

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Projet RADHy Büech

Représentation intégrée des Adaptations individuelles et des
Dynamiques Hydrologiques sur le bassin du Büech

Rapport final

Action n° 67 du Programme 2010 au titre de
l'accord cadre Agence de l'Eau ZABR



RiverLy

Hes-SO VALAIS
Haute Ecole de Gestion
Hochschule für Wirtschaft



Zone
Atelier
LYON FRANCE BASSIN DU RHÔNE

Doctorale
ABIES

INRAE

Avertissement: Guide pour la lecture

Ce rapport, n'est pas rédigé comme un document scientifique mais comme un rapport d'activité à destination de l'AERMC et de la ZABR. Il vise à mettre en perspective les activités et les productions (scientifiques et autres) du projet Radhy Buëch. Il intègre ainsi des parties, des traductions ou des images issues des productions scientifiques des auteurs qui ont été produites dans le cadre du projet. Ces productions sont référencées dans chaque partie dans un encart orange « **Communications** » situé en fin de partie. Cet encart vise à la fois à donner des pistes pour le lecteur intéressé à rentrer dans les détails techniques des activités ou productions référencées, et à mettre en évidence l'intérêt de ces activités ou productions dans les divers cercles où leur présentation a été réalisée (revues scientifiques, conférences académiques, colloques de discussions sciences-sociétés, thèses de doctorat, rapports de stages, ...).

Chaque partie a été rédigée pour pouvoir être lue de manière indépendante mais nous invitons le lecteur à commencer par lire l'introduction générale.

Introduction générale : Déroulé d'un projet de modélisation interdisciplinaire ancré sur un territoire

Contenu de cette partie: Cette partie décrit le déroulé du projet incluant l'organisation mise en place pour adapter le projet chemin faisant en accord avec les acteurs institutionnels du territoire par le biais d'un comité de pilotage local, la relation avec les acteurs du territoire, et une explicitation de nos pratiques interdisciplinaires entre partenaires académiques et non académiques et acteurs de l'eau.

1 Un projet transdisciplinaire sur la gestion des périodes de basses eaux

1.1 Problématique

Les projets ZABR nous donnant la chance d'encre nos réflexions sur des terrains d'études spécifiques nous débutons ce rapport sur les problématiques du Buëch. Depuis plusieurs années, le bassin versant du Buëch est soumis à un déséquilibre entre les besoins en eau de ses différents usagers et ses ressources disponibles. Ce bassin a d'ailleurs été classé Zone de Répartition des Eaux (ZRE¹) par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse en 2012 afin de faciliter la conciliation des intérêts des différents utilisateurs de l'eau. De plus, un dispositif de restrictions d'usages de l'eau a été mis en place depuis la sécheresse de 2003 à l'échelle du département des Hautes-Alpes, dans lequel est située la grande majorité du bassin. Entre 2003 et 2017, des restrictions d'usages de l'eau légalement contraignantes ont été adoptées sur le bassin environ deux années sur trois, ayant notamment pour effet une interdiction d'irriguer au moins deux jours par semaine. Ces restrictions ont pour objectif de préserver l'eau pour les usages définis comme prioritaires dans le Code de l'Environnement, à savoir l'eau potable et l'eau pour les milieux aquatiques. C'est dans ce contexte que le projet RADHY Buëch a débuté en janvier 2019. Dans ce cadre l'analyse s'intéresse tout particulièrement à la modélisation des possibilités d'adaptation à court et moyen termes de l'irrigation durant une campagne en période d'étiage, c'est à dire lorsque l'eau de la rivière atteint son point le plus bas. L'objectif du projet est d'étudier les différentes possibilités d'adaptation selon la diversité des profils d'irrigants et des structures collectives d'irrigation, en prenant en compte la juxtaposition de leurs contraintes respectives et en mettant en perspectives ces adaptations du monde agricole avec le développement futur du Buëch. En ce qui concerne le monde agricole, l'irrigation du bassin du Buëch est en effet principalement collective. Les irrigants sont regroupés au sein d'associations syndicales de propriétaires avec un statut particulier : les Associations Syndicales Autorisées (ASA). Chaque propriétaire possède une ou plusieurs parcelle dépendant d'un ouvrage collectif (un canal par exemple) et ils ont collectivement intérêts à la réalisation de certains travaux.

Or, les différents agriculteurs propriétaires au sein d'une même ASA peuvent avoir des systèmes de production différents, entraînant des contraintes d'irrigation propres à chacun. De plus, les ASA se

¹ Les ZRE sont des zones (bassins, sous-bassins, fractions de sous-bassins hydrographiques ou systèmes aquifères) où sont constatées une insuffisance, autre qu'exceptionnelle, des ressources par rapport aux besoins.

sont spécialisées au cours du temps avec l'évolution des techniques d'irrigation, et il semble exister au sein du bassin du Buëch une hétérogénéité de profils d'ASA en fonction notamment des techniques employées comme l'irrigation gravitaire et l'irrigation sous pression, apportant chacune leur lot de contraintes spécifiques. De fait, la compréhension des systèmes de production à l'œuvre sur le bassin du Buëch ainsi que celle du fonctionnement des ASA sont une clef importante pour pouvoir étudier le bassin comme un système juxtaposant différentes échelles d'actions et de contraintes : celles des logiques individuelles des agriculteurs au sein de leur exploitation, et celles de ces mêmes agriculteurs avec leur casquette d'irrigant au sein des structures collectives. De plus ces logiques s'inscrivent au sein du bassin versant du Buëch, territoire plus large qui a ses propres dynamiques, et dont dépendent les systèmes de production et les ASA.

Les modèles « pluie - débit » utilisés actuellement pour les calculs de volumes prélevables peuvent parfois avoir un fort pouvoir prédictifs mais ne permettent pas de prendre en compte des diversités d'accès des usagers de l'eau (ils ne sont pas spatialisés) et encore moins les différentes contraintes de ces usagers. Sur le Buëch il existe le modèle hydrologique spatialisé de manière fine J2000 Rhône, développé à l'échelle du bassin du Rhône qui comprend le bassin versant du Buëch. Mais il ne permet pas de décrire explicitement d'une part les capacités d'adaptations des exploitations individuelles ou des structures de gestion collectives locales (les ASA) à l'échelle du bassin du Buëch dans leurs diversités respectives et d'autre part les conséquences sur ces mêmes acteurs des restrictions ou des manques d'eau ou d'autres changement futur.

En proposant la construction de ce que nous avons appelé une *représentation intégrée des socio-hydrosystèmes*, le projet visait à enrichir les outils existants de représentation des hydrosystèmes par une prise en compte des rétroactions entre décisions des acteurs et fonctionnement de ces hydrosystèmes. En Hydrologie, cette question entre sous le chapeau de la *socio-hydrologie* qui consiste à intégrer des dynamiques « sociales » (dans notre cas, les descriptions des usages de l'eau et de leurs déterminants) dans les modèles hydrologiques. Suite aux interactions entre l'équipe de recherche porteuse du projet avec le Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance (SMAVD) et en collaboration avec les acteurs institutionnels majeurs du bassin par la suite organisés en comité de pilotage local du projet, le bassin versant du Buëch a été choisi comme terrain d'étude pour mettre en œuvre de manière expérimentale une méthode originale basée sur le couplage de modèles pour expliciter, évaluer et comparer différentes stratégies d'adaptation menées par différents acteurs à différentes échelles. Dès le début du projet, il a été décidé d'un commun accord entre les scientifiques des différentes équipes et le comité de pilotage local de se centrer sur la gestion des périodes de basses eaux. C'est en effet l'enjeu qui semblait concilier le mieux les compétences des équipes de recherches en présence (expertises sur l'usage agricole, présence d'un modèle hydrologique journalier sur la zone, pas de compétences spécifiques en hydraulique pour envisager une étude sur les risques d'inondations, ...) et les enjeux sur l'eau du territoire (bassin en Zone de Répartition des Eaux, usage agricole grandement majoritaire pendant la période d'étiage, PGRI en cours de révision, difficulté pour les acteurs « institutionnels » de l'EPTB (le SMIGIBA) à la chambre d'agriculture en passant par la police de l'eau et la DDT à concilier les contraintes environnementales et les contraintes du monde agricole dans sa diversité). L'objectif du projet étant alors d'utiliser le modèle socio-hydrologique pour se faire rencontrer les problématiques du

bassin versant et celles des périmètres irrigués et donc des usagers agricoles, tout en prenant en compte, notamment via des ateliers geo-prospectives, les autres enjeux relatifs à l'eau (eau potable, pêche, loisir, ...) présents sur le bassin versant et identifiés comme déterminants pour le devenir du territoire.

1.2 De pluri- à trans-disciplinaire

Une des caractéristiques des projets ZABR est de regrouper un consortium pluridisciplinaire. Le projet regroupait ainsi initialement l'UMR G-EAU pour ses compétences en modélisation multi-agents et en analyse des usages agricoles de l'eau, l'UR RiverLy, avec ses équipes spécialisées en hydraulique et hydrologie et l'UMR ESPACE pour ses compétences géographie et plus particulièrement en géoprospective.

Comme son nom l'indique (« Représentation intégrée des Adaptations individuelles et des Dynamiques Hydrologiques sur le bassin du Buëch »), le projet RADHy Buëch est avant tout un projet de modélisation. En effet le terme « Représentation » fait référence au modèle qui constitue une représentation du réel. La notion de représentation « intégrée » a quant-à elle été introduite pour indiquer que le modèle regroupe, sous un cadre interdisciplinaire cohérent, des champs de connaissance initialement distincts, parce qu'étant notamment rattachés à des disciplines scientifiques différentes telles que l'agronomie (qui va déterminer par exemple la dose d'eau d'irrigation à fournir à une parcelle irriguée), l'hydraulique (qui va décrire par exemple les écoulements dans les canaux d'irrigation des périmètres irrigués gravitaires), et l'hydrologie (qui décrit par exemple les écoulements dans un bassin versant). La discipline scientifique « informatique » qui porte le travail de modélisation doit fournir ce cadre interdisciplinaire cohérent qui permette une « intégration » de ces processus dans un seul modèle qui est ici dit interdisciplinaire car il n'est pas rattaché à une discipline en particulier mais intègre des champs de connaissances provenant de différentes disciplines.

Comme nous le verrons tout au long de ce rapport, il ne suffit pas pour construire un cadre interdisciplinaire de réunir des concepts dans un modèle mais il est également nécessaire d'intégrer les disciplines scientifiques dans leur ensemble, avec leurs méthodes et leurs cadres d'analyses.

Les activités géoprospectives du projet ont quant-à elles l'objectif d'accompagner les acteurs du territoire à se projeter dans le futur et portent des réflexions sur la manière dont les scénarios représentés dans le modèle (centrés sur l'usage agricole en période d'étiage) doivent pouvoir s'intégrer aux scénarios résultants de l'analyse géoprospective. Ce faisant, elles apportent la dimension trans-disciplinaire au projet : l'objectif de recherche, les cadres d'analyses utilisés et les modèles produits ne sont plus seulement orientés par des questions académiques mais par les enjeux sociétaux du territoire étudié.

Ainsi, dès la première phase de terrain du projet qui initiait le diagnostic agraire (objet de la première partie de ce rapport) un comité de pilotage que nous avons qualifié de « local » a été constitué pour orienter le projet au fur et à mesure de son avancement. Ce comité était constitué, en plus des chercheurs permanents du projet, d'un ou une représentant du SMIGIBA (l'EPTB du Buëch), de la DDT 05 (le département majoritaire du Buëch), d'EDF, de la chambre d'agriculture

05, de la police de l'eau (AFB au début du projet et OFB à la fin mais il s'agissait de la même personne). En raison de la crise sanitaire, le comité n'a pas pu être réuni autant de fois que nous l'aurions souhaité et de toute façon avait une dimension davantage consultative que décisionnaire mais des interactions régulières entre les chercheurs et les membres du comité ont pu avoir lieu tout au long du projet sous diverses formes (appels téléphoniques, interviews, réunion en présentiel ou à distance).

1.3 Les grandes parties du projet

Le projet avait été organisé selon trois axes (les *work packages* dans la fiche technique soumise) qui constituent la base des trois parties de ce rapport. Ces axes étaient formulés de la manière suivante : 1. Connaissance des modes de gestion, de prise de décision des acteurs locaux et des leviers d'adaptation qu'ils maîtrisent; 2. Modélisation couplée du socio-hydrosystème sur le territoire cible et 3. Explicitation des résultats de simulations et exploration de stratégies d'adaptation à plusieurs échelles. Dans la pratique, la manière dont les activités de recherches ont été organisées autour de ces trois axes est synthétisée dans la Figure 1 qui illustre par la même occasion le plan de ce rapport et qui est détaillée dans le paragraphe suivant.

Étant donné le focus mis sur les périodes de basses eaux et l'usage agricole, l'axe 1 a été réalisé principalement sous la forme d'un diagnostic agricole (méthode nous venant des écoles d'agronomie françaises) qui a été adapté pour intégrer les questions d'adaptation de l'agriculture irriguée sur le territoire. Les résultats de cette analyse fournissent au projet une vision synthétique et complète de l'usage de l'eau agricole et une description des adaptations en cours et à venir aux différents niveaux identifiés (ASAs et Exploitations agricoles). Ces résultats sont présentés dans la Partie 1 de ce rapport.

L'axe 2, dont les résultats font l'objet de la partie 2 de ce rapport, concerne la modélisation couplée. Celle-ci a été menée par une approche de co-simulation, c'est à dire que, si l'on considère qu'un modèle couplé est composé de plusieurs modèles composants, chaque modèle composant est simulé par un logiciel de simulation différent (une plateforme de modélisation et de simulation)¹. La première partie du travail de ce type de modélisation consiste à adapter ou à construire chaque modèle composant dans sa propre plateforme de modélisation et simulation. Ces développements (en terme de construction ou d'adaptation du modèle conceptuel, de programmation du modèle, de récolte et d'organisation des données, etc.) sont présentés dans la Partie 2. Le premier chapitre de la Partie 2 présente ce qui concerne les adaptations du modèle de culture à l'échelle de la parcelle et du modèle hydrologique à l'échelle du Buëch et à celle du grand Buëch (sous partie du Buëch amont). Le deuxième chapitre de la Partie 2 présente un modèle multi-agents original développé intégralement dans le cadre du projet pour simuler un périmètre irrigué gravitaire. La principale originalité de ce modèle est de se baser sur la théorie de l'action située qui consiste à décrire les

¹111. L'alternative à la co-simulation est de recoder les modèles composants dans une seule plateforme de modélisation et de simulation suffisamment générique pour implémenter chacun des modèles. L'utilisateur n'a alors besoin que d'un seul logiciel pour simuler le modèle couplé. Comme cela est expliqué dans la Partie 2 de ce rapport, avec la méthode de co-simulation on s'économise l'effort de recodage des modèles mais on ajoute la modification des logiciels composants pour qu'ils puissent communiquer ensemble et le codage d'un logiciel tiers qui agence les simulations de chacun des logiciels composants.

décisions des agents comme des choix des agents parmi un ensemble d'opportunités d'actions toutes représentées explicitement dans le modèle. L'ensemble de ces opportunités est réactualisé en permanence au cours de la simulation en fonction de l'évolution des conditions environnementales et des actions des autres agents. La seconde partie du travail de modélisation, rédigée dans le chapitre 3, concerne le travail de couplage par co-simulation qui consiste donc à coupler chaque modèle composant de telle manière qu'il puisse être perturbé par les autres modèles, à adapter les plateformes de simulation pour qu'elles puissent être pilotées par une simulation maîtresse qui pilote l'ensemble des simulations composantes, et enfin à programmer cette simulation maîtresse orchestrant les simulations composantes. Ce travail de couplage se découpe en deux parties : Un couplage entre modèle de périmètre irrigué et modèle de croissance des cultures qui a pu être finalisé (COPAT cf. Partie 2) et un couplage entre modèle de périmètre irrigué et modèle hydrologique (COWAT) qui est à ce jour encore en phase de finalisation.

L'axe 3 enfin, dont les résultats font l'objet de la troisième partie de ce rapport présente la démarche géoprospective menée tout au long du projet. Cette démarche avait été prévue lors de l'écriture du projet puis en début du projet avec le comité de pilotage local, comme une approche participative visant à co-construire des scénarios prospectifs spatialisés avec des acteurs du territoire du Buëch, permettant notamment aux acteurs d'identifier et de partager leurs craintes, leurs désidérata pour le futur du bassin, es craintes et désidératas devant ensuite être intégrés au travail de modélisation et discutés à nouveau. En raison de la crise COVID, l'approche participative en tant que telle n'a pu avoir lieu et a été remplacée par une enquête en ligne dont l'objet et les résultats sont présentés dans le chapitre 1 de la partie 3 qui a pu donner lieu à des scénarios d'évolution du territoire présentés dans le chapitre 2. Le partage de ces résultats n'ayant pas pu être réalisé de manière présentielle, un prototype d'outil en ligne de présentation des résultats de simulation et de l'enquête géoprospective a été développé à la place. La présentation de ce prototype fait l'objet du chapitre 3.

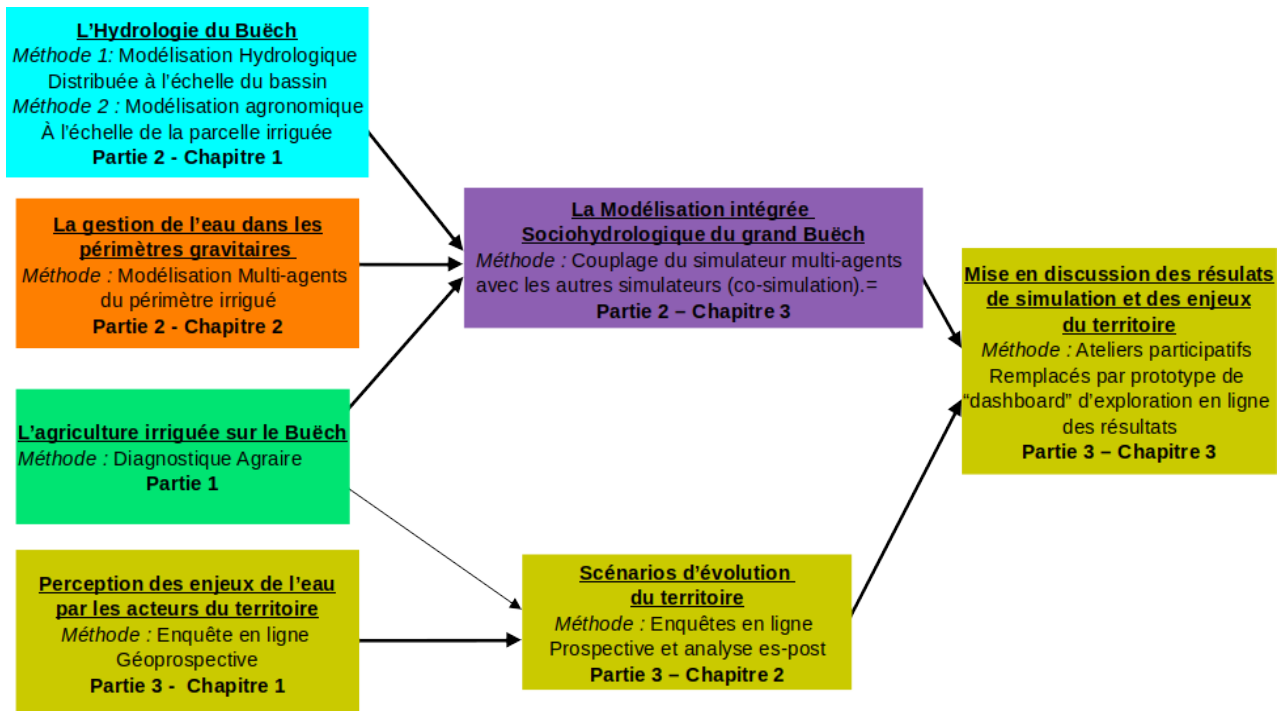


Figure 1 : Organisation du projet et du rapport

Nous avons dans notre fiche projet, proposé de fournir un certain nombre d'éléments que nous listons ci-dessous en indiquant où le lecteur peut trouver ces éléments dans ce rapport. Une liste d'indicateurs dans et hors hydrologie utilisés par les acteurs dans leur prise de décision sur la ressource.

Pour l'axe 1 : « Une description des règles de décision des acteurs et des échelles de temps. Caractéristiques de leurs actions associées à une typologie des comportements d'acteurs. », c'est ce qui est décrit dans la partie 1 et l'annexe 2.

Pour l'axe 2 : « Un Modèle couplé hydrologie – modélisation à base d'agents et résultats de simulation évalués par rapport aux données ». Ce modèle couplé n'est pas finalisé à ce jour. Le modèle hydrologique, et son adaptation pour la co-simulation ainsi que son évaluation par rapport au données est présenté dans la Partie 2, chapitre 1, section 1.2. Le modèle à base d'agent destiné à être couplé est présenté dans la Partie 2 chapitre 2, le couplage est présenté dans le chapitre 3 de la partie 2. L'ensemble des codes informatiques, publications scientifiques et documentations techniques associés sont synthétisés dans l'Annexe 5.

Pour l'axe 3 : « Une analyse critique des limites des représentations modélisées, de la représentativité des acteurs identifiés et des conséquences sur la pertinence des résultats, de la comparaison des performances de scénarios d'adaptation et des avis des acteurs sur ces scénarios. » Cette partie a été réduite en raison de l'incapacité de se réunir avec les acteurs de terrain due à la crise COVID qui nous a amené à nous pencher plutôt sur la manière dont on pouvait donner à voir les résultats de simulation et les coordonner avec une démarche prospective plus large sur le devenir du bassin versant.

2 Déroulé du projet

Bien que les résultats du projet puissent être restitués sous la forme des trois grandes parties distinctes et cohérentes présentées dans la section précédente, il nous semblait important de souligner que les différentes dimensions du projet ont été menées de front et en interaction, à la fois au niveau des grands domaines scientifiques et modèles développés au cours du projet et au niveau de l'interaction des chercheurs avec le territoire du Buëch. La Figure 2 ci-dessous schématise ces interactions.

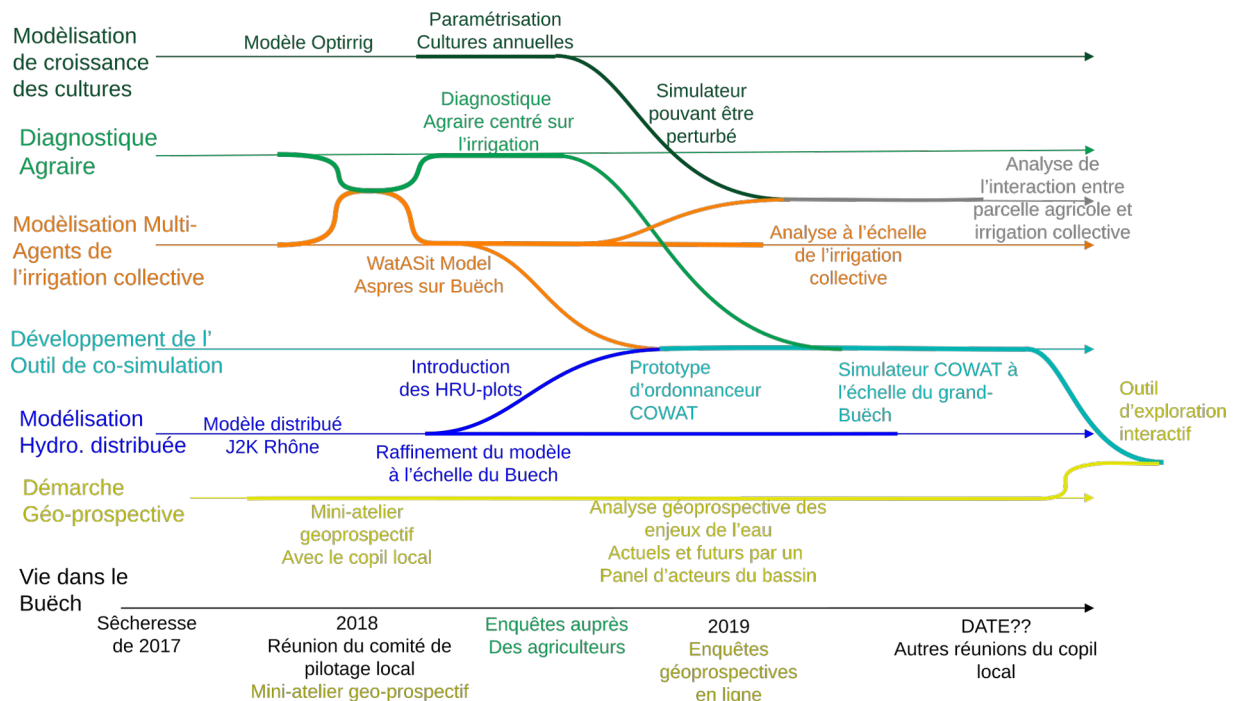


Figure 2 Déroulé du projet et interactions entre ses différentes dimensions

Communications

Bastien Richard, Isabelle Braud, Olivier Barreteau, Bruno Bonté (2021). Coupling an agent-based model of collective irrigation and a distributed hydrological model. Application to the Buech River Basin in Southern France. 1st Sociohydrology Conference, Delft, September 2021. Support visuel de la communication.

Bruno Bonté, Olivier Barreteau, Isabelle Braud, Christine Voiron-Canicio (2021). Représentation intégrée des adaptations individuelles et des dynamiques hydrologiques sur le bassin du Buëch - « Radhy Buëch » . Journée eau & Connaissance AERMC, Lyon, le 15 Novembre 2021. Support visuel de la communication et vidéo.

Bruno Bonté, Olivier Barreteau, Bastien Richard, Isabelle Braud, Christine Voiron-Canicio, Nathalie Dubus, Jean-Christophe Loubier, Quentin Robiquet, (2020), Coupler modèles hydrologiques distribués et modèles multi-agents: l'expérience du Buech (ZA Bassin du Rhône), Communication orale au 5e colloque des Zones Ateliers – CNRS, 2000-2020, 20 ans de recherche du Réseau des Zones Ateliers. Du 3 au 5 Novembre 2020, en ligne. Enregistrement disponible : RTRMD. (2020, 4 novembre). *Coupler modèles hydrologiques distribués et modèles multi-agents: l'expérience du Buech*. [Vidéo]. Canal-U. <https://www.canal-u.tv/105219>.

Première partie : Analyse de l'usage de l'eau agricole sur le Buëch

Contenu de cette partie: Cette partie décrit les connaissances acquises sur le Buëch à travers le diagnostic agraire réalisé (typologies d'exploitations et d'ASA, historique, pratiques et adaptation d'irrigation). Ce diagnostic est enrichi par l'analyse des données existantes réalisée pour la partie « usage » des modèles et le début de la modélisation conceptuelle du fonctionnement des périmètres agricoles. Elle discute également la méthode du diagnostic agraire. À noter qu'une grande partie de ces développements reprennent des textes du rapport de Stage de Master de Claire Distinguin citée en fin de partie.

1 Introduction : Une diversité de situations

Comme expliqué dans la partie précédente, le recentrage de la problématique du projet sur la gestion des périodes de basses eaux en période estivale a mis le focus sur l'usage agricole qui est le plus grand consommateur d'eau à cette période de l'année. Lorsque nous indiquions dans notre fiche projet vouloir fournir « Une liste d'indicateurs dans et hors hydrologie utilisés par les acteurs dans leur prise de décision sur la ressource » ainsi que « Une description des règles de décision des acteurs et des échelles de temps caractéristiques de leurs actions associées à une typologie des comportements d'acteurs », il s'agit en fait des acteurs agricoles du bassin. La partie la plus laborieuse étant, comme nous l'expliquons plus bas, de construire cette typologie de comportements d'acteurs.

Pour bien comprendre notre démarche et la méthode choisie, il convient de rappeler ici que l'intérêt du type de modélisation dont il est question dans ce projet (i.e. modélisation à base d'agents basée sur la théorie de l'action située, cf. la partie suivante) vise à permettre la prise en compte dans le modèle de différents niveaux d'hétérogénéité. Concernant les usages, il s'agit premièrement de l'hétérogénéité des agents au niveau des éléments qui les composent (par exemple les cultures ou les systèmes d'irrigation pour des agents représentant des exploitations agricoles). Il s'agit ensuite de l'hétérogénéité en terme de situation dans laquelle les agents se trouvent vis-à-vis de leur environnement (par exemple la position amont-aval d'une parcelle au sein d'un périmètre gravitaire, ou la position d'une exploitation dans le bassin versant qui va déterminer l'affluent auquel elle accède, le climat, etc.). Naturellement, en pratique, lors de la modélisation ces hétérogénéités sont en partie reliées puisque l'on imagine bien que les exploitations agricoles vont se développer en fonction des situations dans lesquelles elles se trouvent et on va par exemple trouver dans une zone donnée du bassin, des exploitations assez similaires. Avant de pouvoir identifier ces règles de décisions et cette typologie de comportements, il s'agit donc de pouvoir caractériser cette diversité de situations.

Cette volonté d'explorer et de caractériser cette diversité d'acteurs a par ailleurs été très bien accueillie par tous les membres du comité de pilotage local qui, chacun dans leurs rôles avaient, soit un accès limité à ces différents types d'usagers, soit un message à porter (pour ou à l'encontre du

monde agricole en général) qui s'accommodait mal de son hétérogénéité faute de pouvoir la décrire de manière riche et « neutre ». Citons l'exemple d'un représentant du monde agricole, représentant la chambre d'agriculture lors d'un comité de pilotage local et qui, lorsque l'on demande de positionner les problèmes actuels sur le bassin, nous dit « le problème c'est qu'il manque une grande retenue collinaire dans le Buëch amont car les agriculteurs ont besoin de plus d'eau ». On imagine bien que ce n'est pas forcément le problème majeur de l'ensemble des agriculteurs du bassin.

Notre objectif, dans notre analyse de l'usage agricole, n'était donc pas tant d'obtenir des fonctions de décisions donnant les meilleures prédictions de ce que les acteurs vont effectivement faire dans telle ou telle situation, que de décrire, de manière à la fois compréhensible et synthétique, la diversité des configurations dans lesquelles les acteurs du monde agricole sur le bassin avaient à prendre leurs décisions, leurs marges de manœuvres et les conséquences de leurs choix sur leurs propres exploitations, sur les périmètres irrigués, et sur leurs confrères du monde agricole.

Claire Distinguin, qui a été au cœur de la réalisation de ce diagnostic au cours de son stage de master 2 au sien du projet Radhy Buëch résume ce travail de la manière suivante: *Depuis plusieurs années, le bassin versant du Buëch est soumis à une recrudescence des conflits d'usage de l'eau entre les besoins en eau pour les milieux et le monde agricole, en amont et en aval du bassin. Les changements climatiques et notamment la récurrence des sécheresses estivales entraînent une fragilisation des milieux naturels et davantage de difficultés pour irriguer. Dans ce contexte, le projet [...] RADHY Buëch [...] et une thèse réalisée au sein de ce même projet s'intéresse à la modélisation des possibilités d'adaptations à court et moyen termes de l'irrigation en période d'étiage notamment selon la diversité des profils d'irrigants. La présente étude cherche à décrire et à analyser cette diversité en lien avec les dynamiques agraires en cours et passées du bassin. Une meilleure connaissance des usages agricole de l'eau est nécessaire pour intégrer une représentation plus fine et plus complexe de leurs comportements, notamment en termes de stratégie de pilotage de l'irrigation. [...] L'approche par diagnostic agraire a permis la compréhension des pratiques et des stratégies d'irrigation possible et mise en place par les agriculteurs en fonction de leur contexte agraire, de leur système de production mais aussi de la trajectoire historique de leur exploitation.* (Distinguin, 2019)

C'est ce travail qui est présenté dans cette partie qui reprend de nombreux éléments du mémoire de fin d'étude de Claire Distinguin (Distinguin, 2019).

2 Matériel et Méthode

2.1 La méthode du diagnostic agraire

Le diagnostic agraire vise à « identifier et hiérarchiser les éléments de diverses natures qui conditionnent le fonctionnement et l'évolution des exploitations agricoles d'une région. Ces éléments explicatifs sont à rechercher non seulement au niveau des exploitations agricoles elles-mêmes et de leur fonctionnement, mais aussi, plus globalement, au niveau du milieu écologique, économique et social dans lesquelles elles se trouvent plongées » (Cochet et al., 2007). C'est une analyse multi-échelle qui permet d'articuler d'organiser de manière synthétique et cohérente l'observation de la production agricole selon différents niveaux d'échelles hiérarchiques (c'est à dire emboîtés les uns

dans les autres). Chaque niveau est schématisé sous la forme de « systèmes » spécifiques qui comprennent un certain nombre de caractéristiques à observer. Le niveau le plus large, qui contient les autres, est le système agraire. Il est défini d'après Mazoyer comme « un mode d'exploitation du milieu, historiquement constitué et durable, adapté aux conditions bioclimatiques d'un espace donné, et répondant aux conditions et aux besoins sociaux du moment » (Mazoyer, 1987). Le niveau d'échelle inférieure s'intéresse aux systèmes de production correspond à l'échelle de l'exploitation agricole individuelle. Celui-ci se définit comme « un mode de combinaison entre terre, force et moyens de travail à des fins de production végétale et animale, commun à un ensemble d'exploitation (...) caractérisé par la nature des productions, de la force de travail (qualification), des moyens de travail mis en œuvre et par leurs proportions » (Reboul, 1976). Le dernier niveau est celui des systèmes de culture et d'élevage qui décrivent les pratiques à l'échelle de la parcelle (ou plutôt d'une production agricole donnée) afin d'apporter une lecture systémique plus riche que l'approche technique (Cochet et al, 2007). Le système de production permet de décrire les dynamiques entre unités de production que sont les systèmes de cultures et d'élevage. À ces niveaux d'études classiques du diagnostic agraire s'ajoute dans notre cas la caractérisation des ASAs en tant que structures collective. À noter que les ASAs ne constituent pas réellement un niveau hiérarchique puisque toutes les parcelles d'un même agriculteur ne sont pas forcément comprises dans une même ASA.

La méthodologie est constituée de trois phases principales :

- Une étude de milieu pour comprendre l'environnement dans lequel évoluent les agriculteurs, notamment en termes de climat, de topographie, de sols qui définissent des zones agro-écologiques différentes qui ont chacune des propriétés et des modes d'exploitation spécifiques pour l'agriculture. Cette phase a principalement recours à la bibliographie et à l'étude de paysage ;
- Une étude de l'histoire agricole de la région pour identifier ses dynamiques de différenciation et de transformation des systèmes de production, par exemple suivant leur taille ou leur accès à certaines ressources, avec un intérêt particulier pour l'accès à l'eau pour l'irrigation dans notre cas ;
- Une étude de caractérisation technique et économique des systèmes de production en œuvre dans la région, pour proposer des profils « types » (ou archétypes) de ces systèmes avec la même gamme de moyens de production, en faisant ressortir leurs logiques de fonctionnement. L'ajout de données économiques permet de comparer les systèmes technico-économiques entre eux. Dans notre étude, et selon les besoins du projet, ces aspects économiques ont peu été étudiés au profit des aspects liés à l'irrigation qui renseignent plus vis-à-vis de l'axe d'étude qui est centré sur le lien à l'irrigation.

Chacune des trois études a comporté de nombreuses interactions avec le terrain et ses acteurs (Distinguin, 2019 ; Richard 2021). Le Tableau 1 et la Figure 3 en Annexe illustrent respectivement le type d'acteurs et la localisation des agriculteurs du Buëch interviewés dans le cadre de ce diagnostic. Le total des entretiens réalisés par Claire Distinguin regroupe le nombre d'agriculteurs et/ou présidents d'ASA, le nombre de présidents d'ASA non agriculteurs et les acteurs des services pu-

blics, soit 42 au total, auxquels s'ajoutent de nombreux entretiens préalables et complémentaires réalisés par Bastien Richard avec un sous-échantillon de ces mêmes personnes.

L'étude qui est présentée ici cherche donc à mobiliser cette méthodologie adaptée du diagnostic agraire pour décrire et à analyser la diversité des systèmes de production en lien avec les dynamiques agraires en cours et passées du bassin du Buëch, et avec une focale sur l'irrigation et ses structures collectives. Dans ce but, les résultats sont organisés en trois parties : la première partie propose une caractérisation du milieu, la seconde partie offre une synthèse de l'histoire agricole du bassin du Buëch, et la troisième partie propose une caractérisation des systèmes de productions et des associations d'irrigants.

3 Résultats

Les résultats du projet sur cette analyse de l'usage de l'eau agricole du Buëch sont présentés de manière extensive dans le mémoire fin d'étude de Claire Distinguin et dans le chapitre n°3 de la thèse de doctorat de Bastien Richard. L'objectif de cette section est tout principalement de proposer une synthèse de ces résultats visant à fournir au lecteur une vision globale de la problématique de l'usage de l'eau agricole sur le bassin. Il s'agit également d'illustrer les principaux outils utilisés par des exemples des résultats qu'ils ont apportés de manière à permettre au lecteur de mieux cerner ce qu'il pourra trouver dans les documents plus complets et de mieux comprendre les outils utilisés dans le cas notamment où il pourrait les utiliser dans d'autres contextes.

Notons que l'outil principal utilisé est l'entretien semi-directif qui, comme il est très connu, ne sera pas illustré de la sorte. Nous en rappelons toutefois la nature. La méthode de l'entretien semi-directif suppose de recueillir le point de vue de l'interviewé sur ses pratiques, ce n'est pas un questionnaire mais la construction d'un discours à partir d'un entretien. L'objectif est de comprendre les pratiques, les adaptations face aux périodes d'étiage et aussi la façon dont ils les justifient par leur propre « monde de références » (Girard, 2006). Comme le présente Girard, cette étape requiert de nombreux aller-retour entre matériaux recueillis et formalisations de la diversité des pratiques. Plusieurs guides d'entretien ont été réalisés pour répondre aux objectifs des deux phases de terrain. Lors des entretiens, les récits de vie étaient enregistrés (après accord de l'intéressé) en complément d'une prise de notes afin d'être le plus possible en interaction et de faciliter l'échange avec la personne.

3.1 Le Buëch et son milieu

Il s'agit des résultats de la première phase du diagnostic agraire qui permet de caractériser le milieu dans lequel l'exploitation agricole se développe. Deux zones bien distinctes ont clairement été identifiées entre l'amont et l'aval du bassin, ainsi qu'une troisième à la jonction entre ces deux zones. La différence topographique ainsi que la différence de climat entre la zone amont (zone 1 sur la carte) et la zone aval (zone 3 sur la carte) va différencier de fait les potentialités en terme de cultures, d'installation d'infrastructures etc. et l'on va voir dans les parties suivantes que l'exploitation agricole s'organise de fait différemment dans ces trois zones.

Zone Atelier Bassin du Rhône

La différence de climat entre les zones est illustrée par la comparaison des données météorologiques entre la ville de Veynes pour l'amont et de Laragne-Montéglin pour l'aval qui enregistre une température moyenne sur l'année de 10.6°C soit 1,7°C de plus que la ville de Veynes, et des précipitations en moyenne de 808 mm, soit 98 mm de moins que la ville de Veynes. De manière générale et assez intuitive, une différence de degrés s'observe entre la partie amont du bassin et la partie aval ; Il fait plus froid l'hiver en amont du bassin et plus chaud l'été en aval du bassin. Les trois zones peuvent se résumer ainsi :

1. La zone du Bochaîne (amont du bassin) : Cette zone regroupe le Grand Buëch et le Petit Buëch et le massif du Dévoluy jusqu'à la jonction des deux bras du Buëch, au pied de la ville de Serres. Son altitude s'étage entre 680 et 2709 m avec le Pic de Bure. Les précipitations moyennes sont un peu plus élevées, 1200 mm par an. La végétation est constituée de Chênes pubescents et de Pins sylvestres sur les versants sud. Les versants exposés au soleil sont composés de landes à Genêts et les versants à l'ombre, d'Hêtres (Gonzales, 2002).
2. La zone du Serrois-Rosanaïs (médiane du bassin) : Cette zone connaît un exode rural fort. Elle se situe à 1750 m non loin de la montagne de l'Aup et de la frontière de la Drôme, son altitude moyenne est de 1000 m. Son climat est caractéristique des Préalpes du sud. Les pluies y sont plus rares de 800 à 1000 mm par an et l'air y est sec. Les landes sont dominées par la présence de Genêts et les reboisements par des Pins noirs couvrent de grandes étendues (Gonzales, 2002). Le Serrois regroupe les communes de Serres, Sigottier, La Pierre, La Bâtie-Montsaléon, Le Bersac, Savournon, Saint-Genis, Montrond, Méreuil, Montclus et l'Epine. Le Rosanaïs est le prolongement naturel de la région drômoise des Baronnies. Il regroupe les communes de Rosans, Saint-André-de-Rosans, L'Epine, Ribeyret, Moydans, Montmorin, Montclus, Sigottier, La Pierre, Bruis, Sainte-Marie.
3. La zone du Laragnais (aval du bassin) : Le Laragnais se situe au nord de Sisteron sur un vaste plateau en aval du bassin. Les massifs de Saint-Genis et d'Aujour composés de calcaire dominant le paysage. Le Laragnais est un district dont l'altitude s'étage entre 478 et 1824 m avec la montagne d'Aujour. Le climat y est sub-méditerranéen. La température moyenne annuelle est de 11,5°C et les précipitations moyennes de 750 mm par an. Les milieux naturels sont modifiés par la plantation de plusieurs hectares de cultures fruitières irriguées. La vallée se compose de prairies propices aux développements floristiques et faunistiques et abrite exceptionnellement une zone arborée de Chênes verts et de Châtaigniers. Enfin, la ripisylve se compose de Chênes pubescents (Gonzales, 2002).

Ces zones se différencient également par leurs paysages, ce qui nous donne l'occasion de présenter l'outil de la lecture paysagère. En effet, le début de l'étude a commencé par l'observation des paysages afin de comprendre les formes d'artificialisation du bassin versant, la morphologie du paysage et les diverses activités humaines. Cette première étape était basée sur la collecte d'informations sur les facteurs d'ordre physique et agro-écologique (géologie, topographie, etc.). Ces observations ont été réalisées sur des points hauts pour faciliter la lecture paysagère du bassin versant. Cette phase a permis d'établir les premières hypothèses quant aux contraintes, opportunités et modes d'exploitation du milieu. Deux exemples sont présentés ici pour illustrer la zone amont (coupe a. sur la carte de la Figure 3) et la zone aval (coupe b. sur la carte de la Figure 3). Les Fi-

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

gures 4 et 5 illustrent bien respectivement ces différences de paysages entre le vallées encaissées de la zone amont et la grande vallée aval de type plaine agricole.

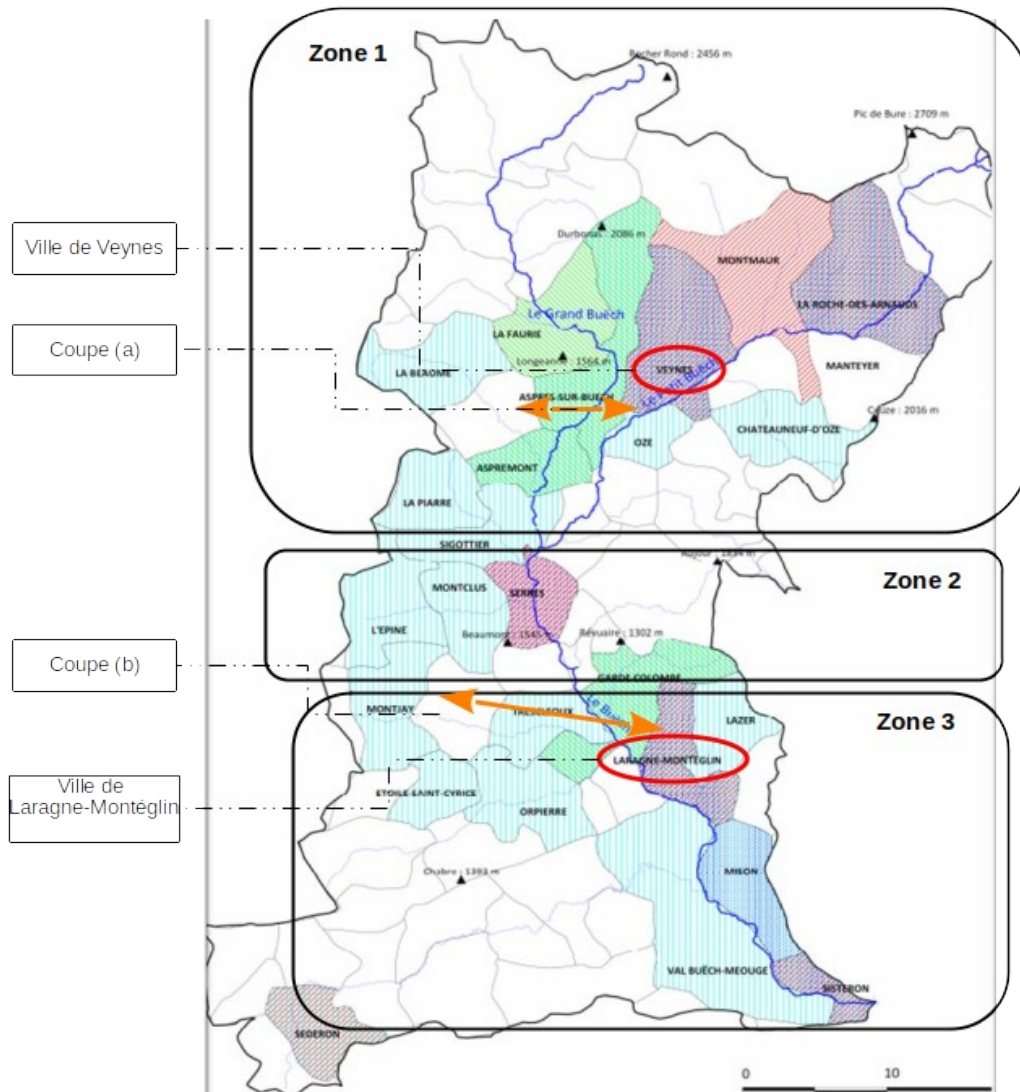


Figure 3: Les différentes zones du bassin versant du Buëch (Distinguin 2019 sur la base d'une carte du SMIGIBA)

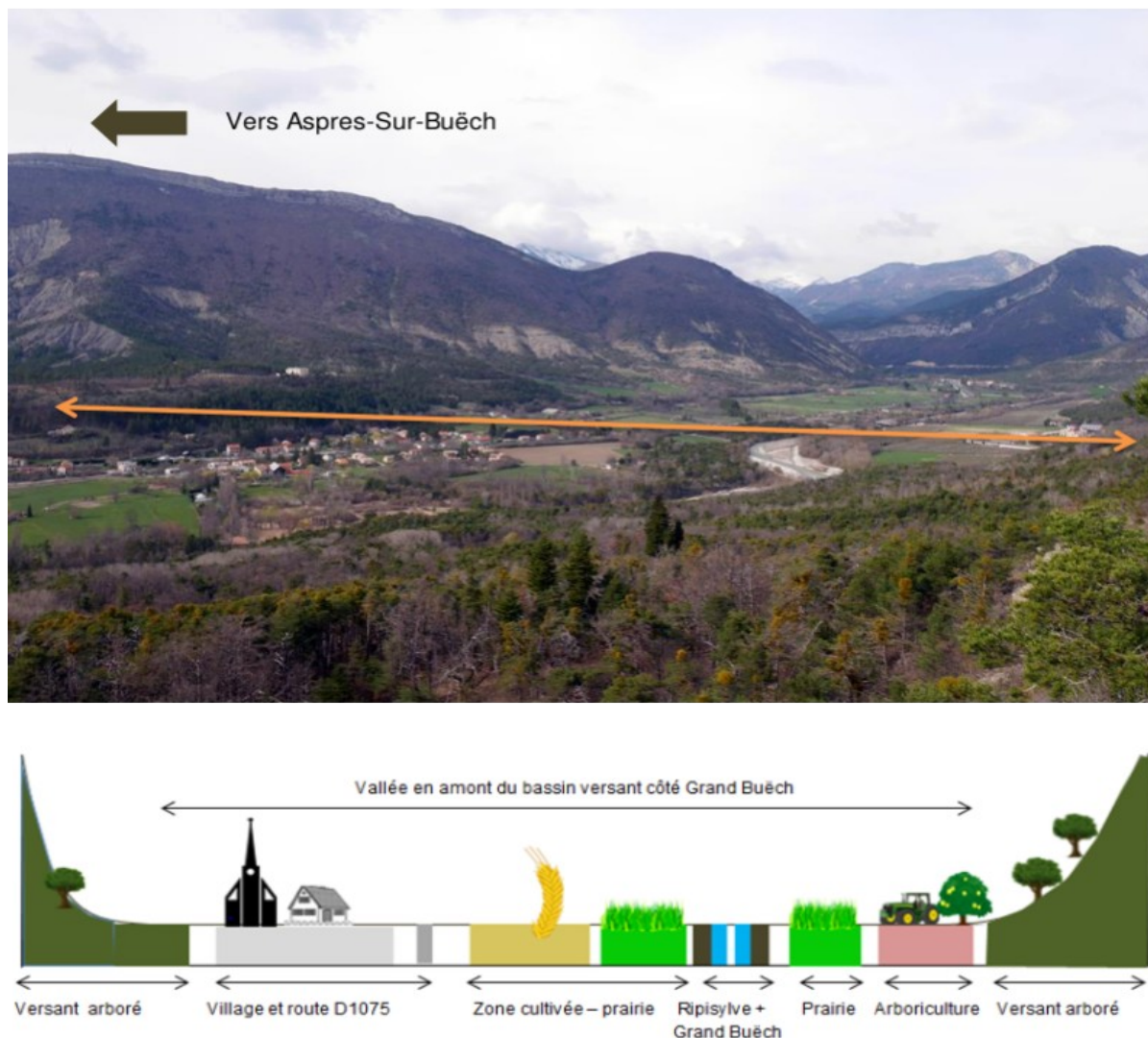


Figure 4: Coupe transversale en amont du bassin versant après Aspres-sur-Buëch (côté Grand Buëch) – En haut: Photo depuis les hauteurs de la montagne de l’Ubac (© C. Distinguin) – En bas: Coupe schématique (Distinguin, 2019)

Les autres éléments recueillis au niveau du Buëch et son milieu concernent le relief, la richesse floristique et animale, le détail du climat et des sols, les régimes hydrologiques, le recensement des usages principaux (eau potable (1 %), l’irrigation (9 %) et l’industrie (dont l’hydroélectricité (90 %)), les aménagements hydrauliques et une synthèse des études déjà réalisées sur l’agriculture et ses prélèvement en eau d’irrigation sur le bassin. Ces éléments sont décrits en détail dans le mémoire de fin d’études de C. Distinguin. Nous ne citerons ici que certains points saillants à savoir que le Buëch comptait 362 exploitations agricoles en 2008 avec une SAU totale de 32’418 ha et que 35 ASA sont présentes sur l’ensemble du bassin versant du Buëch (13 ASA en irrigation sous-pression, 20 ASA en irrigation gravitaire, 2 ASA mixte (irrigation en aspersion et irrigation en gravitaire)) et que les cultures irriguées sont principalement des prairies, des céréales et des vergers.

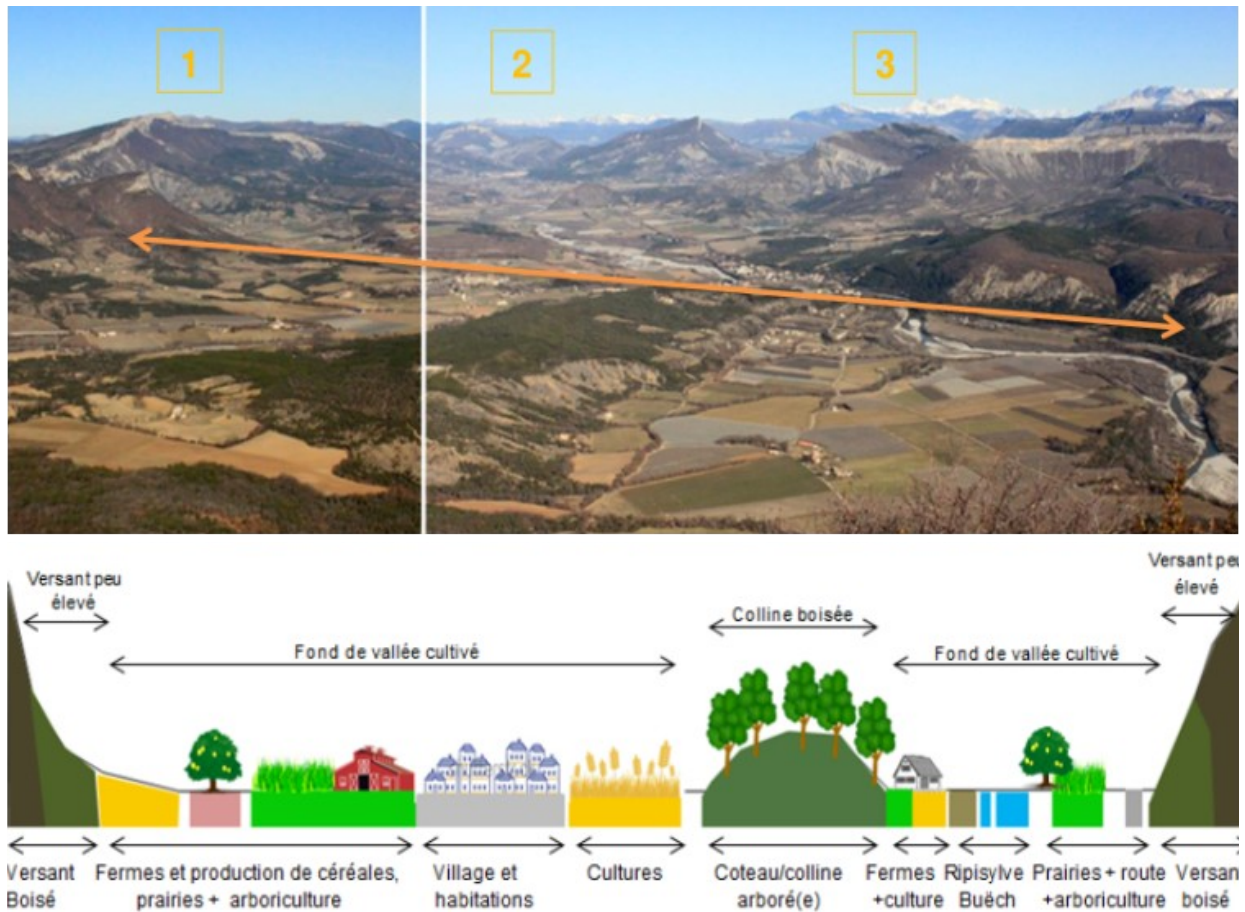


Figure 5: Coupe transversale en aval du bassin versant avant Laragnes-Montéglin – En haut: Photo depuis au sommet de la crête de la montagne de Chabre (© B. Richard) – En bas: Coupe schématique (Distinguin, 2019)

3.2 Le Buëch et son histoire agricole

Afin de donner du corps à l'analyse des exploitations agricoles réalisée dans le diagnostic agraire, le deuxième outil utilisé que nous illustrons ici est l'historique d'évolution des exploitations agricoles. Les informations historiques ont été recueillies lors d'entretiens avec les agriculteurs et agricultrices de tout âge. Il était notamment demandé aux agriculteurs et agricultrices de raconter leur installation sur l'exploitation et son évolution jusqu'à aujourd'hui ou de parler de l'exploitation à l'époque de leurs parents pour faciliter l'identification des périodes. D'autres personnes rencontrées au gré du séjour apportaient des informations supplémentaires quant à l'histoire agricole locale.

Cette analyse a identifié quatre grandes phases et différentes « trajectoires » menant aux exploitations observées aujourd'hui. La frise présentée dans la Figure suivante synthétise bien ce résultat. Encore une fois le détail est disponible dans (Distinguin, 2019) et (Richard, 2012).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

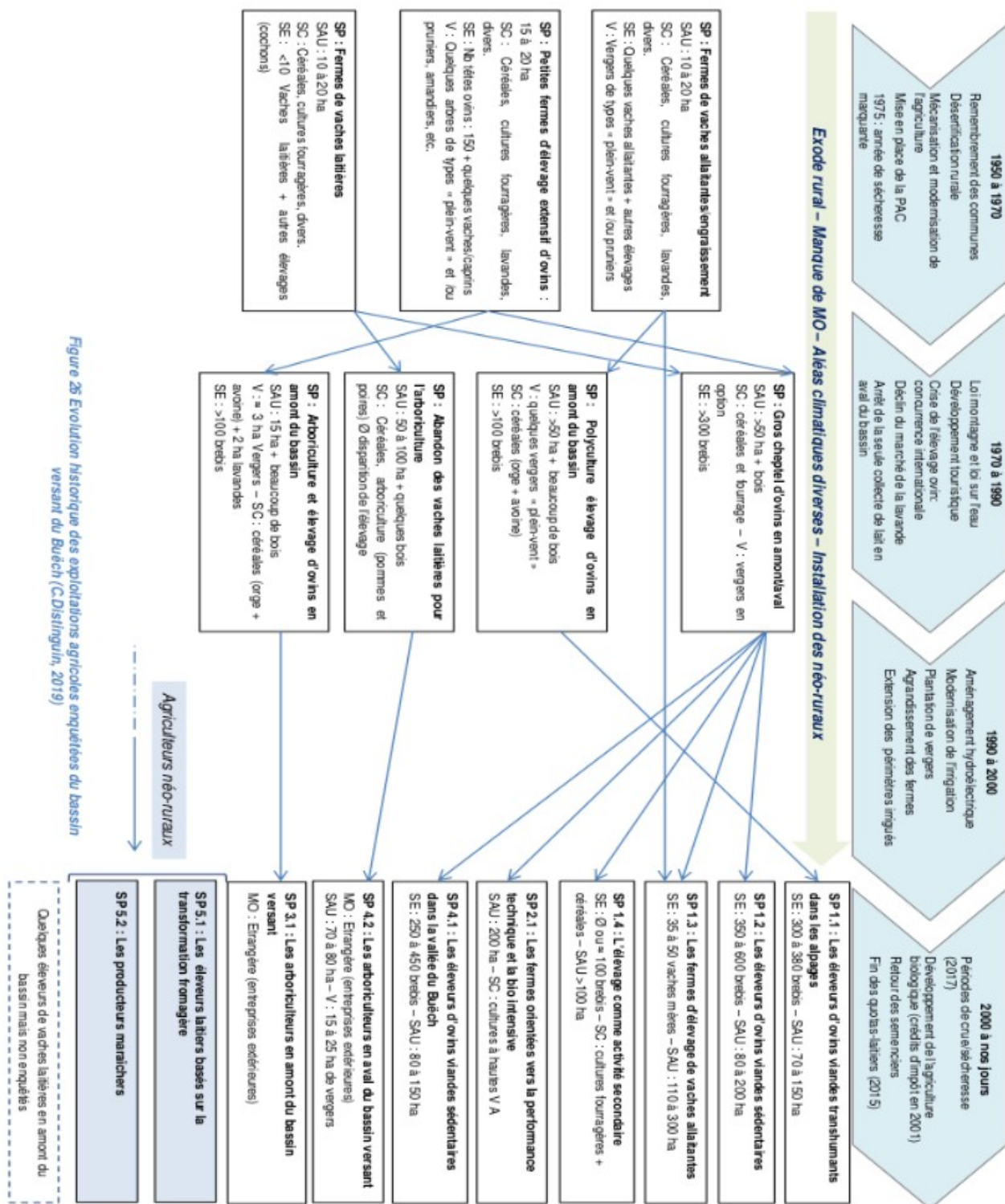


Figure 26 Evolution historique des exploitations agricoles enquêtées du bassin versant du Buëch (C.Distinguin, 2019)

Figure 6 : Les grandes trajectoires des exploitations agricoles du Buëch au cours du siècle dernier (Distinguin, 2019).

3.3 Le Buëch d'aujourd'hui, ses cultures, ses exploitations agricoles et ses ASAs

Le diagnostic a enfin permis de caractériser la diversité des cultures du territoire: l'association des lectures de paysages et de l'analyse historique a permis d'identifier et de mettre en évidence les conditions d'émergence et de développement des cultures cultivées. Ces données ont été récoltées lors des entretiens avec les acteurs agricoles et à partir des observations menées au cours de l'étude paysagère ; l'objectif n'étant pas seulement de décrire les pratiques mais également d'identifier les raisons qui ont amené ces agriculteurs et agricultrices à cultiver telle ou telle production végétale (le choix des cultures, la logique des successions, l'itinéraire technique, etc.). De même pour les pratiques d'élevage pour lesquelles ont pu être réunies les informations sur la localisation des différents types d'animaux présents sur le bassin, les races, les espèces et les techniques d'élevage pratiquées. L'objectif concernant l'élevage a alors été de montrer la façon dont sont conduits le(s) troupeau(x) par les agriculteurs et agricultrices (les techniques d'alimentation, de reproduction, etc.). L'annexe 3 présente un exemple de caractérisation de système d'élevage.

Une fois les systèmes de cultures et d'élevages définis, il est possible de définir les différents systèmes de production (exploitations agricoles « types » présentes sur le territoire). Il s'est alors agi d'approfondir l'analyse des systèmes de culture, d'élevage et d'exploitation des ressources naturelles notamment hydriques, initiée dans les étapes précédentes. Suite à de nouveaux entretiens ciblés et approfondis avec des agricultrices et des agriculteurs en activité il a été alors possible de caractériser les systèmes productifs mis en œuvre sur le bassin et de comprendre les pratiques. Chacun des dix systèmes productifs identifiés (ceux que l'on retrouve dans la colonne de droite de la Figure 6 ont ainsi été caractérisés. La Figure 7 ci-dessous présente la fiche signalétique du système de production «SP 1.1. : Les éleveurs d'ovins viandes transhumants dans les alpages » pris à titre d'exemple. Elle illustre notamment : la répartition des types d'irrigation (camembert bleu), l'occupation du sol d'une ferme type et la rotation des cultures (camemberts jaunes et verts) et le calendrier type de production d'une exploitation de ce type (tableau du bas). L'annexe 3 reprend l'intégralité de la caractérisation du SP1.1. Les autres sont disponibles dans (Distinguin, 2019).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

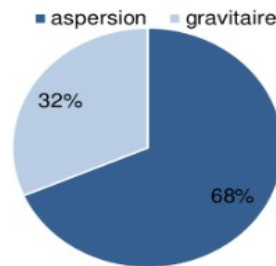
Les fermes d'ovins viandes transhumants dans les alpages
(Source : entretiens réalisés par Claire Distinguin en mars et juin 2019)

Localisation : zone amont du bassin du Buëch
Surfaces cultivées : entre 70 et 135 ha
Nombre d'actifs : 1 à 2 actifs
Nombre d'agnelages : 2
Surfaces irriguées : moyenne de **22 ha** par exploitation
Types d'irrigation : irrigations par canaux gravitaire et par aspersion
Nombre d'enrouleurs : 1 à 3 enrouleurs

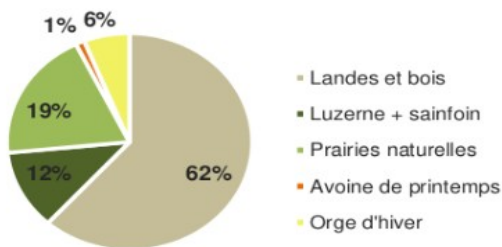


300 à 380 brebis

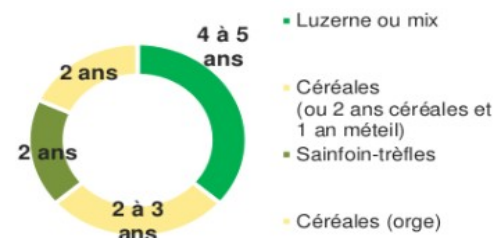
Répartition des types d'irrigation par ferme
(2 éleveurs sur 5 concernés)



Occupation du sol d'une ferme type



Rotation des cultures



bis	oct-18	nov-18	déc-18	janv-19	févr-19	mars-19	avr-19	mai-19	juin-19	juil-19	août-19	sept-19
roupeau	redescente du troupeau	Stabulation (en fonction de la météo)				Sur les parcours			Transhumance 15 juin (une partie du troupeau)		Redescente d'1 lot pour agnelage (mi-août)	
							Fin avril - mai	Agnelage 2e lot				Agnelage 1er lot
							Brebis sur les prairies autour de l'exploitation					
prairies naturelles	Pâturage du regain							voir mi-mai	1er coupe 15/20 juin	2e coupe	3e coupe	
légumineuses : sainfoin, luzerne, trèfle, etc.	4e coupe pâturée par les brebis					Semis des fourrages (voir avril)			2e coupe 10 juillet			
								1er coupe		3e coupe ou pâture		
									Irrigation			
orge triticale	Semis des céréales 1er semaine											
labour	Désherbage			Apport d'engrais				Irrigation occasionnelle				Moisson orge-blé et triticale
												Moisson
labour	Déchaumage méca					Déchaumage méca			Récolte en fourrage	Récolte en grain		
entretien des parcs												

Figure 7 : Fiche signalétique du système de production type « SP 1.1 : Les éleveurs d'ovins viandes transhumants dans les alpages » (Distinguin, 2019).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

De la même manière, une typologie a été réalisée pour les caractériser les différents types d'ASAs présentes sur le territoire qui a menée à l'identification de 9 grands types d'ASAs en utilisant les critères suivants pour les discriminer :

- Système d'irrigation par Aspersion, versus Gravitaire ;
- Surface de l'ASA importante (>150 ha), moyenne (50 à 150 ha), ou petite (>50 ha) ;
- Pourcentage de surface agricole au sein de l'ASA complète (100 %), importante (>85 %) ou ASA mixte (< 85 %) ;
- Présence ou non de jardins urbains ;
- Présence de tour d'eau ;
- Nombre d'adhérents (3 niveaux).

Ce qui nous a mené à distinguer les 9 types d'ASAs suivant qui ont chacun été caractérisé sous forme de profil d'ASA décrits en détails dans (Distinguin, 2019). Le profil A1 – ASA en aspersion avec tour d'eau est illustré de manière synthétique par la Figure 8.

- A1 : ASA en aspersion avec tour d'eau
- A2 : ASA en aspersion avec une prise dans un cours d'eau ou dans un canal gravitaire sans tour d'eau
- A3 ASA en aspersion alimentée par EDF sans tour d'eau
- A4 Petite ASA en aspersion et en gravitaire
- G1 ASA gravitaire avec beaucoup d'adhérents, beaucoup de surfaces urbanisées sans tour d'eau
- G2 ASA gravitaire avec beaucoup d'adhérents, beaucoup de surfaces urbanisées avec tour d'eau
- G3 Petite ASA gravitaire avec 100% d'agriculteurs avec tour d'eau
- G4 Petite ASA gravitaire avec peu d'adhérents, urbanisée avec tour d'eau
- G5 Petite ASA gravitaire avec peu d'adhérents, beaucoup de surfaces agricoles sans tour d'eau

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Profil A1 ASA en aspersion avec tour d'eau	
Caractéristiques : • Peu d'adhérents 50 à 150 • Beaucoup de surfaces agricoles (94 à 100%) • Réseau en bon état • Présence de tour d'eau • Moyennement sécurisée en eau	
ASA concernées	Commentaires
ASA de Maraize	Périmètre irrigué : 200 ha Adaptation de l'irrigation par rapport au tour d'eau Non soumise aux restrictions Pas assez d'eau pour faire l'antigel car réserve de 8.000m3 (différent du lac) Prise d'eau dans le lac de Peyssier
ASA d'Aiguebelle	Périmètre irrigué : 12 ha Adaptation de l'irrigation par rapport au tour d'eau Retenue alimentée par une source Surfaces de l'ASA 100% 3 agriculteurs dans l'ASA

Figure 8 : Présentation synthétique du profil d'ASA A1.

Communications

Distinguin, C. (2019). *L'eau d'irrigation du buëch : entre actions collectives et logiques d'individualisation. une approche par l'analyse-diagnostic de système agraire*. Mémoire de master, ISTOM / INRAE G-Eau.

Richard, B. (2020). Chapitre 3 : Case study dans : *Coupling agent-based and agro-hydrological modeling to represent human actions within an agrohydrosystem. Application to collective irrigation in the Buëch catchment (France)*. Thèse de doctorat en Hydrology soutenue à l'Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France, 2020. (Anglais).

4 Références bibliographiques

Cochet, H., Devienne, S. & Dufumier, M. (2007). *L'agriculture comparée, une discipline de synthèse?*. Économie rurale, n°297-298, pp. 99-112.

Gonzales, G (2002). *Schéma départemental des carrières des Hautes-Alpes*. Rapport BRGMRP/50234 FR. 158 p., 17 fig., 18 tab., 29 Annexes.

Mazoyer M. (1987). *Dynamique des systèmes agraires*. Rapport de synthèse présenté au Comité des systèmes agraires. Paris : 16-17-18 Novembre 1987. Paris. Ronéo, 20p.

Reboul, C. (1976). *Mode de production et système de culture et d'élevage*. Économie rurale, n°112, pp. 55-65.

Deuxième partie : Modélisation intégrée

Contenu de cette partie : Pour bien expliquer la nature des travaux de modélisation réalisés dans le projet, il nous est nécessaire de revenir sur les cadres théoriques sur lesquels ils se basent. Nous essayerons d’être pédagogues pour les non informaticiens en nous basant à chaque fois, sur la théorie puis sur une explicitation basée sur des exemples concrets qui peuvent parler à tout-un-chacun. Après une introduction donnant notre approche générale, nous présentons ici les modèles de simulation construits et les résultats de simulation obtenus le cas échéant, en renvoyant autant que possible aux documents scientifiques produits au cours du projet. Les modèles dont il est question sont les suivants : un modèle hydrologique, un modèle de croissance de culture, un modèle à base d’agent de gestion de périmètre irrigué et un couplage entre ces modèles deux à deux.

Introduction : Le choix de la co-simulation

La partie modélisation du projet a comporté des travaux de différents types incluant : la paramétrisation de deux modèles sur notre cas d’étude (le modèle agronomique Optirrig-Aspres-Sur-Buëch présenté dans la section 1.1 et le modèle hydrologique distribué J2000-Buëch présenté dans la section 1.2), la construction d’un modèle qui n’existaient pas auparavant (le modèle à base d’agent WatASit présenté dans le chapitre 2) et deux couplages de modèles menant à deux modèles couplés (le modèle COPAT combinant modèle à base d’agents et modèle agronomique présenté dans la section 3.4 et le modèle COWAT non encore achevé combinant modèle à base d’agents et modèle hydrologique présenté dans la section 3.5). D’un point de vue thématique chacun de ces modèles porte sur une échelle différente et est détaillé dans des chapitres dédiés de la thèse de Bastien Richard (2021) (cf. Figure 9) et on imagine bien que les couplages entre ces modèles pose de nombreuses questions conceptuelles et techniques qui sont décrites plus en détail dans cette introduction.

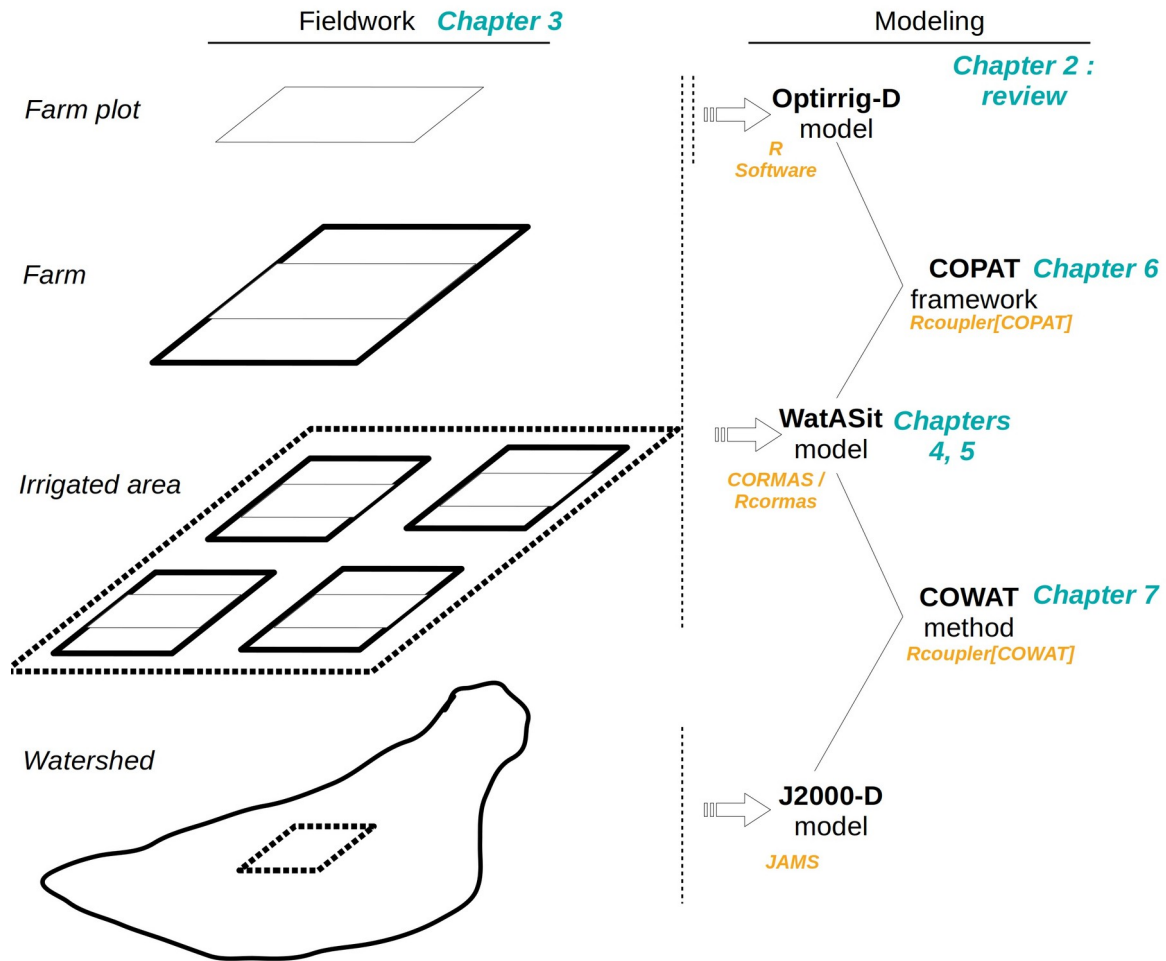


Figure 9 : Les modèles composants et modèles couplés développés dans le cadre du projet, les échelles considérées et les chapitres correspondant dans la thèse Bastien Richard (2021) (d'après (Richard, 2021)).

En informatique en général et en modélisation et simulation en particulier, la gestion de l'hétérogénéité, c'est à dire l'intégration d'éléments de natures différentes se pose à plusieurs niveaux. Aussi, différentes couches d'intégrations ont-elles été identifiées par la Théorie de la Modélisation et de la Simulation (Zeigler 2000) bien résumées en français dans la thèse de doctorat de R. Duboz (2004) de la manière suivante : « Zeigler et Sarjoughian (Zeigler 2000) ont défini une hiérarchie conceptuelle [des niveaux d'intégration]. Cette hiérarchie propose six couches interdépendantes qui représentent chacune une problématique précise. La Figure 10 présente ce cadre conceptuel hiérarchique. La couche « réseau » contient tous les éléments physiques de calcul (stations de travail, serveur...), de connexion et d'interconnexion et les logiciels et protocoles liés aux réseaux. La couche « simulation » est une couche logicielle qui a pour objectif d'exécuter les modèles. Elle intègre les protocoles nécessaires pour les bases de la simulation distribuée, la gestion des accès aux bases de données, le contrôle du cycle d'exécution de la simulation, la visualisation et l'animation des comportements simulés. La couche « modélisation » supporte le développement des modèles dans des formalismes qui doivent être indépendants de l'implémentation de la couche « simulation ». Les trois couches suivantes sont des couches de haut niveau qui concernent les acteurs humains

de la modélisation et de la simulation. La couche « recherche » qui met au point les modèles, la couche « décision » qui comprend l'exploration du comportement des modèles et la couche « collaboration », qui comprend les phases de concertation entre les participants à la construction du modèle. »

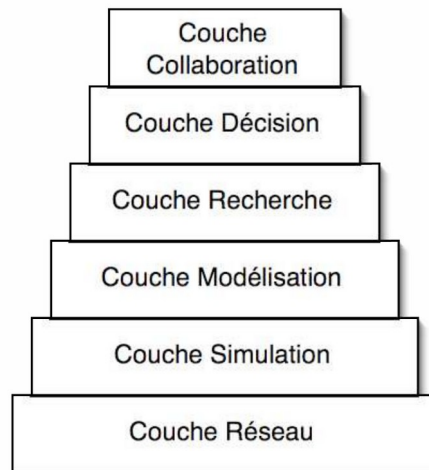


Figure 10 – Cadre conceptuel de la modélisation et de la simulation par Zeigler & Sarjoughian.
(d'après Duboz 2004)

Nous allons essayer de traduire ce cadre dans un langage de non-informaticien en nous basant sur des exemples du projet.

La couche modélisation : Lorsque l'on parle de « modèle », on pense à l'ensemble des équations et des règles qui décrivent le comportement du système représenté et on se situe donc dans la couche de modélisation. Il s'agit typiquement du modèle J2000-Buëch décrit dans la section 1.2 de cette partie. Les modèles que nous utilisons ici décrivent des systèmes dynamiques, c'est à dire qui évoluent avec le temps. Or ces descriptions sont elles mêmes des objets compliqués, c'est à dire que même si on connaît leur fonctionnement, l'ensemble des équations, des valeurs de paramètres etc. il faut un ordinateur pour les simuler, c'est à dire calculer l'évolution du modèle au cours du temps pour un jeu de paramètres donné.

La couche simulation : Le programme utilisé pour calculer ces simulations est appelé le simulateur. Souvent, dans le domaine de la modélisation et de la simulation appliquée à l'environnement, le simulateur est confondu avec le modèle² au point que l'on caractérise souvent les modèles par la plateforme de simulation utilisée pour le simuler (même dans ce rapport par exemple nous pourrions dire du modèle hydrologique que c'est un « modèle J2000 », ou du modèle à base d'agents que c'est un « modèle CoRMAS »). Dans le cas du modèle J2000-Buëch par exemple, le modèle conceptuel s'appelle J2000-Buëch, il est décrit dans la section 1.2, et le simulateur informatique s'appelle également J2000-Buëch mais le premier désigne la description du modèle et le second le

² À noter que confondre le simulateur et le modèle n'est une « bonne pratique » dans le domaine de la modélisation et de la simulation. S'il n'est pas question de revenir là dessus dans ce rapport, on peut tout de même résumer un des soucis que pose cette tendance en disant que les chercheurs / modélisateurs se sont habitués à des outils de simulation et finissent par voir le monde qu'ils modélisent à travers ces outils au lieu de considérer à chaque fois l'ensemble des possibilités mathématiques imaginables pour construire leur modèle.

programme informatique qui permet de simuler ce modèle. Le simulateur J2000-Buëch donc, est implémenté dans la plateforme J2000, elle-même étant une instance de la plateforme JAMS (Just Another Modelling System) qui est programmée en Java. Le simulateur de notre modèle de périmètre irrigué par contre est implémenté dans la plateforme CoRMAS elle-même programmée dans un langage de programmation informatique qui s'appelle SmallTalk. Alors que ces détails d'implémentation ne nous intéressent pas dans la couche modélisation (ce qui nous intéresse est la représentation que l'on a choisie pour notre bassin versant), ils ont toute leur place dans la couche simulation où il s'agit justement de construire le programme informatique qui va simuler le modèle.

La couche recherche : En amont de la couche modélisation, on trouve en premier lieu la couche recherche qui justifie le choix des modèles, collecte et organise la connaissance que l'on a du système étudié, etc. Les concepts, les outils, les méthodes mobilisés dans cette couche sont propre à la discipline scientifique dédiée à l'étude du système modélisé. Dans notre cas par exemple pour le modèle de périmètre irrigué, cela correspond typiquement aux activités réalisées lors du diagnostic agraire décrites dans la première partie de ce rapport. Pour le modèle hydrologique ces activités sont décrites dans la section 1.2 de cette partie, dans le premier paragraphe qui décrit les caractéristiques hydrologiques connues du bassin, dans les outils de mesures et autres procédures propres à l'hydrologie (bases de données de la banque hydro, etc.).

Les couches collaboration et décision : Dans les couches de collaboration et de décision on se rapproche encore plus du système étudié en considérant les activités qui permettent de donner à voir, ou dans certains cas (mais pas vraiment dans notre projet si l'on considère que les utilisateurs finaux sont les acteurs du Buëch) de co-construire le modèle avec ses utilisateurs et d'utiliser ce modèle pour la prise de décision au sujet de l'objet modélisé. Dans notre projet, ces activités sont l'objet de la partie « géoprospective » et sont décrites dans la troisième partie de ce rapport.

Le couplage de modèle et co-simulation : Dans notre cas, nous cherchons à réunir un modèle hydrologique avec un modèle de périmètre irrigué dans un seul modèle. On parle de modèles composants (le modèle hydrologique et le modèle de périmètre irrigué) réunis en un modèle composé (aussi appelé modèle couplé), le modèle qui intègre les deux. Le couplage peut s'envisager à différents niveaux. Il faut forcément réfléchir le couplage au niveau de la couche de modélisation de manière à assurer la cohérence des interactions choisies entre les variables de chacun des modèles, au niveau des échelles considérées, des unités, des processus impliqués dans ces interactions etc. En fonction des modèles il est parfois possible de « coder » tous les modèles dans une même plateforme de simulation, voire simplement de « brancher » des simulateurs déjà construits dans une même plateforme de simulation dite modulaire. Chaque sous-modèle composant est un « module ». C'est ce qui est fait par exemple dans le modèle J2000-Buëch (au sein la plateforme JAMS) où le modèle hydrologique qu'est J2000-Buëch est en fait un modèle composé faisant intervenir un modèle composant pour l'évapotranspiration, un autre pour les écoulements le sol, etc. Dans notre cas de couplage entre modèle hydrologique et modèle de périmètre irrigué, il n'existait de pas de plateforme qui intègre déjà ces deux modèles sous la forme de composants que l'on aurait pu « brancher » l'un à l'autre. Il s'agissait alors soit de recoder l'un des simulateurs dans la plateforme de l'autre, soit d'organiser la communication entre des simulateurs différents ayant chacun leur propre

logique mais que l'on va devoir simuler ensemble. On parle dans ce cas de co-simulation. C'est ce choix de co-simulation qui a été fait et qui nécessite de travailler au niveau de la couche réseau.

La couche réseau : Dans un ordinateur ou entre différents ordinateurs reliés dans un réseau informatique, il est possible de faire communiquer des programmes informatiques l'un avec l'autre. Pour ce faire, des protocoles de communication (une sorte de langage commun basé sur syntaxe simple bien décrite) ont été spécifiés de manière à ce que n'importe quel programme puisse communiquer avec n'importe quel autre en utilisant ce langage commun. Un protocole dont tout le monde connaît le nom est le protocole HTTP qui permet de faire des requêtes sur le web et que l'on utilise lorsque l'on va sur internet. C'est le protocole que nous avons utilisé pour faire communiquer nos plateformes de simulation (et donc nos simulateurs et donc nos modèles) ensemble. Si les langages informatiques utilisés « comprennent » ces protocoles, la communication n'est pas forcément prévue au sein des plateformes de modélisation et de simulation. Un important travail a de fait été réalisé pour permettre à la plateforme J2000 de communiquer avec d'autres programmes en utilisant ce protocole HTTP.

La Figure 11 décrit les outils utilisés et les développements réalisés au cours du projet dans chacune des couches qui nous concernent dans cette Partie, à savoir les couches réseau, simulation et modélisation. Nous résumons dans le tableau présenté en Annexe 5 toutes les informations pratiques relatives au sujet des outils développés (le langage et ou la plateforme de programmation, la location des codes produits pendant le projet et les publications scientifiques le cas échéant).

La paramétrisation des modèles agronomique « optirrig » à l'échelle de la parcelle (Optirrig-Buëch) et hydrologique « J2000 » à l'échelle du bassin versant (J2000 – Buëch) sont présentées dans les Sections 2.1 et 2.2 respectivement. Le modèle « CoRMAS » (WatASit) de gestion de périmètre irrigué (modèle à base d'agents programmé sous la plateforme de modélisation et de simulation CoRMAS (Common Pool Ressource Multi-Agents Systems) qui intègre et relie les échelles de la parcelle, de l'exploitation agricole et du périmètre irrigué) est présenté dans le chapitre 2 de cette partie. Le couplage entre modèle agronomique et modèle multi-agents (COPAT) est présenté dans la Section 3.1 et le couplage entre modèle multi-agents et modèle hydrologique (COWAT) est présenté dans la Section 3.2.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

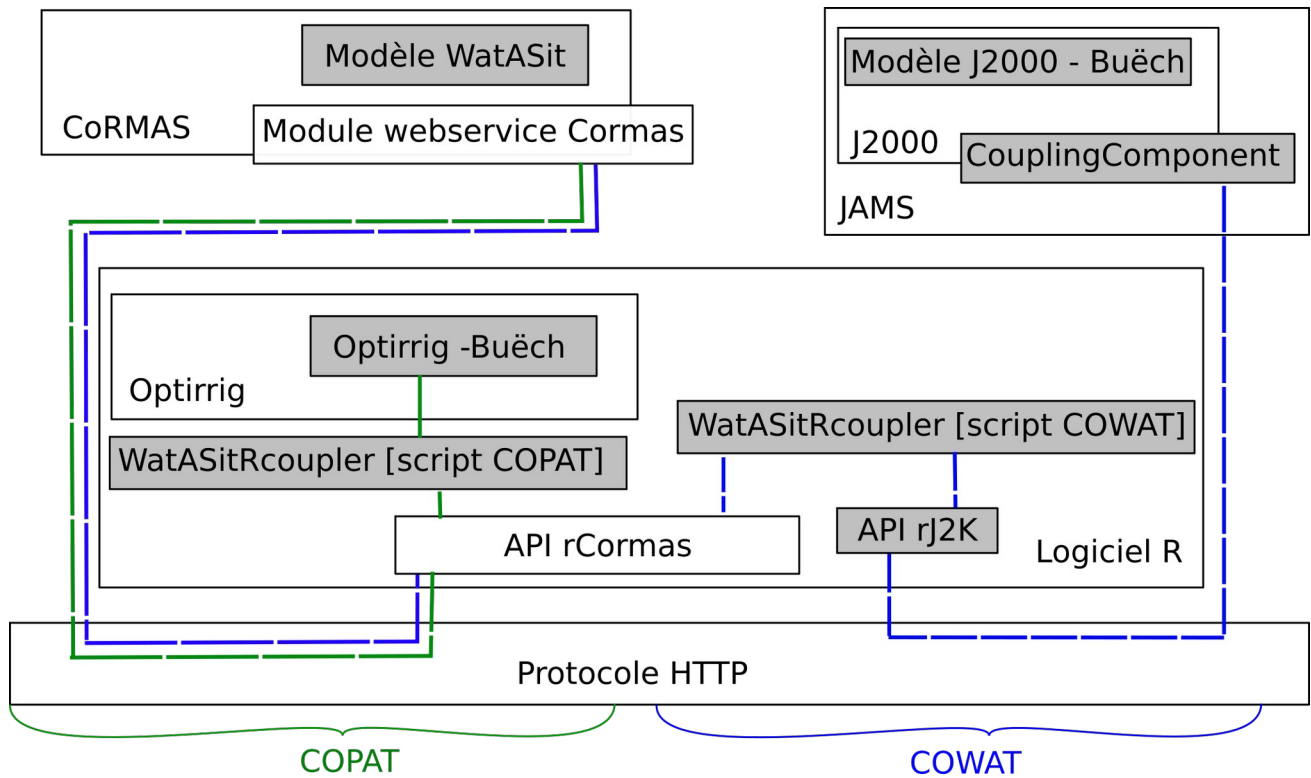


Figure 11 : Outils, modèles et plateformes informatiques utilisés (en blanc) et développés (en gris) au cours du projet. Détails dans le corps du texte.

1. Adaptations d'un modèle de croissance de cultures et d'un modèle hydrologique distribué

1.1. Le modèle de culture à l'échelle de la parcelle³

A. Le modèle Agronomique

Le modèle Optirrig est une structure à deux couches, interne et externe. La couche interne effectue des calculs hydro-agronomiques basés sur l'évolution d'une variable d'état appelée l'indice de surface foliaire (*LAI* pour *Leaf Area Index* en anglais) et représentant la surface de feuille de la plante. Cette variable, souvent utilisée en modélisation agronomique synthétise le niveau de développement de la plante. Cette couche interne est basée sur des concepts initialement présents dans le modèle PILOTE (Mailhol et al., 2011) et maintenant appelé PILOTE-R tel que codé dans le langage R. La couche externe d'Optirrig permet l'utilisation de plusieurs exécutions à des fins numériques diverses, par exemple des scénarios exploratoires d'irrigation et de fertilisation et/ou des scénarios climatiques, des analyses d'incertitude et de sensibilité, l'ajustement de modèles ou l'irrigation. La Figure 12 donne un aperçu de la structure et des principales variables du modèle, parmi lesquelles le *LAI* et l'indice de stress hydrique (*WSI* pour *Water Stress Index* en anglais) qui nous intéressent particulièrement ici puisque c'est l'information qui va être transmise au modèle agents et que les « agents ». Le *WSI* est calculé comme étant le rapport entre la transpiration réelle et la transpiration maximale. Il est calculé par le « module » sol comme une moyenne mobile de 10 jours.

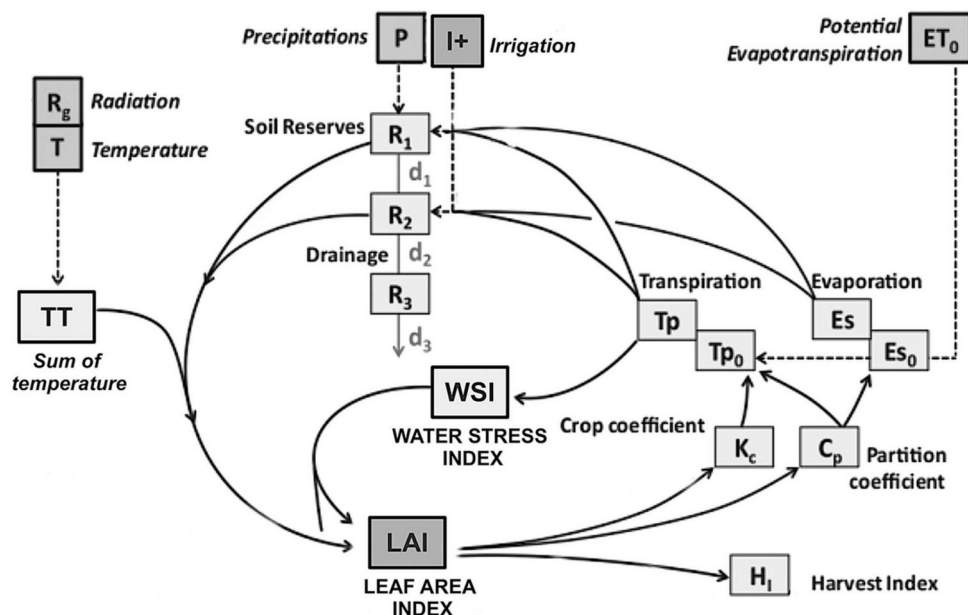


Figure 12 : Vue d'ensemble du modèle Optirrig pour la simulation des variables *WSI* et *LAI* (adapté de). Les forçages climatiques sont des carrés aux contours épais, les variables intermédiaires sont des croquis gris pâle et les variables d'état clés sont des croquis gris aux contours épais. L'irrigation

³ Cette sous-section est une traduction d'une partie de l'article (Richard et al. 2022b) publié dans le journal "Agricultural Water Management dans le cadre du projet.

est notée I^+ pour indiquer que ce forçage du modèle dépend des règles de décision en matière d'irrigation (Richard et al., 2022b).

La simulation de l'indice de surface foliaire LAI est réalisée en prenant notamment en compte la température moyenne journalière du jour, la température de base de la culture, la valeur maximale du LAI et la sensibilité de la plante au stress hydrique. En pratique, nous avons utilisé une version récente du modèle Optirrig (Cheviron et al., 2016) développée à l'INRAE G-Eau. Cette version Optirrig-D spécifiquement développée pour l'approche de co-simulation ("D" désigne l'horizon journalier spécifique de la simulation) permet le forçage externe des instructions d'irrigation pour certains pas de temps (i.e. un programme extérieur, dans notre cas le modèle multi-agents détermine à chaque pas de temps si il y a irrigation ou pas), avant le calcul des variables d'état du modèle (LAI et WSI).

B. L'adaptation du modèle agronomique pour la co-simulation

La version Optirrig-D développée dans cette étude est donc une fonction journalière dérivée du modèle Optirrig, qui est habituellement exécuté sans interruption du début à la fin de la période de simulation. Dans cette utilisation classique, l'irrigation (I^+ , en $L\ m^{-2}\ j^{-1}$ en unités légales, souvent exprimée en mm) est soit programmée selon des règles de décision, donnant lieu à un calendrier d'irrigation, soit décidée à partir de données de terrain et/ou de prédictions du modèle, typiquement lorsque la quantité d'eau disponible dans les réservoirs de la zone racinaire (R_1 , R_2) passe sous un certain seuil (voir Matériaux supplémentaires). Cependant, comme le couplage avec l'ABM nécessite de forcer I^+ en fonction des actions de l'agent, il est nécessaire de pouvoir le modifier au cours de la simulation, à chaque pas de temps quotidien et c'est pour ajouter cette fonctionnalité que nous avons développé Otirrig-D.

Le modèle Optirrig-Buëch, basé sur la version journalière Optirrig-D ainsi construite, est décrit de manière extensive dans (Richard et al., 2020) et (Richard et al., 2022b), incluant les valeurs de paramètres utilisées etc. Les scripts et les codes informatiques développés sont également mis à disposition (cf. Annexe 5) de manière à ce que le modèle Optirrig-D puisse être co-simulé avec n'importe quel autre simulateur à pas de temps constant programmé avec le langage R et qui utiliserait le LAI et le WSI pour déterminer les périodes d'irrigation.

1.2 La mise en place d'une modélisation hydrologique distribuée sur le bassin versant du Buëch, adaptée aux objectifs de l'étude

A. Le modèle hydrologique

Il convient tout d'abord de décrire dans les grandes lignes le terrain d'application du modèle d'un point de vue hydrologique. Il s'agit du bassin versant du Buëch (réduit ensuite au bassin du Grand Buëch (336 km²). Ce bassin est situé dans une zone de moyenne montagne (contreforts sud de la chaîne des Alpes), et à proximité de la ville de Gap, France. Il fait partie des zones rurales françaises, avec une densité de population de 14.4 habitants par kilomètre carré (contre 105.8 en moyenne en France). La partie amont du bassin est limitée par une chaîne de montagnes culminant à 2000m et couverte de forêts de feuillus et de conifères, de prairies, de pelouses et de surfaces minérales sur des pentes fortes. La partie aval est différenciée par la présence de cultures d'hiver et de printemps, et de zones urbanisées ou commerciales. L'exutoire du bassin versant est la confluence avec le Petit Buech à l'altitude de 680m. La géologie est constituée de calcaires jurassiques, avec des dépôts fluvio-glaciaires dans la partie aval conduisant à une capacité de stockage des eaux du sol limitée. Le bassin versant du Grand Buëch est soumis à des périodes d'étiage sévères, avec un débit mensuel minimum avec une probabilité de 1/5 de ne pas être dépassé (QMNA5) de 1.1 m³s⁻¹, et qui peut conduire à des restrictions d'usage de l'eau (Sauquet et al., 2019). Le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée hydrologiquement de l'exutoire pour atteindre l'exutoire (temps de concentration) est de 13 heures (Gautier, 1992). L'irrigation de surface domine et consiste en des syndicats d'irrigants gérant des réseaux collectifs de canaux gravitaires. Le syndicat d'irrigants d'Aspres-Sur-Buëch est assez représentatif de cette irrigation collective de surface, avec une surface irrigable de 75 ha (la moyenne est de 50 ha par syndicat d'irrigants), et des types de cultures (38,9% de prairies, 29,5% de fourrages et 23,7% de céréales). Il comprend 74 parcelles agricoles irriguées au sein du réseau gravitaire collectif par 10 irrigants.

L'objectif de la modélisation étant de comparer différentes stratégies des agriculteurs vis-à-vis de l'irrigation, il est nécessaire que les acteurs du territoire puissent disposer des informations nécessaires à la prise de décision, à la bonne échelle spatiale et temporelle. Pour ce qui concerne la décision d'irriguer, l'échelle spatiale pertinente est celle de la parcelle (et de l'exploitation) et l'échelle temporelle est celle de la journée. Ce besoin contraint les besoins en termes de modélisation hydrologique, cette dernière devant être capable de fournir les informations hydrologiques à une échelle spatiale cohérente avec les besoins des agriculteurs, c'est-à-dire le brin de rivière où l'eau d'irrigation peut être prélevée. Il faut aussi que le modèle hydrologique soit capable d'intégrer les actions d'irrigation dans sa mise à jour des calculs de bilan hydrologique (évapotranspiration, humidité des sols, débits dans les cours d'eau). Ceci nous a orienté vers la mise en œuvre d'une modélisation hydrologique distribuée.

Il existait déjà, sur le bassin versant du Buëch une première modélisation de ce type, correspondant aux résultats d'une modélisation J2000 mise en œuvre à l'échelle du bassin du Rhône (projet Modélisation hydrologique distribuée du Rhône, Branger et al., 2016). Néanmoins la résolution spatiale

utilisée (200 m sur la topographie) n'était pas suffisante pour les besoins de la simulation sur le Buëch, en particulier pour la discrétisation du bassin versant en « Hydrological Response Units » (HRUs), les unités de modélisation sur lesquelles les processus sont supposés homogènes et qui résultent du croisement d'informations sur la topographie, la géologie, l'occupation du sol et les types de sols.

Une modélisation spécifique, J2000_Buëch, a donc été mise en œuvre pour obtenir la résolution spatiale requise. La représentation des processus utilisée est celle présentée dans la thèse de Ivan Horner (2020) et le modèle tourne avec un pas de temps journalier, suffisant pour l'application visée. Le travail initial sur le modèle a surtout porté sur la discrétisation spatiale avec la prise en compte des informations suivantes dans la discrétisation du modèle (Richard, 2020, chapitre 3):

- Modèle numérique de terrain de l'IGN à 25 m de résolution
- Carte géologique décrite dans Wasson et al. (2002) à l'échelle 1:250 000 provenant de la base de données Hydro-éco-région (HydroEco)
- Pédologie du sol issue du programme Référentiel pédologique régional sur la région PACA (1/250 000ème) selon un calcul décrit dans Braud et al. (2013)
- [Occupation du sol](#) à 10 m de résolution issue de l'analyse d'images Sentinel2. Ces données ont été complétées, pour le parcellaire détaillé et les cultures par le Registre Parcellaire Graphique ([RPG, 2015](#))
- La base Hydra V2 qui décrit les réseaux d'irrigation sur la région PACA et qui contient les shapefiles des syndicats d'irrigants (c'est-à-dire les surfaces des périmètres irrigués) et les shapefiles des réseaux hydrauliques (c'est-à-dire les prises, branches, jonctions et rejets des réseaux) pour identifier les parcelles agricoles desservies par les périmètres irrigués collectifs
- Le réseau hydrographique issu de la BD Carthage
- Le réseau des stations de mesures hydrométriques sur le bassin

Ces informations ont permis de déterminer les HRUs en se fixant comme critères de discrétisation des sous-bassins versants de surface minimale de 5 km² et des HRUs de taille minimale de 1 km². Le réseau hydrographique a, par ailleurs, été découpé pour inclure les barrages, les points de prélèvement et de rejets pour augmenter le réalisme des simulations par rapport aux pratiques d'irrigation. Une sortie importante de cette étape de maillage est aussi l'obtention d'un schéma de routage des écoulements de HRU en HRU jusqu'au réseau hydrographique. Ceci a permis d'avoir une configuration du modèle sur laquelle une évaluation des performances avec les données de débits disponibles était possible. Le modèle a ainsi été mis en œuvre sur la période 1960-2017, avec le forçage météo journalier sur des mailles de 8x8 km², issu des données SAFRAN et une période d'initialisation du modèle de 2 ans. Le modèle a été évalué avec les données de débits disponibles via le calcul de critères de performance statistiques standard (biais, erreur quadratique moyenne, critère de Nash), démontrant des performances acceptables dans la plupart des stations considérées (cf. Figure 13 ci-dessous).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

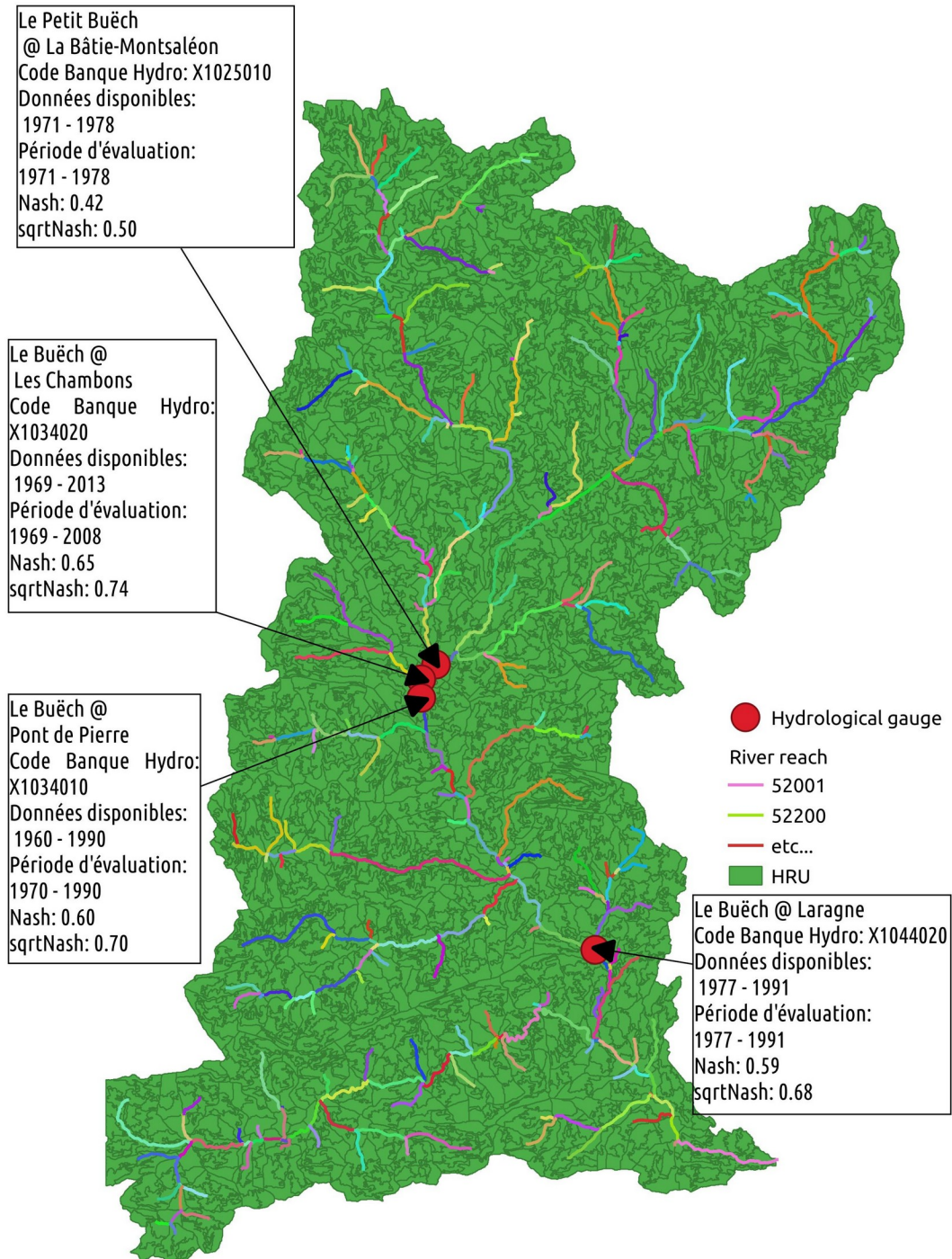


Figure 13 : Évaluation du modèle hydrologique au niveau des 4 stations Banque Hydro.

Pour donner une représentation plus intuitive, les courbes des valeurs de débits à l'exutoire observées et simulées sur la station de la Bâtie-Montsalon sont illustrées dans la Figure 14 à titre d'exemple (les indicateurs pour cette station sont rappelés dans le Tableau 1 ci-dessous).

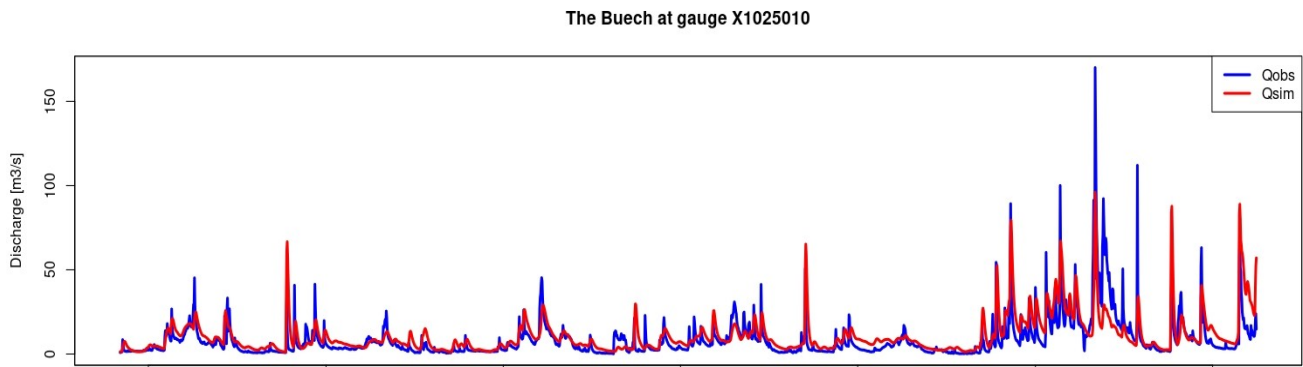


Figure 14 : Comparaison des débits simulés par le modèle hydrologique versus observés à la station de la Bâtie-Montsalon.

Indicateur	Biais	Erreur quadratique moyenne	Nash
Valeur	27,80	8,80	0,5

Tableau 1 : Performances du modèle hydrologique.

B. L'adaptation du simulateur de modèle hydrologique J2000 pour la co-simulation

D'un point de vue de la modélisation, pour le couplage avec le modèle multi-agents de simulation de l'irrigation, il a été nécessaire de faire évoluer le modèle J2000_Buëch. Lors d'un même pas de temps journalier, il faut en effet être capable de modifier localement le bilan hydrologique de chaque unité soumise à irrigation tout en conservant leur topologie d'écoulement du ruissellement et des flux de sub-surface et souterrain d'une unité à l'autre. La solution proposée dans l'approche COWAT (Coupling Plant and Water Trajectories) consiste à considérer chaque parcelle irriguée du modèle agent comme une « HRU-parcelle » ayant son propre bilan dans le modèle hydrologique.

Cela permet, chaque jour, de forcer les bilans de chaque HRU-parcelle par l'irrigation simulée dans le modèle WatASit, puis de simuler l'hydrologie perturbée par l'irrigation à l'échelle du sous-bassin en conservant la même topologie d'écoulement des flux hydrologiques.

Pour réaliser cela, il a fallu modifier le modèle J2000_Buëch pour prendre en compte les parcelles irriguées dans la modélisation. Ces dernières sont en effet simulées explicitement dans le modèle agent, mais ne sont pas explicitement présentes dans les HRUs originelles. Pour ce faire, il a fallu faire évoluer le maillage et introduire le concept de HRU-parcelle et de HRU-tronquée (Figure 15). Les HRU-parcelles permettent de représenter les parcelles irriguées à l'intérieur des différentes HRUs. Les HRUs –parcelles possèdent leur propre bilan hydrologique, ce qui permet en particulier d'y prendre en compte l'irrigation calculée par le modèle agent et de tenir compte de l'irrigation dans le calcul du ruissellement et de l'évapotranspiration de la HRU-parcelle. Il est par ailleurs fait l'hypothèse que ces HRUs-parcelles ne sont en interaction qu'avec leur HRU « mère », ce qui permet de ne pas modifier le routage du modèle J2000_Buëch initial (Figure 16).

Zone Atelier Bassin du Rhône

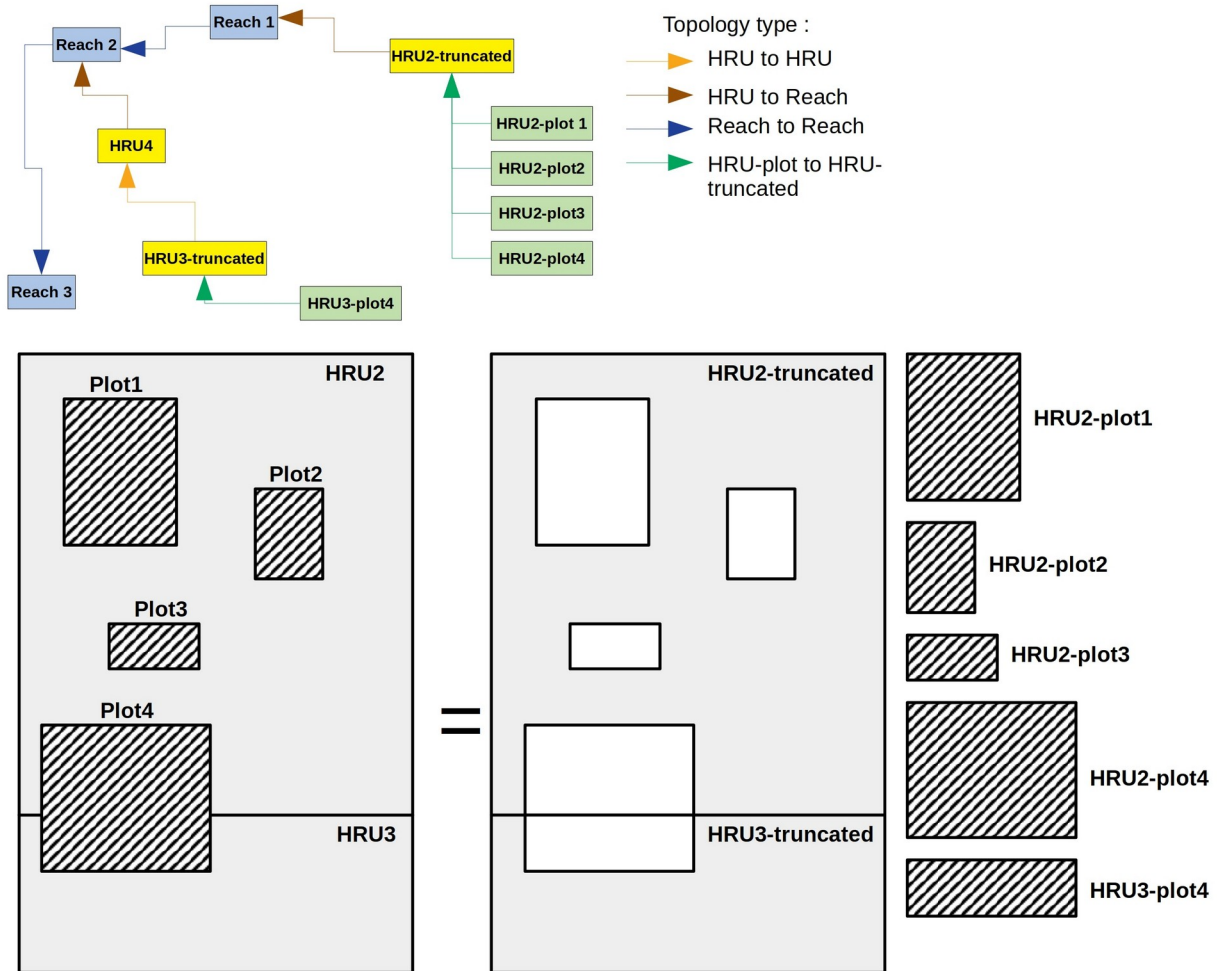


Figure 15 : Illustration du concept de HRU-parcelles (en hachuré) et de HRU-tronquée (en gris clair). Il est fait l'hypothèse que les HRU-parcelles ne sont en interaction qu'avec leur HRU-mère, ce qui permet de ne pas modifier le routage des HRU initiales (haut de la figure).

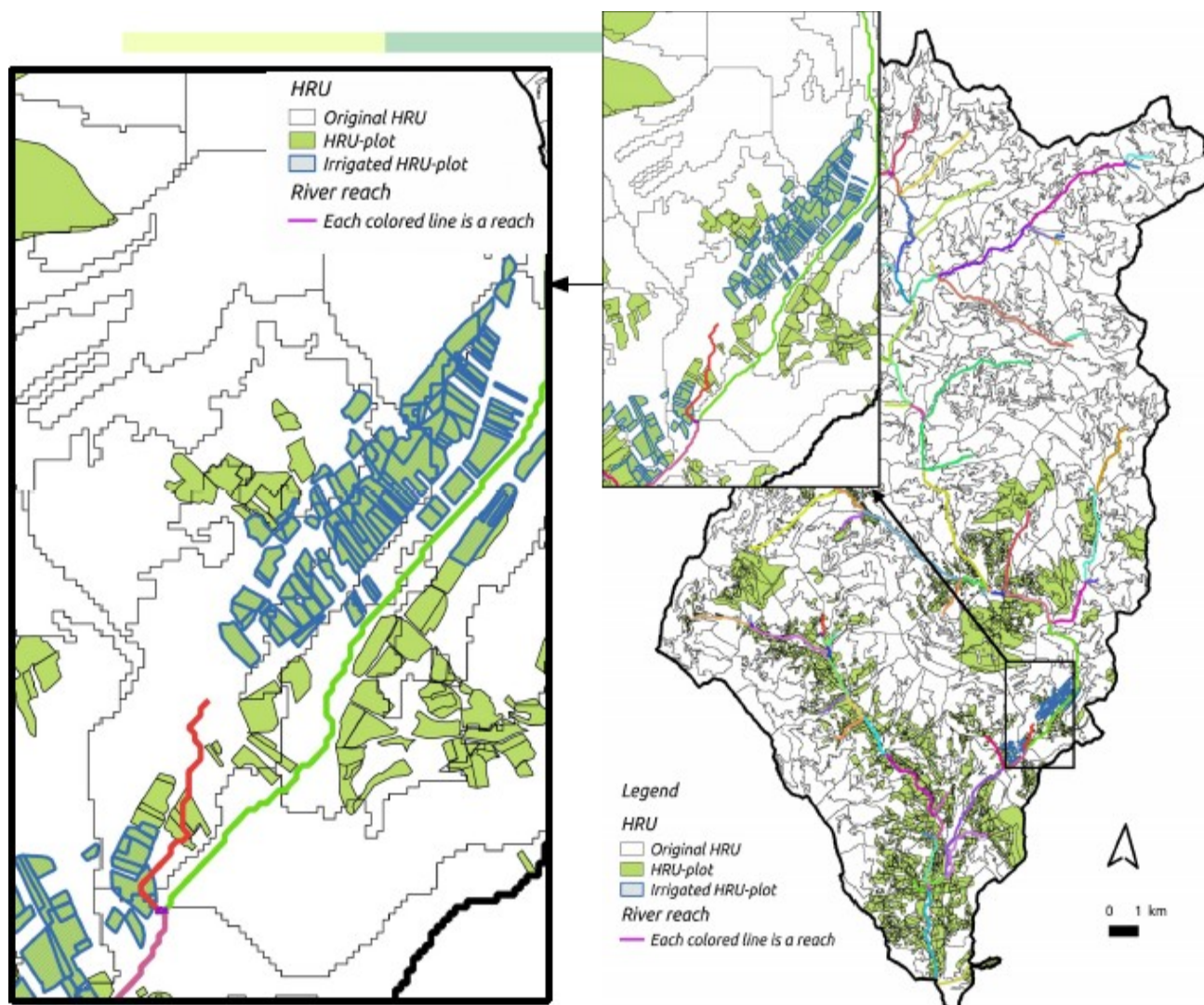


Figure 16. Mise en œuvre du concept de HRU-parcelles sur le bassin du Grand Buëch en amont de Serres. Les HRUs du modèle initial apparaissent en contours noirs. Les HRUs-parcelles sont les polygones colorés, avec un zoom sur le secteur du périmètre irrigué d'Aspres sur Buëch (gauche de la figure). On y visualise les HRUs-parcelles en vert correspondant à l'ensemble des exploitations du secteur irrigué. Les parcelles irriguées sont entourées en bleu. Les lignes colorées sont les brins de rivière où les prélèvements peuvent être réalisés et où sont calculés les débits.

D'un point de vue de la simulation, il s'agit d'être capable de stopper l'exécution du modèle hydrologique pour le « perturber » (changer la valeur de certaines variables d'état, comme l'eau apportée aux plantes dans certaines HRU-parcelles dans notre cas par exemple) au bon endroit et ce sans introduire d'incohérence dans le reste des calculs. Notre travail de co-simulation impliquant plusieurs plateformes informatiques différentes programmées dans différents langages informatique, nous avons choisi de faire communiquer ces programmes par le protocole HTTP. Cette fonctionnalité n'était pas offerte par la plateforme J2000 (elle existait déjà dans la plateforme CoRMAS) et nous avons donc dû l'ajouter. Cela a été fait de manière générique, c'est à dire qu'elle peut désormais être utilisée pour n'importe quel modèle hydrologique que l'on voudrait co-simuler avec un autre

simulateur que l'on peut piloter via le protocole HTTP et utiliserait des variables hydrologique pour régler des irrigations situées à des endroit spécifiques du bassin-versant. Le développement de cette fonctionnalité est une tâche assez technique et spécifique qu'il n'est pas pertinent de présenter dans ce rapport. Il convient tout de même de dire que ce travail est construit autour du développement d'un nouveau composant JAMS - J2000 (le CouplingComponent) qui a nécessité le travail à plein temps d'un informaticien pendant plusieurs mois et que les codes informatiques développés, ainsi qu'une documentation ont été mis à disposition (cf. Annexe 5). De manière générale ces travaux sont présentés dans le chapitre 7 de (Richard et al., 2020).

Ce type de modification du modèle et du simulateur nécessite, en plus de la validation (comparaison des résultats simulés aux résultats observés), une étape de vérification (comparaison entre ce que l'on veut que le simulateur calcule et ce qui calculé réellement). Pour cela nous avons développé des outils qui permettent de vérifier la conservation de masse au cours de la simulation et la topologie du réseau de HRUS et de brins de rivières (pour vérifier que les brins de rivières simulés se jettent bien dans les bons brins de rivières, et idem pour les HRUs). Des exemples sont présentés en Annexe 4. Nous avons en outre pour ce faire eu à recoder le programme de calcul de la topologie des bassins utilisé par J2000 (HRU Delin) comme expliqué également en Annexe 4.

2. Construction d'un modèle multi-agents du périmètre irrigué gravitaire basé sur la théorie de l'action située

Du point de vue des activités de modélisation, la plus grande partie du travail du projet a porté sur la construction du modèle WatASit de modélisation multi-agents du périmètre irrigué gravitaire et l'analyse de ses simulations. En effet, le projet RADHy Buëch s'étant focalisé sur l'usage agricole en période de basse eau et plus particulièrement sur la représentation des adaptations mises en œuvre, de leur explication et de leurs conséquence, et la majeure partie de l'irrigation étant collective sur le bassin du Buëch, il semblait important de disposer d'une bonne représentation des dynamiques d'irrigation qui puisse prendre en compte les aspects techniques et quantitatifs nécessaire aux discussions entre le niveau de l'exploitation agricole et le niveau du périmètre irrigué de manière à pouvoir par la suite mettre en discussion les problématiques rencontrées à ces niveau avec celles rencontrées à l'échelle du bassin versant.

Rappelons tout d'abord ce que nous entendons par « Modèle à base d'agents » ou « système multi-agents qui sont la base de notre modèle. Nous traduisons pour cela un passage de la thèse Bastien Richard (Richard, 2020).

L'intelligence artificielle distribuée (DAI) propose de décomposer un problème en un ensemble de sous-problèmes, chacun ayant un solveur spécifique. Cette approche s'oppose à l'approche classique de l'intelligence classique de l'intelligence artificielle où la solution d'un problème était assignée à un seul programme qui était parfois difficile à développer et à maintenir (Boissier et al., 2004). Dans la veine de l'IAD, les systèmes multi-agents (SMA) sont composés d'un ensemble d'entités et ont une portée plus large que la résolution de problèmes puisqu'ils sont également utilisés comme modèles de la réalité. Ferber (1995) a proposé de définir un SMA comme suit :

- Un ensemble d'objets qui sont localisés. Ces objets sont passifs ou actifs (les agents). Les objets passifs peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
- Un ensemble de relations qui unissent les objets entre eux.
- Un ensemble d'opérations (actions) permettant aux agents de percevoir, produire, consommer, transformer et de manipuler les objets,
- Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative d'adaptation, que l'on appellera les "lois de l'Univers".

Boissier et al. (2004) définissent trois grands domaines d'application : 1) Modéliser, observer, expliquer ou prédire le comportement de systèmes réels complexes, 2) La création de simulations dans lesquelles des agents jouent le rôle d'êtres humains et 3) la résolution de problèmes dans un contexte distribué. Notre travail porte principalement sur le premier domaine, en particulier la modélisation, l'observation et la représentation de l'action humaine dans les modèles agricoles à base d'agents.

Dans ce travail, nous construisons donc un modèle de système multi-agent au sens de l'approche Modeling and Simulation (MS) (Michel et al., 2002). Dans la communauté des agents (surtout francophone), de tels modèles sont appelés " Agent-Based Models " (ABM), et il existe des initiatives

de formalisation intéressantes proposant des méta-modèles (i.e. ces manières de concevoir des modèles à bases d'agents) riches et génériques. Notre travail s'appuie sur le méta-modèle Agent de la plateforme CORMAS (Bommel et al., 2015) dédiée à la conception de modèles de systèmes multi-agents de gestion de ressources communes. Nous restons dans la lignée du méta-modèle CORMAS qui considère qu'un modèle à base d'agents est simplement un "modèle de MAS" et où un agent est une entité qui représente une entité sociale dans la vie réelle. Nous utiliserons le terme ABM dans ce sens dans ce document. suivants. La partie " sociale " et les interactions " environnement-homme " de l'ABM développé dans ce travail utilisera cependant un méta-modèle spécifique développé au chapitre 4 de (Richard et al., 2020) et qui inclut comme nous l'expliquons ci-dessous une représentation explicite des actions et même des possibilités d'actions offertes à chaque instant aux agents par l'environnement. La description de la dynamique environnementale sera basée sur d'autres formalismes tels que l'hydrologie distribuée (cf. Section précédente) par exemple.

Ainsi, dans le cadre du projet RADHy Buëch, Bastien Richard propose dans sa thèse un modèle à base d'agent pour représenter l'irrigation gravitaire au niveau opérationnel, et discute de son apport pour la représentation et la compréhension des changements de gestion observés. Ainsi dans son troisième chapitre, il décrit d'abord le modèle WatASit de manière extensive. Nous proposons un modèle basé sur le concept d'Affordance qui rend explicite les possibilités d'action disponibles pour chaque agent.

L'approche permet de générer, pour chaque agent et pour chaque pas de temps, un ensemble d'options spatialement réparties qui conditionnent les trajectoires des agents sans faire appel à une re-planification ou à des algorithmes de décision complexes. L'approche tire aussi parti de la mise à jour systématique de l'ensemble des options pour les faire correspondre aux différentes échelles spatio-temporelles des contraintes opérationnelles, telle que la disponibilité de l'eau en plusieurs endroits du réseau. Comme preuve de concept, le modèle WatASit a été appliqué au fonctionnement d'un réseau gravitaire collectif du bassin du Buëch qui a abandonné le partage historique de l'eau par tours d'eau. Chaque bras de canal irrigué, chaque connexion entre les bras de canal, exploitation et chaque irrigant du périmètre ainsi que chaque des parcelles du périmètre sont représentés dans le modèle (cf. Figure 17). Les résultats de simulations montrent que si l'abandon de la coordination par tours d'eau permet effectivement une augmentation du nombre de possibilités d'irrigation, il met également en exergue les inégalités entre irrigants en termes de capacité à irriguer et d'abandons d'irrigation. Le changement d'organisation n'impacte pas tous les irrigants de la même façon, selon la localisation, notamment en aval du réseau, et le nombre de parcelles irrigables de chacun.

Zone Atelier Bassin du Rhône

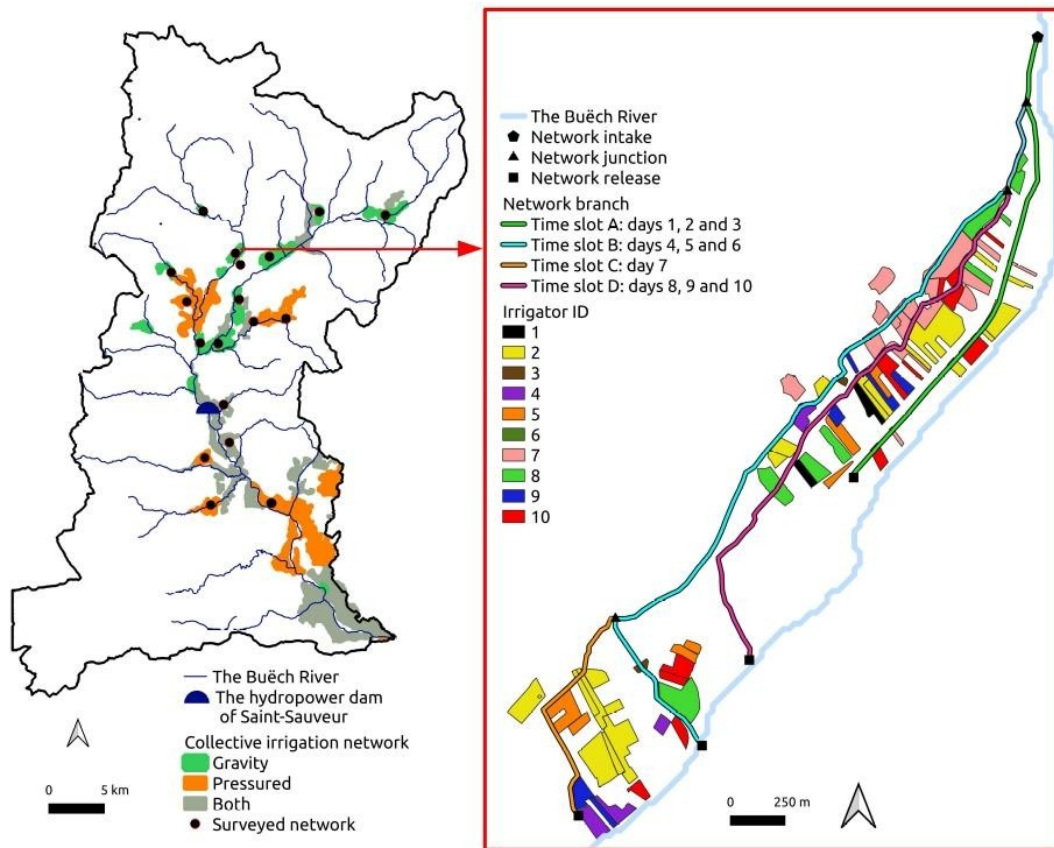


Figure 17 : Les réseaux collectifs d'irrigation du bassin versant du Buëch (à gauche), et la zone d'étude (encadré rouge). Dans l'encadré rouge sont cartographiées les parcelles irriguées desservies en eau par le réseau gravitaire d'Aspres-Sur-Buëch choisi comme cas d'étude pour le modèle WatASit (source : RPG 2017 et BD Hydra consulté en mars 2019). Les couleurs des parcelles correspondent aux identifiants des irrigants. Lorsque le réseau est coordonné par des créneaux journaliers, chaque ligne colorée désigne la branche arrosée pendant un créneau horaire donné. Par exemple, la branche verte s'écoule pendant le créneau A, c'est-à-dire pendant les 3 premiers jours de chaque période de 10 jours. La branche bleue s'écoule pendant les 3 jours suivants, la branche orange pendant le 7ème jour, et la branche rose pendant les 3 derniers jours, puis à nouveau la branche verte est mise en eau (Richard et al., 2022a).

Dans sa thèse, Bastien Richard explore également comment les changements de trajectoire des agents dans un modèle tel que WatASit peuvent être liés à l'évolution de leurs possibilités d'action, avant et après l'abandon de la coordination par tour d'eau. Les résultats de la simulation montrent que l'approche fournit un niveau intermédiaire de visualisation et d'analyse. Dans notre exemple, la valeur ajoutée de ce niveau réside dans l'information qu'il fournit sur la nature des trajectoires simulées. La Figure 18 donne un exemple du niveau de détail de ce qui est représenté dans le modèle et que l'on a ainsi pu analyser. On y voit pour un irrigant donné, l'évolution des possibilités d'irrigations qu'il a eu au cours de la simulation au niveau de chacune de ses parcelles (qui ne sont pas toutes sur les mêmes canaux et n'ont donc pas toutes le même accès à l'eau) et les actions d'irrigation qu'il a au final « choisi » de réaliser. Il s'agit bien de résultat de simulation et donc ces

Zone Atelier Bassin du Rhône

« choix » sont en réalité le résultat de règles de décision que nous avons programmé dans notre modèle mais l'on voit bien ici qu'il ne s'agit pas uniquement du résultat d'une règle de décision mais d'un ensemble d'éléments (structure du canal d'irrigation, mode de coordination du réseau, pluviométrie etc.) qui mettent les agents dans des situations de décisions particulières qui conditionnent grandement leurs actions : l'agriculteur ne peut pas irriguer une parcelle si toutes les conditions ne sont pas réunies, cela qui est matérialisé dans le modèle par les possibilités d'actions (Affordances).

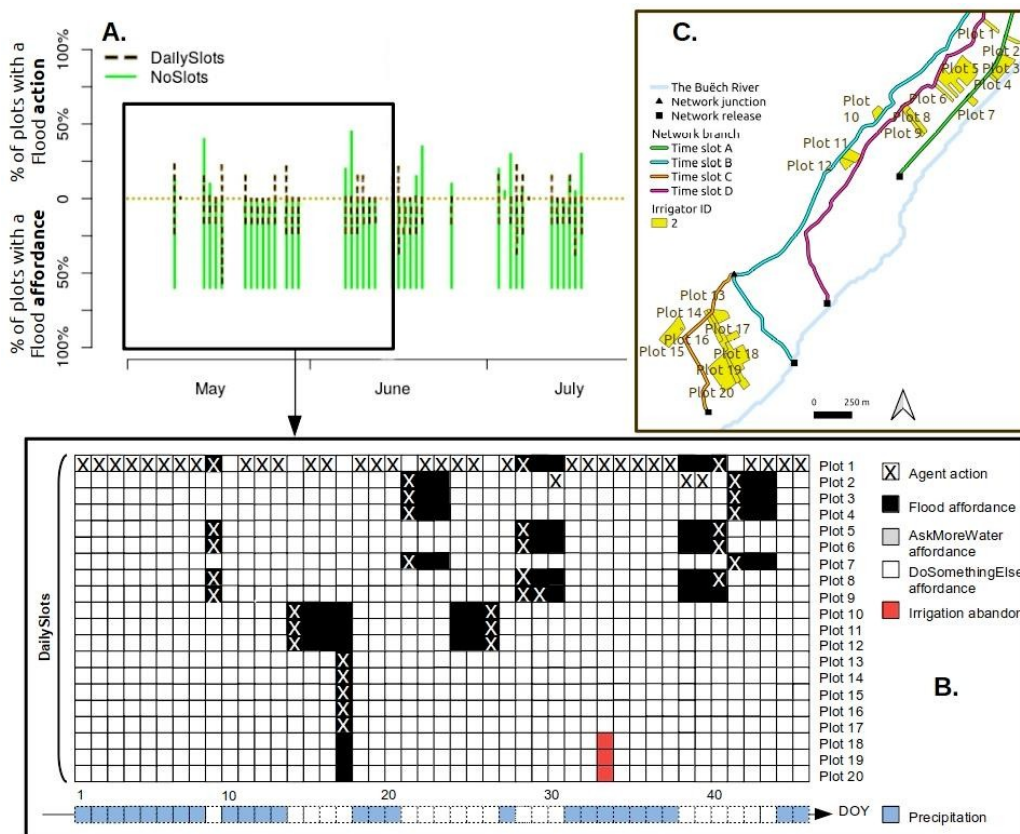


Figure 18 : Analyse du comportement de l'agent du modèle WatASit représentant l'irrigant n°2 du périmètre irrigué d'Aspres sur Bèche. A) Diagramme à barres du pourcentage de parcelles de l'agent avec une action d'inondation (en haut) et une affordance d'inondation (en bas) au cours de la campagne d'irrigation simulée du 1er mai au 30 septembre dans les configurations de modèles avec tour d'eau (*DailySlots* barres noires pointillées) et sans tour d'eau (*NoSlots* barres vertes). B) Visualisation des options d'irrigation quotidiennes de l'agent d'irrigation 2 dans la configuration du modèle avec tour d'eau, du 1er mai au 14 juin. DOY (*Day Of the Year*) est le jour de l'année. C) Emplacement des parcelles de l'agent dans le réseau d'irrigation gravitaire.

Grace à ce niveau de détail de l'analyse de ce qui se passe dans nos simulations offert par l'explicitation des possibilités d'action par les affordances, on montre par exemple que lorsque le réseau d'irrigation n'est pas coordonné par les agents irrigants, les options d'irrigation existent et ne sont pas la cause des abandons de l'irrigation, qui sont dues au manque d'eau au niveau des parcelles les moins bien desservies par le réseau. Dans nos simulations, la coordination du réseau réduit forte-

ment les abandons d'irrigation pour ces parcelles, mais la difficulté vient alors de la situation individuelle de chaque agent irrigant pour satisfaire tous les besoins d'irrigation simultanés pendant une fenêtre de temps réduite. La mobilisation du concept d'Affordance permet également de prendre du recul par rapport à la façon dont les humains sont représentés dans le modèle, avec par exemple un manque d'anticipation des agents lorsque le réseau d'irrigation n'est pas coordonné.

Ces résultats sont publiés en français dans la revue francophone d'Hydrologie la *Houille Blanche* (Richard et al., 2020a) et en anglais dans la revue anglophone de modélisation des systèmes sociaux et environnementaux *Social and Ecological Systems Modelling* (Richard et al., 2020b). Ils sont présentés de manière plus extensive dans les chapitres 4 et 5 de (Richard et al., 2020b).

3 Les modèles couplés

3.1 Le couplage COPAT :

Il s'agit tout d'abord de montrer la faisabilité d'un couplage entre un modèle à base d'agent horaire à l'échelle d'un périmètre irrigué (WatASit), avec un modèle de culture journalier à l'échelle de la parcelle (Optirrig), pour mieux prendre en compte les contraintes spécifiques à la gestion du réseau gravitaire. En effet, les modèles de culture fournissent des stratégies d'irrigation optimales au niveau de la parcelle. Toutefois, dans de nombreux endroits comme dans le bassin du Buëch, l'irrigation est souvent gérée collectivement afin de coordonner l'approvisionnement en eau au niveau de chaque réseau, avec de potentiels effets de rétroaction sur la dynamique des plantes. Pour saisir ces rétroactions lors d'une campagne d'irrigation collective, nous avons proposé l'approche COPAT (*COupling Plant and Agent Trajectories*). L'élément clé de l'approche est la dérivation du modèle de culture en une fonction quotidienne (présenté dans la Section 1.1 de cette partie), ce qui a permis d'exécuter cette version quotidienne comme un modèle esclave du modèle à base d'agents, et donc de permettre le couplage au pas de temps journalier. Ce couplage a permis de donner des ordres d'irrigation journaliers au niveau de chaque parcelle en fonction de nouvelles contraintes spécifiques au réseau collectif d'irrigation gravitaire, comme l'écoulement nécessaire dans le canal, et de récupérer les variables agro-hydrologiques des parcelles (i.e. Leaf Area Index, Water Stress Index) pour les cultures de céréales qui sont les seules disponibles avec le simulateur optirrig journalier pour l'instant. Il s'agit aussi en effet d'illustrer l'influence mutuelle des trajectoires des agents et des trajectoires des cultures irriguées. Les résultats de simulations, illustrés sur un cas d'étude et une campagne d'irrigation, montrent que potentiellement l'irrigation simulée par le modèle couplé a un impact sur le stress hydrique moyen et la gravité du stress lorsque les plantes sont réparties dans l'espace selon un gradient amont-aval le long du réseau. Dans ce cas, une absence de coordination entraîne un stress hydrique plus précoce, en moyenne, que lorsque le réseau est coordonné. Ces résultats sont présentés dans le chapitre 5 de la thèse de Bastien Richard (Richard, 2020a) et publiés dans la revue internationale *Agricultural Water Management* (Richard et al., 2022b). Les codes informatiques sont mis à disposition (cf. Annexe 5).

La Figure 19 illustre l'intérêt d'avoir un couplage avec un modèle multi-agents plutôt que le modèle optirrig seul. On y voit que si on prend le modèle optirrig seul qui ne permet pas de prendre en compte les contraintes amont/aval complexes relatives à la position des parcelles dans les canaux et

Zone Atelier Bassin du Rhône

encore moins les tour d'eau (scénario NoCollCons en pointillés verts) on n'observe quasiment pas de stress hydrique sur les parcelles de céréales. Alors que lorsque l'on intègre les contraintes collectives amont/aval et / ou de tour d'eau (autres courbes de couleur) on observe des cas avec des stress hydriques à plusieurs reprises dans la campagne qui varient en fonction des scénarios choisis et sont notamment les plus importantes dans le cas où toutes les contraintes sont prises en compte (scénario SpaTimeCollCons).

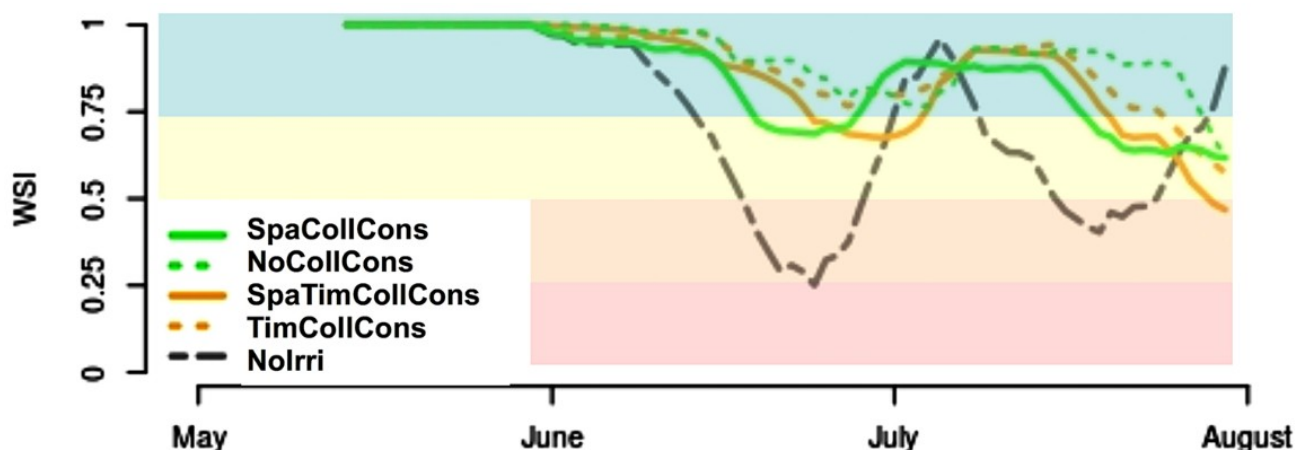


Figure 19 : Évolution moyenne de l'indicateur de stress hydrique (WSI) des plantes dans le modèle en fonction des contraintes prises en compte par le modèle (NoIrr (pas d'irrigation), NoCollCons (pas de contrainte collective), TimCollCons (tours d'eau mais sans prendre en compte les contraintes amont-aval), SpaCollCons (contraintes amont/aval sans mise en place de tour d'eau) et SpaTimCollCons (contraintes amont/aval et présence de tour d'eau)). Les couleurs de fond bleu, jaune, orange et rouge indiquent respectivement une gravité faible, moyenne, élevée et très élevée du stress hydrique des plantes.

La figure 20 permet de rentrer les détails de l'analyse de ces résultats en ne nous intéressant plus uniquement à la valeur moyenne du WSI mais en regardant ce qui se passe au niveau de chaque parcelle. On peut y voir par exemple que d'après notre modèle, si l'on prend en compte les contraintes spatiales amont/aval (graphiques du bas), lorsque les pratiques du périmètre sont passées d'une irrigation organisée par tour d'eau (SpaTimeCollCons en bas à droite) à une irrigation sans tour d'eau (SpaCollCons) les agriculteurs ont en fait « sacrifié » deux parcelles qui étaient en aval et qui sont passées d'un stress élevé à un stress très élevé mais ont abaissé le niveau de stress hydrique de nombreuses parcelles en amont (6 parcelles avaient subies un stress hydrique élevé avec la configuration en tour d'eau sont passées à un stress moyen dans la configuration sans tour d'eau).

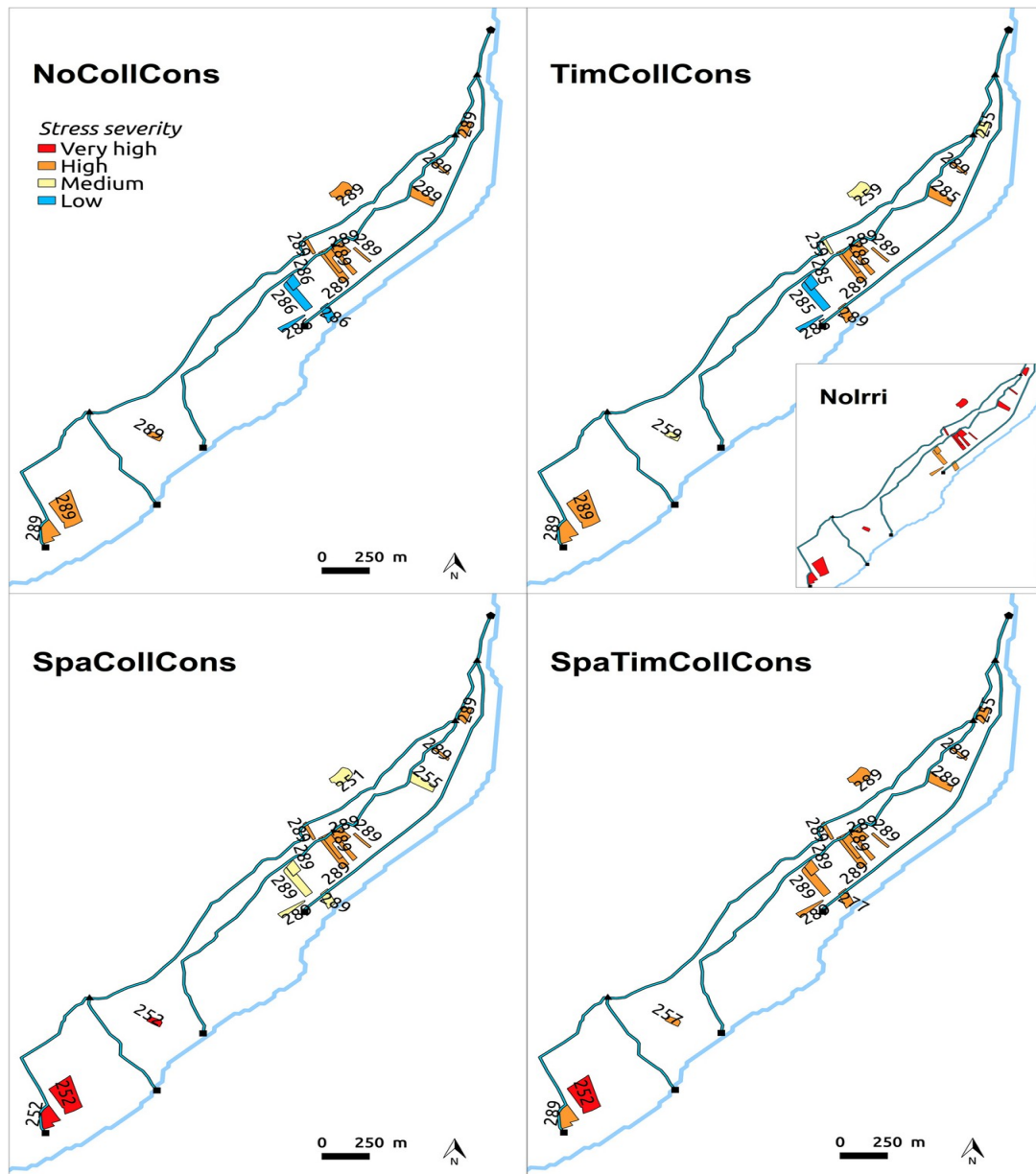


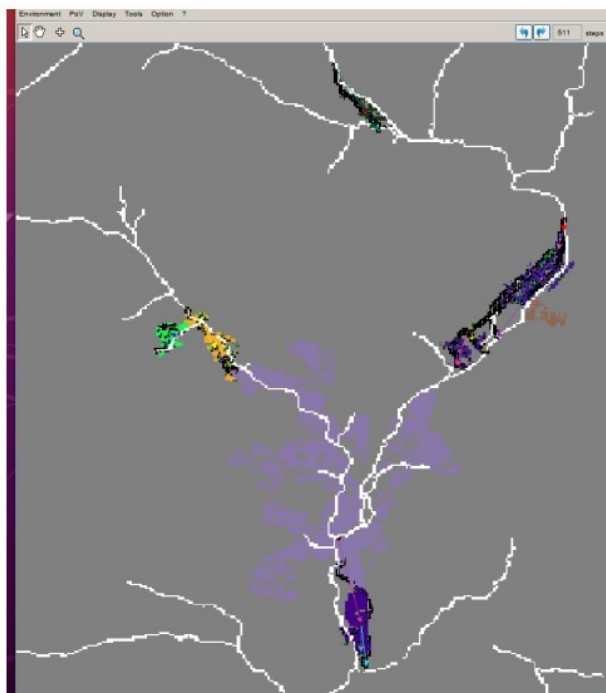
Figure 20 : Localisation de la gravité maximale du stress hydrique dans les 16 parcelles de céréales du périmètre irrigué, selon les simulations NoIrr (pas d'irrigation), NoCollCons (pas de contrainte collective), TimCollCons (tours d'eau mais sans prendre en compte les contraintes amont-aval), SpaCollCons (contraintes amont/aval sans mise en place de tour d'eau) et SpaTimCollCons (contraintes amont/aval et présence de tour d'eau). Les nombres sont la date (jour de l'année) de survenue du stress hydrique maximal.

3.2. Le couplage COWAT

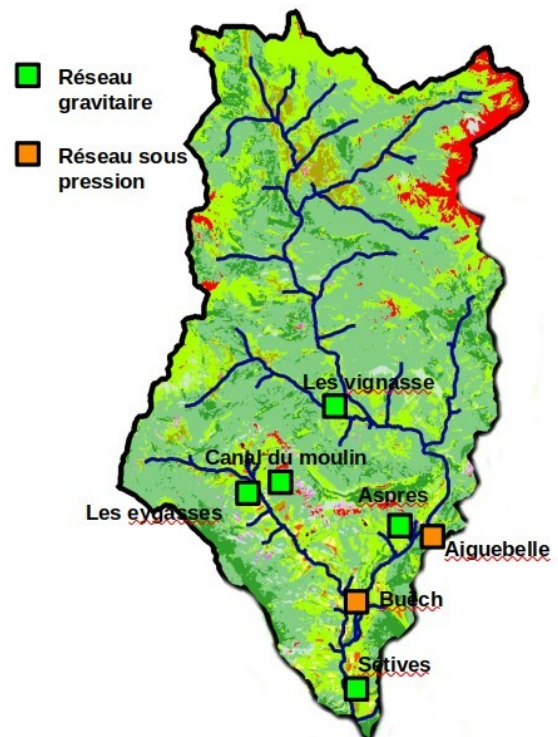
Le couplage COWAT (*COUplage Water and Agents Trajectories*) est pensé à l'échelle du Grand-Buëch. Il n'est à ce jour pas abouti. L'ensemble des développements informatiques ont été réalisés mais sont encore en phase de test et ne sont donc à ce jour pas intégralement diffusés.

Zone Atelier Bassin du Rhône

Le travail s'est organisé en trois phases. La première, achevée, a consisté à développer le modèle hydrologique « co-simulable » pour le bassin du grand Buëch, présenté dans la Section 1.2 de cette partie (cf. Figure présentant le découpage en HRU et HRU-parcelles de ce sous-bassin). La seconde, achevée également, a consisté à développer le modèle WatASit Aspres sur Buëch (présenté dans le chapitre 2 de cette partie) et à l'étendre à l'ensemble des périmètres irrigués du grand Buëch en utilisant les données disponibles et les informations fournies par le diagnostic agricole (cf. Partie 1). Les périmètres irrigués considérés sont représentés dans la Figure 21 ci-dessous.



*Vue de WatASit-Grand Buëch depuis
l'interface graphique de CORMAS
RESOLUTION 50m*



*Les réseaux d'irrigation du Grand
Buëch
RESOLUTION 25m*

Figure 21 : Les périmètres irrigués du modèle COWAT – Buëch

La troisième phase, en cours de finalisation consiste à relier les deux dans un programme de co-simulation avec une architecture client / Serveur. Cela passe en pratique par le développement d'un script R qui organise à chaque pas de temps journalier :

- La mise à jour dans le modèle multi-agents des débits présents dans la rivière au niveau des points de prélèvement des périmètres irrigués,
- L'exécution de 24 pas de temps horaires du modèle multi-agents,
- La récupération de l'ensemble des quantités d'eau prélevées et apportées dans la rivières ou dans les HRUs pendant cette simulation,
- La mise à jour de ces « perturbations » dans le modèle hydrologique,

- La simulation d'un pas de temps journalier du modèle hydrologique pour déterminer le nouvel état hydrologique en tout point du bassin et du réseau hydraulique en début de journée suivante.

L'ensemble des codes développés à ce jour et par la suite sont organisés (suivi des cohérences entre version des modèles hydrologiques et agents et du script de co-simulation) et mis à disposition comme expliqué dans l'Annexe 5.

Communications

Richard, B., Bonté, B., Barreteau, O., & Braud, I (2022a). *A situated agent-based model to reveal irrigators' options behind their actions under institutional arrangements in Southern France*. Socio-Environmental Systems Modelling, vol. 3, 17893, 2022, doi:10.18174/sesmo.17893

Bastien Richard, Bruno Bonté, Olivier Barreteau & Isabelle Braud (2020a). *L'abandon des tours d'eau et ses conséquences opérationnelles sur les systèmes collectifs d'irrigation. Une approche multi-agents situationnelle appliquée à un canal gravitaire de Moyenne Durance (France)*. La Houille Blanche, 106:4, 43-55, DOI: 10.1051/lhb/2020033

Bastien Richard, Bruno Bonté, Magalie Delmas, Isabelle Braud, Olivier O. Barreteau, et al. (2020) *A framework for coupling plant and agent trajectories (COPAT) to support collective irrigation coordination*. iEEMS2020, Sep 2020, Bruxelles, Belgium. [hal-03126267](#)

Bastien Richard, Bruno Bonté, Magalie Delmas, Isabelle Braud, Bruno Cheviron, Julien Veyssier, Olivier Barreteau (2022b). *A co-simulation approach to study the impact of gravity collective irrigation constraints on plant dynamics in Southern France*, Agricultural Water Management, Volume 262, 2022, 107205, ISSN 0378-3774, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107205>

Richard, B. (2020b). *Coupling agent-based and agro-hydrological modeling to represent human actions within an agrohydrosystem. Application to collective irrigation in the Buëch catchment (France)*. Thèse de doctorat en Hydrologie soutenue à l'Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France, 2020. (Anglais).

Références bibliographiques pour la partie 2

Boissier, O., Gitton, S., and Glize, P. (2004). Caractéristiques des systèmes et des applications. Observatoire français des techniques avancées, ARAGO Diffusion Editions TEC and DOC, 29:25–54.

Braud, I., Breil, P., Thollet, F., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C., Kermadi, S., and Michel, K. (2013). Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized peri-urban catchment in France. *Journal of Hydrology*, 485:5–23.

Cheviron, B., Vervoot, R., Alsbasha, R., Dairon, R., Le Priol, C., and Maillhol, J. (2016). A framework to use crop models for multi-objective constrained optimization of irrigation strategies. *Environ Modell Softw*, 86:145–157.

Duboz, Raphaël, 2004. Intégration de modèles hétérogènes pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes : application à la modélisation multi-échelles en écologie marine. Thèse de doctorat Informatique Littoral.

Ferber, J. (1995). Les Systèmes multi-agents: vers une intelligence collective. InerEditions, Paris.

Gatier, E. (1992). Suivi de l'impact d'une ballastière sur une rivière torrentielle : le petit buëch (hautes-alpes). *Géographie Associés.*, 10:113–118.

Mailhol, J., Ruelle, P., Walser, S., Schütze, N., and Dejean, C. (2011). Analysis of aet and yield prediction under surface and buried drip irrigation systems using the crop model pilote and hydrus 2d. *Agric Water Manag.*, 98:1033–1044.

Michel, F. (2004). Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents. These de doctorat. Université Montpellier II, 129

Sauquet, E., Richard, B., Devers, A., and Prudhomme, C. (2019). Water restrictions under climate change: a rhône–mediterranean perspective combining bottom-up and top-down approaches. *Hydrol Earth Syst Sci*, 23:3683–3710.

Wasson, J., Chandesris, A., Pella, H., and Blanc, L. (2002). Les hydro-écorégions de France métropolitaine, approche régionale de la typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements de référence d'invertébrés. Cemagref.

Bernard P. Zeigler, Tag Gon Kim et Herbert Praehofer (2000). Theory of modeling and simulation : Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems. Academic Press.

Troisième partie : Une démarche géo-prospective pour relier la modélisation et les enjeux du territoire *

*** et son adaptation à la crise covid**

Contenu de cette partie: Cette partie décrit la démarche géoprospective mise en œuvre sur le projet, en présentant la méthodologie, les outils utilisés et développés et les résultats obtenus.

Objectifs

La partie « géoprospective » du projet Radhy a une double finalité : d'une part, déceler les représentations individuelles qu'ont les « acteurs » du devenir de leur territoire et des changements à venir, en pointant sur les futurs possibles de l'eau et de sa gestion dans le bassin-versant du Buëch et, d'autre part, développer un outil de visualisation des résultats du modèle agro-hydrologique permettant d'améliorer leur intelligibilité, couplé à la présentation des visions des futurs de l'eau par les acteurs du terrain. Cet outil de visualisation repose sur un tableau de bord dynamique, plateforme pédagogique qui rassemble les résultats du projet, et qui peut être utilisée lors d'ateliers de restitution afin de permettre d'évaluer la validité des résultats obtenus, et de susciter échanges, discussions, mise en débat des enjeux de la gestion globale de l'eau sur le territoire. Cet aspect du projet fait partie intégrante d'une démarche de géoprospective.

Le volet géoprospectif est mené parallèlement et indépendamment de la modélisation hydrologique et multi-agents – du moins dans un premier temps –. Il n'a pas pour finalité d'opérer un diagnostic prospectif, mais de déceler le champ problématique général dans lequel la gestion de la ressource en eau prend place, et de faire émerger les perceptions de la problématique de la gestion de l'eau actuelle et future au sein du territoire, qui alimenteront la création de scénarios des futurs possibles à horizon 2050.

La démarche géoprospective adoptée dans le projet RADHY

La géoprospective est un champ de recherche émergent, porté par un petit nombre de chercheurs, Français pour la plupart, qui s'inscrit dans la lignée de la prospective territoriale (Delamarre, 2002 ; Loinger et Spohr, 2004 ; Vanier, 2015), mais qui s'en distingue à la fois par son concept, son projet et ses pratiques. Le concept est fondé sur la place centrale et incontournable accordée à la dimension spatiale dans le processus d'anticipation à moyen et à long termes du devenir du système étudié : écosystème et territoire. Comme pour la prospective, la cible visée est l'aide à l'action en matière de politique publique, d'aménagement ou de gestion. Toutefois, l'objectif premier est d'ordre scientifique et vise à appréhender, par la recherche, l'espace d'étude dans sa complexité, en cherchant à comprendre les dynamiques anthropiques et environnementales ainsi que leurs interactions spatiales à différentes échelles, dans le contexte du futur.

La démarche géoprospective initialement prévue dans le projet de recherche RADHY Buëch relève de la prospective participative menée en atelier, qui s'appuie sur la médiation par les représentations spatiales (Etienne, 2012 ; Gourmelon *et al.*, 2013 ; Lardon et Roche, 2008 ; Piveteau, 1995), lesquelles sont avant tout les vecteurs d'un espace de débat, de réflexion partagée et de construction collective des représentations socio-environnementales. Cette démarche a cependant dû être adaptée en raison de la crise sanitaire du Covid-19 et des confinements successifs du printemps et de l'automne 2020.

1. Le recueil des visions du futur de l'eau dans le Buëch : un mode opératoire adapté

1.1 La démarche géoprospective initialement prévue et sa refonte imposée par la crise sanitaire

Le protocole retenu initialement reposait sur le recueil de perceptions d'habitants du bassin du Buëch, dans le cadre d'ateliers. Il avait été décidé de ne pas limiter les « acteurs » aux élus, gestionnaires et institutionnels habituellement mobilisés dans le cadre des exercices de prospective portés par les pouvoirs publics, mais d'ouvrir la démarche à un public plus large, émanant de la population locale, qui est rarement sollicitée et pourtant directement concernée par la ressource en eau et, indirectement, par sa gestion.

Parmi les acteurs visés, nous souhaitons ainsi inclure non seulement des agriculteurs, dont l'activité prépondérante sur le territoire d'étude faisait déjà l'objet de la modélisation multi-agents, mais aussi des catégories d'acteurs relevant d'autres usages de la ressource en eau : professionnels du tourisme, de l'énergie et de l'industrie, membres d'organismes ou d'associations liés à l'environnement et à l'eau, ainsi que des habitants susceptibles d'avoir un rôle social vis-à-vis de l'eau. La participation de ces différents types d'usagers à l'exploration de futurs possibles pour la gestion de l'eau du bassin du Buëch est l'un des éléments contribuant à une vision globale de la problématique. Nous avons ainsi dressé une liste de participants potentiels en nous appuyant, d'une part, pour les agriculteurs, sur une enquête menée dans le premier volet du projet et d'autre part, pour les autres secteurs de l'eau, sur l'annuaire des professionnels et l'exploration des sites web des intercommunalités et des offices du tourisme.

Trois types d'ateliers ont été programmés au début du projet. D'abord, un atelier, réunissant des acteurs institutionnels liés à la gestion de l'eau et associés au projet de recherche, afin d'appréhender leur vision de la problématique de l'eau sur le bassin-versant, les enjeux et les tensions qu'ils observent selon les espaces. Cet atelier s'est déroulé en avril 2019. Puis un deuxième, destiné à étendre le recueil des informations et perceptions à un public élargi de participants impliqués dans la gestion de l'eau (agriculteurs, professionnels du tourisme, usagers de la rivière, associations liées à l'environnement, élus...), représentant les différents types d'usages de l'eau, devait se dérouler au printemps 2020. L'objectif assigné à cet atelier était identique au précédent, ce sont les modalités de recueil de l'information qui devaient différer, avec pour particularité de s'appuyer à présent sur des représentations spatiales du territoire, autour de cartes et maquettes en 3D, pour déceler les problèmes et enjeux actuels du territoire, hiérarchisés et localisés, vis-à-vis de la problématique de l'eau. Les informations de natures diverses recueillies devaient permettre de faire émerger les thèmes et variables afférentes à partir desquelles seraient construits différents récits du futur dans le cadre de l'atelier suivant. Ce troisième atelier devait poursuivre un double objectif. Le premier était de présenter les résultats de la modélisation scientifique réalisée parallèlement aux participants des deux précédents ateliers (Richard, 2020 ; Richard *et al.*, 2020). Pour rendre les résultats intelligibles et donc accessibles à tout public, et les utiliser comme support de débat et de participation, un travail d'explicitation et de représentation pédagogique des sorties de ces modèles devait être opéré en s'appuyant sur des visualisations intégrées à un tableau de bord dynamique. Le second objectif de l'atelier était de faire dialoguer la modélisation agro-hydrologique et les scénarisations profanes des futurs du Buëch. Le travail collectif des scientifiques et des participants à l'atelier devait notamment permettre de retenir un certain nombre de questions pour lesquelles les apports des deux démarches

Zone Atelier Bassin du Rhône

seraient croisés dans une optique opérationnelle, en particulier à destination des agriculteurs du Buëch.

Cette démarche en trois ateliers successifs a cependant dû être modifiée (Figure 22). En effet la crise sanitaire du covid-19, le confinement et les restrictions de déplacement et de rassemblement du printemps 2020 ont contraint l'équipe à annuler la tenue du deuxième atelier prévue en mai 2020, et à faire évoluer le mode opératoire initial pour pouvoir poursuivre le projet, en opérant « à distance ». La démarche méthodologique initialement envisagée a ainsi été adaptée au contexte exceptionnel de la crise sanitaire du covid-19, avec pour ligne directrice de respecter les principes de la géoprospective : place de la spatialisation des phénomènes, vision à long terme (une trentaine d'années), approche globale de la problématique de l'eau, participation de différentes catégories d'acteurs du territoire, partage de connaissances *via* un outil de médiation scientifique.

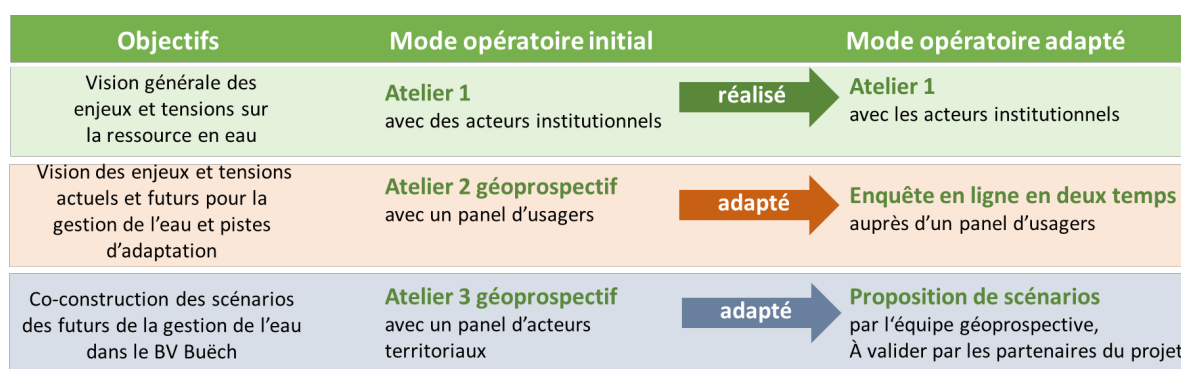


Figure 22 : L'adaptation de la démarche de géoprospective de terrain à une démarche de géoprospective en ligne pour répondre aux contraintes de la crise sanitaire de 2020-2021

Le premier atelier, qui a pu être organisé avec les acteurs institutionnels, a permis d'obtenir une vision globale des enjeux et tensions liés à l'eau sur le territoire du Buëch, tels que perçus par les personnes présentes. Ces résultats ont été très utiles pour orienter la suite de l'étude et envisager les problématiques du terrain.

En revanche **le deuxième atelier géoprospectif, avec les acteurs du territoire, a été remplacé par une enquête en ligne** en deux temps, présentée dans le paragraphe 1.2.

Le troisième atelier de co-construction des scénarios des futurs n'a pu être réalisé. Il a été remplacé par la **construction de micros-scénarios, opérée par les chercheurs de l'équipe scientifique**, à partir des représentations des futurs, issues des réponses aux deux questionnaires en ligne.

1.2 L'enquête géoprospective en ligne

L'enquête mise en place pour remplacer le deuxième atelier géoprospectif a porté sur les représentations des problèmes et enjeux actuels du bassin du Buëch et du système eau, hiérarchisés et localisés, et sur les visions de son devenir, afin de déceler « ce à quoi on tient ». Remplacer cet atelier **par une enquête en ligne** a orienté la conception et la forme du questionnaire et le choix des personnes interrogées. Ainsi nous avons opté pour la réalisation d'une enquête en deux temps, à l'aide de deux questionnaires successifs, en s'efforçant de conserver les principes majeurs d'un atelier de type géoprospectif : une approche spatiale et temporelle des phénomènes, et un échange de connaissances grâce à des documents d'accompagnement. Les thématiques abordées reflètent les lignes fortes mises en évidence lors du premier atelier. Afin de recueillir le plus finement possible les opinions des personnes enquêtées, les questionnaires adressés sont assez conséquents. À mi-chemin entre un guide d'entretien semi-directif et une enquête quantitative, chaque questionnaire couple des

questions ouvertes et des questions fermées avec de nombreuses modalités, des questions à choix multiples, des appréciations/évaluations graduées en intensité, des réponses à localiser.

Les personnes interrogées ont été sélectionnées selon leur profil socio-professionnel, avec pour objectif de constituer un échantillon représentant les différents types d'usagers de l'eau. Les personnes enquêtées ont donc été celles que l'on aurait souhaité solliciter pour participer aux ateliers. Les contacts ont été pris par téléphone puis par mail, et accompagnés de l'envoi d'un flyer présentant le projet RADHY-Buëch et la démarche de l'enquête. Sur la quarantaine de personnes sollicitées, une vingtaine a répondu à l'enquête, soit directement en ligne, soit par téléphone avec un membre de l'équipe de recherche. Elles se répartissent en 1/3 d'agriculteurs, 1/3 d'acteurs institutionnels et 1/3 d'acteurs du tourisme ou d'acteurs associatifs en lien avec l'environnement. Si cet échantillon intègre les différents types d'usagers, il n'est cependant pas statistiquement représentatif de l'ensemble de la population du Buëch. L'objectif final étant de dégager des pistes pour la construction de scénarios futurs pour la gestion de l'eau, nous avons néanmoins considéré qu'une enquête approfondie mais ciblée sur un panel d'acteurs de terrain, et non sur un échantillon plus large et représentatif de toute la population, convenait tout à fait, et pouvait refléter le panel qui aurait été celui des participants à l'atelier géoprospectif. Les résultats obtenus ont donc été exploités et relativisés en conséquence.

Comme indiqué précédemment, l'enquête s'est déroulée en deux temps et a fait l'objet d'envoi d'une documentation complémentaire.

- La première partie de l'enquête a été menée en ligne en juin 2020. Ce premier questionnaire porte sur la perception du bassin du Buëch et du système eau actuel au sein de ce territoire (Figure 23). Il intègre une grille de localisation permettant de positionner spatialement certains éléments de réponse. Les premières questions permettent d'appréhender la perception actuelle du territoire, ses atouts et ses handicaps, l'identification de priorités démographiques, économiques et sociales, environnementales, la détermination et localisation d'éléments permettant de caractériser son identité, et la mise en avant de potentiels changements majeurs dans les dix dernières années. Vient ensuite une partie orientée plus spécifiquement sur la question de l'eau : tensions sur la ressource, modes de gestion de l'eau et actions à promouvoir sont ainsi abordés et donnent ponctuellement lieu à un système de hiérarchisation des problématiques. La dernière partie du questionnaire concerne enfin le profil des participants.

Zone Atelier Bassin du Rhône

Questionnaire 1 – Résumé des questions et modes de réponses

Partie 1 – Le territoire du Buëch, aujourd'hui

Thématiques ou idées ciblées	Modes de réponses	Exemples
Perceptions des faiblesses et des avantages Les atouts et handicaps du territoire ?	• Réponses libres et cartographiées	« Authenticité, l'aspect vierge, sauvage et protégé (naturel et humain) »
Localisation d'atouts et faiblesses sur le territoire Quels sont les secteurs d'identité du territoire ? Les secteurs auxquels vous êtes le plus attaché ?		
Les priorités pour le bassin du Buëch Les priorités pour le bassin du Buëch ?	• Réponses à choix multiples par item Questions démographiques Questions économiques et sociales Questions environnementales	« Démographie, item 1 : Maintenir ou accroître le niveau de population » « Priorité Nulle » « Priorité Faible » « Priorité Moyenne » « Priorité Importante »

Partie 2 – L'eau dans le bassin du Buëch

Thématiques ou idées ciblées	Modes de réponses	Exemples
Perceptions des sources de conflits sur la ressource et des temporalités Les secteurs auxquels vous êtes le plus attaché ? Cause de tensions	• Réponses à choix multiples	« Comment évaluez-vous les tensions sur la ressource en eau ? » 0 10
Identifications des problématiques et des solutions envisagées par les enquêtés Problématiques relatives à la gestion de l'eau sur le territoire	• Réponses à choix multiples par item • Et cartographiées ensuite	« Problématique : Disponibilité de la ressource en eau pour l'agriculture » « Pas préoccupant » « Peu préoccupant » « Assez préoccupant » « Très préoccupant »
Quelles actions seraient à promouvoir pour la gestion de l'eau dans le bassin du Buëch ?	• Réponses à choix multiples avec différentes propositions d'actions	Extrait de réponses possibles ☐ Accroître les réglementations et obligation pour toutes les parties prenantes ☐ Alléger les réglementations ☐ Différencier les réglementations en fonction des situations locales

Figure 23 : Le Buëch aujourd'hui : résumé du questionnaire constituant la première partie de l'enquête sur les futurs de l'eau dans le bassin du Buëch

Source : Robiquet, 2020

- La deuxième partie de l'enquête a été réalisée en juillet 2020 auprès des mêmes participants. Ce deuxième questionnaire porte sur la vision que chaque enquêté a du futur du territoire du Buëch et du système "eau" face aux changements environnementaux et sociétaux en cours (Figure 24). Il se compose de questions portant sur les opportunités et changements (perspectives et craintes) sur le territoire du Buëch à l'horizon 2050, les paysages du Buëch dans le futur, la perception des zones du bassin les plus vulnérables face au changement climatique, la problématique de l'eau et de l'agriculture sur le territoire et les options de gestion souhaitables. Tout comme le premier questionnaire, il offre la possibilité de localiser certains éléments de réponse. Il intègre aussi des éléments photographiques aidant à la détermination des paysages souhaités ou redoutés pour le futur.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Questionnaire 2 – Résumé des questions et modes de réponses

Buëch 2050

Partie 1 – Opportunités et changements sur le bassin du Buëch

Thématiques ou idées ciblées	Modes de réponses	Exemples de réponses
A quelle temporalité se projette le panel ? Vous vous imaginez vivre / avoir la même activité	• Réponses à choix multiples	☒ En 2035 ☒ En 2050
Qu'imaginent-ils dans le futur ? Quels seront les changements majeurs sur le bassin (2020 – 2050) ?	• Réponses libres	
Quelles perspectives d'avenir, et inquiétantes ? Les perspectives préoccupantes ?	• Choix multiples ordonnés sur 12 items	Perspective jugées Exemples : « Impact du changement climatique », « Démographie locale » « Pas préoccupante » « Peu préoccupante » « Assez préoccupante » « Très préoccupante »
Quelles opportunités ?	• Réponses libres et cartographiées	

Partie 2 – Les paysages du Buëch en 2050

Etudier les éléments présents VS souhaités à l'avenir sur le territoire	Modes de réponses	Exemples de réponses
Quels éléments seront davantage présents ?	• Choix sur un lot d'images identiques 2 fois	Images pour un futur proche... A B C 1 ☒ ☐ ☐ 2 ☐ ☒ ☐
Quels éléments composent votre paysage souhaité ?		versus pour un futur souhaité... A B C 1 ☐ ☒ ☐ 2 ☒ ☐ ☐

Partie 3 – Climat et eau dans le bassin du Buëch

Evaluation des zones vulnérables au changement climatique	Modes de réponses	Exemples de réponses
Quelles zones vous semblent vulnérables ? Pourquoi ?	• Réponse libre et cartographiée	

Partie 4 – Eau et agriculture

Les priorités pour l'agriculture dans 30 ans	Modes de réponses	Exemples de réponses
Quelles questions seront cruciales dans 30 ans ?	• Réponses à choix multiples	Perspective jugées Exemples : « Politique agricole », « pénurie en eau », « démographie agricole » « Pas préoccupante » « Peu préoccupante » « Assez préoccupante » « Très préoccupante »
Comment s'adapter au changement ? Que proposeriez vous pour... augmenter la ressource, son suivi ? Comment adapter les cultures sensibles ? Quelles stratégies locales ?	• Réponses à choix multiples	Exemple : « Que proposez vous pour les cultures/élevages sensibles au changement climatique ? » ☒ Abandonner ou réduire certaines cultures ☐ Promouvoir des cultures plus adaptées

Figure 24 : Le Buëch dans le futur. Résumé du questionnaire constituant la deuxième partie de l'enquête sur les futurs de l'eau dans le bassin du Buëch.

Source : Robiquet, 2020

Ce questionnaire a été accompagné par un document de synthèse scientifique qui apporte des connaissances sur certaines données actuelles et projetées pour le bassin du Buëch : population, climat, ressource en eau. Il a pour objectif de contribuer à alimenter la réflexion des enquêtés face au questionnaire.

1.3 Traitements de l'enquête et résultats

Les questionnaires ont été traités par différentes méthodes, selon le type d'information récoltée : analyses textuelles, traitements statistiques simples à partir de codage thématique et représentations graphiques associées et, enfin, analyse spatiale des données localisées ont permis de mettre en évidence les visions du Buëch actuel et futur.

Zone Atelier Bassin du Rhône

La présentation de l'enquête et de ses résultats fait l'objet du mémoire de Master2 réalisé par Quentin Robiquet, stagiaire à l'UMR ESPACE de avril à septembre 2020 sur cette partie du projet.

Voici, à titre d'exemple, des types de résultats obtenus à l'issue de ces traitements. Ces résultats ont été choisis car ils sont directement en lien avec les composantes retenues pour la construction des scénarios des futurs du Buëch.

Tel est le cas des résultats aux questions du 2^{ème} questionnaire portant sur la perception des changements majeurs à venir et des perspectives les plus préoccupantes pour le territoire du Buëch d'ici 2050.

À la question ouverte portant sur **les changements majeurs à venir** sur le territoire du Buëch entre 2020 et 2050, les personnes enquêtées ont répondu par des groupes de mots ou des phrases. Le traitement du corpus obtenu relève de deux approches, l'une manuelle, l'autre automatique. Une codification thématique manuelle, qui consiste à attribuer des thèmes à des éléments de réponses et à sommer leur présence, a été réalisée. Ce traitement s'obtenant par une interprétation subjective de l'information (Guerin-Pace, 1997), il a été conforté par un traitement par analyse textuelle automatique avec l'utilisation du plugin R.Temis (Text Mining Solutions), sous R, qui a permis d'asseoir le codage thématique en réalisant une analyse terme-fréquence à partir de laquelle a été généré un nuage de mots (Figure 25, à gauche), et en réalisant une analyse de cooccurrence de termes (Robiquet, 2020). Parmi les changements identifiés, la question de l'eau apparaît comme prépondérante, avec « moins » d'eau, « plus » de restrictions, des « prix » plus élevés, et une baisse du nombre d'agriculteurs et de l'arrosage des cultures. Le vieillissement de la population est aussi perçu comme inquiétant.

Les réponses à la question sur **les perspectives les plus préoccupantes pour l'avenir** viennent confirmer ces premiers résultats. Cette question propose d'estimer de « Très » à « Pas préoccupante » une liste de propositions. Parmi les préoccupations majeures, on peut noter les problématiques liées à l'eau (quantité disponible et besoins), les impacts du changement climatique, l'agriculture locale et la biodiversité (Figure 25, à droite).

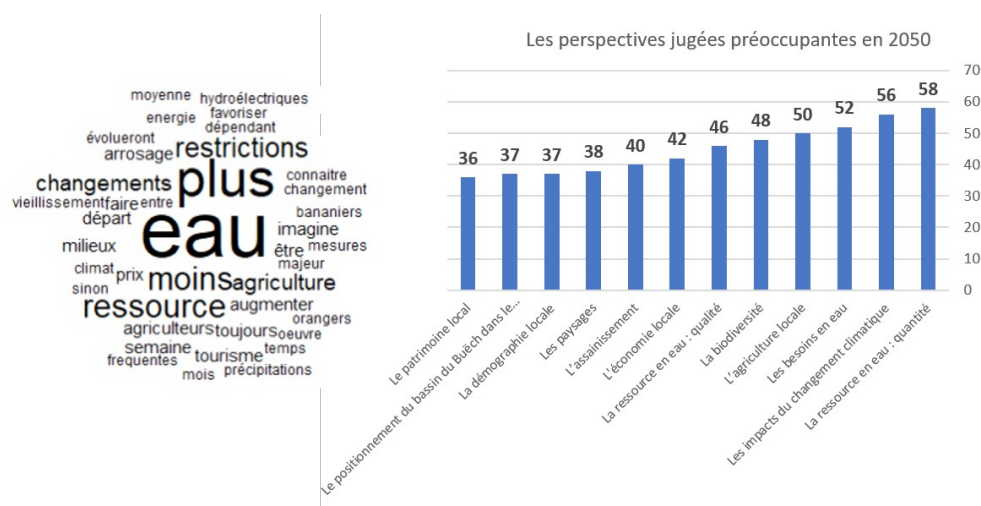


Figure 25 : à gauche : les changements majeurs à venir sur le territoire du Buëch ;
à droite : les perspectives jugées les plus préoccupantes en 2050 (comptage d'occurrence par thématiques)
Source : Robiquet, 2020

Des analyses spatiales ont aussi permis de localiser différents éléments issus de la perception des enquêtés : secteurs de handicaps sur le bassin-versant, lieux représentatifs de l'identité du territoire,

Zone Atelier Bassin du Rhône

changements majeurs survenus depuis 10 ans, localisation des problèmes actuels relatifs à l'eau, zones les plus vulnérables face au changement climatique, mais aussi opportunités pour se préparer aux changements à venir.

Deux méthodes de représentation cartographique ont été explorées.

L'une représente les scores issus de codages thématiques au centre de chaque secteur du carroyage proposé dans l'enquête. Elle permet ainsi de localiser des thèmes de réponses libres, avec les cases citées par les enquêtés. Les scores de citations élevées deviennent alors des données localisées exploitables. La figure 26 montre les secteurs de handicaps dans le bassin-versant selon cette méthode, avec les types de handicap évoqués et le nombre de citations par maille.

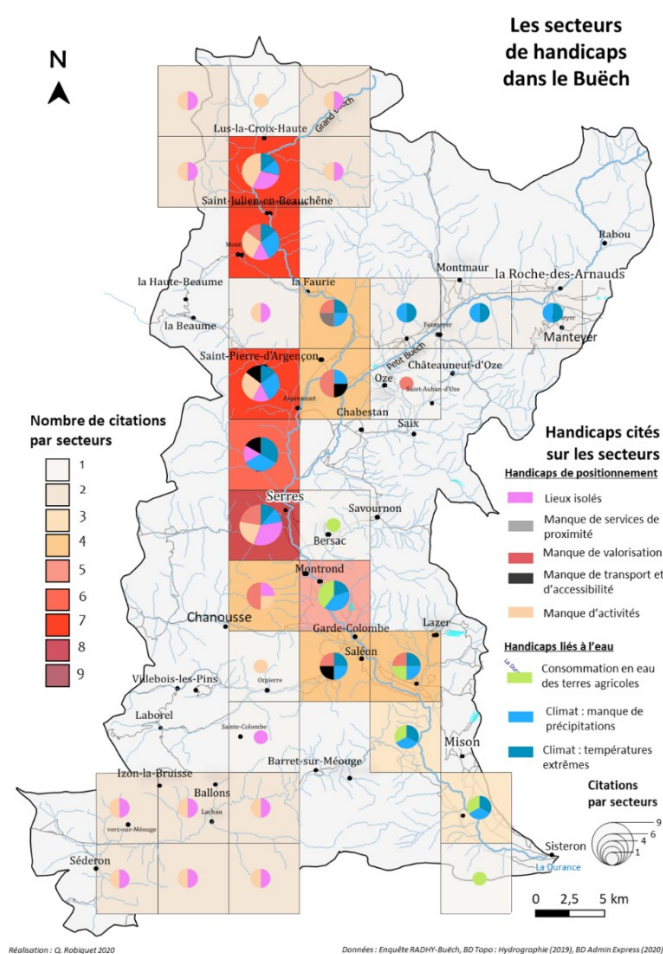


Figure 26 : Les secteurs de handicaps dans le Buëch selon l'enquête en ligne – Méthode de localisation par mailles
Source : Robiquet, 2020

L'autre méthode consiste en un traitement plus complexe. Il s'agit d'associer, pour chaque secteur cité par les enquêtés, une couche de type « point » sur un SIG, sur une couche de type « polygone » caractérisant une occupation du sol (par exemple Corinne Land Cover) sur la maille étudiée. Cette méthode permet une lecture spatiale assez aisée mais dépend fortement des choix sur la couche d'occupation du sol. Elle est à utiliser lorsqu'un ensemble de points se concentrent sur un même secteur pour une même problématique. La figure 27 met en avant les espaces sur lesquels les enquêtés ont pointé des problématiques liées à la gestion de l'eau.

Zone Atelier Bassin du Rhône

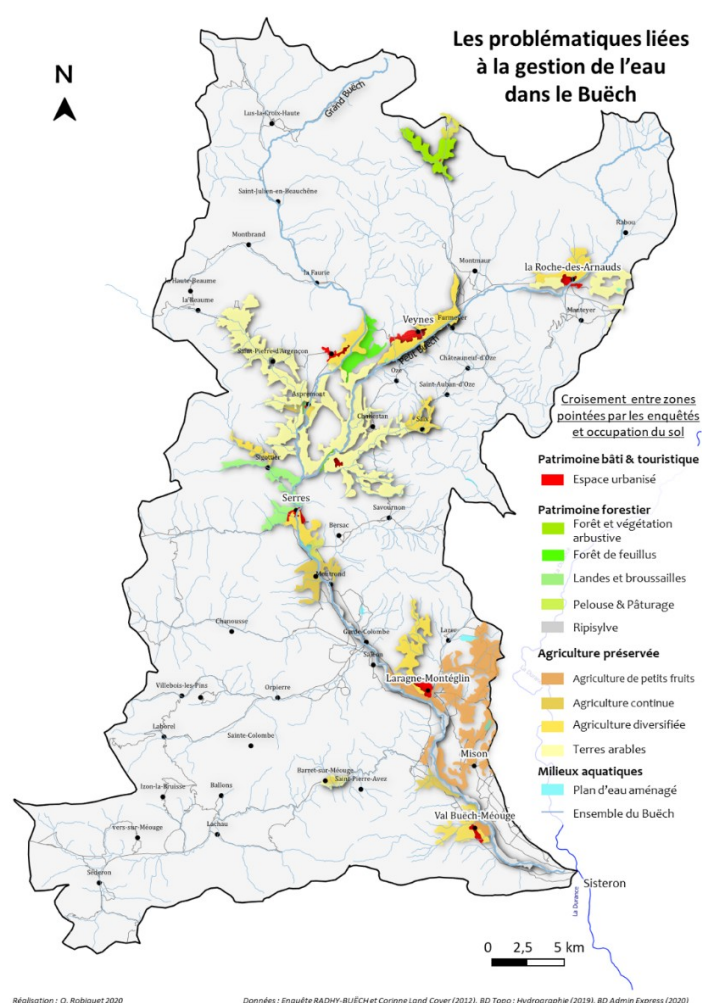


Figure 27 : Les secteurs du bassin-versant du Buëch présentant des problématiques liées à la gestion de l'eau, selon l'enquête en ligne de 2020 - Méthode de localisation par couches d'occupation du sol.

Source : Robiquet, 2020

Les visions des futurs possibles émergeant de cette enquête ont été utilisées pour aller vers une scénarisation des futurs de la gestion de l'eau dans le bassin du Buëch, qui devait être élaborée en atelier de prospective. Mais cet atelier n'ayant pu être organisé en raison des contraintes qui se sont accumulées avec la crise sanitaire, nous avons dû adapter la méthode de construction des scénarios.

2. La construction de scénarios des futurs de l'eau dans le Buëch

La scénarisation des futurs de l'eau dans le Buëch se présente sous la forme de récits construits sur les visions du futur d'un groupe. Elle diffère grandement des modes habituels de conception de scénarios. D'une part, elle ne s'inscrit pas dans un exercice de prospective stratégique étayé par des expertises mais dans une recherche visant à recueillir les représentations des futurs du Buëch d'un petit groupe d'individus vivant sur ce territoire ; d'autre part, les scénarios ne sont pas établis à partir d'analyses rétrospectives quantitatives ni de probabilités d'occurrence d'évènements mais de perceptions et de ressentis sur l'avenir de ce territoire. La substance des scénarios est fournie par les

imaginaires du futur recueillis auprès d'un groupe d'individus, selon la démarche usuelle de scénarisation de type récit.

La nouvelle démarche de construction des scénarios prospectifs contrastés se déroule en cinq étapes.

1) Dans la première étape, l'équipe scientifique détermine la liste des rubriques et des thèmes inclus dans chacune d'elles, qui caractérisent le système de la ressource en eau et de sa gestion, et qui sont porteuses d'évolutions majeures pour le futur. L'identification s'opère dans le cadre du système territorial tel qu'il a été appréhendé par l'équipe scientifique au début de la recherche, et qui a ainsi servi de trame au questionnaire. Ce système intègre des variables sur le changement climatique, les questions environnementales, l'agriculture, la démographie et l'économie, les infrastructures et les aménagements hydrauliques, la gouvernance, le contexte extra-régional national et européen. Ces variables et leurs interactions déterminent la structure et la dynamique du système territorial, en général, et du sous-système de l'eau, en particulier. C'est ce dernier qui est exploré à travers les réponses au questionnaire, et qui aboutit à la détermination des 6 composantes du système des représentations des futurs de l'eau : la perception des enjeux liés aux changements en cours et futurs dans le bassin du Buëch ; la question de l'eau dans la perception des préoccupations à venir ; les questions relatives à l'eau et à l'agriculture cruciales pour le futur ; les perceptions des tensions liées à l'eau ; les stratégies d'adaptation pour faire face aux changements à venir ; les perceptions de la gouvernance de l'eau future.

2) La deuxième étape correspond à un examen approfondi des réponses apportées à chaque question relative à une thématique, afin de déceler, d'une part, celles sur lesquelles s'observent les plus grandes divergences d'opinions et de représentations du futur, et d'autre part, les différenciations géographiques mentionnées. Ces thématiques discriminantes au regard des réponses sont alors retenues comme variables constitutives des composantes. À titre d'exemples, les réponses aux questions relatives aux « stratégies d'adaptation aux changements à venir » sont très divergentes. Ainsi, la variable « actions relatives aux restrictions d'eau en période de sécheresse », opposent ceux qui proposent de différencier les situations locales, avec plus de concertation et RETEX sur l'année précédente, et d'opter pour un modèle graduel faisant peser plus fortement les restrictions sur les structures et les particuliers qui n'ont pas mis en œuvre de dispositifs d'économies d'eau, à ceux qui demandent de réduire le volume de prélèvement autorisé en imposant l'arrosage la nuit.

3) Une fois recensées ces visions divergentes, débute la phase d'élaboration des micro-scénarios. Un micro-scénario est un récit qui propose le cheminement de la variable retenue, de la situation actuelle vers un futur imaginé selon différentes hypothèses d'évolution issues de la phase précédente (H1, H2, H3...). Chaque composante est ainsi décrite par un jeu de micro-scénarios contrastés. Cette phase qui aurait dû être conduite en atelier participatif a été réalisée par l'équipe de recherche, afin de servir de trame à l'atelier de co-construction des scénarios, qui, espérait-on, se déroulerait ultérieurement.

4) La quatrième étape est celle de la restitution de ce travail préparatoire, auprès des acteurs ayant participé au premier atelier et/ou ayant répondu à l'enquête en ligne. Le but étant de discuter sur les micro-scénarios proposés, les modifier et les compléter.

5) Enfin, vient la co-construction des scénarios globaux qui est celle de la combinaison des micro-scénarios les uns aux autres, en différents scénarios narratifs globaux sur les représentations des futurs de l'eau dans le territoire du Buëch.

Trois scénarios globaux ont ainsi été construits :

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Scénario 2050 – 1 Le Buëch résilient : une adaptation aux changements activée par l’innovation sociale

Scénario 2050 – 2 Le Buëch qui s’étiole sous les impacts du CC

Scénario 2050 – 3 Le Buëch qui résiste aux impacts du CC en se tournant vers le tourisme rural

À titre d’exemple, Le scénario 2050 – 1 est présenté ici, à travers la combinaison des micro-scénarios qui le constituent et son récit.

Scénario 2050 – 1 : Le Buëch résilient, une adaptation aux changements activée par l’innovation sociale

Composante 1. Perception des enjeux liés aux changements en cours et futurs dans le bassin du Buëch

Variable	NOM	H1	H2	H3
V1	Démographie locale	Attirer et garder les jeunes au pays	Maintenir la population résidente	Augmenter la population touristique
V2	Economie locale	Valoriser le potentiel touristique	Peser plus à l’extérieur	Miser sur le lien social
V3	Aménagement Questions environnementales	Anticiper les changements	Prioriser la qualité de vie et la durabilité	
1-V4 -1	Paysage attendu : nature & habitat	Paysage traditionnel diversifié et villages	Rivière et paysages ruraux dégradés	
1-V4-2	Paysage attendu : Agriculture	Mixité des cultures et agroécologie	Omniprésence de l’élevage	
1-V4-3	Paysage attendu : Autres activités	Tourisme diffus : Gîte rural et randonnées à vélo	Développement des campings de masse et des EnR	
1-V5-1	Paysage souhaité : nature & habitat	Maintien du paysage traditionnel et habitat groupé en village	Toujours de l’eau et bon état des milieux aquatiques	
1-V5-2	Paysage souhaité : Agriculture	Diversité des paysages agricoles et des modes d’arrosage	Agroécologie combinée à l’élevage	
1-V5-3	Paysage souhaité : Autres activités	Slow tourisme	EnR et mobilité douce	

Composante 2. La question de l’eau dans la perception des préoccupations à venir

Variable	NOM	H1	H2	H3
2-V1	Changements majeurs envisagés d’ici 2050	Changements radicaux dans les cultures et l’irrigation	L’étiolement de l’agriculture	Adaptation et résilience de l’ensemble du territoire
2-V2	Perspectives les plus préoccupantes	L’eau, dans tous ses états !	Des dégradations environnementales et patrimoniales variées	Le devenir du territoire : sa démographie, son économie notamment agricole et son positionnement vis-à-vis de l’extérieur
2-V3	Transformations paysagères exprimant l’impact du CC	L’état écologique des rivières reste bon malgré tout !	Rivières dégradées, prairies sèches et versants collinaires ravinés : stigmates du réchauffement climatique	

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Composante 3. Les questions relatives à l'eau et à l'agriculture cruciales pour le futur

Variable	NOM	H1	H2	H3
3-V1	Problèmes préoccupants liés à l'eau, aujourd'hui	S.O.S manque d'eau	Le secteur agricole à cours de ressources	Dégradation de la qualité de l'eau et intensification des conflits d'usage
3-V2	Problèmes cruciaux concernant l'eau et l'agriculture, d'ici à 2050	Des exploitations agricoles qui se débattent avec une multitude de problèmes	Des exploitations agricoles qui se débattent avec les problèmes liés à l'eau	
3-V3	Zones perçues comme les plus vulnérables	Vulnérabilité de types de milieux plutôt que de zones géographiques	A l'amont de Saint-Sauveur, la double peine : manque d'eau/inondation	L'aval de Saint-Sauveur vulnérable à la canicule et au risque d'incendie

Composante 4. Les perceptions des tensions liées à l'eau

Variable	NOM	H1	H2	H3
4-V1	Nature des tensions actuelles liées à l'usage de l'eau	Tension interne au monde agricole	Tensions entre le monde agricole et les autres activités/l'administration	
4-V2	Localisation des tensions	Sur la totalité du bassin	Dans certaines zones	
4-V3	Appréciation du mode de gestion de l'eau	Consensuel	Conflictuel	

Composante 6. Les perceptions de la gouvernance de l'eau future

Variable	NOM	H1	H2
6-V1	Actions à promouvoir pour améliorer la gestion de l'eau	Etre plus vigilant sur le respect de la réglementation	Développer les connaissances sur les volumes d'eau consommés par secteurs d'activités par modes d'irrigation et par zones géographique
6-V2	Actions relatives aux restrictions d'eau en période de sécheresse	Différencier les situations locales. Plus de concertation et RETEX sur l'année précédente. Opter pour un modèle graduel faisant peser plus fortement les restrictions sur les structures et les particuliers qui n'ont pas mis en œuvre de dispositifs d'économies d'eau.	Réduire le volume de prélèvement autorisé en imposant ou favorisant l'arrosage la nuit
6-V3	Actions pour améliorer les modes de gestion des <u>ASAs</u>	Donner plus d'autonomie aux agriculteurs par des systèmes d'adduction individuels ou des règles de partage <u>intra-ASA</u> différentes	Subventionner/organiser des recrutements pluri-ASA de gestionnaires de réseaux (gravitaires ou sous-pression) pour décharger les agriculteurs

Récit du scénario 1

En 2050, la préoccupation majeure est le devenir du territoire : sa démographie, son économie notamment agricole et son positionnement vis-à-vis de l'extérieur. Afin de relever ces défis futurs, la population locale et les décideurs ont choisi de miser sur la jeunesse, ce qui se traduit par une priorité : garder les jeunes au pays et en attirer d'autres. Pour parvenir à maintenir l'emploi et en créer de nouveaux, la posture adoptée est de s'appuyer sur les forces endogènes existantes, en tablant sur le lien social comme levier majeur du développement futur du territoire du Buëch.

Les questions environnementales devenues omniprésentes depuis le début des années 2020, conduisent les acteurs locaux à accorder beaucoup d'importance à l'anticipation des changements futurs pour tâcher de s'adapter et de prévenir les différents risques auxquels le bassin du Buëch est exposé. Les changements opérés entre 2020 et 2050 n'ont pas bouleversé le paysage du bassin du Buëch qui reste traditionnel ; la diversité est maintenue – forêt, versant collinaire, prairies sèches – les rivières sont en bon état écologique. Le type d'habitat dominant reste groupé dans les villages où se tiennent les marchés locaux. On s'efforce de créer de l'habitat collectif éco-responsable pour limiter la progression de l'habitat pavillonnaire. Les paysages agricoles sont diversifiés, couplant arboriculture et élevage, avec également une diversité des modes d'arrosage : l'aspersion domine mais les canaux gravitaires n'ont pas disparu. Les retenues sont présentes dans le paysage. Le tourisme rural à la ferme associé aux randonnées à vélo sur les petits chemins s'est développé jusqu'à se spécialiser dans le slow tourisme. Le photovoltaïque sur le toit des bâtiments est répandu ce qui n'est pas le cas des éoliennes qui restent marginales. Ce tableau est le résultat d'un processus d'adaptation et de résilience de l'agriculture locale. Les agriculteurs résistent au contexte difficile en se tournant vers le bio, les produits à haute valeur ajoutée piliers du slow tourisme. L'agriculture est plus « paysanne » et en symbiose avec les ressources paysagères : les grandes prairies appréciées des randonneurs.

Si le sujet majeur de préoccupation était, dans les années 2020, la disponibilité de l'eau, tous usages confondus, en 2050, ce sont plus globalement, les conditions d'exploitation : la démographie agricole, le foncier disponible, la pression urbaine et touristique, le choix des cultures et le mode de culture, les différents coûts (foncier, irrigation et énergie), la PAC et la concurrence extérieure. Les vulnérabilités du territoire concernent plus des milieux que des zones spécifiques, ce sont par exemple, les plaines agricoles selon les types de culture (vulnérabilité de l'arboriculture à la canicule), les bassins de vie autour des villages importants pour la pollution des stations d'épuration (rejets sauvages). Et par ailleurs, les milieux aquatiques qui sont sensibles à l'augmentation des températures.

Les tensions liées à l'eau restent très préoccupantes sur la totalité du bassin, et opposent le monde agricole et les autres activités/l'administration. En revanche, le mode de gestion de l'eau est jugé consensuel.

Les stratégies d'adaptation élaborées à partir des années 2020, pour faire face aux changements à venir, misent sur l'adaptation des jeunes agriculteurs à la contrainte de la ressource en eau, à d'autres techniques agricoles. Pour augmenter la ressource en eau on rationalise la consommation et on entretient les réseaux ; on calcule l'optimisation de la ressource non plus sur l'année mais sur le temps long. Pour l'irrigation en période de sécheresse, il s'agit de rechercher le mode d'irrigation le plus adapté aux spécificités locales. Les stratégies d'adaptation pour les exploitations agricoles s'appuient sur la réflexion collective et le partage d'expérience. Les agriculteurs promeuvent les cultures/élevages les moins sensibles à la sécheresse.

La gouvernance de l'eau a évolué, en faisant désormais la part belle à la diffusion des connaissances sur les volumes d'eau consommés par secteurs d'activités, par modes d'irrigation et par zones géographiques. De même pour les restrictions d'eau en période de sécheresse, on différencie à présent les situations locales. Il y a davantage de concertation et de RETEX sur l'année précédente. On opte pour un modèle graduel faisant peser plus fortement les restrictions sur les structures et les particuliers qui n'ont pas mis en œuvre de dispositifs d'économies d'eau. Les ASAs sont toujours présentes car, pour décharger les agriculteurs, un mode de gestion pluri-ASAs a été organisé, et confié à des gestionnaires de réseaux (gravitaires ou sous-pression) recrutés pour ce besoin.

3. La construction d'un tableau de bord dynamique pour mettre en interaction et partager les connaissances

L'objet de cette section est de présenter le système de fusion des deux piliers de la recherche que sont la modélisation fine des écoulements d'eau dans le bassin-versant d'une part, et les représentations des futurs de l'eau d'autre part, dans un outil de partage de connaissance en ligne, un tableau de bord dynamique ou *dashboard* (Figure 28).

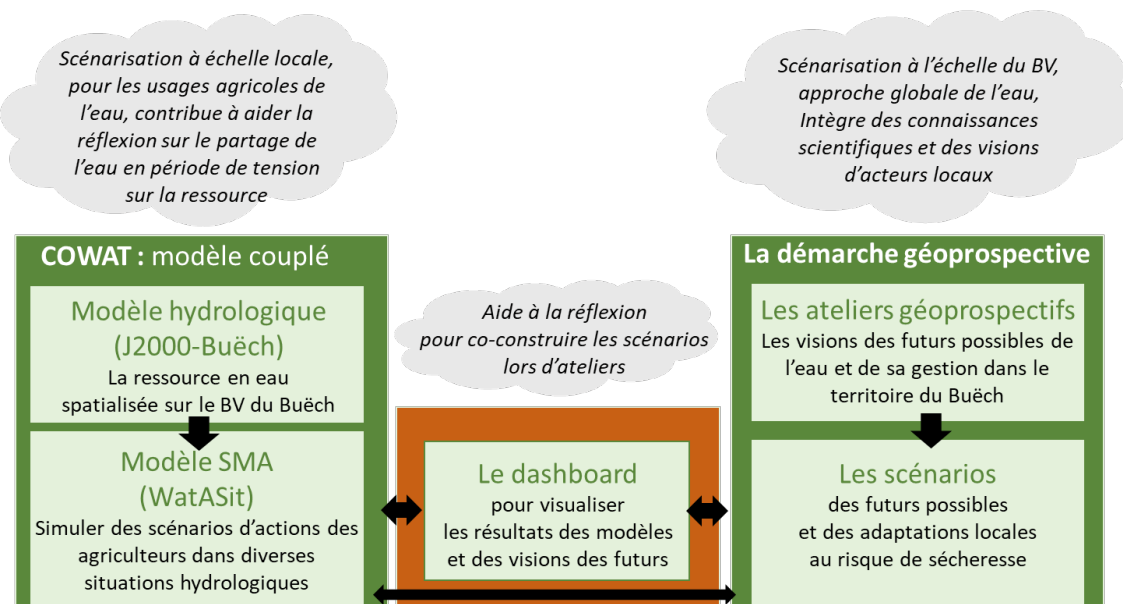


Figure 28 : Le dashboard comme outil de partage des connaissances du projet

Source : d'après Dubus et al., 2021

Les tableaux de bord dynamiques ou *dashboards* sont une extension informatique des sciences cognitives dans le domaine quantitatif. Ils sont fortement liés aux systèmes d'informations dont ils permettent l'exploitation des données. En conséquence, leur construction repose sur une finalité qui s'appuie sur une interface de visualisation et d'interaction (Ahn et al., 2019). Il ne s'agit donc pas seulement d'accéder facilement à un entrepôt de données mais bien de permettre à des acteurs de construire un point de vue sur une situation pour décider de la conduite à tenir sur le plan stratégique ou opérationnel.

- Structure du *dashboard*

Parmi les documents présentés dans le *dashboard* figurent les résultats émanant du modèle hydrologique. Il est néanmoins important de noter que les simulations lancées sur ce modèle sont réalisées dans un environnement indépendant. Les résultats sont fournis au *dashboard* au travers d'un fichier *shape* qui est un standard d'échange de données spatiales et attributaires. Il aurait été en effet trop complexe d'établir un système de liaison dynamique entre le modèle hydrologique et le volet visualisation/interaction. Les conséquences en termes de temps de calcul et d'affichage des résultats dans un navigateur auraient rendu impossible la co-construction.

De même, les cartes de l'enquête, géoréférencées, sont exposées et peuvent être superposées sur les cartes issues des simulations hydrologiques. L'observation de cette superposition est assez évocatrice pour nourrir le processus de scénarisation, et pour susciter, chez les acteurs, des « commandes » de nouvelles simulations à effectuer dans le modèle hydrologique. Il convient alors d'at-

tendre que les données du modèle soient intégrées à nouveau dans la base de données pour y accéder via l'interface de visualisation (Figure 29).

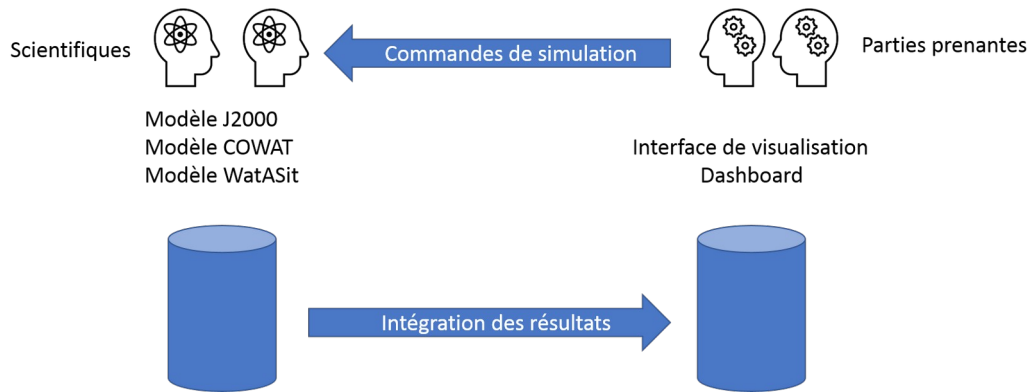


Figure 29 : Processus de dialogue entre scientifiques et parties prenantes
Source : Voiron et al., 2022

- Interface et systèmes d'interactions

Quelques exemples de formes d'interactions offertes par les outils de visualisation du *dashboard* sont présentés. La figure 30 ci-dessous illustre l'interface principale de l'outil.

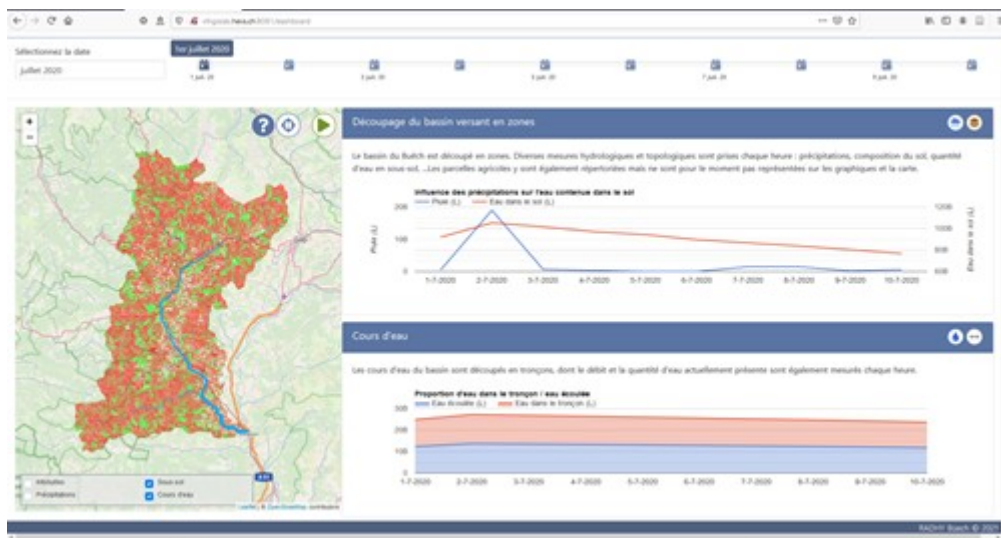


Figure 30 : Interface de visualisation et d'interaction des données du projet RADHY
Source : Voiron et al., 2022, d'après Loubier et al., 2020

Sur la partie gauche de l'écran, le bassin-versant du Buëch est représenté sur une carte et découpé en polygones qui correspondent au modèle de simulation des écoulements (Richard, 2020). Plusieurs informations sont disponibles : précipitations, eau présente dans le sous-sol, cours d'eau et informations diverses sur la topologie (altitude, composition du sol). Il est possible de paramétrer cette carte à travers un menu de cases à cocher. Par exemple, si la case sous-sol est active, les zones vont se colorer selon un gradient rouge-vert en fonction de la quantité d'eau présente en sous-sol sur un polygone donné (configuration visible sur la figure 30). La partie droite de l'interface de vi-

Zone Atelier Bassin du Rhône

sualisation propose un accès aux données de manière temporelle, sous une forme graphique. L'utilisateur peut suivre l'évolution chronologique sur la ligne du temps située en haut de l'interface.

Comme évoqué plus haut, il est également possible de coupler différents documents produits par le projet au travers de cette interface. À titre d'exemple, la figure 31 présente 3 cartes thématiques issues des différents volets du projet : le modèle hydrologique J2000 Buëch, une carte de visualisation des précipitations du 20 juin 2020, et une carte issue de l'enquête géoprospective, représentant le positionnement (cases) et l'occurrence des problématiques liées à l'eau, selon les acteurs interrogés.

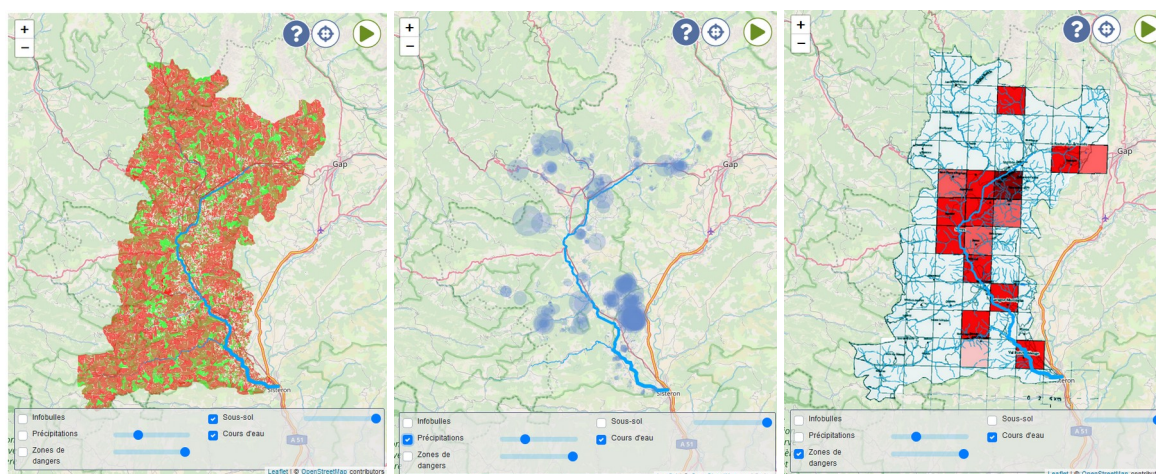


Figure 31 : à gauche, Modèle hydrologique J2000 Buëch ; au centre, les précipitations du 20 juin 2020 ; à droite, les occurrences des problématiques liées à l'eau, d'après l'enquête géoprospective 2020

La figure 32 illustre un exemple de couplage visuel entre ces cartes. La carte à gauche montre la superposition de la carte de la quantité d'eau dans le sous-sol et des occurrences des problématiques liées à l'eau d'après l'enquête (cases), celle de droite la superposition de ces mêmes cases et d'une configuration de précipitations spatialisée (celle du 20 juin 2020).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

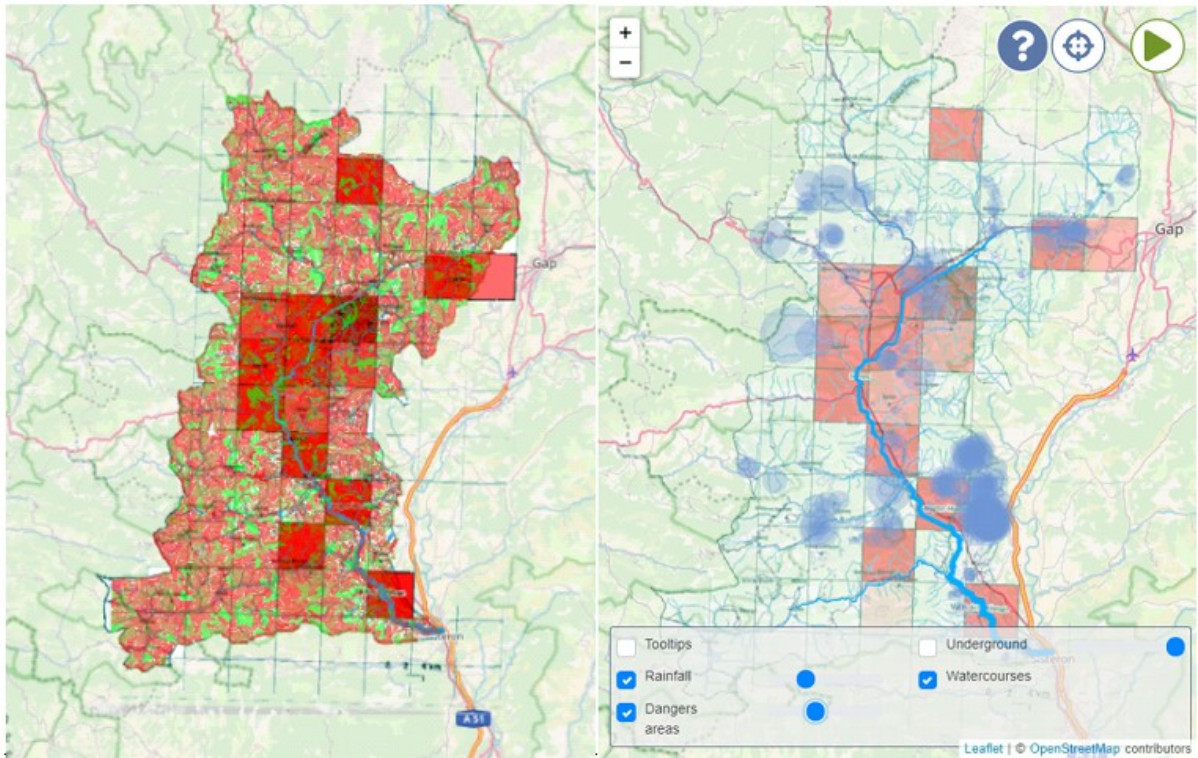


Figure 32 : Superposition de la carte des problématiques liées à l'eau avec celles du modèle hydrologique

L'utilisateur peut ainsi afficher et gérer un grand nombre de situations et de cartes tout en interrogeant facilement les données du modèle hydrologique grâce à des outils simples comme des infobulles qui remontent les informations attachées aux unités spatiales du modèle (Figure 33). Enfin, l'utilisateur peut jouer sur l'échelle de visualisation en temps réel. Il peut zoomer jusqu'au niveau d'un polygone en particulier, pour appréhender les informations à une échelle fine (Figure 34).

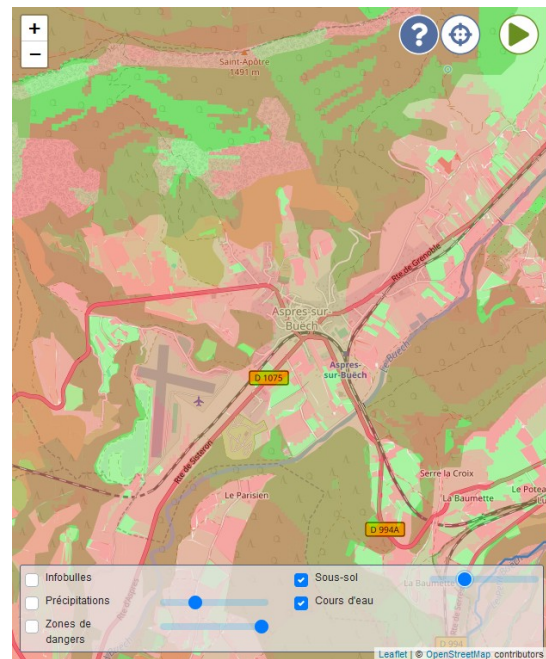
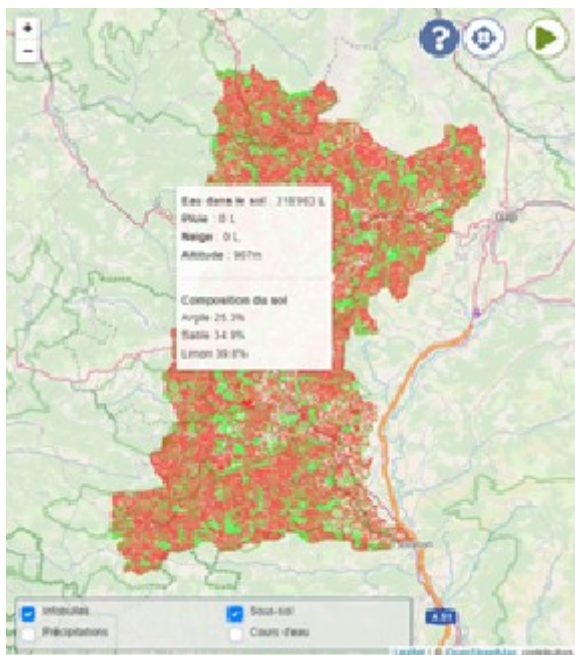


Figure 33 : Exemple d'infobulle sur la partie cartographique Figure 34 : Zoom de J2000 sur Aspres du Buëch

Zone Atelier Bassin du Rhône

Il existe ainsi de nombreuses possibilités de naviguer dans les données au travers des configurations possibles du *dashboard*. Ces données sont présentées à l'échelle globale du bassin-versant et permettent de soutenir la co-construction. L'objectif de ce *dashboard* est donc de permettre aux acteurs sans connaissances particulières en informatique ou en analyse de données, d'interroger la masse d'informations disponibles, de les mettre en relation pour construire un point de vue sur la thématique dans le cadre de ce projet. De cette façon, le *dashboard* est conçu pour être le moyen central de liaison entre la partie modélisation et la partie géoprospective. En ce sens, il représente un outil de géogouvernance (Masson-Vincent *et al.*, 2011 ; Dubus *et al.*, 2015) et une aide à la réflexion anticipative des futurs de l'eau.

Publications / communications sur le projet

Dubus N., Voiron-Canicio C., Loubier J.-C., Robiquet Q., 2021, RADHY-Buëch : Vers la construction de scénarios des futurs possibles de la gestion de l'eau dans le bassin du Buëch : approche méthodologique, *Séminaire scientifique ZABR - Observation sociale des territoires fluviaux*, Lyon, 13 décembre 2021

Loubier J.-C., Voiron-Canicio C., Dubus N., Bonté B., Barreteau O., Braud I., Richard B., Robiquet Q., 2020, Modéliser et co-construire pour une meilleure gestion de l'eau, *Conférence Smart Water 2020*, Verbier, Suisse, Octobre 2020.

Robiquet Q., 2020, *Les futurs possibles de la gestion de l'eau dans le bassin du Buëch, co-construction et géoprospective en ligne*, Mémoire de stage M2, UMR 7300 ESPACE, Master GEOProspective, Aménagement et Durabilité des territoires, Université Côte d'Azur, Nice, 113 p.

Voiron-Canicio C., Dubus N., Loubier J.-C., Robiquet Q., Favre P., Favre P., Reichenbach J., 2022, La géoprospective comme aide à la réflexion sur les futurs possibles de l'eau et de sa gestion : exemple d'une recherche en cours dans le bassin-versant du Buëch, *revue Géocarrefour [en ligne]*, 96/2 | 2022, n° thématique « Chercheurs d'eaux au temps des changements globaux », URL : <https://journals.openedition.org/geocarrefour/18874>

Références bibliographiques pour la partie 3

AHN J., CAMPOS F., HAYS M., DIGIACOMO D., 2019, Designing in Context: Reaching beyond Usability in Learning Analytics Dashboard Design, *Journal of Learning Analytics*, vol. 6, n° 2, p. 70-85.

DELMARRE A., 2002, *La prospective territoriale*, Paris, La documentation française, collection « Territoire en mouvement », 110 p.

DUBUS N., VOIRON-CANICIO C., EMSELLEM K., CICILLE P., LOUBIER J.-C., BLEY D., 2015, Géogouvernance : l'espace comme médiateur et l'analyse spatiale comme vecteur de communication entre chercheurs et acteurs, *Actes du Colloque International du GIS Démocratie et Participation « Chercheur.es et acteur.es de la participation : Liaisons dangereuses et relations fructueuses »*, Paris, 29 et 30 janvier 2015.

ETIENNE M., 2012, La modélisation d'accompagnement : une forme particulière de géoprospective, *L'Espace géographique*, 2012/2, Tome 41, p. 128-137.

GOURMELON F., CHLOUS-DUCHARME F., KERBIRIOU C., ROUAN M., BIORET F., 2013, Role-playing game developed from a modelling process: a relevant participatory tool for sustainable development? A co-construction experiment in an insular biosphere reserve, *Land Use Policy*, vol. 32, p. 93-107.

GUERIN-PACE F., 1997, La statistique textuelle. Un outil exploratoire en sciences sociales, *Population*, 52^e année, n° 4, p. 865-887

LARDON S., ROCHE S., 2008, Représentations spatiales dans les démarches participatives : production et usages, *Revue internationale de géomatique*, vol. 18, n° 4, p. 423-428.

LOINGER G., SPOHR C., 2004, *Prospective et planification territoriales : Etat des lieux et propositions*, Note du Centre de Prospective et de Veille Scientifique n° 19.

MASSON-VINCENT M., DUBUS N., HELLE C., JACOB F., LAMPIN-MAILLET C., VOIRON-CANICIO C., 2011, Information géographique, analyse spatiale et géogouvernance, *L'Espace géographique*, 2011/2, Tome 40, p. 127-132.

PIVETEAU V., 1995, *Prospective et territoire : apport d'une réflexion sur le jeu*, Etudes Gestion des territoires, n° 15, Cemagref Editions, 298 p.

RICHARD B., 2020, *Coupling agent-based and agro-hydrological modeling to represent human actions within an agro-hydrosystem. Application to collective irrigation in the Buëch catchment (France)*, Thèse de doctorat en Science de l'Eau, Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France, Paris, 315 p.

RICHARD B., BONTÉ B., BARRETEAU O., BRAUD I., 2020, L'abandon des tours d'eau et ses conséquences opérationnelles sur les systèmes collectifs d'irrigation. Une approche multi-agents situationnelle appliquée à un canal gravitaire de Moyenne Durance (France), *La Houille Blanche*, vol. 4, p. 43-55.

ROBIQUET Q., 2020, *Les futurs possibles de la gestion de l'eau dans le bassin du Buëch, co-construction et géoprospective en ligne*, Mémoire de stage M2, UMR 7300 ESPACE, Master GEOPRProspective, Aménagement et Durabilité des territoires, Université Côte d'Azur, Nice, 113 p.

VANIER M., 2015, 28 scénarios de prospective territoriale pour la France : relecture transversale, *L'Information géographique*, 2015/2, vol. 79, p. 79-91.

Annexes

Annexe 1: les personnes enquêtées au cours du diagnostic agraire

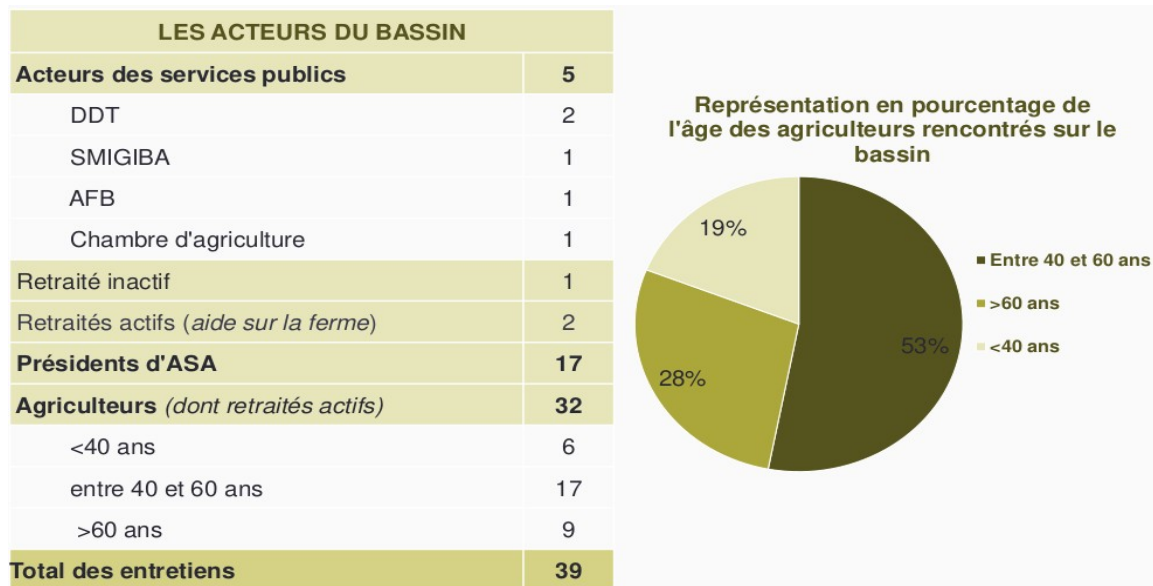


Figure 35: Type de personnes interviewés dans le cadre du diagnostic agraire (C. Distinguin, 2019).

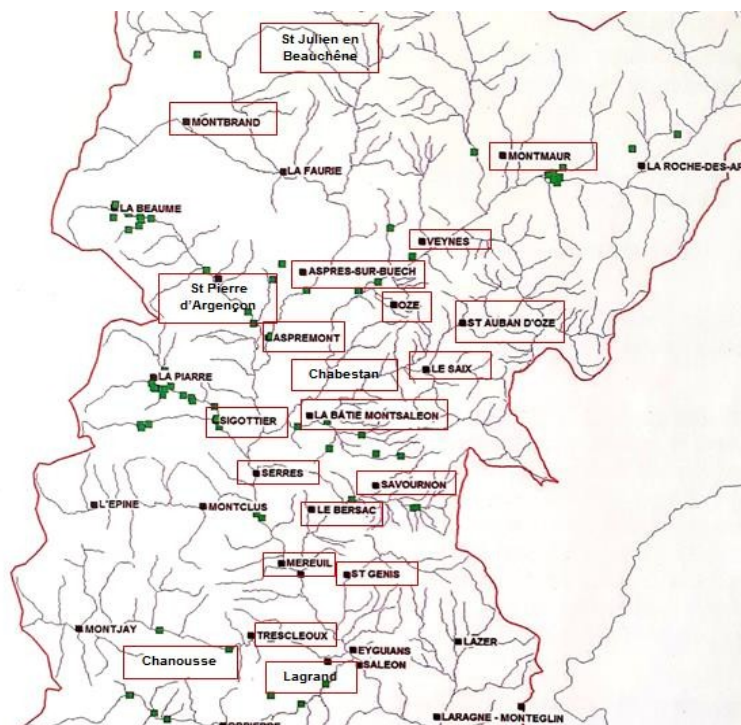


Figure 36: Carte de la localisation des agriculteurs et agricultrices rencontrés. (C. Distinguin, 2019)

Annexe 2 : Exemple de caractérisation de système d'élevage : L'élevage ovin

L'élevage ovin des territoires du Buëch est principalement agropastoral. Il est associé à l'utilisation des fourrages spontanés ou pâturés et à la culture de fourrages pâturés ou récoltés et stockés pour la distribution hivernale. La taille des troupeaux est variable pouvant aller jusqu'à 600 brebis nourries au pâturage toute l'année. Les éleveurs recherchent l'autonomie de leur troupeau en associant les prairies cultivées, les cultures céréalières et les parcours. La conduite du troupeau est différente selon les choix et la disponibilité des ressources : certains pratiquent la transhumance quand d'autres préfèrent avoir recours à des landes et parcours à proximité de leur exploitation. Les troupeaux de plusieurs sont regroupés en un troupeau communal confié à des bergers qui assurent la surveillance et les soins durant toute saison de la transhumance. Entre temps, les paysans peuvent pleinement se consacrer aux travaux agricoles, moisson et fenaison dans la vallée.

L'abattage des agneaux se fait majoritairement à Sisteron. « Le degré, le mode et la période de finition des agneaux dépendent du mode d'alimentation du troupeau, lui-même conditionné par la position de l'exploitation dans l'espace et la disponibilité des moyens de production de l'agriculteur ou de l'agricultrice : terres irriguées, surfaces labourables, parcours et landes, estives, main-d'œuvre, disponibilité en équipements) » (Aubron et al, 2015). Quelques élevages sont engagés dans un signe de qualité : IGP « Agneau de Sisteron », Label Rouge/Bio. Certains se diversifient et associent la pratique de l'élevage ovin à une autre activité comme l'arboriculture, le maraîchage ou encore un autre élevage (chèvres, ferme de repousse, ânes, apiculture, etc.).

Annexe 3 : Exemple de caractérisation de système de production : SP 1.1 : Les éleveurs d'ovins viandes transhumants dans les alpages

Il s'agit d'un sous-groupe des systèmes productifs de type SP 1 : « Eleveurs en amont du bassin versant non sécurisés en eau d'irrigation : irrigation gravitaire et aspersion » dont les pratiques d'irrigations sont caractérisées de la manière suivante :

Ces éleveurs-agriculteurs font partie d'une ou plusieurs ASA gravitaire et/ou ASA en aspersion non sécurisées en eau. Elles sont dites « non sécurisées eau » car la prise d'eau est réalisée à partir de prélèvements effectués dans les cours d'eau et sources. Les parcelles irriguées sont, soit en propriété, soit en fermage. L'irrigation par aspersion est assurée par divers matériels d'irrigation : enrrouleurs, canons, petits jets, goutte à goutte, etc. L'irrigation est consacrée aux prairies naturelles, aux légumineuses, aux maraîchages, aux arbres fruitiers et occasionnellement aux céréales au cas où il n'y aurait pas assez de pluies. Les réseaux des ASA en aspersion sont anciens et supportent difficilement les prélèvements à outrance des usagers, lors des périodes estivales. Les tuyaux sont sous dimensionnés et les débits pas assez conséquents. Certains réseaux ont été faits en 1956 et ne sont plus adaptés à la technicité des équipements d'aujourd'hui. Certaines de ces fermes irriguent les

prairies naturelles avec de petits jets situés autour de l'exploitation pour rapidement déboucher les jets incrustés par le calcaire et changer les tuyaux. Les luzernes situées plus loin, sont arrosées par des enrouleurs, matériel favorable aux grandes parcelles et moins contraignants pendant leur fonctionnement. Lorsque l'enrouleur est mis en marche, l'agriculteur ou l'agricultrice peut se consacrer à une autre activité. Les canaux gravitaires vieillissants avec le temps, irriguent principalement les prairies naturelles, bien adaptées à ce système d'irrigation.

Les diverses stratégies des irrigants SP1

- Irrigation après une fauche de prairies permanentes ou temporaires
- Martelière ouverte jusqu'à immersion totale de la parcelle
- Localisation des martelières en fonction de la topographie des parcelles
- Utilisation de l'irrigation par canaux gravitaires pour les prairies naturelles
- Irrigation des parcelles en fonction des stratégies de gestion de troupeau et de la rentabilité financière des cultures irriguées :
 - Irrigation des prairies autour de la bergerie lors des périodes d'agnelage pour faciliter l'accès des besoins alimentaires des brebis
 - Irrigation des cultures maraîchères et des semences
- Adaptation des quantités d'eau en fonction des types de sols : différence entre un sol argileux et un sol drainant qui filtre l'eau
- Investissement dans des enrouleurs plus économes en eau
- Irrigation des parcelles en fonction de l'état de stress hydrique de la plante
- Positionnement du matériel d'irrigation et/ou adaptation du matériel d'irrigation en fonction du débit délivré à la sortie du réseau et du relief de la parcelle
- Irrigation en fonction des tours d'eau (si ASA gravitaire organisée en tour d'eau)
- Irrigation la nuit : moins de vent pour l'irrigation par aspersion, meilleur débit car moins de prélèvements en eau par les usagers (particuliers et agriculteurs)
- Production de cultures moins consommatrices en eau telles que les céréales et les luzernes

Les indicateurs des besoins en eau d'une parcelle :

- Le sol argileux forme des écartes (fissures)
- La végétation sur les sols de grès commence à sécher
- Utilisation d'un saut pour connaître la quantité d'eau pluviale
- Après la fauche d'une prairie temporaire ou naturelle
- Le changement de couleur du feuillage des arbres
- Le pissenlit qui commence à faner
- La fréquence de la pluviométrie

Description des agriculteurs SP 1.1 enquêtés :

Ces éleveurs sont tous originaires du milieu agricole, ils ont repris une exploitation familiale. Il y a d'un côté des éleveurs âgés d'une cinquantaine d'années et de l'autre des éleveurs plus jeunes, âgés de trente à trente-cinq ans. L'activité principale est l'élevage de brebis pour la production d'agneaux de bergerie. Certains agriculteurs et agricultrices rencontrés pratiquent en plus de l'éle-

vage d'ovin, un élevage supplémentaire. Ces associations d'espèces animales peuvent être liées à l'installation d'un membre de la famille ou d'une opportunité qui s'est présentée à l'éleveur. La combinaison des espèces apporte de multiples avantages à l'éleveur tels que la sécurisation du revenu et le rôle de production complémentaire. Par exemple, le fils d'un agriculteur souhaitait s'installer avec son père sur l'exploitation mais l'exploitation n'était pas suffisamment dimensionnée pour leur assurer un revenu à chacun. Par manque de terres, le père a décidé de construire une chèvrerie afin de mettre en place un atelier caprin lait. L'avantage de cette alternative a permis à la fois de développer une nouvelle activité et d'assurer une nouvelle rentrée d'argent. Aujourd'hui, l'activité fonctionne bien et ils comptent augmenter le troupeau de chèvres et diminuer les brebis qui sont plus contraignantes (présence du loup dans les estives, gardiennage, etc.).

Ces fermes se situent en amont du bassin. Ces agriculteurs et agricultrices recherchent avant tout l'autonomie alimentaire de leur troupeau en associant des prairies naturelles/temporaires, des cultures de céréales et des parcours et estives alpins. La surface agricole utile de ces fermes varie entre 70 et 135 hectares. Ils travaillent seuls mais bénéficient de l'aide familiale. Les surfaces de la ferme sont dominées par des landes et des bois, suivis de prairies naturelles et temporaires, et enfin, par la production de céréale dont la totalité des rendements est souvent destinée à l'élevage. En fonction des typologies des sols de la ferme, les terres lourdes ne sont pas propices à la production de céréales de printemps. La première année, la luzerne est souvent semée sous couvert d'une céréale pour ne pas que l'agriculteur/l'agricultrice perde une année. Certains éleveurs, par manque de temps et de matériels agricoles, font appel à des entreprises privées pour les labours des terres, les moissons et les semis. Un gain de temps pour eux car ils n'ont ni à s'occuper des terres et ni à s'occuper de l'entretien du matériel et surtout cela représente un gain financier car ils n'ont pas d'investissement à faire pour acquérir le matériel. La taille des troupeaux rencontrés varie entre 300 et 400 brebis en label rouge IGP « Agneau de Sisteron » ou label biologique. L'IGP « Agneau de Sisteron » n'a pas de réglementation pour le nombre d'antibiotiques donnés aux animaux, tout dépend du poids et de la taille de la carcasse.

Les brebis sont soit des races Préalpes soit des Mérinos d'Arles. Certains éleveurs font le choix de changer de race, en passant des Préalpes au Mérinos, qui sont plus petites, plus grégaires et mieux adaptées aux conditions des alpages. La conduite du troupeau est basée sur deux périodes d'agnelage, le départ en estive conditionne les dates de mises-bas. La période d'agnelage dure environ trois semaines. Il y a un agnelage au printemps et un agnelage en automne qui se déroulent comme suit :

- Une période de mise-bas au printemps, d'avril à mai (lutte d'automne de septembre à décembre). Les agneaux naissent dans la bergerie et sortent vers l'âge de deux mois puis sont engraisés à partir du sevrage. Les brebis qui ont agnelé restent sur les prairies autour de la bergerie quant aux autres, elles partent en montagne vers le 10 juin pour redescendre vers le 10 septembre ou le 1^{er} octobre selon les éleveurs.
- Une deuxième période de mise-bas à l'automne, de septembre à octobre (lutte de printemps). Celle-ci se déroule pendant la période de transhumance. Un lot de brebis en estive

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

redescend vers la mi-août pour agneler en septembre. Les brebis sont alimentées par un apport de foin et d'orge ou d'avoine.

La viande ovine est ensuite vendue en vente directe ou à des bouchers. Pour la vente directe, l'éleveur fait agneler un lot de brebis tous les trois mois pour bénéficier d'agneaux toute l'année. Le calendrier de travail doit être adapté en fonction des naissances. Les brebis de réforme sont engraisées puis transformées en merguez ou saucisses par un atelier de découpe local.

La pratique de la transhumance estivale permet aux agriculteurs de se libérer du temps pour les périodes de fenaison et de moisson et d'économiser de la nourriture pour les brebis l'hiver. Dans un contexte de sécheresse en été, la transhumance permet de combler les potentiels déficits fourragers estivaux causés par différents facteurs : manque de superficies irriguées, de surfaces de prairies, de landes ou de parcours adaptés aux pâturages par exemple. De plus, l'accès aux estives suppose que l'agriculteur ou l'agricultrice appartienne à un groupement pastoral (rassemblement de plusieurs troupeaux confiés à un seul berger) ou qu'il/elle ait les moyens financiers d'engager un berger. Une partie du troupeau part en montagne vers le 10 juin et redescend vers le 10 septembre. Les brebis pleines restent sur l'exploitation pour réaliser un agnelage au mois de mai.

La Figure présentée dans le corps du document en fin de deuxième partie présente une synthèse de ce type de système productif.

Annexe 4 : Vérification du modèle hydrologique

Conservation de la masse

Afin de vérifier le bon fonctionnement du simulateur, nous avons développé un modèle spécifique dans la plateforme de simulation J2000 qui permet de vérifier qu'il n'y a pas de « perte d'eau » lors de la simulation, c'est à dire qu'à tout moment simulé, toute l'eau qui est comptée en entrée du bassin versant dans le modèle (par la pluie ou la neige), soit ressort par l'exutoire ou l'évapotranspiration, soit est stocké entre dans le bassin. La Figure N ci-dessous présente un exemple de résultats de cette vérification. Le graphique du haut montre que la « perte » d'eau ne dépasse pas 2 L par jour. Ces « pertes » dues aux approximations sur la précision des valeurs réelles sont considérées comme négligeables. Le graphique du milieu montre les calculs d'entrées sorties de volumes d'eau à l'échelle du bassin (pluie et neige en entrée et évapotranspiration et débit à l'exutoire en sortie). Le graphique du bas présente le calcul de l'évolution des stocks d'eau dans les brins de rivières et dans les HRUs.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

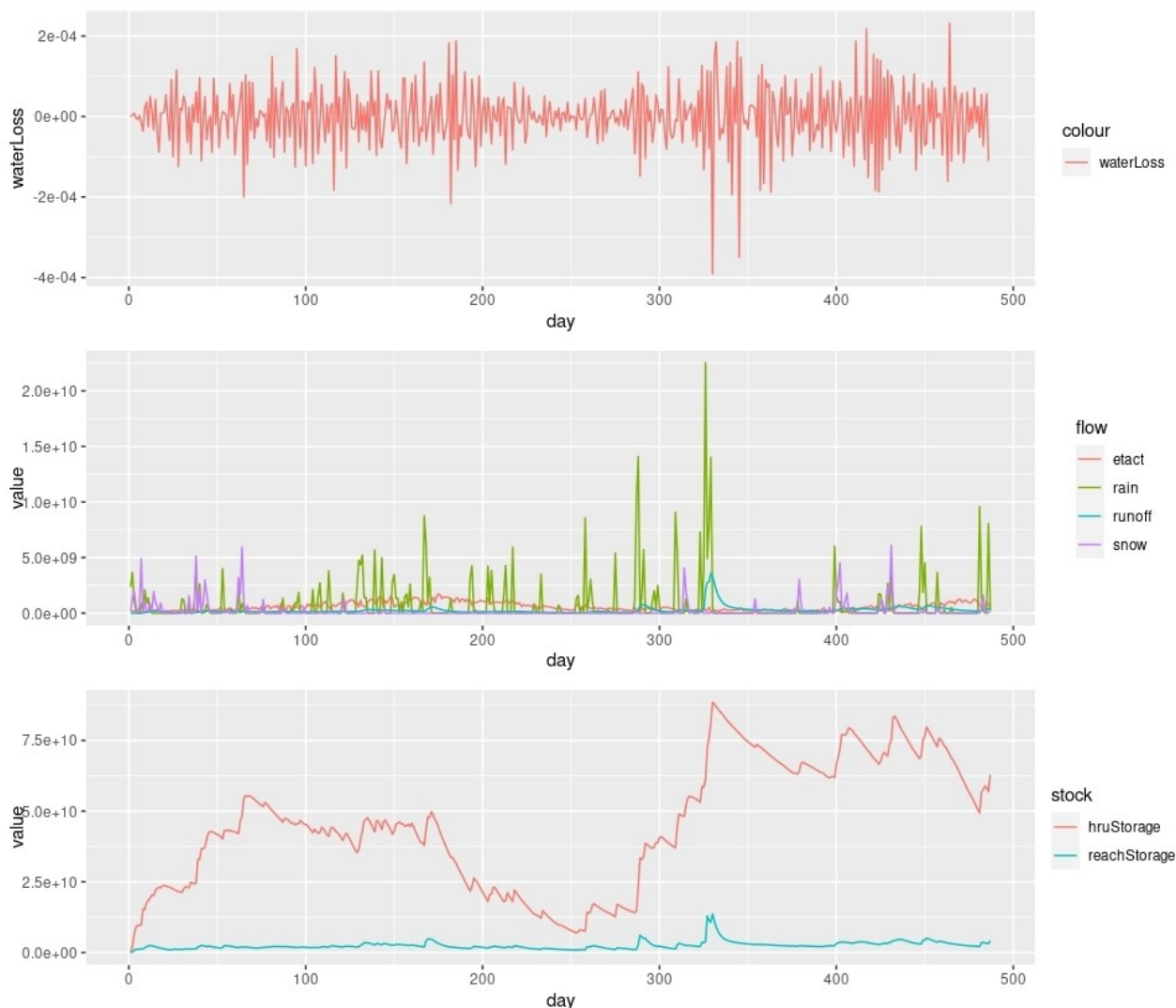


Figure 37 : Exemple de résultat de l'outil de vérification de la conservation de la masse.

Vérification et calcul de la topologie

Dans les modèles hydrologiques distribués l'espace est dit topologique c'est à dire qu'il n'est pas représenté de manière continue mais est comme un ensemble de lieux considérés chacun comme une entité homogène en interaction avec les autres lieux. L'interaction prend la forme d'une relation amont-aval : on considère que l'eau présente dans lieu amont va « se jeter » dans le lieu situé en aval. On considère deux types de lieux : les HRUS (« Hydrological Response Units ») qui représentent des bouts de sol et constituent une sorte de dallage de l'ensemble du bassin ; et les brins de rivière (« reaches » en anglais) qui, mis bout à bout constituent la rivière.

Le calcul de l'identification des HRUs dans le bassin, c'est à dire le découpage du bassin versant en zones considérées comme homogènes hydrologiquement dans le bassin et comment les connecter entre elles, est réalisé de manière automatique par un logiciel prenant en entrée un ensemble de couches d'informations géographiques (Modèle Numérique de Terrain, cartes géologiques, cartes d'occupation du sol, etc.). Ce programme a intégralement été recodé dans le cadre du projet pour

être plus accessible et évolutif (langage de programmation plus moderne et utilisation d'un logiciel de suivi de version). Le code est disponible sur demande et a été « transféré » à la communauté française d'utilisation de J2000 animée depuis l'UMR RiverLy. Tous le code est disponible sur le serveur de développement logiciel Inrae à l'adresse suivante (<https://gitlab.irstea.fr/hru-delin-dev/hru-delin/-/tree/master>) et documenté à l'adresse suivante (<https://gitlab.irstea.fr/hru-delin-dev/hru-delin/-/wikis/home>). À noter cependant qu'il semble que si le code est mis à jour par la communauté J2000 française ce n'est peut-être pas le cas de la documentation qui semble être restée en l'état où nous l'avons fournie.

De plus des scripts R ont été développés pour permettre de visualiser les typologies créées sous forme de graphes tels que ceux de la Figure N. On y remarque la structuration liée au HRU parcelles dans le graphe qui zoom sur les HRUs se jetant dans le brin 76200 : en haut à gauche du cadre par exemple on voit que plein de HRUs (les HRUs parcelles) se jettent dans la même HRUs (la HRU mère).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

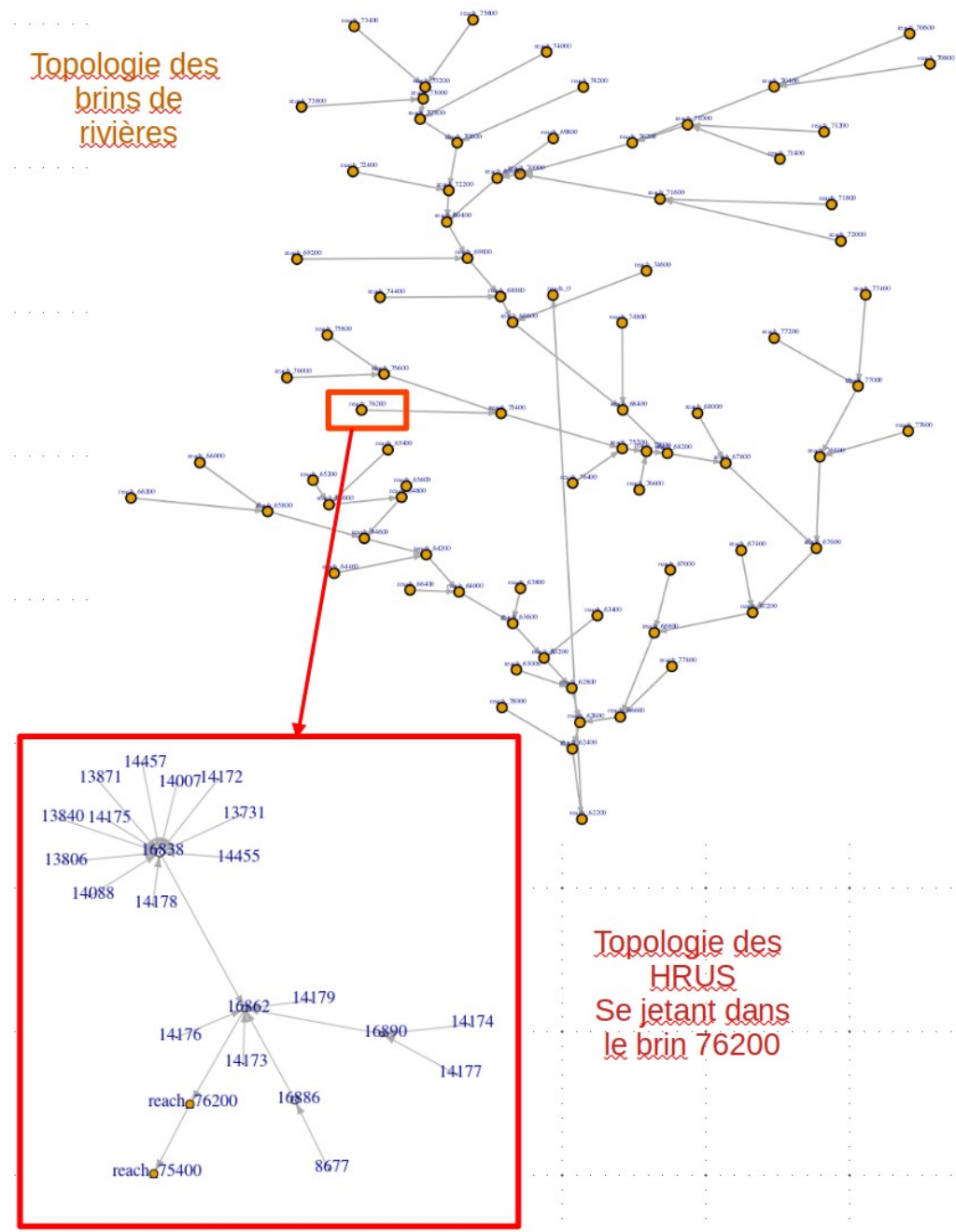


Figure 38 : Visualisation de l'espace topologique des brins de rivières (graphe principal) et des HRUS (encadré rouge). Les nœuds oranges représentent des brins de rivières et les nœuds noirs des HRUS les flèches représentent les relations amont -> aval entre entités spatiales (HRUs ou brins).

Annexe 5 : Ressources sur les outils informatiques développés

Outil	Langage / plateforme	Dépôt de code & documentation technique	Publications scientifiques
Modèle WatASit	Smalltalk Plateforme CoRMAS	Dépôt git: https://gitlab.irstea.fr/watasitdev/watasit Dépôt de modèle CoMSES - model – library	- Richard, B., Bonté, B., Barreteau, O., & Braud, I. (2022). A situated agent-based model to reveal irrigators' options behind their actions under institutional arrangements in Southern France. <i>Socio-Environmental Systems Modelling</i> , 3, 17893. https://doi.org/10.18174/sesmo.17893 - Bastien Richard, Bruno Bonté, Olivier Barreteau & Isabelle Braud (2020a). <i>L'abandon des tours d'eau et ses conséquences opérationnelles sur les systèmes collectifs d'irrigation. Une approche multi-agents situationnelle appliquée à un canal gravitaire de Moyenne Durance (France)</i> . La Houille Blanche, 106:4, 43-55, DOI: 10.1051/lhb/2020033
Modèle COPAT - Buëch	Script R cran + SmallTalk et CoRMAS	Dépôt Git: https://gitlab.irstea.fr/watasitdev/watasitrcoupler	Bastien Richard, Bruno Bonté, Magalie Delmas, Isabelle Braud, Bruno Cheviron, Julien Veyssier, Olivier Barreteau (2022b). A co-simulation approach to study the impact of gravity collective irrigation constraints on plant dynamics in Southern France, <i>Agricultural Water Management</i> , Volume 262, 2022, 107205, ISSN 0378-3774, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107205
Composant de co-simulation JAMS / J2000	Java JAMS plateforme J2000 Compatible	Code: https://gitlab.irstea.fr/watasitdev/j2k-coupling Documentation technique (usage et fonctionnement): https://gitlab.irstea.fr/watasitdev/j2k-coupling/-/wikis/home	À venir
Modèle COWAT - Buëch	Script R cran+ SmallTalk et CoRMAS	Dépôt Git: https://gitlab.irstea.fr/watasitdev/watasitrcoupler	À venir

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

HRU - DELIN	Pyhton	Code (dépôt git): https://git-lab.irstea.fr/hru-delin-dev/hru-delin Documentation: https://git-lab.irstea.fr/hru-delin-dev/hru-delin/-/wikis/home	Outil technique ayant peu d'intérêt dans une publication scientifique. À été présenté au collectif français J2000 le 15 Juillet 2021. Outil maintenu depuis par Mickaël Rabotin, animateur du groupe J2K.
------------------------	--------	--	--

