



Projet SURGE

SOLIDARITE URBAIN-RURAL POUR LA GESTION DE L'EAU

Comparaison et généralisation des modèles Rapport conjoint tâches 2 et 7

Géraldine Abrami¹, Olivier Barreteau¹, Cadic Eric^{1,2}, Flavie Cernesson^{2,3}

Septembre 2012

¹ IRSTEA, UMR G-EAU

² AgroParisTech, UMR TETIS

³ Ce travail a également bénéficié de l'apport de Pieter Bots avant son départ d'IRSTEA en début de projet pour la partie modèle a priori.

Sommaire

Table des figures	2
1 Introduction	3
2 Modélisation a priori	4
2.1 Abstraction a priori dans un cadre de description générique.....	4
2.2 Abstraction pour une formalisation des actions d'entités solidaires	7
2.3 Constitution d'un thésaurus	9
3 Modélisation a posteriori.....	10
3.1 Représentations simplifiées des modèles	10
3.2 Situations d'action types des entités génériques.....	15
3.3 Modèle générique résultant	17
3.4 Discussion : enjeux urbains rural et contraintes techniques	21
4 Conclusions	26
Annexe : Thésaurus générique et son application à l'eau domestique (en italique)	28
Bibliographie.....	29

Table des figures

Figure 1 : Première version du méta-modèle de réseau d'interdépendances	4
Figure 2 : Seconde version du méta-modèle de réseau d'interdépendances	6
Figure 3 : Diagramme UML de la circulation des flux entre agents interdépendants	7
Figure 4 : Contraintes localisées avec une ressource en eau.....	8
Figure 5 : Modéliser différents types de moteurs de l'action.....	9
Figure 6 : Modèle simplifié du cas alsacien.....	12
Figure 7 : Modèle simplifié du cas Pays de Caux	13
Figure 8 : Modèle simplifié du cas Thau.....	14
Figure 9 : Schéma type d'une dynamique élémentaire d'évolution d'une composante élémentaire d'un système représenté.....	15
Figure 10 : Dynamique élémentaire des entités Cellule.....	15
Figure 11 : Dynamique élémentaire des entités type Infrastructure.....	16
Figure 12 : Dynamique élémentaire des entités Commune.....	17
Figure 13 : Diagramme de classes commun aux trois modèles des études de cas.....	19
Figure 14 : Diagramme de séquence du modèle commun aux 3 cas	20
Figure 15: Légende des codes utilisés dans les schémas de synthèse ci-dessous	21
Figure 16 : Schéma de synthèse des rétroactions sur le cas de Thau	21
Figure 17 : Schéma de synthèse des rétroactions sur le cas alsacien	22
Figure 18 : Schéma de synthèse des rétroactions sur le cas du pays de Caux	23

1 Introduction : objectifs de la modélisation générique et démarche

L'un des objectifs du projet SURGE était d'élaborer un modèle générique des solidarités urbain/rural pour la gestion de l'eau et de l'alimenter tout au long du projet. Après une phase de définition d'un langage commun, il s'agissait d'élaborer un modèle conceptuel générique initial permettant d'écrire dans un même cadre nos hypothèses initiales, servir de point de départ au travail de modélisation sur chaque terrain puis être développé en parallèle et en accompagnement des études de cas. Cette idée initiale d'utiliser un modèle générique constituant un cadre de description unifié pour les modèles des études de cas s'est-elle rapidement avérée trop contraignante, fastidieuse et artificielle. Il aurait fallu « tordre » les modèles spécifiques ou bien élaborer des constructions génériques compliquées et artificielles. La synchronisation des processus de modélisation d'accompagnement sur les 3 sites n'a pas été possible du fait des rythmes différents des interactions avec les acteurs sur chacun des sites. La méthode choisie de modélisation d'accompagnement nécessitait une adaptation du travail de recherche à leur calendrier et leurs besoins. Cette contrainte se retrouve aussi dans la forme des modèles produits : jeu de rôles, modèles conceptuels ou modèles informatiques. Nous avons donc préféré revenir sur la méthode envisagée initialement.

Le travail sur le modèle générique s'est ainsi effectué en deux temps. En amont et en parallèle aux travaux conduits sur chacun des cas, un travail de modélisation « a priori » a été fait. Nous avons emprunté pour cela trois chemins :

1. une exploration a priori de situations d'interdépendances urbain-rural types à partir de travaux antérieurs, qui a donné lieu à la formalisation d'une représentation des types d'entités devant être mobilisées a priori. C'est une démarche de formalisation des hypothèses et d'abstraction des concepts fondamentaux dans un cadre de description pouvant être instancié.
2. une réflexion sur la constitution d'un modèle jouet minimal permettant de mettre en question la constitution de prise en charge solidaire d'interdépendances vis-à-vis d'une ressource localisée dans l'espace. Il s'agit également d'une démarche de formalisation d'hypothèses et d'abstraction qui visait à construire un modèle dynamique abstrait minimal pouvant être spécifié par la suite.
3. la construction d'un thésaurus ayant pour but de regrouper l'ensemble des concepts liés aux interdépendances urbain-rural utilisés dans les modèles (constitution d'un vocabulaire commun). Il s'agit là d'une démarche d'union et d'alignement des concepts.

En fin de projet, une synthèse a été faite, a posteriori, des contenus communs aux modèles développés sur les 3 études de cas françaises (analyse et comparaison des études de cas). Il s'agit cette fois-ci d'une démarche « d'intersection », recherchant les « plus petits dénominateurs communs » dans les structures des 3 modèles. Nous nous sommes intéressés aux éléments communs identifiables dans les 3 modèles spécifiques. L'élaboration d'un modèle commun a facilité la démarche comparative. Ainsi les formalisations a priori et le thésaurus ont essentiellement servi de cadre de réflexion initial sur les situations spécifiques des études de cas. Nous pourrions cependant examiner en conclusion de cette partie dans

quelle mesure ces éléments se retrouvent ou pas dans la synthèse à posteriori. Ce rapport présente le travail de modélisation accompli et les éléments de réflexion issus de ce travail.

2 Modélisation a priori

2.1 Abstraction a priori dans un cadre de description générique

L'idée initiale pour développer le modèle générique était la vérification de l'hypothèse que tout territoire peut se représenter à partir d'une spécialisation (spécification au cas particulier d'une étude de cas) d'un « même méta-modèle de réseau d'interdépendances » (Figure 1) :

- les entités physiques sont en interaction via des relations physiques (2 parcelles liées par du ruissellement par exemple)
- les entités sociales sont en interaction via des relations sociales (2 acteurs liés par un lien amical par exemple)
- les entités sociales agissent sur les entités physiques (1 acteur prélève de l'eau dans une nappe par exemple)
- les entités sociales peuvent motiver la modification de leurs actions parce qu'elles sont concernées par l'état d'entités physiques (1 acteur prélève moins d'eau si les débits diminuent)
- les entités institutions cadrent les relations entre des entités sociales et sont responsables de la régulation des interdépendances entre entités physiques par lesquelles les agents qui s'y réfèrent sont concernés (1 décret sécheresse contraint les prélèvements)

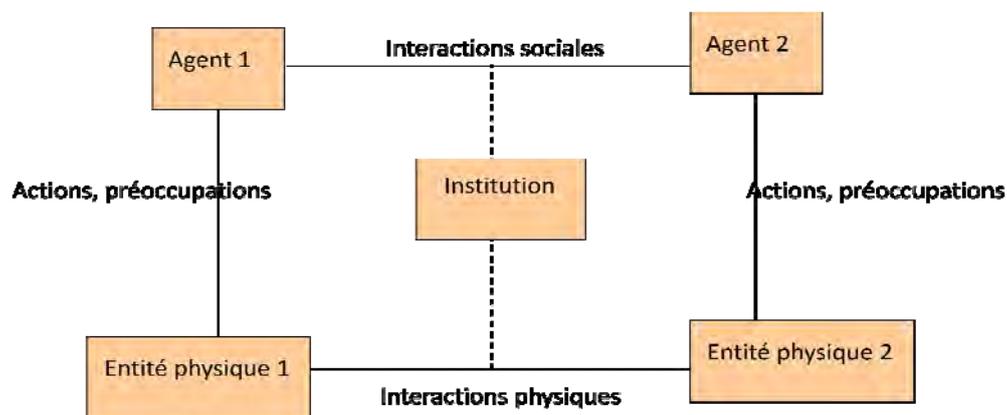


Figure 1 : Première version du méta-modèle de réseau d'interdépendances

En attendant un avancement suffisant des modèles dans chacune des études de cas, nous avons demandé aux chercheurs du projet de nous fournir des descriptions de modèles archétypaux liés aux différentes thématiques en jeu dans le projet (ruissellement/érosion, eau potable/assainissement, eau agricole, dynamiques de population, foncier/paysages/axes de transport) afin de nous en servir comme base de réflexion. Nous avons alors éprouvé des difficultés pour instancier ces modèles dans le cadre de description initial à cause de (i) une confusion des notions de relation (lien entre deux entités), d'interaction (lien entre deux entités et qui fait que l'activité de l'une dépend de l'activité de l'autre), d'interdépendance (lien de dépendance réciproque entre deux entités) (ii) à la diversité des flux (eau, foncier, financière, informationnelle) qui vont circuler ; ainsi que (iii) de la manière d'y représenter le temps et l'espace (la parcelle dans le cas de Caux, la commune dans le cas Alsacien) qui

supportent les processus et finalement les modes d'agrégation spatiale, temporelle et sociale. Nous avons alors développé un méta-modèle permettant de prendre en compte ces aspects.

Nous avons ainsi défini un concept d'équipement : les espaces physiques et sociaux sont porteurs de liens de proximité sous-tendant des relations facilitées par des équipements physiques (par exemple des infrastructures d'eau potable) ou sociaux (par exemple des contrats) qui modifient ou sous-tendent d'autres relations. Les relations contraignent ou rendent possible les interactions entre les entités. Réciproquement les entités peuvent modifier ou créer des équipements. Par ailleurs, les activités des entités sont attachées à des rôles ou fonctions que les entités peuvent adopter selon les contextes où elles se trouvent. Enfin, nous avons défini des types d'entités (symbolique et matérielle) destinées à circuler dans des flux. C'est dans l'exercice suivant que nous avons poussé plus loin la réflexion sur ce concept de flux. Un second méta-modèle (figure 2) plus élaboré a donc été produit, incluant les notions de rôle, d'équipement et d'activité et distinguant l'espace comme un contexte particulier.

L'idée initiale de cette réflexion était de pouvoir décrire les modèles dans un cadre commun afin d'identifier des briques de description ou bien pouvoir fournir une base de comparaison entre les modèles. Il s'agissait donc de constituer a priori une grammaire de description qui pourrait permettre de « faire rentrer » les différents modèles du projet. Cependant devant la complexité croissante de cette grammaire, l'état d'avancement des modèles inégal et le travail de « torsion » des concepts qui aurait été nécessaire pour arriver à un résultat incertain, nous avons finalement décidé d'orienter notre réflexion d'abstraction conceptuelle sur la constitution d'un modèle jouet permettant d'expérimenter par la simulation les cadres théoriques de solidarité dans un territoire constitué d'entités en interdépendance. Nous avons donc recadré notre réflexion d'un cadre de description des situations d'interdépendances vers un cadre de formalisation possible des actions de ces entités et de leur motivation. Ce premier travail a eu permis de partager un même vocabulaire entre les différents partenaires du projet, issus de disciplines variées.

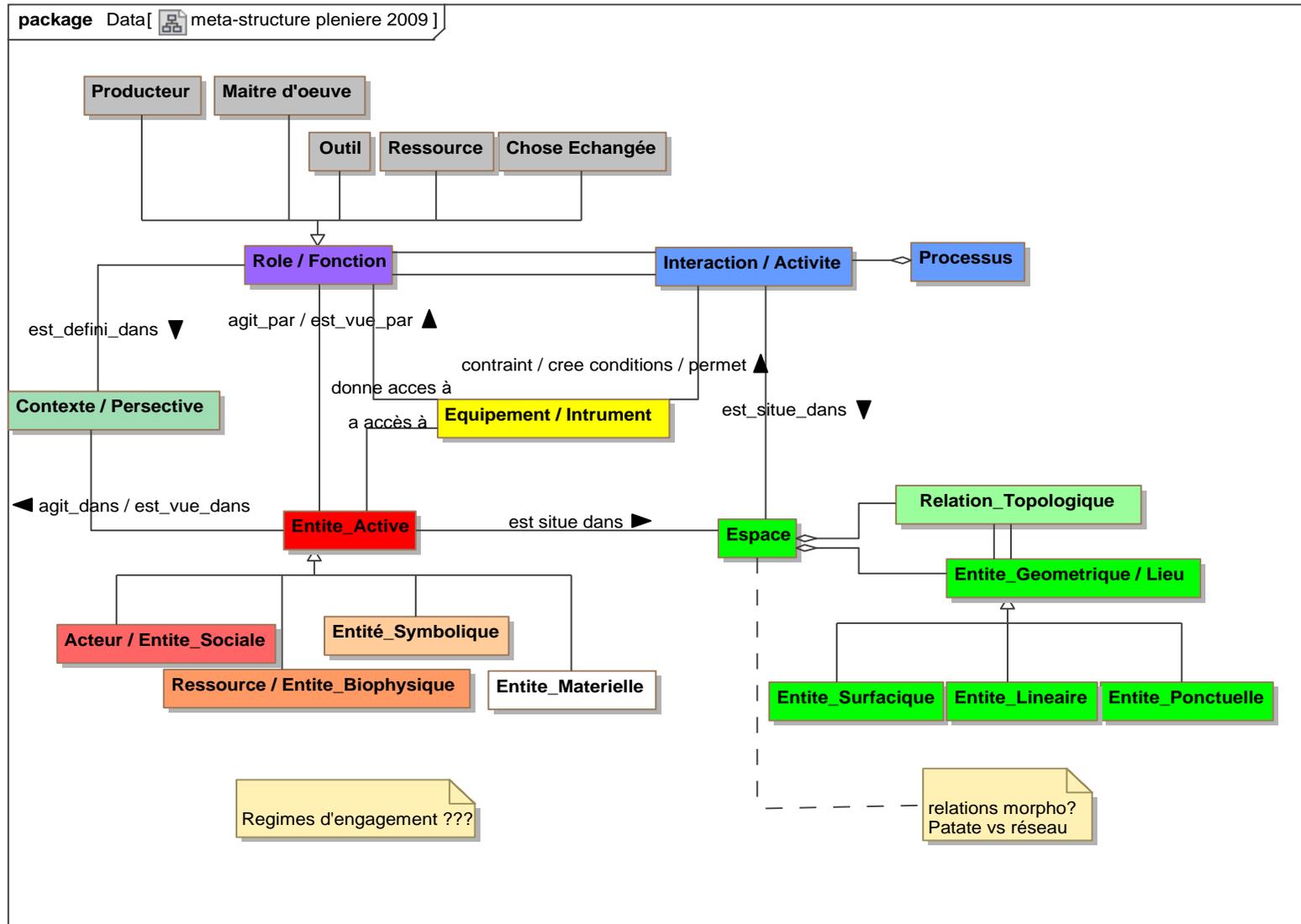


Figure 2 : Seconde version du méta-modèle de réseau d'interdépendances

2.2 Abstraction pour une formalisation des actions d'entités solidaires

L'approche est cette fois-ci différente. Plutôt que de rechercher un formalisme englobant les possibles comme précédemment, la démarche est maintenant de construire par itérations un formalisme générique minimal rendant possible le test d'hypothèses du projet. Le point de départ est donc non plus la description de situation d'interdépendances des études de cas mais la formulation des hypothèses du projet : quel modèle minimal créer pour s'interroger sur la prise en charge d'interdépendances vis-à-vis de l'eau entre des agents urbains et ruraux, que ce soit par le biais d'institution ou par le biais de formes de solidarité?

Pour cela il est donc nécessaire de pouvoir constituer :

1. Une société d'agents interdépendants
2. Du fait de contraintes issues d'interactions localisées avec une ressource en eau
3. Dont le choix des actions est motivé par différents régimes d'engagement

Une société d'agents interdépendants....

Pour que des entités puissent être interdépendantes, il faut les rendre capable d'agir et d'interagir, de manière à ce que l'état d'une entité puissent affecter de manière directe ou indirecte l'état d'autres entités, via un enchaînement d'actions. Afin de pouvoir tracer plus facilement la circulation des dépendances, les interactions entre entités sont décrites sous forme de circulation de flux (d'argent, d'eau, d'information...). Ainsi une interaction n'est possible que si des entités sont reliées par une connexion ou un réseau de connexions, et effective si et seulement si ce réseau de connexions est activé par la circulation d'un flux, qui peut éventuellement s'y transformer selon les propriétés des connexions. On retrouve de manière plus opérationnelle la distinction nécessaire entre relation et interaction évoquée dans la partie précédente. Ainsi 3 types d'actions sont possibles pour une entité : activer la circulation d'un flux ; être affectée par la réception d'un flux (modification de son état) ; ou bien modifier les conditions de circulation des flux en créant, détruisant ou modifiant des connexions.

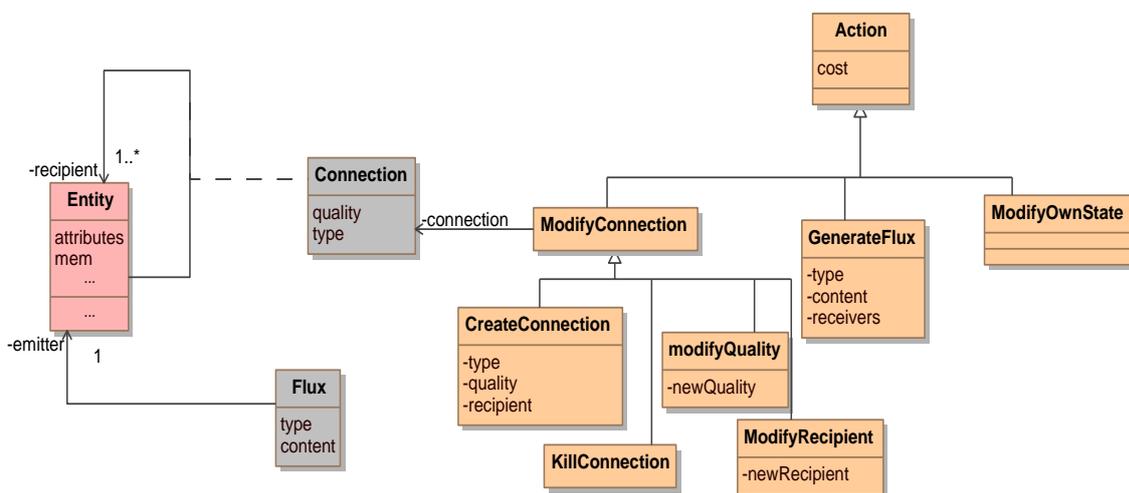


Figure 3 : Diagramme UML de la circulation des flux entre agents interdépendants

Le principe est le suivant : un agent délibère sur les actions à mettre en œuvre de manière périodique, ou bien quand il est sollicité par les flux reçus d'autres entités. Enfin, une entité est connectée aux autres entités du système, qui déterminent l'espace de ses possibilités d'interaction. Une entité peut avoir des rôles dans le système : agriculteur, représentant du

monde agricole, élu, etc. Lorsqu'une entité prend en charge un rôle, elle doit prendre en compte les objectifs liés à ce rôle et peut disposer de nouvelles connections fournies par le rôle.

...du fait de contraintes localisées avec une ressource en eau...

Ces entités (acteurs, ressources, équipement...) peuvent être situées dans un espace équipé de relations spatiales et percevoir des zones de cet espace. Les relations spatiales entre localisation ou zones perçues par des entités peuvent induire ou modifier des connexions entre ces entités.

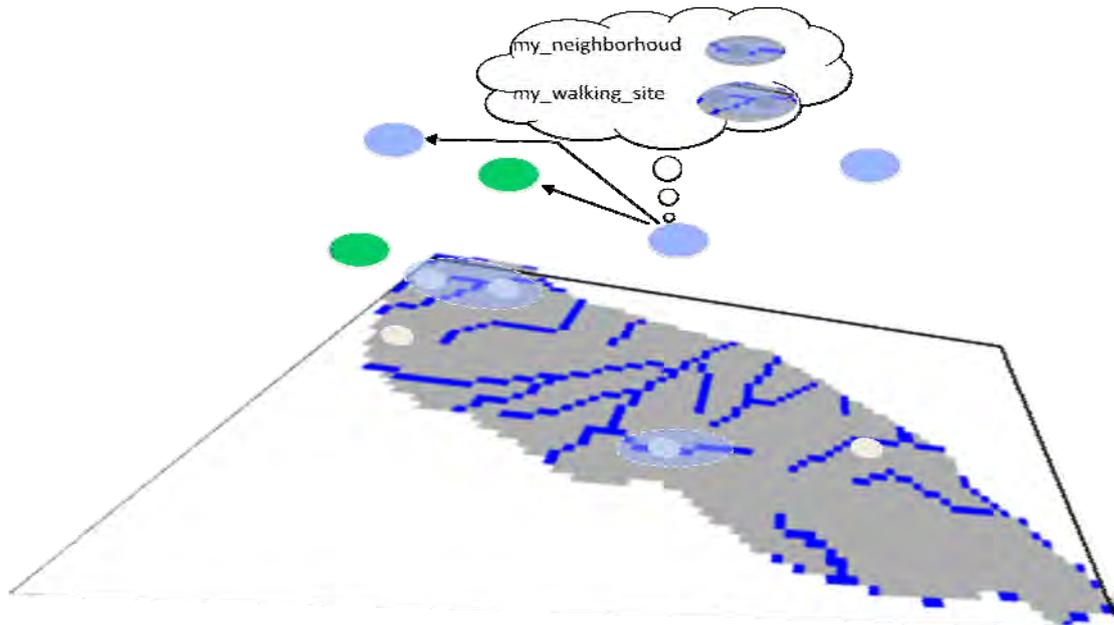


Figure 4 : Contraintes localisées avec une ressource en eau

... dont le choix des actions est motivé par différents moteurs ...

Un des objectifs du travail de modélisation était, sur la base de ce modèle d'agent potentiellement solidaire, d'aller plus loin que dans l'expérience so-si-so (Bots *et al.*, 2008). Il s'agissait de mettre en œuvre so-si-so à partir de cas concrets. Nous nous sommes alors demandé quelle serait la manière la plus raisonnable de construire les connaissances causales des agents qui ont besoin d'exister a priori pour que le modèle puisse tourner. Comment procéder lorsqu'il faut définir un grand nombre d'actions et que de plus certaines de ces actions n'ont qu'un impact indirect ou difficilement évaluable sur le système (e.g. agir sur une connexion) ? Ne pouvant nous donner les moyens de résoudre cette question dans le cadre du projet SURGE, nous avons préféré ne pas pousser plus loin vers l'implémentation de ce modèle jouet et s'orienter vers d'autres voies de modélisation générique que la définition de modèles a priori.

Une seconde piste explorée a résidé dans la modélisation du cadre des régimes d'engagement (Thévenot, 2006) identifié comme pertinent dans la tâche 1 pour mettre en visibilité différents types de solidarité : d'intérêt, valeurs ou liée à des attachements familiaux. Ce cadre d'analyse invite à considérer différents moteurs de l'action des agents : contribuer au bien commun, atteindre un objectif ou préserver ce à quoi l'on est attaché. L'idée est qu'un agent choisisse

les actions qu'il met en œuvre en arbitrant sur l'effet des actions dont il a connaissance sur ses indicateurs de valeurs, d'attachements et/ou d'objectifs (voir Figure 5.)

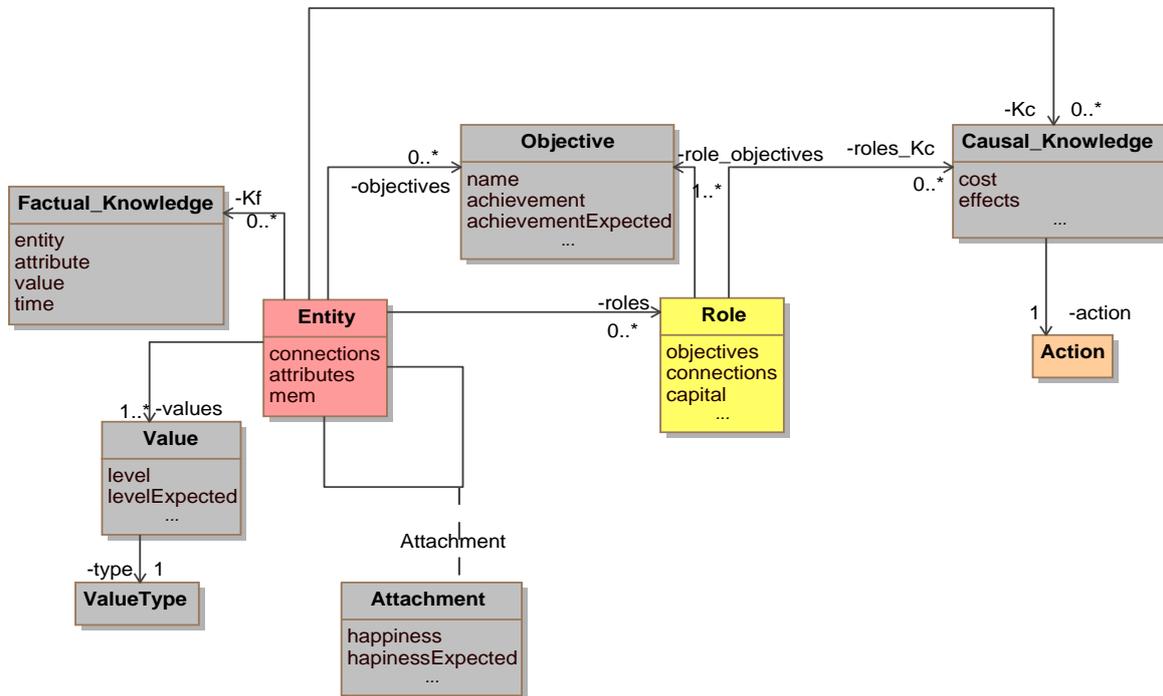


Figure 5 : Modéliser différents types de moteurs de l'action

Ce mode d'activation calqué sur celui des agents de So-Si-So (Bots *et al.*, 2008) pose toutefois des problèmes pour être viable à long terme notamment sur la construction des connaissances causales liées à toutes les actions pouvant être mises en œuvre dans le système. En effet pour qu'un tel modèle puisse tourner, il faudrait pouvoir écrire à l'avance pour chaque action que peut choisir un agent quel impact l'agent pense que cette action a sur les indicateurs qui l'intéressent. Comment procéder lorsqu'il faut définir un grand nombre d'actions et que de plus certaines de ces actions n'ont qu'un impact indirect ou difficilement évaluable sur le système (e.g. agir sur une connexion) ? Si nous avons poussé plus loin dans cette direction des pistes de réflexion intéressantes mais dépassant le cadre du projet auraient pu être explorées. Par exemple comment concrètement gérer la composition de régime d'engagements : comment faire qu'une entité puisse choisir / pondérer de manière dynamique ses engagements ? Ou bien comment représenter les aspects organisationnels en distinguant organisations (des rôles connectés entre eux ?), arènes d'interaction (des unités de définition des scénarios ?), actions collectives (si le coût d'une action désirable est trop élevé, donner possibilité de mobiliser d'autres entités pour former des actions collectives) et institutions (règles ayant cours dans les différents lieux d'action collective) ? Ou bien encore si il s'agit de mettre à jour les dépendances à prendre en charge dans une simulation, comment produire une approche analytique dynamique des réseaux de dépendance ?

2.3 Constitution d'un thésaurus

Une autre piste dans notre recherche d'éléments de modélisation générique a été l'établissement d'un thésaurus.

A partir des travaux de Barde (2005) et de manière à simplifier le méta-modèle générique établi précédemment pour le rendre opérationnel comme structure de thésaurus, nous avons mis au point un modèle à quatre composantes. Les deux premières, l'*acteur*, et les *ressources* qui peuvent être naturelles, ou artificielles constituent les entités du système. La troisième composante concerne les *interactions* qui régissent les processus entre les entités. Elle traduit la dynamique du système. Enfin, la quatrième composante concerne les *outils* nécessaires à la réalisation d'interactions. Nous avons retenu le cadre « acteur-ressource-interaction-outil » comme cadre de travail.

A partir de la bibliothèque de modèles archétypaux et de cette structure, nous avons demandé à des étudiants du master SILAT à l'occasion d'un projet de groupe de constituer un thésaurus permettant de fixer le vocabulaire concernant les facteurs et les impacts du développement urbain. Le résultat de ce travail est fourni en annexe 1.

Il aurait alors fallu compléter ce thésaurus avec les autres thématiques du projet. Cependant quelques essais d'utilisation de logiciels à base d'ontologies pour développer une base de données permettant de stocker la description des études de cas et des modèles et d'effectuer des analyses comparatives automatisées nous ont montré que nous ne disposions pas de l'expertise en ingénierie des connaissances qui aurait été nécessaire pour mener à bien ce travail. De plus, même si le thésaurus et la base existent, l'utilisation par les chercheurs des études de cas du vocabulaire proposé et le travail de saisie dans la base avaient toutes les chances de représenter des contraintes fastidieuses et peu compatibles avec les objectifs de terrain). Ainsi, devant l'incertitude liée à l'utilisation opérationnelle d'un tel dispositif, nous avons préféré reporter notre investissement sur la modélisation générique vers la piste de l'analyse ex-post des points communs entre les modèles produits.

3 Modélisation a posteriori

Afin de construire un modèle générique « a posteriori », constitué des éléments communs aux 3 modèles du projet nous avons procédé en identifiant les entités communes aux 3 modèles et en construisant pour chaque modèle une représentation simplifiée sur la base de ces entités. Puis, en examinant les 3 représentations simplifiées obtenues, nous nous sommes attachés à caractériser la manière dont chaque entité générique inscrit son action dans les modèles. Enfin, à partir de ces caractérisations, nous avons reconstruit un modèle générique décrivant comment les entités génériques des modèles sont définies et reliées les unes aux autres, et comment se produisent les interactions entre ces entités.

3.1 Représentations simplifiées des modèles

Nous avons dans un premier temps repris à deux (l'un principal auteur du modèle sur le bassin de Thau et l'autre du modèle Alsace) les modèles développés sur les trois terrains afin d'identifier les éléments communs. Cette analyse a ensuite été validée par entretien avec les collègues impliqués sur la troisième étude de cas (pays de Caux).

Sans véritable surprise, même si les enjeux et les échelles des 3 études cas sont différents, on retrouve des composants semblables aux trois modèles. Cette intersection permet de dessiner d'une part des représentations simplifiées de chaque modèle à partir des mêmes composants élémentaires et d'autre part de proposer un modèle conceptuel générique apte à simuler les récits propres à chaque étude de cas et au-delà.

Les schémas ci-dessous représentent les 3 modèles simplifiés. Chaque modèle est ainsi décrit par des flux de contrôle et de ressources entre les types d'entité suivants qui jouent un rôle central dans les dynamiques observées :

- Une entité spatiale élémentaire servant de référence pour les processus localisés que nous appellerons cellule
- Les infrastructures comme entités localisées modifiant ou contraignant les flux de ressources
- Des agents qui activent ou sont destinataire des flux : Syndicat et Usagers (Agriculteur, préleveur...), ainsi que commune qui est à la fois un agent et une entité spatiale agrégée de référence des flux d'information et de ressources

Pour chaque cas nous avons également spécifié dans un cartouche les caractéristiques principales suivantes des modèles : Pas de temps (step), Echelle spatiale = taille de la cellule (spat), Paramètres d'entrée (scénarios) et Indicateurs

Enfin pour chaque cas nous avons indiqué les indicateurs observés pour chaque type d'entité et tracé les frontières entre les composantes urbaines U et rurales R d'une part, les dynamiques territoriales T et les dynamiques de l'eau E d'autre part.

Ceci permet de localiser les principaux lieux de décision, les boucles de rétroaction et les points d'entrée des scénarios.

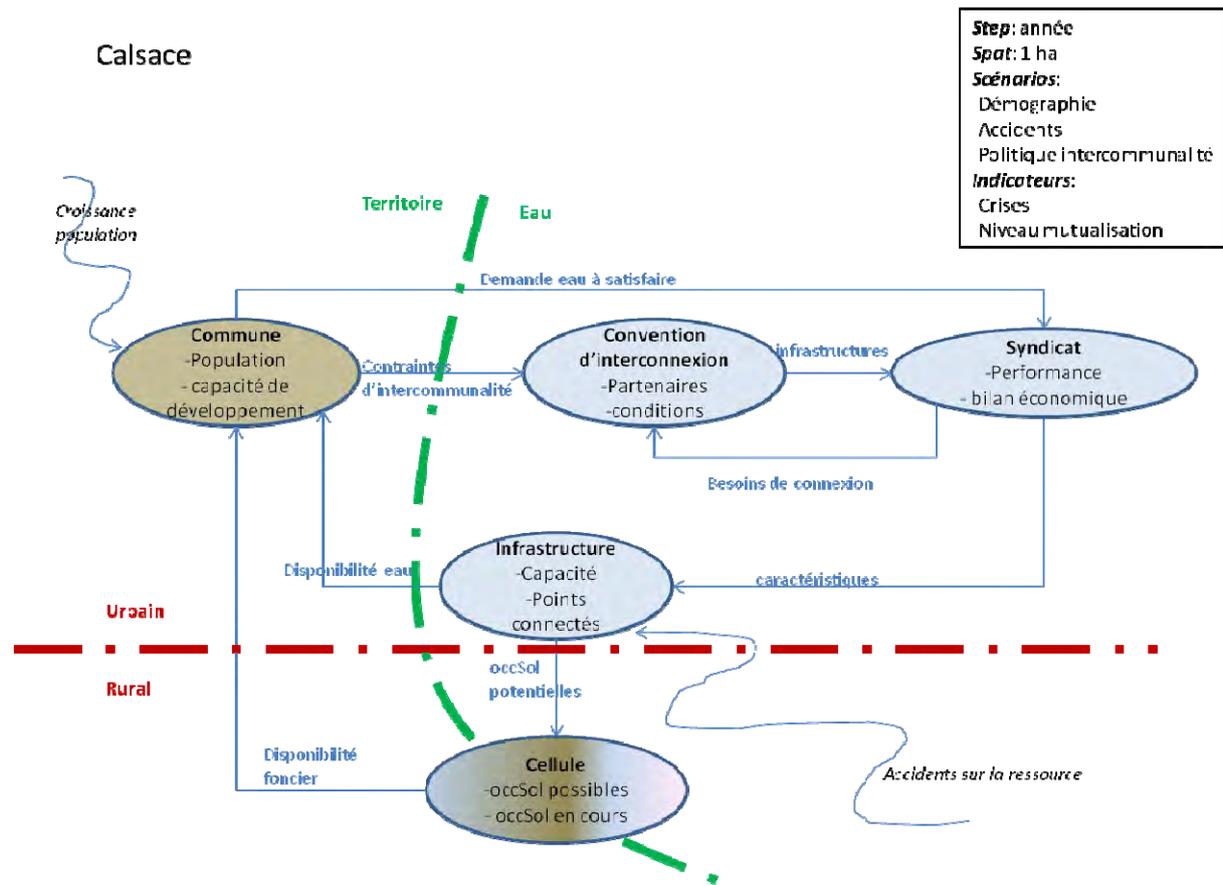


Figure 6 : Modèle simplifié du cas alsacien

Dans le cas de l'Alsace, c'est au niveau des cellules seulement qu'apparaît une composante rurale dans ce modèle, à travers les cellules ayant des occupations du sol de type agricole. Les occupations du sol des cellules sont soumises à des contraintes liées aux infrastructures qui y sont placées (périmètres de protection), qui procurent par ailleurs une disponibilité en eau aux communes qui y sont connectées. Le contrôle sur les usages urbains est assuré par l'entité Commune qui est soumise à un forçage externe démographique influant sur sa population, ainsi qu'aux contraintes sur son développement issues des contraintes sur son foncier portées par les cellules et de la disponibilité en eau issue de son accès aux infrastructures. La commune génère une demande en eau agrégée, ainsi qu'une demande en connexion en fonction de son autonomie politique (contraintes d'intercommunalité). Les Syndicats sont responsables de la satisfaction de la demande en eau, et peuvent, selon les ressources économiques dont ils disposent, modifier les infrastructures.

CaCaux

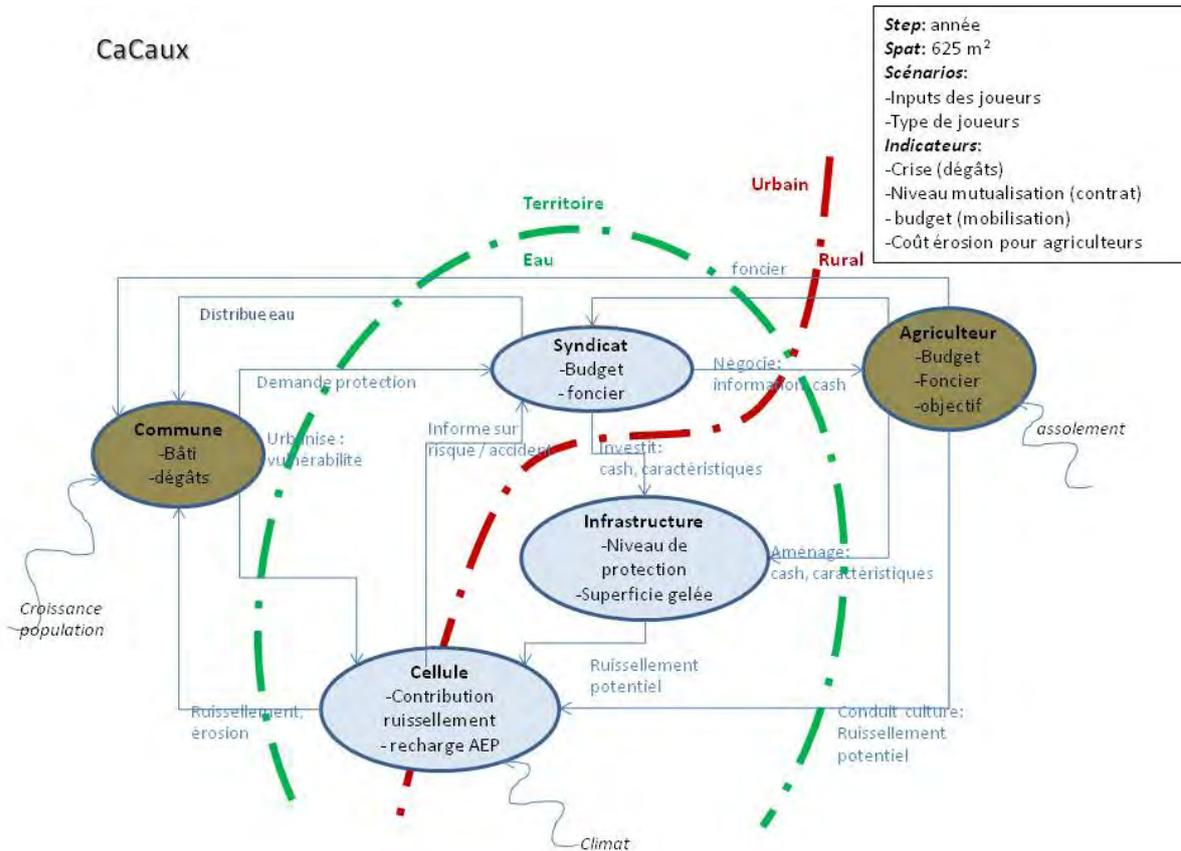


Figure 7 : Modèle simplifié du cas Pays de Caux

Dans le cas de Caux, la cellule est génératrice d'une contribution au ruissellement et donc par conséquent d'une demande de protection pour les communes réceptrices du ruissellement. La contribution au ruissellement d'une cellule dépend du forçage externe du climat d'une part, et de caractéristiques induite par les infrastructures qui y sont placées et de son occupation du sol d'autre part. Les usages agricoles sont portés par des agents agriculteurs qui induisent des modifications de foncier, d'infrastructure et d'usage du sol en fonction de leurs objectifs propres et de l'état des cellules qu'ils contrôlent. Les usages urbains sont portés par l'entité Commune, soumise au forçage externe de la démographie comme dans le cas Alsace et générant donc une demande en ressource protection lorsqu'elle est victime de ruissellement. Les syndicats sont responsables de la protection des communes, et peuvent selon les ressources financières et foncières dont ils disposent, financer des actions ou créer / modifier des infrastructures.

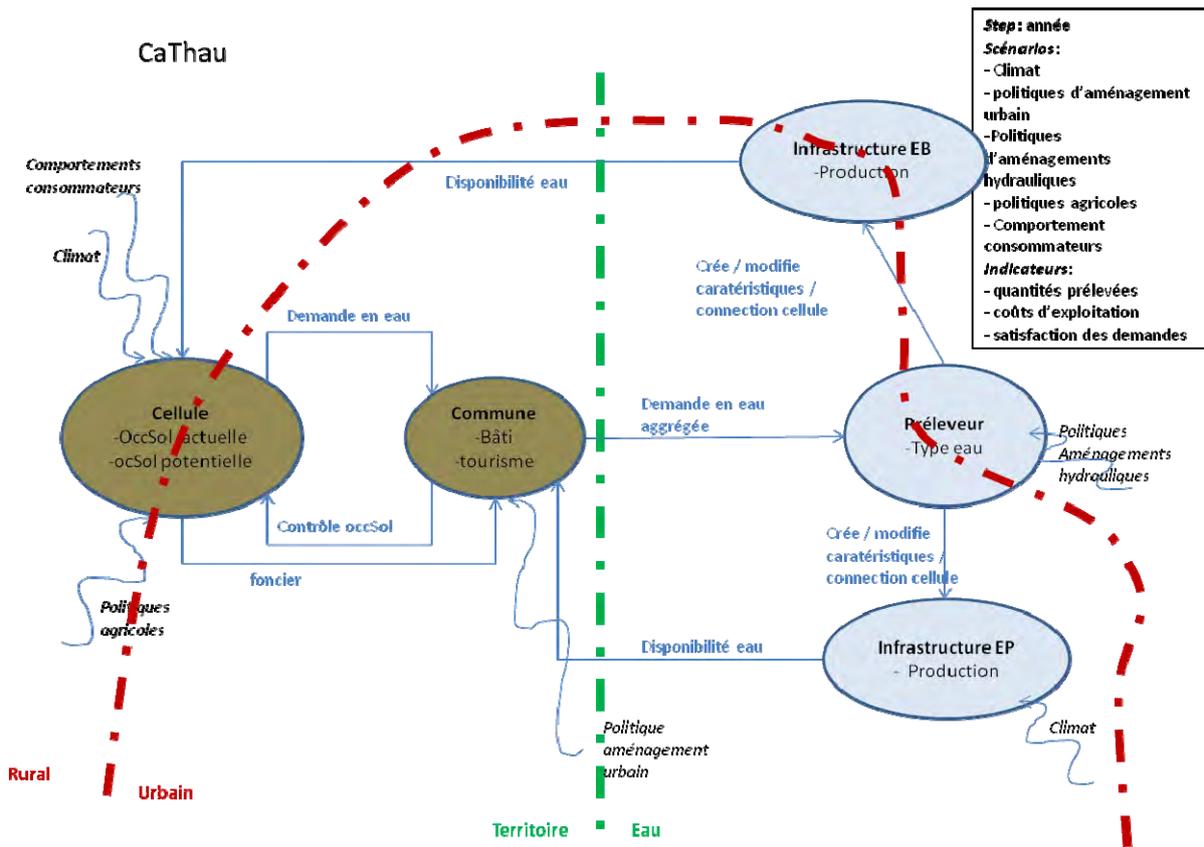


Figure 8 : Modèle simplifié du cas Thau

Dans le cas de Thau comme dans celui de l'Alsace, les usages ruraux sont portés par la cellule et celle-ci induit une demande en eau brute qui est déterminée par son occupation du sol (pour l'irrigation) et contrainte par des forçages externes climatiques. Ces usages ruraux sont par ailleurs contraints par des forçages externes de politiques agricoles et induisent, comme dans le cas de Caux, des modifications d'occupation du sol ou de foncier influencées par les occupations du sol en cours et la disponibilité d'infrastructure en cours. Comme dans les 2 autres cas, les usages urbains sont portés par une entité Commune qui génère comme dans le cas de Caux une demande en eau potable agrégée et se développe selon ses ressources en foncier et, dans ce cas, des contraintes de politique urbaine portées par un forçage externe. Des entités Préleveur (syndicats et associations ou groupes d'irrigants) sont responsable de la satisfaction des demandes en eau, et selon les possibilités offertes par des politiques d'aménagement hydrauliques externes, créent ou modifient des infrastructures qui impactent la disponibilité en eau pour les usagers (communes ou cellules). Il est à noter qu'eau brute et eau potable sont distinguées dans ce modèle et suivent des circuits différents et indépendants, l'eau brute étant assimilée uniquement à l'eau d'irrigation et l'eau domestique à l'eau potable dans la version du modèle prête à la fin du projet. Dans le contexte d'un questionnement sur la gestion intégrée de la ressource en eau sur un territoire cependant cette dichotomie n'est pas valide et il est prévu d'introduire des transferts entre eau brute et monde urbain dans des versions ultérieures du modèle qui seront développées dans la suite du projet.

3.2 Situations d'action types des entités génériques

Les composants utilisés dans les représentations simplifiées précédentes permettent de décrire des situations d'action type pour chacune de ces entités composantes. Ces situations d'action sont caractérisées par un état, des contraintes internes et des paramètres internes qui pourront être modifiés en fonction de forçages externes. Elles sont décrites selon une forme de schéma classique pour décrire des systèmes multi-agents : un état du monde induit une activité d'une entité qui produit un nouvel état du monde. L'état du monde inducteur est considéré comme composé non seulement de l'état interne de l'entité mais aussi de contraintes qui lui sont propres et de paramètres externes. Par contre les entités ne peuvent agir que sur leur état interne. A ce stade c'est le partage d'éléments (en particulier via l'espace) qui va induire les interactions. Par exemple, lorsqu'une cellule émet une demande de ressource, c'est l'entité qui contrôle cette cellule qui reçoit la demande et la traite comme une nouvelle contrainte.

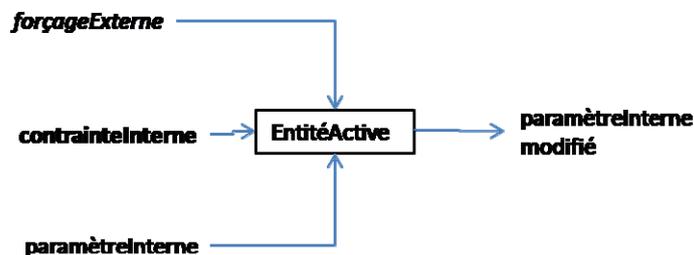


Figure 9 : Schéma type d'une dynamique élémentaire d'évolution d'une composante élémentaire d'un système représenté

Les figures ci-dessous présentent les transformations observées de manière commune aux trois cas analysés pour chacun des composants identifiés ci-dessus. Nous avons conservé le niveau de spécification Agriculteur pour la catégorie Usager/Préleveur car même si le rural ne se résume pas à agriculture, cela reste la figure la plus emblématique à la croisée d'usage du foncier et de ressources communes, les usages urbains étant par ailleurs représentés par l'entité Commune

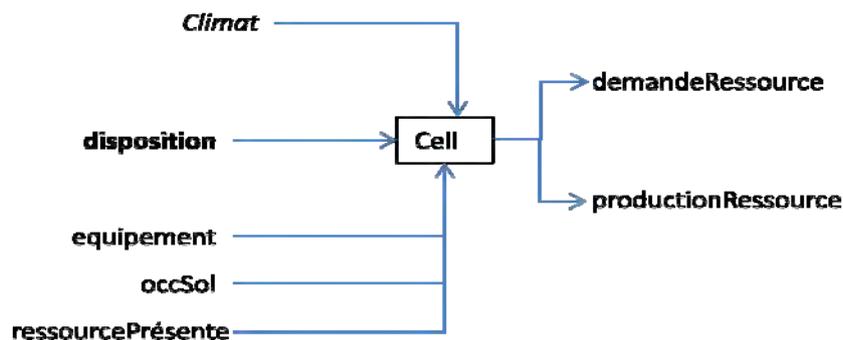


Figure 10 : Dynamique élémentaire des entités Cellule

Dans tous les cas, l'état des cellules est déterminé par leur équipement et leur occupation du sol qui induit selon des forçages en général climatiques pour les usagers qui les utilisent une demande ou une production de ressource, les ressources liées aux cellules apparaissant dans les différents modèles étant l'eau (Thau), la protection contre le risque lié au ruissellement (Caux) ou le foncier (tous les modèles).

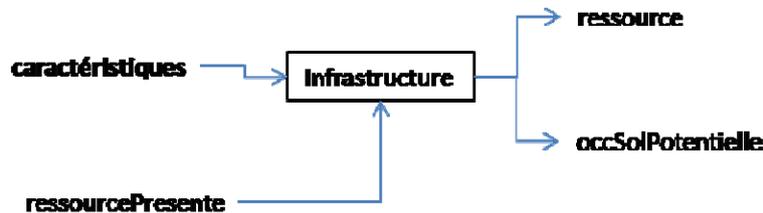


Figure 11 : Dynamique élémentaire des entités type Infrastructure

Dans tous les cas les infrastructures modifient une ressource ou l'accès à cette ressource et / ou redéfinissent le champ des occupations du sol potentielles (permettent des cultures irriguées pour Thau, interdisent l'urbanisation pour Alsace, occupent du foncier agricole pour Caux).

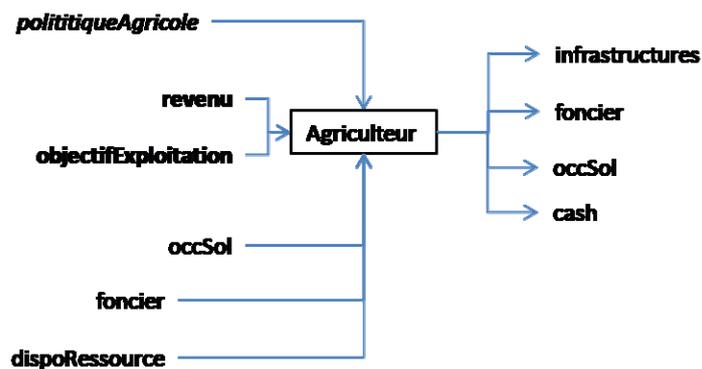


Figure 4 : Dynamique élémentaire des entités Agriculteur

Dans tous les modèles, les agriculteurs, ou les entités portant les usages de l'agriculture modifient les infrastructures, le foncier, l'occupation du sol et / ou produisent des revenus en fonction de l'occupation du sol et du foncier et de la ressource disponibles auxquels ils ont accès (à travers l'usage de cellules et des infrastructures qui y sont localisées en général) et selon des objectifs de revenu et / ou liés à leur type d'exploitation, la contrainte extérieure principale portant sur eux étant la mise en œuvre de politiques agricoles.

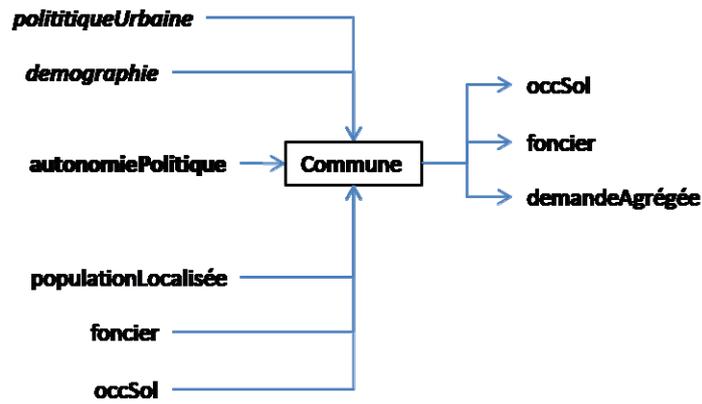


Figure 12 : Dynamique élémentaire des entités Commune

De manière similaire, les communes qui mettent en œuvre les usages des ressources pour les composantes urbaines modifient occupation du sol et foncier en fonction leurs caractéristiques de population et de foncier accessible et selon leur stratégies politiques internes (stratégie d'autonomie politique pour Alsace) ou externes (scénarios de forçages de politiques urbaines pour Thau), ainsi que dans tous les modèles, selon le forçage de scénario démographique. Par ailleurs par leur dimension d'entité spatiale agrégée, les communes portent des demandes agrégées de ressource vers les syndicats.

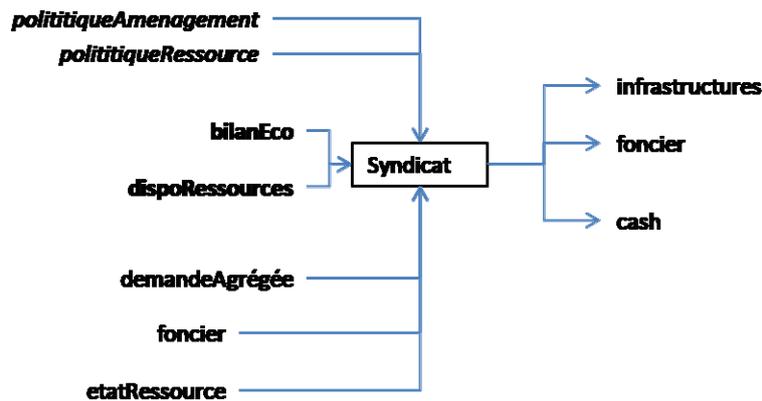


Figure 6 : Dynamique élémentaire des entités type « Syndicat »

Enfin les syndicats (ou les entités responsables de l'aménagement des infrastructures collectives – préleveurs dans le modèle Thau) ont des objectifs propres liés à leurs finances et aux contraintes de disponibilité des ressources, et font face à des demandes avec le foncier auquel ils ont accès et l'état des ressources qu'ils gèrent en modifiant foncier et infrastructures et / ou mettant en place des incitations financières. Ils sont soumis à des forçages externes liés à des scénarios de politiques d'aménagement hydraulique ou territorial.

3.3 Modèle générique résultant

Le diagramme de classes ci-dessous rassemble les entités composantes des modèles construits dans le projet, en spécifiant leurs caractéristiques et leurs activités. Ceci permet de préciser les diagrammes précédents et ce que nous avons nommé paramètre interne. Il s'agit parfois de paramètres internes de second ordre, notamment l'occupation du sol *occSol* est d'abord une

caractéristique de la cellule contrôlée ou prise en compte par diverses entités douées d'une capacité de délibération/décision (Agriculteur, Commune, Syndicat).

Ce diagramme décrit en fait la structure d'un modèle générique de gestion stratégique (c'est-à-dire sur un pas de temps long) d'un bien commun (Attonaty and Soler, 1991), en supposant un bien commun avec une dynamique autonome et sa propre inscription dans l'espace. La ressource en eau dont le partage est l'enjeu du cas de Thau est bien entendu une telle ressource. Pour le cas du pays de Caux, nous considérons que la protection face au risque de ruissellement est aussi un tel bien commun, dont la dynamique se produit à l'échelle du bassin versant. Au-delà des enjeux liés à l'eau, il pourrait s'agir aussi de population piscicole. Nous avons retenu l'Agriculteur comme principale figure de l'usager de la ressource car c'est celui dont l'activité marque le plus l'occupation du sol en milieu rural. Pour l'eau domestique, nous considérons que c'est la commune qui porte la demande et marque l'occupation du sol. Enfin nous avons matérialisé en tant qu'entité les plans de zonage en fait présents dans tous les modèles mais qui n'apparaissaient dans les représentations précédentes qu'à travers les contraintes d'occupation du sol potentielles.

Enfin la dynamique n'est pas seulement donnée par les réactions des entités actives à un état donné de leur environnement modifiant leurs paramètres internes et ainsi éventuellement une partie de l'environnement des autres. La dynamique est aussi donnée par des interactions directes entre entités. Le diagramme de séquence ci-dessous présente un ordonnancement de ces séquences sur un pas de temps. Ces interactions modifient également les paramètres internes des entités. Les interactions concernent en particulier la transmission d'informations sur un état perçu du système ou une attente par rapport à cet état (par exemple un manque d'eau), ce qui appelle une réaction d'une autre entité. Cette différence entre état du système perçu et attendu peut être une situation prévue (générant une action prévue telle que l'approvisionnement en eau) ou extraordinaire (générant alors des actions plus structurantes telles que des investissements dans de nouvelles infrastructures). On retrouve ici un schéma assez classique.

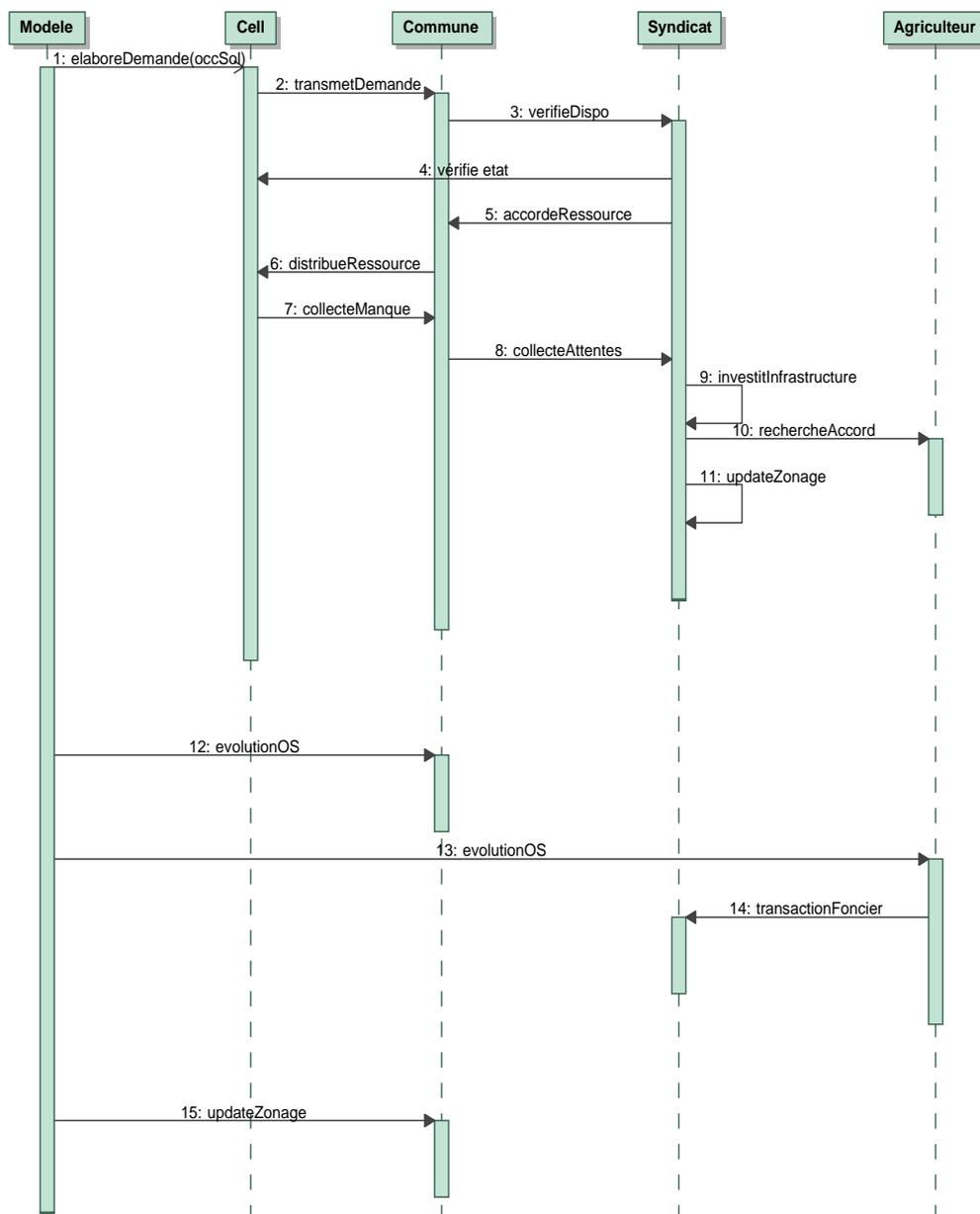


Figure 14 : Diagramme de séquence du modèle commun aux 3 cas

3.4 Discussion : enjeux urbains rural et contraintes techniques

L'analyse de cette modélisation générique a posteriori permet d'une part de proposer des analyses des interdépendances urbain-rural U-R à propos de la gestion de l'eau et d'autre part d'identifier ce qui est essentiel dans le couplage des dynamiques liées à l'eau E et celles liées au territoire T.

A propos de solidarité : analyse des interdépendances

Les schémas de synthèse de chaque cas permettent d'analyser des lieux possibles de solidarité transcrits dans les modèles grâce à la présence de rétroactions englobant les interdépendances présentes. La connaissance du terrain permet alors d'identifier où se trouvent les contrôles principaux de ces rétroactions.

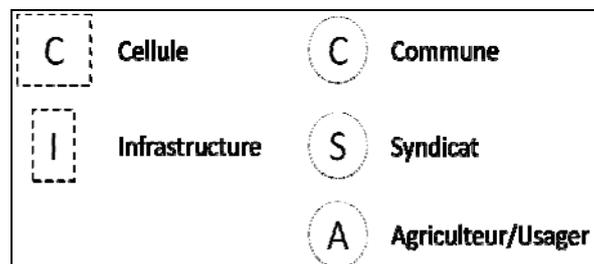


Figure 15: Légende des codes utilisés dans les schémas de synthèse ci-dessous

Sur le cas **Thau**, le monde de l'eau potable domine les dynamiques en se trouvant à l'origine des interactions.

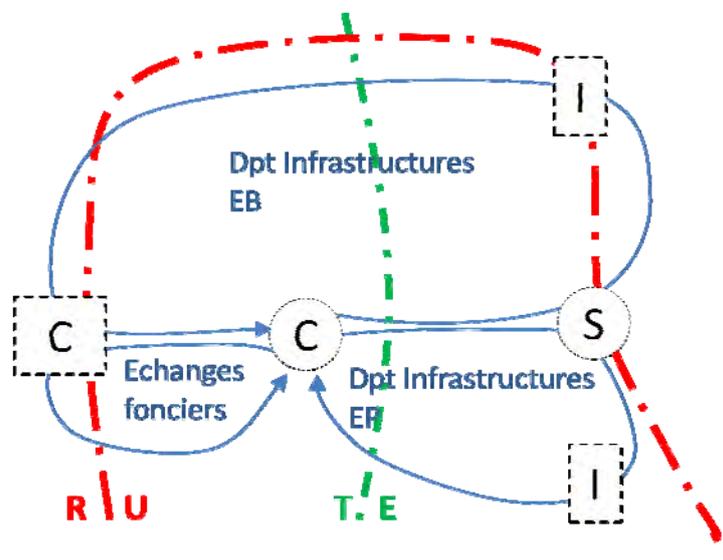


Figure 16 : Schéma de synthèse des rétroactions sur le cas de Thau

Les rétroactions sont constituées des trois cycles suivants :

- d'un petit cycle foncier : régulation par le SCOT
- d'un cycle d'infrastructures Eau Brute : ce cycle organise un transfert de ressources de R vers U. L'exploration de ce lieu de solidarité est en devenir car il est associé à un échange de coûts et la représentation de la circulation de l'argent n'est pas mise en

place dans le modèle. Par ailleurs ces transferts de ressource R-U ne sont pas encore existant sur le terrain.

- d'un cycle lié aux infrastructures d'Eau Potable, pour lequel l'aménagement du Territoire domine le monde de l'eau, mais n'induit pas de relation U-R.

Sur le cas Alsace, le monde de l'eau domine les dynamiques. Les entités « Syndicat » jouent un rôle central en étant impliquées dans toutes les rétroactions. La solidarité se passe au sein de U, du moins du monde l'Eau Potable, dans les interconnexions. R est essentiellement une ressource foncière sous contrainte multiple pour laquelle il y a concurrence dans le modèle entre protection de la ressource et accroissement urbain. Il y a des interdépendances de voisinage qui ne semblent pas gérées explicitement (extension des périmètres rapprochés au-delà des limites communales voire au-delà des limites syndicales).

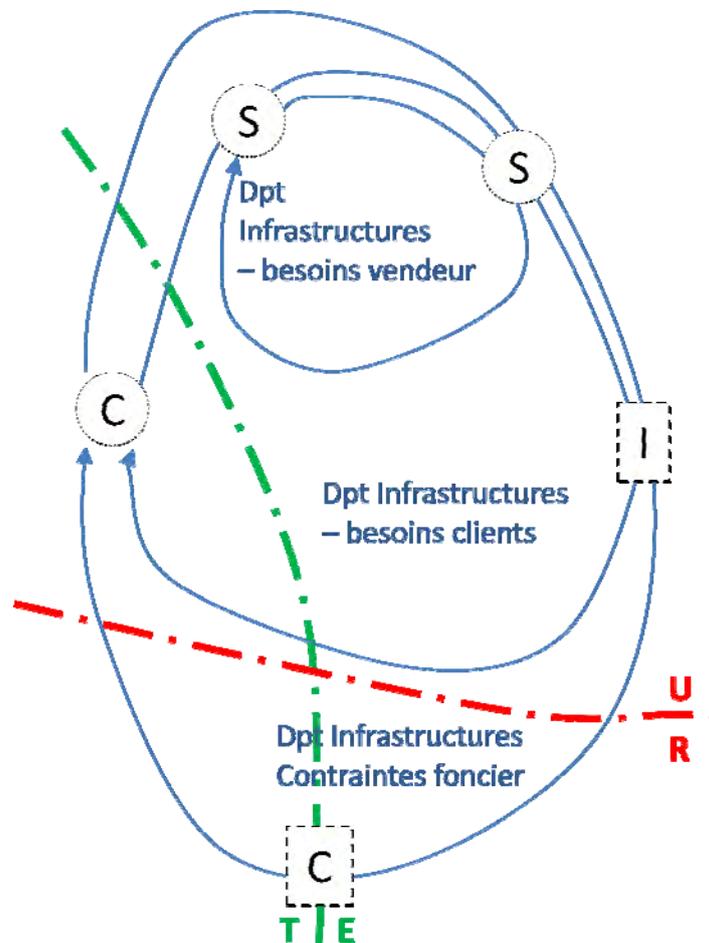


Figure 17 : Schéma de synthèse des rétroactions sur le cas alsacien

Sur le cas Caux, U domine R en le contrôlant pour diminuer les risques et via des échanges de foncier. la solidarité se fait via le syndicat quia un rôle central dans l'ensemble des rétroactions où il porte les enjeux U qui a été assimilé à une dynamique foncière très liée au développement de bâti à finalité d'habitation au sein des arènes de l'eau. Ce sont bien les questions de vulnérabilité au risque de coulées de boue qui est au cœur du problème.

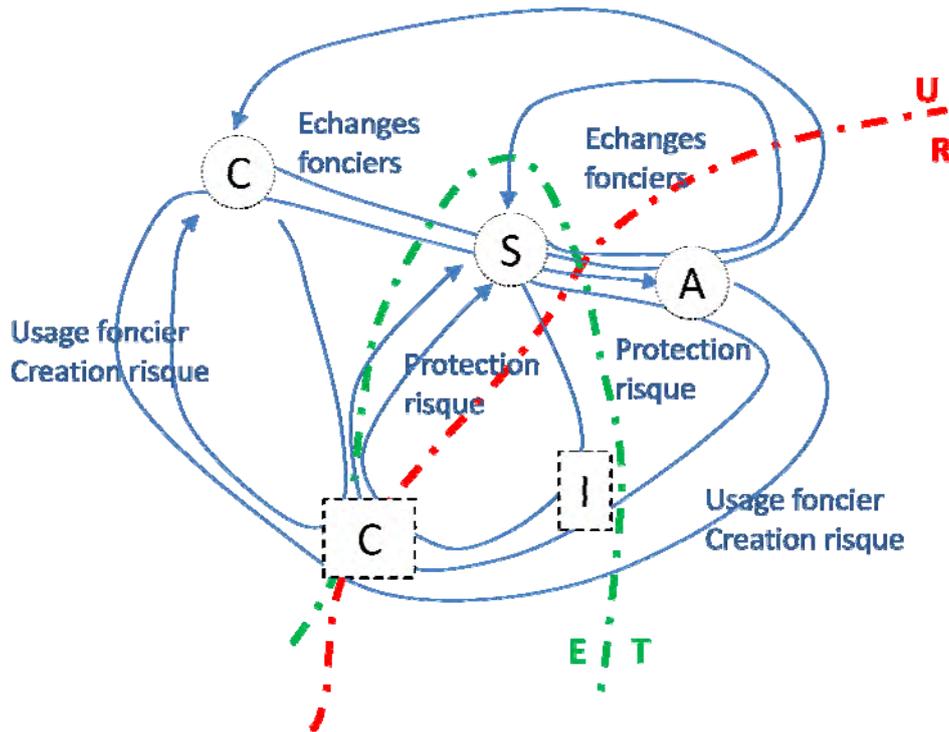


Figure 18 : Schéma de synthèse des rétroactions sur le cas du pays de Caux

Bien commun

Afin d'identifier les éléments de généricité, nous assimilons ressource en eau et protection face au risque de ruissellement comme deux spécialisations d'une même classe virtuelle « BienCommun⁴ ». L'autre ressource présente dans les modèles, le foncier, ne pouvant être assimilée à un bien commun étant les droits de propriété individuels, elle ne rentre pas dans cette analyse. Ce ne sont pas des biens communs de même nature. Dans le cas de la gestion quantitative de la ressource en eau, il s'agit de quantités d'eau vues comme des ressources. L'exclusion est difficile et il y a concurrence sur l'usage : l'eau consommée par l'un n'est plus disponible pour un autre. La mise en place d'infrastructures et d'institutions de contrôle rend possible l'exclusion. Celle-ci est effective dans le cas de l'eau potable. Pour la protection face au risque de ruissellement par contre, l'exclusion est possible selon la localisation des infrastructures mais impossible via des mécanismes institutionnels. La « concurrence » n'apparaît pas dans la protection mais dans la contribution à cette protection. Si une cellule est protégée, toutes les cellules exposées au même risque sont également protégées. Il s'agit d'un enjeu de provision de bien commun : plusieurs configurations sont possibles pour atteindre le même niveau de protection, et il est tentant pour un usager de laisser les autres usagers faire les efforts pour la protection de tous. Dans les deux cas on se retrouve avec des possibilités de passer clandestin et une inégalité spatiale entre les usagers. L'enjeu est la mise en place d'institutions permettant d'éviter ces phénomènes et de compenser l'inégalité existante.

Plusieurs biens communs peuvent être mobilisés dans chaque cas : dans le cas de Thau par exemple il y a une diversité de ressources en eau, chacune constitue une instance de bien commun. Dans les modèles proposés nous avons considéré la dynamique de chaque instance

⁴ Bien commun, expression polysémique, est entendu ici au sens du droit d'accès à ces ressources.

de bien commun comme indépendante. Il y a des interdépendances mais indirectes. Ce bien commun, représenté dans les cellules, est localisé, dans certains cas mobile et présente une certaine accessibilité. Sa mobilité et son accessibilité peuvent être contrôlées par des infrastructures. A chaque pas de temps, l'état de la cellule (en particulier son occupation du sol) la conduit à induire une modification de son stock de bien commun ainsi que celui des cellules auxquelles elle est connectée (par voisinage ou par réseau - tuyaux).

La principale différence entre les deux types de bien commun explorés dans SURGE réside dans la mise à l'épreuve. Dans le cas de la ressource eau, cette mise à l'épreuve est complètement endogène. C'est-à-dire qu'un manque de bien commun sera perçu de manière systématique. La dépendance à l'extérieur du système de la variabilité de la demande est très faible. Dans le cas de la protection au ruissellement, cette mise à l'épreuve est variable, dépendant fortement de besoins de protection définis de manière exogène et intrinsèquement aléatoires.

Spatialisation – localisation des processus au niveau de la cellule

La cellule occupe une place cruciale dans la dynamique des modèles. C'est à son niveau que se font les interactions, du fait de l'inscription physique des actions et/ou de la référence à des entités physiques localisées (les infrastructures). Le « bien commun » décrit ci-dessus est toujours localisé sur la cellule, ainsi que le « bien privé » (foncier), ce qui induit les questions d'accès et de droit sur la cellule, de dynamique physique, etc. Il n'y a pas de contrôle direct complet de l'agent sur le bien commun, mais seulement sur une partie de bien commun localisée sur un ensemble de cellule sur lequel il a une part de contrôle.

Dans le cas de Thau, la demande en bien commun est faite par la cellule en fonction de l'occupation du sol (quantité) et de la connexion de la cellule aux infrastructures (destinataire) et agrégée au niveau de la commune. La demande est ensuite collectée par les gestionnaires de biens communs (préleveurs) et le bien commun est alloué aux communes et la satisfaction de la demande est un indicateur au niveau des communes. Le développement d'infrastructure est soit géré de manière exogène (scénarios sur des infrastructures collectives supra-communales) soit motivé à un niveau de la cellule pour abaisser son niveau de contraintes sur l'occupation du sol (développement d'infrastructures individuelles par l'utilisateur).

Dans le cas Alsace, on se retrouve dans un cas plus détaillé dans le sens où la population est prise en compte dans la cellule, en plus de l'occupation du sol. La ressource en eau est aussi caractérisée par sa qualité et pas simplement par un volume. La cellule est connectée aux infrastructures de production (ex : puits) et de distribution (ex : réseau). La demande est agrégée au niveau de la cellule tandis que la satisfaction de la demande, est agrégée au niveau de la commune. En revanche, le développement d'infrastructure est motivé au niveau agrégé des infrastructures de distribution par la réinjection de l'indicateur de satisfaction de la demande (mécontentement) pour localiser les besoins supplémentaires.

Dans le cas Caux, le risque est généré au niveau de la cellule (selon occupation du sol et infrastructure présente, propagation de cellule à cellule) et agrégé au niveau de la parcelle puis des communes (ruissellement ou érosion). Il en résulte un indicateur de mécontentement

collecté par les gestionnaires (syndicats) et qui motive le développement d'infrastructures. Les infrastructures développées sont localisées en fonction du niveau de mécontentement agrégé et des caractéristiques propres des cellules. Elles contribuent au niveau de protection.

Spatialisation - zonage

La place cruciale de la spatialisation se retrouve dans l'importance de la notion de zonage dans les 3 cas : PLU, périmètres de protection, SCOT... Il s'agit de paramètres qui constituent un jeu de contraintes initiales et qui peuvent évoluer sur des pas de temps longs selon la dynamique des simulations. Ces zonages constituent des contraintes aux changements d'occupation du sol (utilisation des biens privés), notamment par rapport au processus d'urbanisation mais aussi pour les usages agricoles tant pour des questions de dynamiques territoriales (SCOT et PLU) que de protection de la ressource en eau (périmètre de protection). La représentation de l'évolution des PLU pose problème quand on ne passe pas par une mise en situation de type jeu, car elle résulte d'une négociation difficile à capturer dans un modèle.

Spatialisation - infrastructures

La spatialisation passe aussi par les infrastructures mises en place qui contraignent la mobilisation des biens communs (ressource / risque) et l'utilisation des biens privés: points d'accès à la ressource qui transforment une ressource potentielle en ressource active mais posent des contraintes locales sur l'occupation du sol, réseaux qui font circuler la ressource dans l'espace et rendent possible des occupations du sol potentielles nouvelles nécessitant de l'eau, ou bien aménagements à la parcelle qui modifient la propagation du risque et imposent une occupation du sol. Ces infrastructures sont gérées (création, modification, mobilisation) soit par des entités de gouvernance (Syndicats) soit par des usagers propriétaires de l'espaces où se situent ces infrastructures (eg agriculteurs).

Spatialisation - urbanisation et changements d'occupation du sol

Le processus d'urbanisation est représenté dans les 3 modèles comme un scénario de forçage externe vers lequel il n'y a aucune rétroaction. Pour Caux, il est marginal et défini par les joueurs au cours du jeu (il y a donc en fait une part de rétroaction qui passe par les joueurs car ceux-ci réagissent à une situation de jeu) qui vont faire varier l'offre localement. Les scénarios définissent un forçage comme une demande de cellules à changer d'occupation du sol. Cette demande est satisfaite selon les choix des joueurs. Pour Thau, les scénarios définissent des probabilités de transition des occupations de sol sous contrainte des zonages. Pour le cas d'Erstein, c'est un forçage exogène fixe. La nature et le nombre de types d'occupation du sol est variable selon les modèles. Celles impliquées dans les transitions sont essentiellement de type urbain ou agricole, même si ces deux types peuvent avoir une variété de sous types : par exemple, dans le cas de Thau, la nomenclature retenue comporte 10 classes (naturelles, céréales, vigne, maraichage, arboriculture, friche, non construit, zone d'activités, bâti collectif, bâti individuel).

La résolution spatiale est variable : 100 m pour Erstein et Thau, 25 m pour Caux. Or les zones d'études considérées correspondent à des surfaces comparables allant de quelques dizaines à

quelques centaines de km². Dans tous les cas, la résolution spatiale retenue pour la description des cellules est très fine par rapport à l'extension de l'espace représenté. Le choix de travailler avec une résolution aussi fine correspond à la prise en compte de la dynamique des processus biophysiques (Caux) et/ou à la mise en relation avec les caractéristiques spatiales des infrastructures (Caux, Thau et Alsace). Les informations sont ensuite agrégées au niveau de la commune.

Temps

L'échelle du temps est toujours longue, celle de la stratégie et pas celle de la mise en œuvre : les horizons temporels sont d'une dizaine voire d'une vingtaine d'années, et le pas de calcul retenu est l'année ou le semestre. Dans le cas de Thau, l'horizon temporel choisi est celui des scénarios du SAGE.

Aspects économiques

La dimension économique joue un rôle faible dans chacun des modèles, avec une représentation du prix de l'eau pour les cas Alsace et Thau (à venir) et le revenu agricole pour Caux. Dans le cas des actions sur les infrastructures, les décisions relèvent davantage de choix politiques et dans le cas des actions sur les occupations du sol elles relèvent plutôt de continuité de dynamiques d'exploitation en cours. Si bien que l'économie n'intervienne que comme une contrainte dans les actions d'investissement (revenu agricole) ou comme un indicateur de l'efficacité des politiques mises en place (prix de l'eau « réel » et marché). Cette perspective doit être explorée en couplant des modèles économiques aux modèles développés.

4 Conclusions

En début de projet, plusieurs méta-modèles ont été produits concernant la représentation des interdépendances entre entités physiques et sociales impliquées dans des situations de solidarité urbain/rural pour la gestion de l'eau, à partir de la diversité des expériences au sein du consortium sur des cas de telles interdépendances. Ce travail a conduit à la révision de l'ambition initiale de construire un modèle générique, étant donné la diversité des problématiques traitées. Cependant, la comparaison des modèles développés sur chacun des cas a bien permis l'identification et la discussion d'éléments génériques de représentation des interdépendances urbain-rural pour la gestion de l'eau. Pour cela, une représentation simplifiée des modèles de chaque étude de cas a été produite. La comparaison a permis une réflexivité sur les entités et les dynamiques représentées ou encore sur les échelles spatiales considérées. La modélisation a impliqué une représentation spatiale des infrastructures de l'eau d'une part et des usages sur le territoire d'autre part. La cellule, entité spatiale minimale de référence, occupe une place cruciale dans la dynamique des modèles car c'est à son niveau que se font les interactions. C'est une entité localisée qui a pour attributs une occupation du sol et un stock de ressource en eau. Les entités sociales sont elles décrites par trois niveaux : individu (usagers, agriculteurs), commune, et syndicat (groupes de commune). On retrouve donc le concept d'interactions portées des relations induites par l'espace et modifiées par des

équipements localisés d'une part, et une spécification des entités sociales de l'autre. Par ailleurs on retrouve bien dans le schéma dynamique l'action des entités motivées par la nécessité de répondre à des attentes vis-à-vis d'états insatisfaisants du système. Dans le cas de Thau comme dans celui de l'Alsace, les usages ruraux ne sont pas représentés par des agents mais portés directement par la cellule et celle-ci induit une demande en eau brute qui est déterminée par son occupation du sol (pour l'irrigation) et contrainte par des forçages externes climatiques. Dans le cas de Caux, les usages ruraux sont portés par les agents agriculteurs. Dans les trois cas, les usages urbains sont portés par une entité nommée «commune» qui génère une demande en eau et se développe selon ses ressources en foncier, sous la contrainte d'une politique d'expansion urbaine qui intervient comme un forçage externe et sous contraintes règlementaires de transformation des espaces agricoles et naturels. Nous avons représenté la manière dont l'eau contraint –ou non - l'occupation de l'espace et, réciproquement, dont les usages du territoire déterminent l'état de la ressource. La spatialisation dans le modèle a tenu compte des territoires fonctionnels d'un point de vue hydrographique autant que des territoires administratifs. Enfin, un diagramme de classe commun aux 3 cas a été produit, qui a conduit à identifier une classe virtuelle « Bien Commun » permettant de mettre en parallèle les enjeux liés à la ressource en eau ou à la protection face au risque de ruissellement. L'échelle de temps choisi est celle des scénarios d'aménagement. La comparaison avec le modèle a priori montre de nombreux points communs dans la structure générale. Le passage par les études de cas a en fait essentiellement permis de spécifier le schéma initial en sélectionnant les entités et processus identifiés sur le terrain. Les tentatives de construire des modèles génériques englobants auraient nécessité d'investir des moyens beaucoup plus important en ingénierie des connaissances pour une utilité dont on peut douter dans un cadre de modélisation d'accompagnement ou les modèles sont destinés à toujours évoluer. On peut par contre souligner l'utilité de mener un travail d'abstraction a posteriori des concepts utilisés dans les modèles existants pour se donner les moyens d'analyser les études de cas selon des théories de la littérature.

Annexe : Thesaurus générique et son application à l'eau domestique (en italique)

ACTEURS

- Individu
 - ❖ Usager
 - *Activités domestiques*
 - *Activités récréatives*
 - ❖ Riverain
- Organisme
 - ❖ Entreprise / exploitation
 - *Opérateur (Régie/Délégataire privé)*
 - *Consommateur (Industrie/Ville /Bâtiments collectifs)*
 - ❖ Socio-culturel
 - ❖ Scientifique
 - ❖ Gestion espace/ressource
 - ❖ Politique
 - *Autorité organisatrice (Commune ; Syndicat de communes ; etc.)*
 - ❖ Association
 - *De consommateurs*

RESSOURCES-NON HUMAINS

- Ressources / milieux naturels
 - ❖ Eau
 - *Eau superficielle (Ruisseau Rivière Fleuve Mer Océan)*
 - *Eau souterraine (Nappe alluviale)*
 - ❖ Sol
 - ❖ Air
- Biomasse
 - ❖ Faune
 - ❖ Flore
- Information
- Infrastructure/équipement
 - ❖ collectif
 - *Réseau Eau potable (longueur, densité, accès, rendement) Station de pompage surpression (topographie, énergie) Eaux usées (longueur, densité, accès, rendement) Séparatif/Unitaire*
 - *Usine (qualité ressource/milieu receptr) Epuration (type de traitement) Traitement eau potable (type de traitement)*
 - *Compteurs (fréquence de relève, personnel de relève, volume de facturation)*
 - ❖ Non collectif
- Argent
- Climat
 - ❖ Température
 - ❖ Pluie

INTERACTIONS

- Interaction acteur/acteur
 - ❖ Régulation
 - ❖ Conflit d'usage
 - ❖ Concurrence
- Interaction acteur/ressource
 - ❖ Activité économique
 - Consommation ressource
 - Sans consommation ressource (Usage domestique)
- Interaction ressource/ressource
 - ❖ Casse réseaux = f (température, inondation = g(pluie))
 - ❖ Réduction de la disponibilité de la ressource = f (inondation= g(pluie))

OUTILS

- Instruments de planification
- Instruments de mise en œuvre
- Instruments d'évaluation

ESPACE

- ❖ Administratif / politique
- ❖ Périmètre de protection
 - Protection immédiate
 - Protection rapprochée
 - Protection éloignée
- ❖ Aire d'alimentation de captage
- Economique
- Géographique (relief, densité habitat)
- Fonctionnel

Bibliographie

Attonaty, J.-M., Soler, L.-G., 1991. Des modèles d'aide à la décision pour de nouvelles relations de conseil en agriculture. *Economie Rurale*, 37-45.

Bots, P.W.G., Barreteau, O., Abrami, G., 2008. Measuring Solidarity in Agent-Based Models of Resource Sharing Situations. *Advances in Complex Systems* 11, 337-356.

Thévenot, L., 2006. L'action au pluriel Sociologie des régimes d'engagement. La découverte.