 2008. Fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère de Caumont et incidence des aménagements de bassin versant sur la qualité des eaux du forage des Varras. AESN SERSAEP. Département de l'Eure
- Guilbault P., 1992, Analyse des facteurs à l'origine de l'érosion par ruissellement concentré dans les sols limoneux du nord de la France. Intérêt d'un aménagement par tassement du sol dans le talweg, Mémoire de master, ENSA Rennes
- Helloco, 2003. Système d'anticipation des événements pluvieux hivernaux générateurs de désordres hydrologiques. CG Seine Maritime
- Holling, C. S. (1978). *Adaptive Environmental Assessment and Management*, Wiley, London
- Kolb, D., 1984. *Experiential learning: Experience as a source of learning and development*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Le Bissonnais Y., Benkhadra H., Gallien E., Eimberck M., Fox D., Martin P., Douyer C., Ligneau L., Ouvry JF., 1996, Genèse du ruissellement et de l'érosion diffuse sur sols limoneux : analyse du transfert d'échelle du m2 au bassin versant élémentaire agricole, Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 2, no. 3, pp. 51-64
- Le Bissonnais Y., Couturier A., Cerdan O., Papy F., Martin P., Souchère V., Bruno JF., Lebrun P., Fox D., J. Morschel D., Elyakime B., 2003, Maîtrise de l'érosion hydrique des sols cultivés : phénomènes physiques et dispositifs d'action, rapport final du programme GESSOL
- Leguédois S., 2003, Mécanismes de l'érosion diffuse des sols, modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés, thèse de doctorat, Université d'Orléans
- Levinson E., 2007, Analyse du déroulement, de la conception et de l'impact d'un jeu de rôles sur la gestion préventive des ruissellements érosifs dans le Pays de Caux, Mémoire de master, AgroParisTech
- Massei, N., 2001. Transport de particules en suspension dans l'aquifère crayeux karstique et à l'interface craie/alluvions. Thèse de doctorat, Rouen
- Measham, T., 2006. Learning about Environments : The Significance of Primal Landscapes. *Environmental Management* Vol. 38, No. 3 426-434
- Mezirow, J., 1995. Transformation theory of adult learning. In: M. Welton (Ed.) *In Defense of the Lifeworld: Critical Perspectives on Adult Learning*, State University of New York Press, New York.
- Ministère de l'Agriculture, 1980-1982. Synthèse Nationale sur les crues des petits bassins versants. Fascicule 2 : la méthode SOCOSE, Fascicule 3 : la méthode CRUPEDIX.

Monnier G., Boiffin J., Papy F., 1986, *Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : Cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest*, cahiers ORSTOM, série pédologie, vol. 22, no. 2, pp. 123-131

Saubes, N. 2010. *Construction d'un outil d'appui à la concertation pour la gestion des risques liés au ruissellement érosif. Initiation d'une démarche de modélisation d'accompagnement sur le bassin versant du Haut-Cailly, en Seine-Maritime (76). Mémoire de master. Université Paris 8*

SCOT du Pays entre Seine et Bray 2010. I) Réunion par groupes de communes, Phase 1 : de l'état des lieux au diagnostic : les enjeux. Ii) Diagnostic stratégique – Forces et faiblesses – Enjeux et questionnements, septembre 2010.

Souadi T., King C., Bourguignon A., Maurizot P., Denis L., Le Bissonnais Y., Souchère V., Lecour A., 2000, *Cartographie régionale de l'aléa " érosion des sols " en région Haute-Normandie*, Rapport BRGM RP-50454-FR, en ligne : www.brgm.fr/brgm//Fichiers/erosionHNO.pdf

Souchere, V., 1995. *Modélisation spatiale du ruissellement à des fins d'aménagement contre l'érosion de talweg*. Thèse, INA P-G, Paris

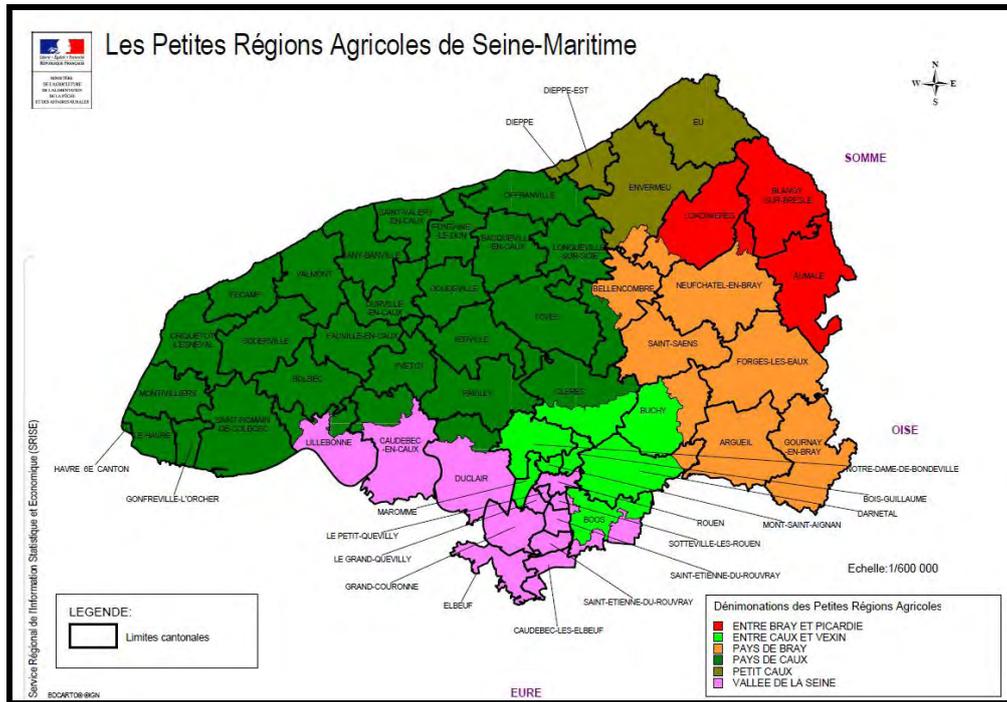
Souchère et al., 2003. *Modelling ephemeral gullyerosion in small cultivated catchments*. *Catena*, 50 (2-4), 489-505.

Souchère, V., King C., Dubreuil N., Lecomte, V., Le Bissonnais, Y., Chalat M., 2003, *Grassland and crop trends: role of the European Union Common Agricultural Policy and consequences for runoff and soil erosion*, *Environmental Science & Policy*, no. 6, pp. 7-16

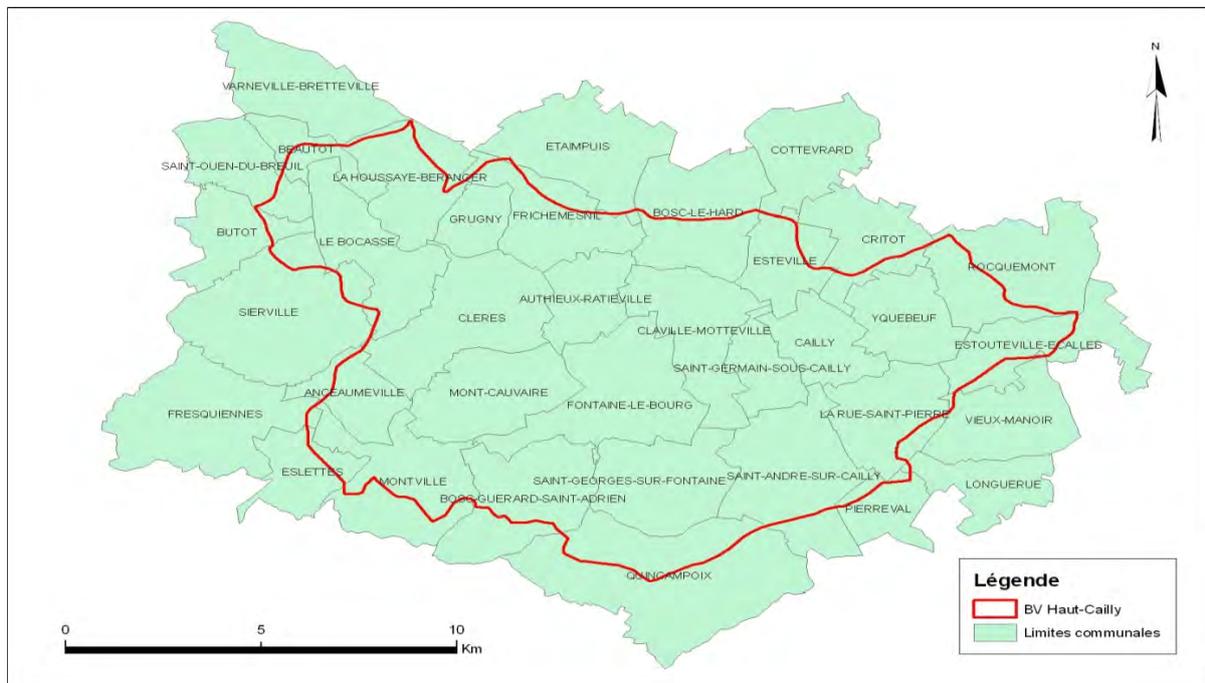
Souchere, V., Millair, L., Echeverria J., Bousquet, F., Le Page C., Etienne, M., 2009. *Co-constructing with stakeholders a role-playing game to initiate collective management of erosive runoff risks at the watershed scale*. *Environmental Modeling and software*. 25(11):1359–1370

Vygotsky, L.S., 1978. *Mind in society: The development of higher psychological processes*. M.Cole, V. John-Steiner, S. Scribner & E. Souberman, Eds.) Cambridge, MA: Harvard University Press

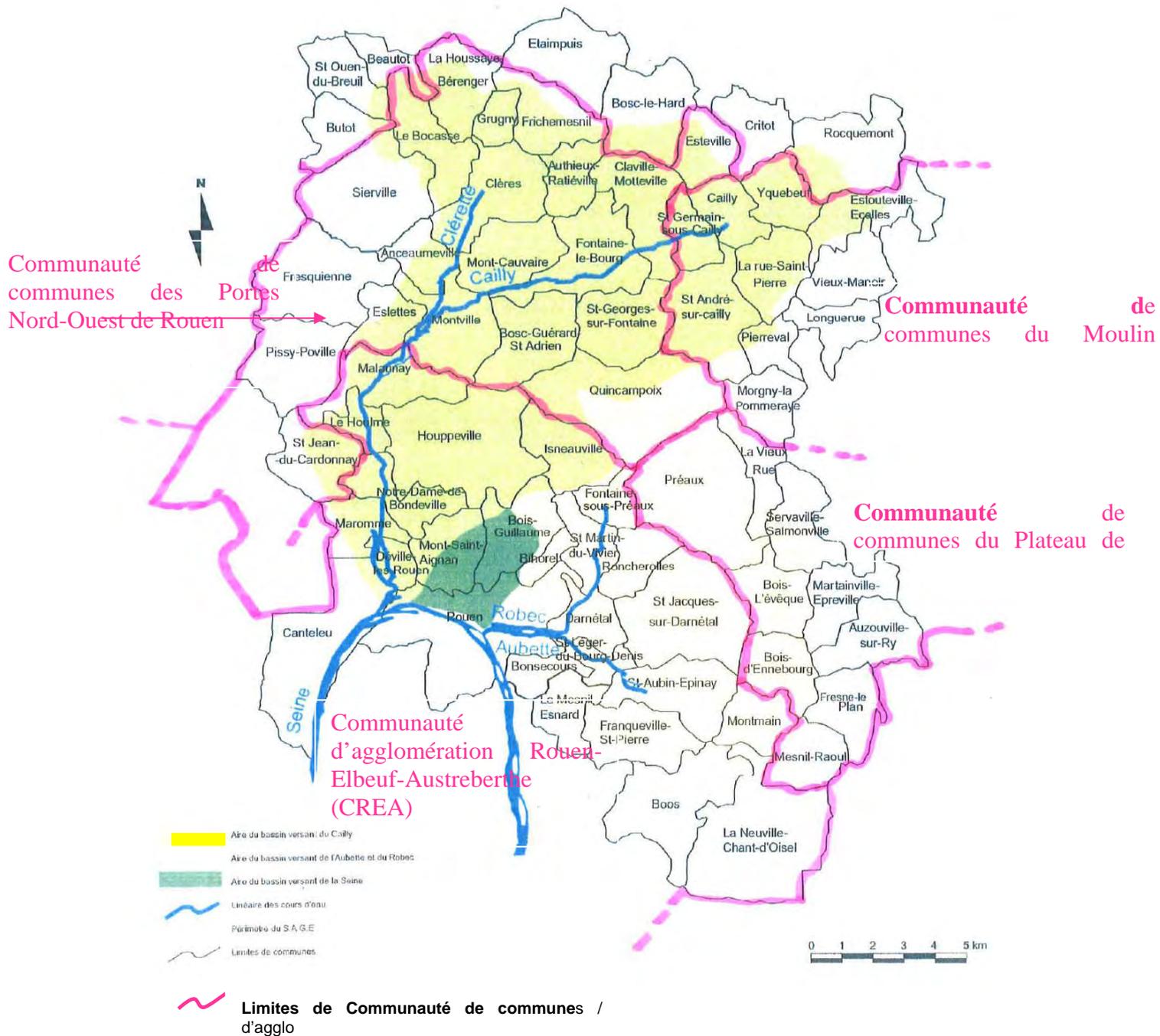
Annexes



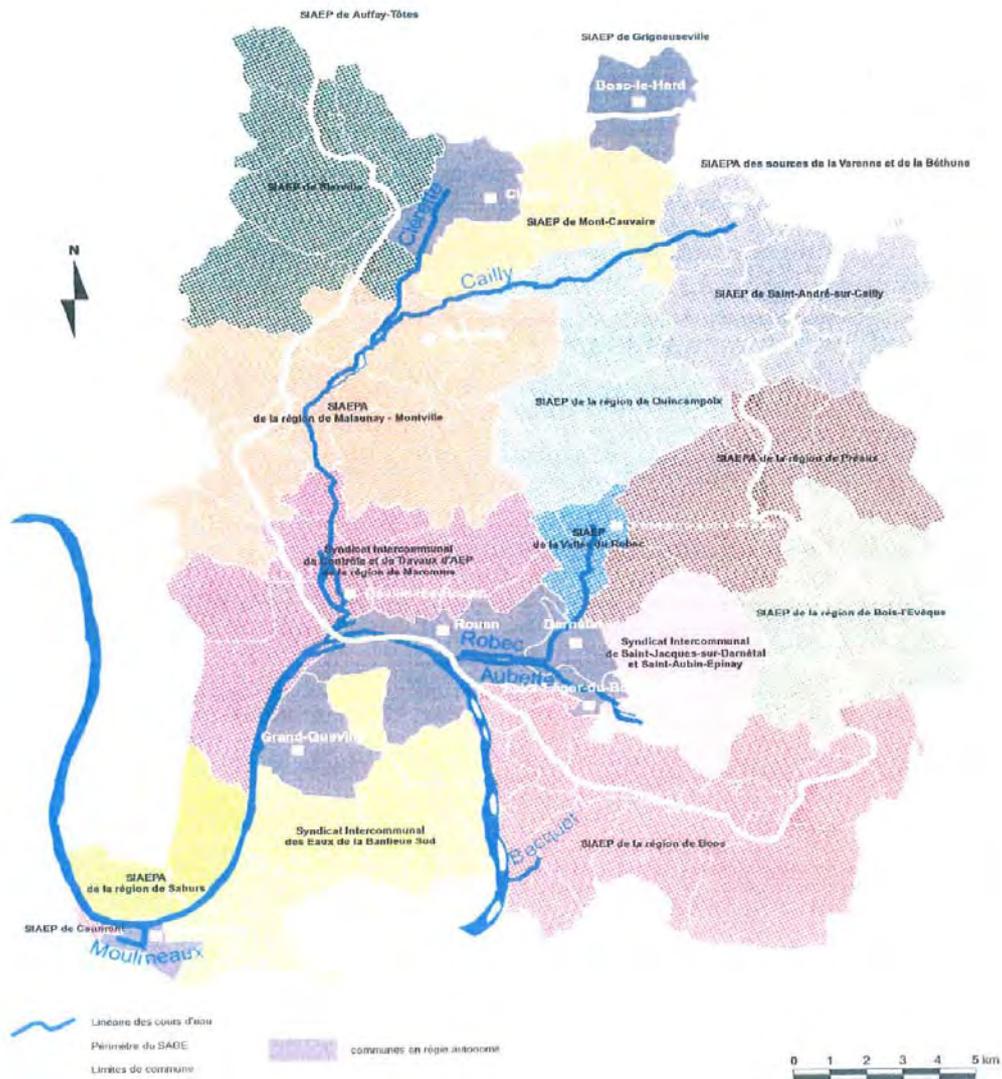
Annexe 1 : Carte des petites Régions agricoles en Seine Maritime - Localisation des pays de Caux et "entre Caux et Vexin" (Source DDAF 76)



Annexe 2 : Carte des communes du Haut Cailly (source N. Saubes 2010)



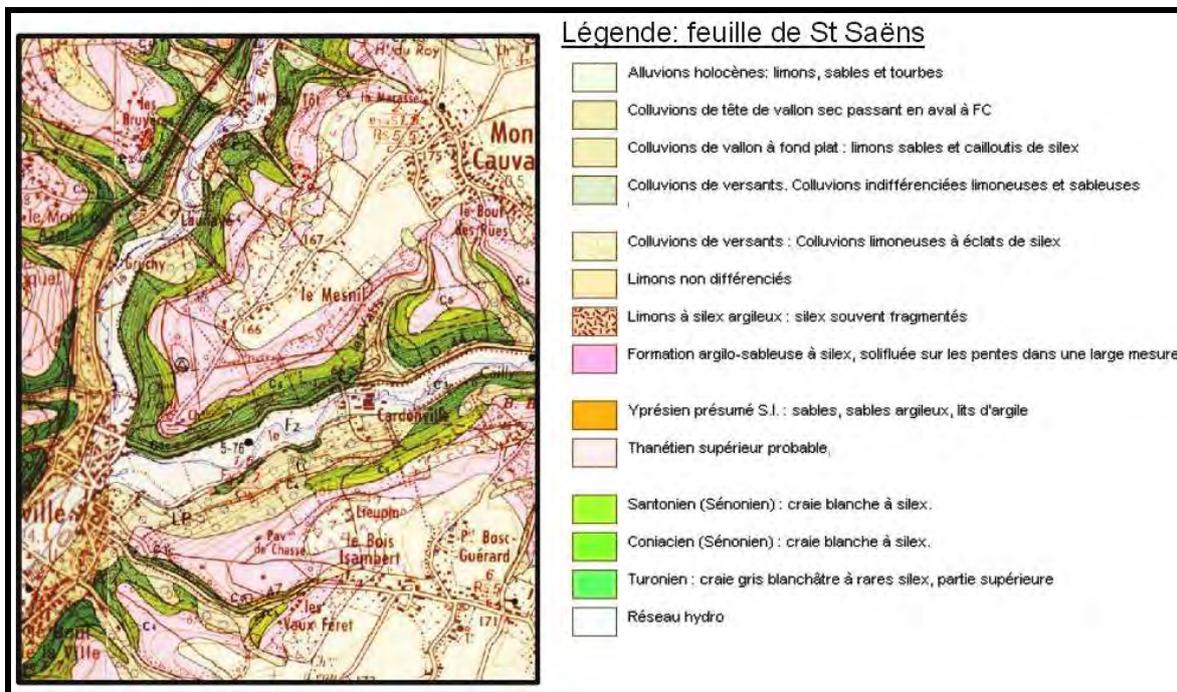
Annexe 3 : Périmètre du SAGE Cailly-Aubette-Robec et les intercommunalités impliquées



Annexe 4 : Syndicats d'eau potable sur le périmètre du SAGE Cailly-Aubette-Robec (Source doc SAGE)



Annexe 5 : Réseaux routier principal et ferroviaire au Nord de Rouen



Annexe 6 : Exemple de faciès géologique typique présent dans le Pays de Caux.
Extrait de la carte géologique (source: BRGM)