

ArchPress - Apport des données d'ARCHives hydrologiques pour l'étude des PRESSions sur la ressource en eau et les milieux aquatiques dans les rivières cévenoles depuis la fin du XIX^e siècle

Rapport final

Action n° 52 du Programme 2010 au titre de l'accord cadre Agence de l'Eau ZABR

NAVRATIL Oldrich (UMR 5600 EVS)

JACOB-ROUSSEAU Nicolas (UMR 5133 Archéorient)

CREPY Maël (UMR 5600 EVS et Irstea)

DOLEDEC Sylvain (UMR 5023 Lehna)

VIDAL Jean-Philippe (IRSTEA Lyon RiverLy)

SAUQUET Éric (IRSTEA Lyon RiverLy)

Rapport rendu le 13/12/2019

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Sommaire

Remerciements	5
Index et sigles	6
Fiche synthétique	7
1 – Introduction	8
1.1 - Les perturbations des écoulements, un aspect mal connu des pressions sur les rivières	8
1.2 - L’objectif : la caractérisation quantitative, spatiale et temporelle des pressions anciennes.....	9
2 - Le terrain d’étude : les bassins de l’Ardèche, de la Cèze et des Gardons.....	12
2.1 - Les bassins versants	12
2.2 - Aspects climatiques	12
2.3 - Les écoulements	13
2.4 - Les usages de l’eau et leurs héritages.....	15
3 - Les archives statistiques et bases de données hydrologiques.....	17
3.1 - L’inventaire des archives disponibles	17
3.2 - L’hydrologie des chenaux : le recours au RHT	22
3.3 - La constitution des bases de données	26
4 - Traitements dans un Système d'Information Géographique	30
4.1 - Présentation de l’approche.....	30
4.2 - L’estimation des prélèvements agricoles	31
4.3 – Les prélèvements industriels.....	32
4.4 – Les cumuls de pressions	33
4.5 - Synthèse des apports et incertitudes ou limites de l’approche	34
5 - Bilan des activités industrielles et agricoles au XIX ^e siècle dans le bassin de l’Ardèche	36
5.1 - Synthèse des données industrielles et agricoles disponibles	36
5.1.1 - La présence industrielle en cartes	37
5.1.2 - La base de données agricoles	44
5.2 - Quantification des pressions humaines sur les cours d’eau à la fin du XIX ^e siècle.....	45
5.3 - Influence de ces activités sur la durée des étiages critiques et la durée moyenne annuelle de tension sur la ressource dans le bassin de l’Ardèche	54
5.4 - Évolution des conflits liés à l'exploitation des ressources en eau du bassin versant de la Borne : quels rôles respectifs de l'intensification des prélèvements et de l'assèchement hydroclimatique ?	58
5.5 - Analyse diachronique de la pression sur l’eau (fin XIX ^e siècle et période actuelle)	66
6 – Le rôle de ces aménagements passés sur les biocénoses aquatiques actuelles.....	74
6.1 - Objectifs	74
6.2 - Matériel et méthodes	74
6.2 - Résultats.....	78
6.3 Conclusion de la partie.....	91
7 - Conclusions et perspectives	92
Bibliographie	94
Annexes	98

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Remerciements

Ce projet a été financé dans le cadre de l'accord cadre Agence de l'Eau-ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône). Nous remercions Olivier Gorin, Stéphane Stroffek et Thomas Pelte de l'Agence de l'Eau pour l'accompagnement de ce projet. Le présent rapport s'appuie sur les données acquises et traitées entre 2016 et 2018, notamment grâce au travail des stagiaires ou personnes suivantes.

Lise Devreux (Master 1 « Géographie, Environnement, Territoire », Université de Lyon 2)
– Stage effectué de mars à juillet 2016 sur les bassins de la Cèze et des Gardons. Rapport soutenu en septembre 2016 (*La pression des dérivations industrielles sur les écoulements de rivières cévenoles (Gardon, Cèze et haute Ardèche) depuis la fin du XIX^e siècle : une approche par les archives statistiques et la cartographie, fin XIX^e siècle – début XXI^e siècle*, 92 p. + annexes).

Oumaima Benchiboub (Master 1 « Sciences de l'eau », Université de Lyon 2)
– Stage effectué de mars à juillet 2017 sur le bassin de l'Ardèche. Rapport soutenu en septembre 2017 (*L'apport des données des archives pour l'étude des pressions sur la ressource en eau dans le bassin versant de l'Ardèche depuis le XIX^e siècle.*, 78 p. + annexes).

Germain Mériaux (Licence professionnelle « Milieux aquatiques et eaux pluviales », Université de Lyon 2)
– Stage effectué de mai à août 2017 sur le bassin de l'Ardèche. Rapport soutenu en septembre 2017 (*Mise en place des bases de données et cartographie des pressions industrielles et agricoles sur la ressource en eau dans les rivières cévenoles depuis la fin du XIX^e siècle*, 75 p. + annexes).

Maël Crépy (Docteur en géographie)
– Stage postdoctoral effectué en janvier et février 2018 à l'IRSTEA sur le bassin de l'Ardèche (Structuration et analyse SIG, recherches en archives).

Les 15 étudiants du master *Gestion de l'environnement*, parcours « GRAINE » à l'Université de Lyon 2, promotion 2016-2017.

– Stage de terrain en Ardèche et dans le Gard du 17 au 21 octobre 2016 (enquêtes et recensements sur l'héritage industriel dans les vallées de la Cèze et du Luech, secteur de Saint-Ambroix et Vialas).

Nous tenons également à remercier Nicolas Lamouroux et Hervé Pella (IRSTEA Lyon) pour la mise à disposition de la base de données du RHT et leur aide pour son utilisation.

Index et sigles

RHT : Réseau Hydrographique Théorique

AERMC : Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse

QMNA5 : débit minimum mensuel de période de retour 5 ans

Q40, Q60, Q80 : débit dépassé 40%, 60% et 80% du temps en moyenne par an

SIG : Système d'Information Géographique

RMC : Rhône-Méditerranée-Corse

ZABR : Zone Atelier Bassin du Rhône

LEHNA : Laboratoire UMR-CNRS d'Écologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés

EVS : Laboratoire UMR-CNRS Environnement Ville Société

Fiche synthétique

Titre du projet : Évaluation de l'apport des données d'archives hydrologiques pour l'étude des pressions sur la ressource en eau et les milieux aquatiques dans les rivières cévenoles depuis la fin du XIX^e s. Acronyme : ARCHPRESS - Cévennes

Responsables : Oldrich Navratil (Université Lyon 2 - UMR 5600), Nicolas Jacob-Rousseau (Université Lyon 2, UMR 5133)

Site ou Observatoire de rattachement ZABR : Rivières cévenoles

Thème de rattachement ZABR : "Flux, formes, habitats, biocénoses" et secondairement "changements climatiques et ressources".

Thème de rattachement Agence de l'Eau et numéro de question : Q 1 et Q 15

Budget global : 113978 euros (subvention AE : 54441 euros)

Résumé : Le projet consistait à analyser l'évolution des pressions engendrées par les prélèvements agricoles et les dérivations industrielles sur les écoulements naturels dans les trois bassins du site atelier depuis le XIX^e siècle (Ardèche, Cèze, Gardons). Si de nombreuses études ont été menées sur les effets environnementaux des grands ouvrages, la connaissance du rôle joué par la « petite hydraulique » sur les écoulements et les milieux est encore assez lacunaire. Jusqu'à présent l'accent a surtout été mis sur les obstacles physiques opposés au transit sédimentaire et aux flux biologiques : chaussées, barrages, prises d'eau (Walter et Merritts, 2008 ; Lespez *et al.*, 2013). Les aspects quantitatifs ont été plus rarement étudiés dans une perspective temporelle longue (Berger, 1998 ; Jacob, 2005, 2015 ; Jacob *et al.*, 2016), alors qu'un des enjeux actuels est de cerner des niveaux de pression acceptables dans des bassins où la ressource est fortement sollicitée ou risque d'être sujette à une raréfaction consécutive aux changements climatiques. Le travail s'est appuyé sur des documents statistiques produits à la fin du XIX^e siècle (1862-1899) qui décrivent les pressions industrielles et agricoles soit à l'échelle du réseau hydrographique (prises d'eau), soit à l'échelle du bassin (surfaces irriguées) et sur une base de données hydrologiques contemporaine, le Réseau Hydrographique Théorique (RHT) (Pella *et al.*, 2012). Le traitement de ces informations dans un SIG a permis une comparaison de la pression sur les eaux de surface à la fin du XIX^e avec la situation actuelle à l'échelle du sous-bassin et du tronçon ainsi qu'une simulation des effets de ces dérivations sur des débits caractéristiques. La confrontation avec des reconstructions et réanalyses hydrométéorologiques a permis de contraindre les incertitudes concernant les données hydrologiques utilisées pour cette étude. L'information historique a permis également d'orienter le diagnostic écologique basé sur les stratégies biologiques (trait) adoptées par les différentes espèces composant les communautés de macroinvertébrés benthiques de façon à déterminer si les pressions hydrauliques jouent un rôle sur ces communautés et, indirectement, sur les écosystèmes aquatiques.

1 – Introduction

L'utilisation de l'énergie hydraulique et de l'irrigation exerce des pressions sur les cours d'eau européens depuis plus d'un millénaire (Bloch, 1935 ; Mousnier, 2002 ; Lucas, 2005). Ces pressions peuvent être envisagées sous plusieurs aspects. (1) Il s'agit d'une part de perturbations physiques ou structurelles produites par les aménagements hydrauliques destinés à dériver les eaux (chaussées, prises d'eau, étangs canaux ou biefs...) et les opérations nécessaires à leur entretien (curages, rectifications de tracés, reconstructions ou modernisations d'ouvrages). (2) D'autre part, d'un point de vue quantitatif, ces deux formes d'exploitation de la ressource hydrique représentent des prélèvements ou des dérivations qui peuvent affecter les débits et la continuité temporelle de l'écoulement dans les chenaux naturels. (3) Ces perturbations ont une durée et une fréquence variable dans le temps (saisonnière ou annuelle ; permanence ou disparition dans le temps « long ») qui est étroitement dépendante des modalités de gestion ou d'usage de la ressource et qui détermine le régime de perturbation auquel est soumis le cours d'eau. (4) En dernière analyse, ce régime de perturbation est potentiellement susceptible d'affecter suffisamment les habitats et les biocénoses pour conduire à leur évolution au cours du temps.

1.1 - Les perturbations des écoulements, un aspect mal connu des pressions sur les rivières

Parmi les perturbations induites par cette gestion hydraulique, les aménagements physiques faisant obstacle au transit sédimentaire et aux flux biologiques tiennent actuellement une place centrale dans les discussions scientifiques (études d'impacts, analyse des conflits d'usage) et les politiques environnementales (restauration ou désaménagement des rivières) (Adam *et al.*, 2007 ; Malavoi et Salgues, 2010 ; Barraud, 2007 et 2009 ; Lespez, 2013 ; Germaine et Barraud, 2013a ; Walter et Merritts, 2008 ; Beauchamp, 2018).

Dans le champ de la restauration des hydrosystèmes, l'expertise hydro-géomorphologique (Adam *et al.*, 2007 ; Malavoi et Salgues, 2010) et hydrobiologique est dominante et tend à se focaliser sur le démantèlement des ouvrages afin de rétablir la continuité physique qui serait garante d'un meilleur état des écosystèmes aquatiques, pour des raisons à la fois hydrosédimentaires et biologiques (Germaine et Barraud, 2013a, b). Ces opérations de désaménagement soulèvent cependant des débats sur l'état de référence voire sur le bien-fondé de certains projets (Brown *et al.*, 2018 ; Barraud et Germaine 2017 ; Beauchamp, 2018).

Par comparaison, les aspects quantitatifs de ces perturbations sont moins étudiés et, qui plus est, encore plus rarement dans une perspective temporelle longue. De nombreuses études ont décrit les effets environnementaux des grands ouvrages, mais notre connaissance du rôle de la petite hydraulique sur les écoulements et les milieux aquatiques est encore lacunaire. C'est assez paradoxal dans la mesure où l'attention aux quantités prélevées ou dérivées et aux discontinuités hydrauliques apparaît dans les archives dès le XIX^e siècle. Dans les dernières décennies, la sensibilité aux discontinuités hydrauliques a été renforcée par les dispositions réglementaires ou légales et par la forte pression de prélèvement qu'exercent certains sites industriels reconvertis en « microcentrales ». Néanmoins, les travaux qui ont proposé de mettre en perspective les pressions quantitatives actuelles avec celles qui s'exerçaient jadis sur la

ressource hydrique restent encore assez rares, de même que les approches comparatives entre bassins (Berger, 1998 et 1999 ; Benoît *et al.*, 2004 ; Jacob 2005 ; Jacob, 2005 ; Jacob, 2015 ; Poux *et al.*, 2011 ; Richard-Schott, 2010 ; Jacob *et al.*, 2016). Ces auteurs ont pourtant montré que ces prélèvements et ces dérivations pouvaient être importants et induire des conflits récurrents entre usagers de l'eau, en particulier dans la seconde moitié du XIX^e siècle. Aujourd'hui, un des enjeux de la gestion de l'eau et des milieux aquatiques est de préciser des niveaux de pression acceptables dans des bassins où la ressource est fortement sollicitée ou risque d'être sujette à une raréfaction consécutive aux changements climatiques. Mais l'analyse des vulnérabilités pointe le manque de recul historique sur l'évolution des prélèvements (Balestrat et Théron, 2014 ; Fabre et Pelte, 2013). Ceci constitue un argument supplémentaire pour tenter d'affiner l'analyse des pressions anciennes, de caractériser les perturbations qu'elles pouvaient représenter sur les écoulements et de mesurer leurs évolutions.

L'intérêt d'une analyse rétrospective est de permettre de mesurer l'évolution positive ou négative des différents types de pressions au cours du temps et de les confronter à l'évolution de la ressource existante, en particulier dans le cas de l'agriculture. La connaissance des tendances pourrait être une information utile dans la définition de *scenarii* de gestion de la ressource. Ces approches peuvent contribuer à la définition d'états de référence en matière de gestion quantitative ou qualitative des eaux, soit pour les débits nécessaires aux communautés aquatiques, soit pour les débits prélevables. La prospection sur archives délivre également une information assez exhaustive sur les pressions représentées par les aménagements ou les obstacles ; sa structuration en une base de données peut aussi être un outil utile pour le suivi réalisé par les gestionnaires à l'avenir (suivi des ouvrages, mais aussi des prélèvements).

1.2 - L'objectif : la caractérisation quantitative, spatiale et temporelle des pressions anciennes

L'objectif de ce projet est d'évaluer quel pouvait être l'apport d'une démarche rétrospective, dans les bassins du site atelier des « rivières cévenoles » de la Zone Atelier Bassin du Rhône. Ce terrain est apparu pertinent pour mener cette approche compte tenu de leur localisation méridionale et de l'existence de tensions récurrentes sur la ressource hydrique. Le travail a été mené selon deux axes.

Le premier objectif était de tenter une restitution des pressions qui s'exerçaient sur les écoulements à la fin du XIX^e siècle et de mesurer leurs évolutions depuis cette époque. Il s'agit donc d'une approche de quantification rétrospective qui vise à caractériser :

- les prélèvements destinés à l'agriculture irriguée à l'échelle de bassins versants élémentaires ; ces prélèvements sont suivis de la consommation nette, par évapotranspiration, d'une partie du volume dérivé dans les chenaux drainant les bassins-versants. On a ainsi cherché à évaluer les effets hydrologiques de ces prélèvements.
- les dérivations industrielles et leurs effets à l'échelle du tronçon. Dans la majorité des cas, si l'eau de la rivière est totalement restituée à l'issue de son utilisation énergétique, elle ne s'écoule plus dans le tronçon situé entre la prise d'eau et le canal de fuite, ce qui entraîne une pression par affaiblissement du débit.

- les effets cumulés de ces deux types de pression puisqu'il y a coexistence spatiale entre l'agriculture irriguée et l'industrie alimentée par la force hydraulique.

Cette démarche générale se subdivise en plusieurs objectifs. Le premier est de tenter une estimation rétrospective des prélèvements agricoles et des dérivations industrielles afin de pouvoir ensuite les comparer aux écoulements « naturels » pour définir les niveaux de pression et leur influence sur ces écoulements. Le deuxième est de proposer une approche spatiale, de façon à pouvoir caractériser et cartographier les tronçons du réseau hydrographique en fonction des niveaux de pression qui s'y exerçaient. Enfin, le troisième objectif était de tenter d'approcher la durée effective de la pression au cours de l'année hydrologique afin, d'une part de mieux comprendre dans quelle mesure elle pouvait influencer le milieu aquatique, d'autre part de savoir quelles sont ses relations avec les conflits liés à la ressource en eau et l'évolution de leur fréquence au cours du temps.

Ces objectifs supposaient ainsi d'acquérir des informations quantitatives sur l'utilisation de la ressource en eau et sur les écoulements naturels. Il s'agissait aussi d'en faire l'analyse critique avant de mener des traitements quantitatifs et géographique de l'information obtenue ou produite (Fig. 1). Afin de mener cette analyse des pressions et leurs évolutions, nous avons créé et exploité une base de données sur (1) la répartition spatiale des prélèvements, des aménagements, des pratiques (techniques de prélèvement) et (2) sur la quantification des volumes mis en jeu, la caractérisation des pressions au moyen d'indices et leur évolution diachronique (fin XIX^e s. – actuel). Une confrontation aux reconstructions et réanalyses hydrométéorologiques existantes a permis de valider la démarche de simulation des pressions anciennes sur des valeurs actuelles de débit.

Le second objectif était une première approche des potentiels impacts écologiques engendrés par les dérivations d'eau dans le passé. Une fois identifiés des tronçons marqués par différentes situations de pressions actuelles, il s'agissait d'y étudier les indicateurs biologiques que représentent les macroinvertébrés benthiques. L'hypothèse était qu'il pouvait exister une variabilité biologique en fonction des conditions de pressions qui s'exercent dans les chenaux, et que ces différences pourraient refléter des situations ayant eu cours dans le passé. Les deux approches seront présentées successivement dans le rapport.

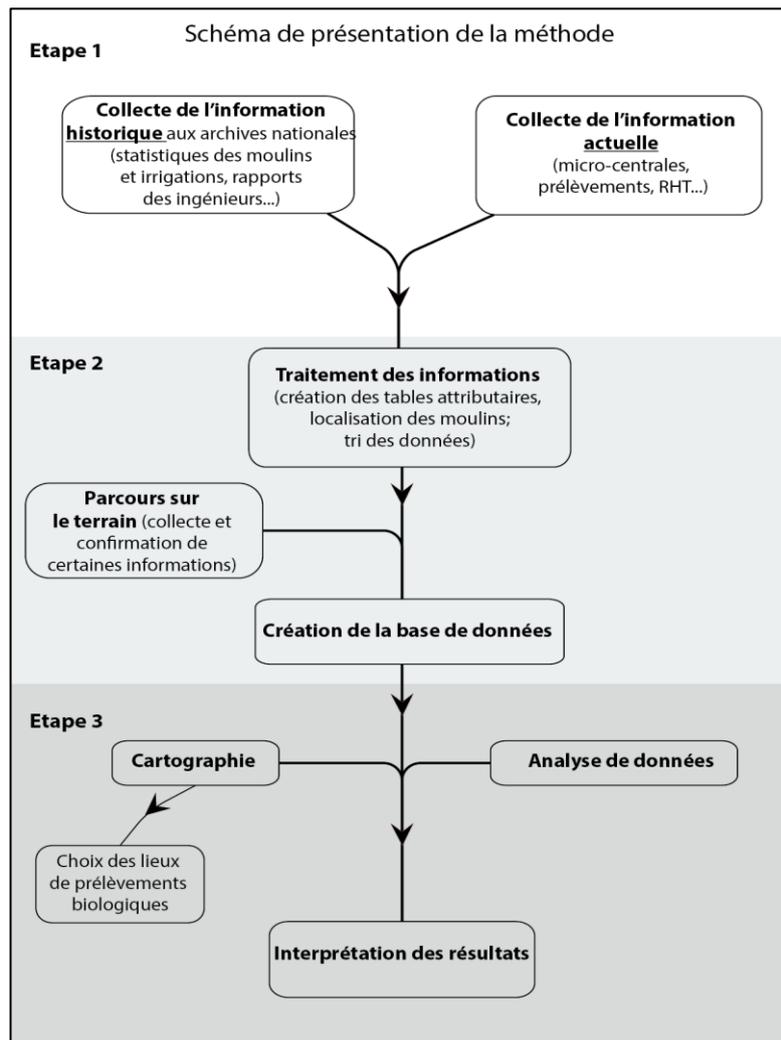


Figure 1 — Schéma de présentation de la méthode employée dans cette étude – Source : L. Devreux (2016).

2 - Le terrain d'étude : les bassins de l'Ardèche, de la Cèze et des Gardons

Comme nous l'avons évoqué plus haut, le terrain d'étude correspond aux trois bassins du site atelier récemment constitué par la ZABR et appelé « rivières cévenoles » soit, du nord au sud, les bassins de l'Ardèche, de la Cèze et des Gardons. Cette partie présentera successivement les principaux traits physiographiques et économiques des bassins, les caractéristiques hydrologiques et, enfin, quelques éléments historiques relatifs à la gestion de l'eau, de façon à mieux cerner le contexte actuel.

2.1 - Les bassins versants

Ces trois bassins versants étudiés couvrent une surface totale de 5 733 km². Ils s'étendent sur deux régions, Auvergne-Rhône-Alpes et Occitanie, anciennement appelé Languedoc-Roussillon et, plus particulièrement, sur les départements du Gard, de la Lozère et de l'Ardèche. Les trois bassins versants renferment une population permanente d'environ 398 728 habitants (SMAGE des Gardons, 2014 ; Syndicat mixte Ardèche Claire, 2012 ; <http://www.abceze.fr/le-bassin-de-la-ceze.html>). Durant la saison touristique estivale, la population de chaque bassin versant augmente très sensiblement.

Les trois bassins versants présentent des caractéristiques assez similaires. L'amont se développe sur la partie orientale du Massif central, la bordure cévenole, sur différents affleurements du socle ancien (granites, gneiss, schistes) qui sont imperméables et caractérisés par des aquifères libres de faibles capacités. Le réseau hydrographique est très dense et fréquemment marqué par des confluences rapprochées. L'amont des bassins versants est par ailleurs caractérisé par de très fortes pentes et des vitesses d'écoulement élevées lors des crues. À l'aval, les cours d'eau débouchent dans le fossé d'effondrement qui court d'Alès, au sud, à Aubenas au nord. Il est constitué de divers affleurements sédimentaires : une auréole gréseuse peu large suivie de vastes plateaux calcaires qui vont jusqu'au couloir rhodanien et dans lesquels les cours d'eau s'enfoncent en canyons parfois très profonds (Ardèche inférieure). Ce secteur karstique est caractérisé par une quasi absence de drains pérennes en surface. L'altitude maximale de notre zone d'étude est de 1585 m, située dans le bassin versant de la Cèze et l'altitude minimale correspond à la confluence des Gardons avec le Rhône, à 11 m.

2.2 - Aspects climatiques

Le climat de notre zone d'étude est de type méditerranéen, caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. Le régime pluviométrique est très contrasté comme on peut le voir sur la figure 2. Les précipitations se concentrent principalement à l'automne et l'été est caractérisé par la rareté voire l'absence de précipitations. Il y a donc une forte amplitude entre les périodes humides et sèches, ce qui a un impact important sur la ressource en eau, comme nous le verrons plus tard. Les événements très pluvieux, appelés « épisodes cévenols », surviennent principalement en automne, mais parfois aussi au printemps et affectent généralement la bordure cévenole, donc l'amont des bassins versants qui peuvent recevoir

plusieurs centaines de mm de précipitations en quelques jours lors des abats d'eau exceptionnels. Ces derniers produisent des crues soudaines et parfois très violentes qui occasionnent des dégâts importants (en 1958 et 2002 par exemple pour les crues majeures des Gardons ; Ponce *et al.*, 2008).

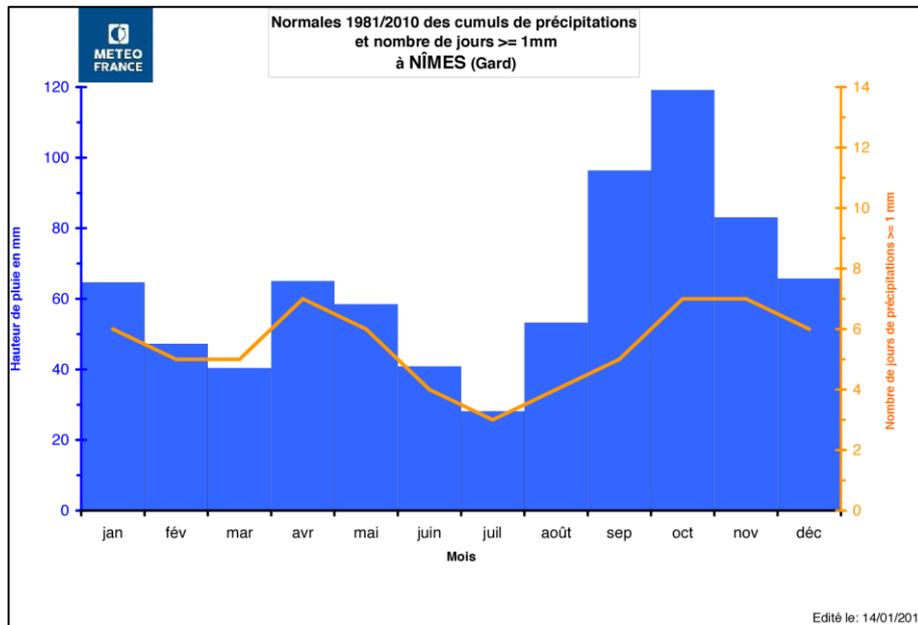


Figure 2 — Précipitations mensuelles à Nîmes. Diagramme pluviométrique – Source : Météo-France.

2.3 - Les écoulements

Les conditions géologiques et topographiques des Cévennes, au substratum imperméable, accentuent les contrastes saisonniers de l'écoulement. La figure 3 présente ici le débit mensuel interannuel à Pont-de-Labeaume, à l'amont d'Aubenas qui reflète bien la saisonnalité du régime pluviométrique. On discerne deux périodes, l'une caractérisée par un débit moyen mensuel plus important à l'automne, ce qui correspond à la période d'épisodes cévenols et la seconde déterminée par un débit plus faible durant les mois d'été, un étiage très inférieur au module.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

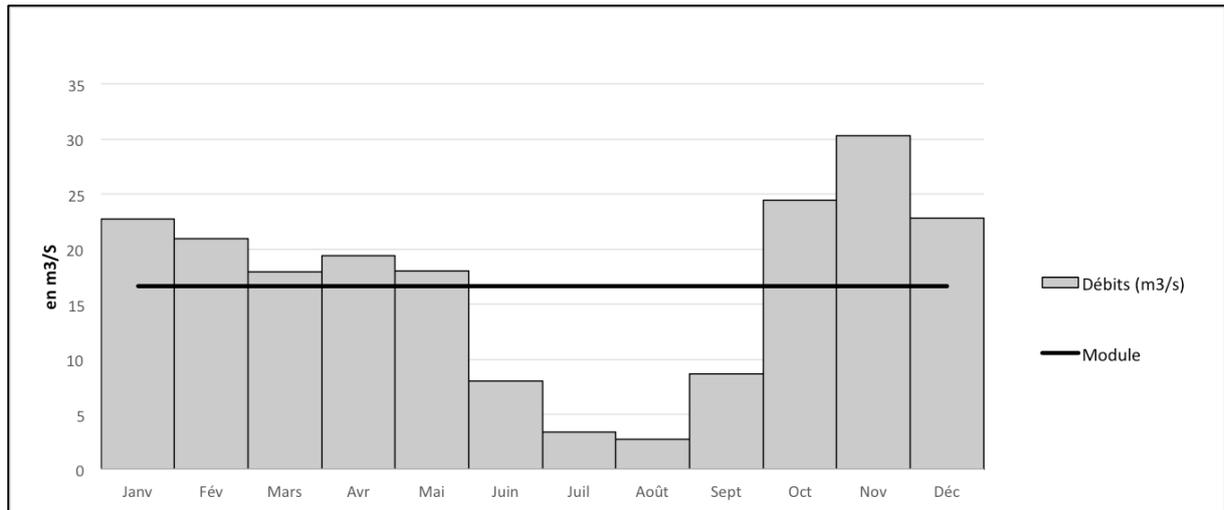


Figure 3 — Débit mensuel interannuel et module de l’Ardèche à Pont-de-Labeaume, calculés sur 30 ans – Source : Banque hydro.

Dans la partie aval des bassins, le karst soutient les débits estivaux et dans les cours principaux et empêche un assèchement total qui survient en revanche dans certains petits affluents du secteur aval (Ibie, Granzon, dans le bassin de l’Ardèche). Mais les débits restent faibles en été, dans une période comprise entre juillet et septembre (Fig. 4).

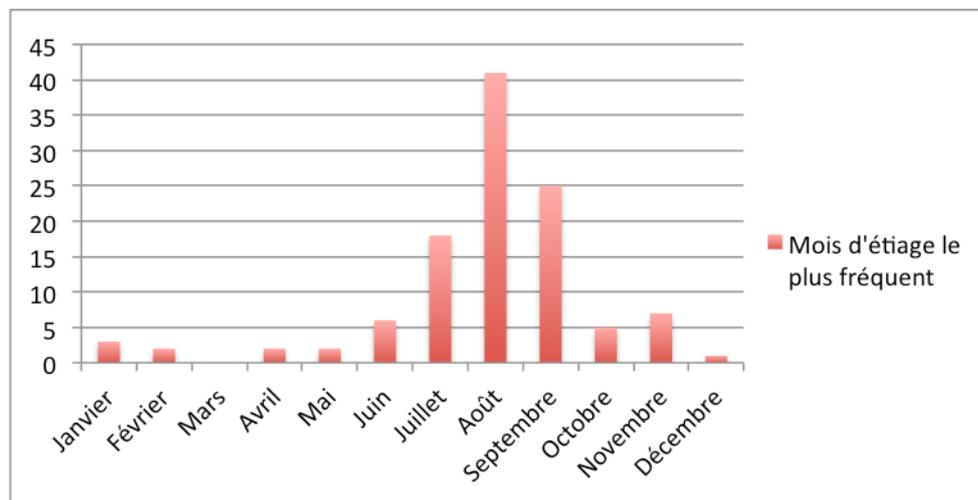


Figure 4 — Fréquence des débits mensuels minimums dans l’année pour la Cèze à La Roque-sur-Cèze - Source : Banque hydro.

2.4 - Les usages de l'eau et leurs héritages

Actuellement, les principaux usages de l'eau sont la production hydro-électrique, les consommations domestiques, l'agriculture irriguée et les loisirs aquatiques estivaux. L'hydro-électricité est principalement produite dans les bassins de l'Ardèche et du Chassezac à partir de retenues et d'usines mises en services entre 1951 et 1965 et auxquelles se sont ajoutées celles de Pont-de-Veyrières (1987) et Puylaurent (1997). L'activité de microcentrales est plus marginale mais elle intéresse encore un secteur situé dans l'Ardèche supérieure et ses affluents (Volane, Bésorgues, Lignon, Fontolière et Bourges), ainsi que, plus ponctuellement, dans l'Ardèche inférieure, jusqu'à l'entrée du canyon de Vallon-Pont-d'Arc.

L'approvisionnement domestique est satisfait à partir de captage de sources à l'amont, par des prélèvements dans les retenues (Pont-de-Veyrières) ou des captages dans les aquifères libres à l'aval. La consommation est marquée par de forts contrastes annuels étant donnée la grande fréquentation touristique de la région (en particulier dans le secteur aval de l'Ardèche). Les usages agricoles sont surtout concentrés dans les secteurs de plaine, entre le pied de l'escarpement cévenol et les plateaux qui bordent la vallée du Rhône.

Les loisirs aquatiques ou nautiques entraînent une demande en eau un peu particulière puisque depuis la fin des années 1990, un soutien d'étiage a été mis en place dans le bassin de l'Ardèche, afin d'assurer des écoulements suffisants pour certaines pratiques (*e.g.* baignade, descentes en canoës).

Les usages étaient assez différents dans le passé et consistaient essentiellement en la pratique de l'irrigation gravitaire (prés de fauche surtout, plus marginalement vergers et châtaigneraies) et l'utilisation énergétique de l'eau pour les moulins et usines.

Les moulins sont attestés depuis le Moyen Âge comme dans les autres bassins versants en France, sans que nous puissions savoir exactement quand le premier fut construit (XII – XIII^e siècles au plus tard). Ils assuraient la transformation des matières premières, surtout agricoles et destinées à l'alimentation humaine : il s'agit donc surtout de moulins à farine ou à huile. À partir de la fin du XVIII^e siècle, l'industrie textile se développe en lien avec l'activité de la soierie lyonnaise. Les vallées cévenoles sont un espace de sous-traitance avant les opérations de tissage qui sont réalisées à Lyon : les filatures sont surtout installées dans le Gard et le moulinage (préparation des différentes qualités de fil) dans l'Ardèche. C'est une spécialisation économique assez affirmée et les autres productions industrielles (papier, tan, cuir, métallurgie) sont beaucoup plus rares dans nos bassins. L'industrie textile est florissante pendant tout le XIX^e siècle mais elle décline assez rapidement à partir du début du XX^e siècle du fait de plusieurs facteurs (*e.g.* concurrences étrangères, conséquences économiques de la première guerre mondiale et de la crise de 1929, concurrences des fils synthétiques ou artificiels). Dans leur écrasante majorité les sites industriels sont aujourd'hui désaffectés ; quelques-uns sont reconvertis en centrales autonomes de production électrique (microcentrales), essentiellement là où l'activité a été maintenue jusque dans la seconde moitié du XX^e siècle.

Pour assurer l'arrosage et la production énergétique, les eaux étaient dérivées au moyen de prises d'eau appelées des « levades », parfois assez rudimentaires et fréquemment reconstruites (bourrelets de cailloutis, troncs de châtaigniers). L'eau s'écoulait ensuite par un

canal (ou *béal*, *béalière*, en occitan) en direction du moulin ou des champs irrigués, où elle était distribuée par des rigoles sur toute la parcelle.

Les barrages des gros moulins ou des fabriques les plus importantes étaient maçonnés et, de ce fait, pérennes, sauf en cas de destruction par une très forte crue. Les usiniers pouvaient diriger l'eau jusqu'au moulin selon différents moyens. L'usine pouvait être « à fil d'eau », c'est-à-dire directement sur la berge du cours d'eau. Ces moulins nécessitaient donc un débit régulier et se situaient sur un tronçon du cours d'eau à l'écoulement soutenu (donc dans les cours inférieurs) ; la production énergétique dépendait alors plus du débit que de la hauteur de chute, qui restait faible. À l'amont où les pentes longitudinales plus soutenues permettaient d'obtenir une hauteur de chute intéressante sur de petites distances, l'eau était conduite dans le canal d'amenée jusqu'au moulin ; ce dernier la restituait ensuite au cours principal par un canal de fuite. Les usiniers pouvaient également construire un bassin à éclusées, en général à la fin du canal d'amenée ou directement dans le lit d'un ruisseau dans les hautes vallées. Ces bassins à éclusées permettaient de stocker l'eau lorsque les écoulements naturels étaient insuffisants pour entraîner les roues, de façon à pouvoir faire ensuite des lâchers d'eau d'un débit souhaité. De ce fait, ces aménagements sont plutôt présents dans les têtes de bassin. Le fonctionnement par éclusées avait un impact particulièrement important sur les écoulements puisque le débit naturel était rythmé en fonction de l'ouverture et de la fermeture des vannes.

Dans certains tronçons, les moulins étaient parfois très proches les uns des autres. Il arrivait ainsi qu'un moulin réutilise le volume d'eau sortant du autre situé immédiatement en amont, avant même la restitution à la rivière. Ces dispositifs étaient susceptibles de former des tronçons court-circuités d'une distance assez importante (plusieurs centaines de mètres) dans certaines vallées.

3 - Les archives statistiques et bases de données hydrologiques

Le travail s'est appuyé sur un ensemble de documents ou de données de natures différentes qui sont présentées ci-après.

3.1 - L'inventaire des archives disponibles

En France, des documents variés permettent d'étudier les prélèvements d'eau et leur gestion au cours des deux derniers siècles. Ils proviennent essentiellement des grandes enquêtes administratives et statistiques qui ont été ordonnées l'État central à partir de la fin du XVIII^e siècle. Ces enquêtes ont concerné des domaines de plus en plus nombreux au cours du XIX^e siècle, en étant fréquemment associées à la cartographie (Palsky, 1996).

La plupart de ces documents sont conservés aux archives nationales (AN) ou départementales (AD) ; les statistiques récentes sont disponibles auprès des agences de bassin. Le corpus documentaire retenu ici pour analyser les systèmes hydrauliques anciens visait à obtenir de façon directe ou indirecte des informations sur les prélèvements d'eau, leur répartition spatiale, certains aspects techniques propres aux conditions de dérivation de l'eau et leur évolution au cours du temps, en d'autres termes à caractériser la structure spatiale de la pression sur la ressource.

3.1.1 - L'information historique

L'*Atlas statistique des cours d'eau, usines et irrigations*, conservé aux archives nationales dans la série F¹⁰ est un document central pour cet objectif. Il a été constitué, à la demande du Ministère de l'agriculture, par les services des Ponts-et-Chaussées de chaque département à partir de 1861 (Cheysson, 1879). En fonction des moyens et des contraintes propres à chaque service, sa confection s'échelonne entre 1862 et 1901. Cet atlas se compose en plusieurs tableaux, il recense tous les drains constituant le réseau hydrographique (tableau A), les prises d'eau agricoles et/ou industrielles existant alors (tableau B) en indiquant leur localisation, les débits moyens dérivés (la plupart du temps en l/s), la longueur des canaux collectifs, les forces motrices obtenues ainsi que les superficies arrosées correspondantes (Fig. 5, Annexes 1 et 2).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

ANNÉE 1891

DEPARTEMENT de l'Ardèche

TABLEAU B. UTILISATION AGRICOLE ET INDUSTRIELLE DES COURS D'EAU.

N°	DÉSIGNATION DES COURS D'EAU ALIMENTANT DES IRRIGATIONS ou des usines.	IRRIGATIONS.					USINES.							OBSERVATIONS.				
		DÉSIGNATION DES PAYSIS D'EAU ET DES COMMUNES.	DÉBIT EN LITRES PAR SECONDE.	SERVICES ASSURÉS PAR COMMUNE.			NOMBRE DE MOULINS DE MOULIN.	VOLUME DES EAUX MOTRICES.	DITES EN HECT. CARRÉS.	FORCE BRUTE EN CHEV.-VAP.	NATURE DE MOTRICE HYDRAULIQUE.	FORCE UTILISÉE EN CHEV.-VAP.						
				Principales cultures.	Autres cultures.	TOTAL.												
151	Riboulet (Ard. de)	Rebort Seureuse (C ^{te} Ardèche) 1.01 Chabrol (—) 1.050	14	1048	366,0	14	144,90	2,00	2,00	1,60	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	
157	Donave (Ard. de)	Ardèche (C ^{te} Ardèche)	0,133	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
153	Kieuzand (Ard. de)	Boisguy (C ^{te} Ardèche)	0,150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	Signe (Ardèche de)	C ^{te} de Montbrun Souche (C ^{te} Ardèche) 0,020 — Maison (—) 0,070 C ^{te} de Sargues — C ^{te} de Sargues Bourras (C ^{te} Ardèche) 1,070 Gay (—) 1,050 Bélis (—) 1,050 C ^{te} de Brunel —	8	240	10,00	8	8,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
			57			57												

Figure 5 – Extrait d'une double page du tableau B de l'Atlas des cours d'eau... (Utilisation agricoles et industrielle des cours d'eau), département de l'Ardèche (1891) – source : AN F¹⁰ 5711.

Pour les trois départements concernés par cette étude, l'information date de la dernière décennie du XIX^e siècle et du début XX^e siècle ; un état datant de 1862 est disponible pour le Gard mais celui de 1899, à la fois plus complet et plus proche des deux autres dans le temps a été retenu (Tab. 1).

Département	Année	Cote du document
Ardèche	1891	F ¹⁰ 5711
Gard	1862 et 1899	F ¹⁰ 5731
Lozère	1900	F ¹⁰ 5748

Tableau 1 – Date de constitution de l'Atlas des cours d'eau dans les départements étudiés.

Ces informations statistiques de l'Atlas paraissent fiables pour plusieurs raisons. D'une part il existe souvent plusieurs états successifs des tableaux qui présentent des corrections avant la mise au net d'une version finale dont un exemplaire a été adressé aux services ministériels. D'autre part, on ne constate pas de rupture ou d'aberrations dans les valeurs (débits, caractéristiques techniques) lorsqu'un cours d'eau traverse deux départements différents d'une part et d'autre de la limite départementale, alors que les mesures ou les estimations ont été faites par des opérateurs différents, puisque rattachés au service hydraulique de chaque département. Il faut toutefois admettre une part d'incertitude provenant de l'imprécision des mesures. Pour le calcul des « volumes des eaux motrices » (débit dérivé), il y a coexistence de différentes méthodes de calcul. Dans certains cas le débit a été mesuré par jaugeage dans le canal d'amenée ; les hauteurs de chute au niveau de la roue ont également été mesurées directement. Mais dans d'autres cas, les débits ont été déterminés à partir de la force brute nécessaire au fonctionnement de l'usine. Des rapports indiquent que des mesures directes et précises ont été faites sur certains ouvrages et usines de façon à pouvoir faire des estimations plus rapides sur les autres sites.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Les cartes (Cassini, État-Major, IGN) ou les cadastres permettent de localiser précisément les moulins hydrauliques et les usines mentionnés dans l'Atlas (Fig. 6 et 7). Ces informations et certaines caractéristiques techniques (longueur des biefs - donc des tronçons court-circuités -, existence d'aménagements spécifiques liés à la gestion de l'eau) ont été vérifiées par des observations sur le terrain et par la consultation de photographies aériennes verticales.



Figure 6 — Moulin de Caveirac sur la carte de Cassini (Feuille n°90, 1772) - Source : Géoportail.

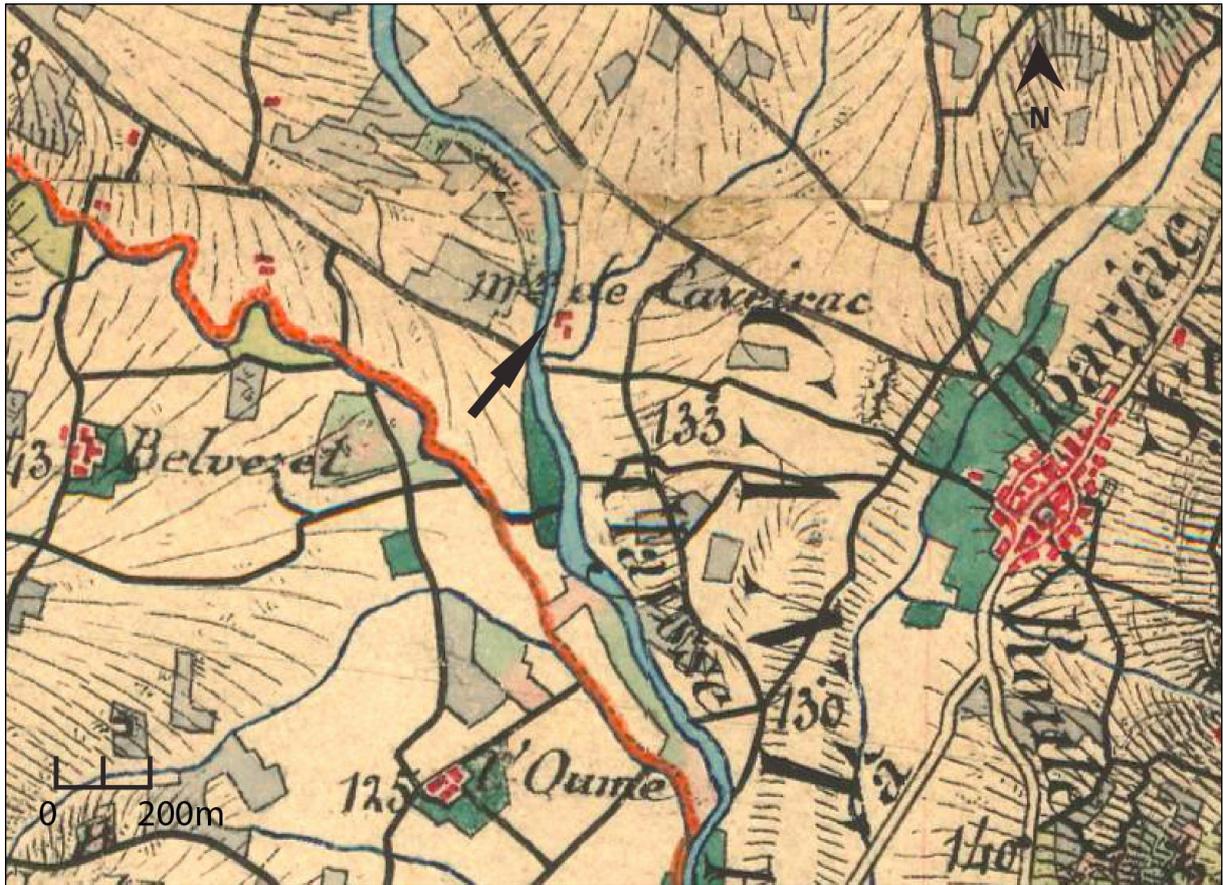


Figure 7 — Moulin de Caveirac sur la Claysse dans le bassin versant de la Cèze, sur la carte d'État-Major (mi XIX^e siècle) - Source : Géoportail.

Les prélèvements destinés à l'agriculture ne peuvent être abordés que de façon indirecte. En effet, l'*Atlas des cours d'eau* est malheureusement lacunaire sur les superficies irriguées et le débit dérivé aux prises car, sauf sur des secteurs très restreints comme en Lozère, il n'indique que les périmètres arrosés par des canaux collectifs. Or comme l'irrigation individuelle dominait, ceci entraîne une sous-estimation considérable de la réalité des surfaces arrosées. Il faut donc évaluer ces dernières par un autre moyen, soit par les statistiques agricoles qui indiquent le nombre d'hectares concernés à l'échelle communale (AD, série M), soit grâce aux cadastres (AD, série P), cette fois à l'échelle plus précise des bassins versants et du parcellaire agricole.

Dans le cadre de cette étude, étant donné la taille des bassins et le temps imparti, nous avons restreint l'approche à celui de l'Ardèche, en utilisant deux sources d'information. Pour la partie du bassin située en Lozère, nous avons utilisé les informations détaillées fournies par l'Atlas (1901), pour la partie située dans le département de l'Ardèche, les valeurs données par les statistiques agricoles de 1912, à la fois les plus complètes et les plus proches dans le temps des informations disponibles dans l'*Atlas des cours d'eau*. L'information présente ainsi un portrait de l'agriculture à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècles (1880-1920 ; Fig. 8).

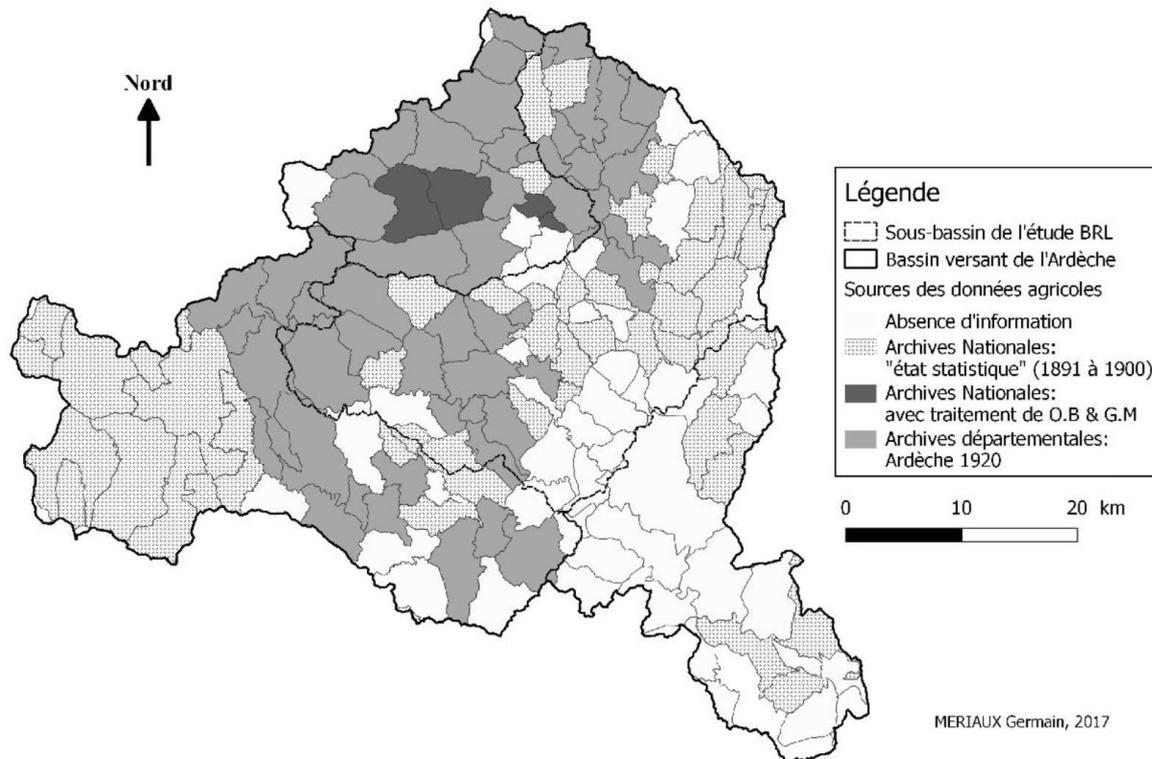


Figure 8 — Origine et emprise spatiale des sources d'informations utilisées pour étudier les pressions agricoles. Source G. Mériaux (2017).

Une fois les surfaces connues, il a été possible d'estimer grossièrement la demande en eau en appliquant les valeurs moyennes de débit que les ingénieurs des Ponts et Chaussées indiquaient comme nécessaires à l'irrigation, soit 3 l/s/ha.

3.1.2 - Les statistiques récentes

Nous avons aussi collecté des données sur les pressions actuelles (microcentrales et prélèvements d'eau superficielle) dans des bases de données auprès de différents organismes (par exemple l'Agence de l'eau, les syndicats).

Les données sur les microcentrales collectées auprès de l'Agence de l'Eau RMC sont issues de redevances sur la production électrique. Ces fichiers contiennent le volume turbiné, le nom de la commune, le nom de l'ouvrage, les coordonnées de localisation ainsi que le code de métadonnées. Les usagers paient la redevance à l'Agence de l'Eau lorsqu'ils dérivent un volume annuel supérieur à un million de mètres cubes. Cependant, ces données présentent certaines limites. Les dérivations inférieures à un million de mètres cubes ne sont pas recensées pas plus que les dérivations qui sont entretenues pour conserver un droit d'eau ancien sans pour autant donner lieu à une production énergétique.

Nous avons pu recueillir des données sur les volumes dérivés par les microcentrales pour les années 2012 à 2014 à partir desquelles nous avons calculé une moyenne du volume

dérivé par année par point de dérivation. Les données transmises par l'Agence de l'Eau comprenaient également des coordonnées et des métadonnées pour la précision de localisation. Nous avons également utilisé des informations qui avaient été acquises en 2001 auprès du service de la police de l'eau de la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (DDAF) de l'Ardèche. Elles concernent le bassin de l'Ardèche supérieure et de ses affluents et expriment les volumes dérivés en litre par secondes. Nous les avons donc converties en mètre cube par seconde afin de pouvoir les comparer avec les données originelles issues des moulins du XIX^e siècle.

Les informations actuelles sur les prélèvements d'eau de surface sont également issues des redevances payées par les usagers (domestiques, industriels, agriculteurs etc.) à l'Agence de l'Eau et ont pour but premier d'inciter les usagers à économiser la ressource. Une redevance est payée par l'utilisateur lorsque celui-ci prélève un volume supérieur à 10 000 m³ d'eau par an (<http://www.eaurmc.fr/aides-et-redevances/redevances-et-prim.es.html>), le volume minimum passe à 7 000 m³ lorsque l'on se situe dans les ZRE. Comme pour les données sur les microcentrales, les prélèvements annuels inférieurs à 7 000 m³ en ZRE ou inférieurs à 10 000 m³ de manière générale ne sont donc pas déclarés car ces usagers ne paient pas de redevances ; il nous manque donc une part de la donnée. D'autre part, il existe des prélèvements particuliers non déclarés ou non autorisés, donc non recensés par l'Agence de l'Eau. Il serait difficile de collecter ces données car il est impossible de les recenser à l'échelle de chaque bassin versant. Enfin, autre source d'incertitude, environ 31 % des volumes annuels prélevés en surface et dédiés à l'irrigation sont estimés par forfait, on ne connaît donc pas les volumes prélevés de manière exacte pour tous les usagers.

Ces données sont présentées sous la forme d'un tableur Excel et comprennent plusieurs informations, entre autre le volume capté, le type d'usage, le type de milieu où le volume est prélevé, la commune et enfin les coordonnées géographiques et ce pour les années de 2008 à 2013 (Annexe 4).

3.2 - L'hydrologie des chenaux : le recours au RHT

Afin de permettre une exploitation systématique des données d'archives et d'ouvrir la voie à une modélisation fiable des pressions sur l'eau, il convenait d'acquérir une information hydrologique à une échelle suffisamment fine.

3.2.1 - Le choix du RHT

Les référentiels concernant les débits des cours d'eau doivent être soigneusement choisis. Il était en effet exclu d'employer directement les valeurs proposées par *l'Atlas Statistique des cours d'eau*, qu'elles aient été mesurées et/ou calculées. Cette information est disponible à une résolution spatiale intéressante (au minimum une valeur par branche du réseau) mais la trop grande diversité des modes d'évaluation des débits et la trop faible récurrence des opérations de mesure ne permettent pas de disposer d'informations fiables sur les écoulements. Les données obtenues à la fin du XIX^e siècle correspondaient de plus à des débits *a priori* modifiés par les prélèvements, ce qui entraînait un potentiel biais supplémentaire.

Prendre en compte les valeurs mesurées de débits par les stations actuelles n'aurait pas été pleinement satisfaisant non plus, car le réseau est peu dense et que, là encore, le risque de modification par les prélèvements (déclarés ou non), pouvait être très élevé dans les trois bassins versants concernés par l'étude. Ces derniers comportent également quelques barrages-réservoirs ou barrages écrêteurs édifiés dans la seconde moitié du XX^e siècle qui influencent fortement les conditions d'écoulement des débits faibles (débits réservés). On ne dispose ainsi, pour certains bassins et depuis plusieurs décennies, que des débits naturels reconstitués par EDF.

Le recours à la base de données du RHT (réseau hydrographique théorique ; Pella *et al.*, 2012) s'est donc logiquement imposé.

3.2.2 - Un référentiel pour évaluer les pressions industrielles et agricoles passées

Ce réseau correspond à une base de données hydrologiques, spatialisée à l'échelle de segments de cours d'eau considérés comme homogènes et appelés « arcs » à chacun desquels correspond aussi un bassin versant unitaire. Ces arcs sont des tronçons compris entre l'origine (la source) et une confluence, entre deux confluences successives ou entre une confluence et l'exutoire du réseau (Fig. 9). Le réseau est généré, pour les paramètres principaux, à partir de données de relief et de précipitations et contient de nombreuses informations hydrologiques théoriques exploitables dans notre étude : le module interannuel, le QMNA5 (débit minimum mensuel annuel de période de retour 5 ans), ainsi que les débits classés (Q05, Q10,Q90 et Q95, débits respectivement dépassés pendant 5%, 10%,....90% et 95% du temps). Ces informations sont régionalisées et disponibles à l'échelle de chaque arc de cours d'eau ou de son bassin versant. Elles caractérisent, d'un point de vue théorique, la situation hydrologique actuelle non-influencée.

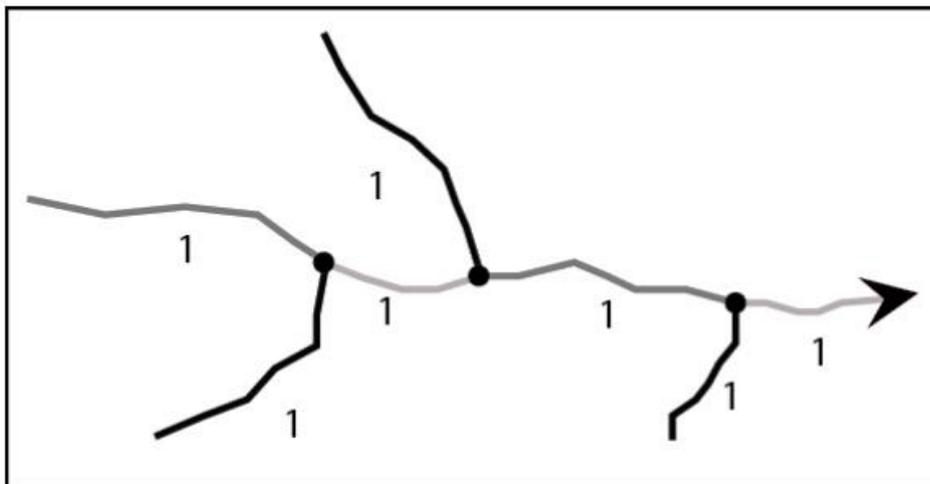


Figure 9 — Représentation schématique du découpage du réseau en arcs dans le RHT. Source : L. Devreux, 2016.

Pour cette même raison, le réseau comporte quelques biais, dans la mesure où les valeurs ne sont pas issues de jaugeages. Il ne prend ainsi pas en compte les processus liés à la présence

d'un karst, autant pour les transferts d'eau entre bassins voisins (pertes et émergences) que pour les écoulements de surface. Ces derniers apparaissent par exemple sur des arcs qui sont en réalité des vallées sèches toute l'année, sauf en dehors de rares crues liées à des précipitations intenses ; les données les concernant sont donc faussées. Dans les bassins étudiés ici, c'est en particulier le cas sur tout le plateau dans lequel s'encaissent les gorges de l'Ardèche. Mais cela n'a pas eu d'impact majeur sur notre étude, car très peu de prélèvements portent sur ces secteurs. Lors de l'interprétation des résultats, en revanche, il a été nécessaire d'en tenir compte (facteur explicatif pour une part de la distribution des moulins à écluse, secteurs sans prélèvements agricoles connus, etc.). Néanmoins, pour le reste des bassins, il constitue un référentiel fiable pour notre étude, et présente l'intérêt, en tant que réseau théorique, de ne pas présenter de valeurs influencées par les prélèvements actuels.

Un autre biais possible à envisager était la représentativité des données hydrologiques proposées par le RHT pour une étude rétrospective, puisque les informations statistiques issues d'archives datent des deux dernières décennies du XIX^e siècle alors que le RHT est établi à partir de valeurs actuelles. C'est pourquoi nous nous sommes référés à des jeux de données issus de reconstructions/réanalyses hydrométéorologiques développées récemment sur la période 1880-2012.

Il s'agit de SCOPE Climate (reconstruction météorologique long-terme à haute résolution sur la France), SCOPE Hydro (reconstruction hydrologique long-terme sur 662 bassins versants français), FYRE Climate (réanalyse météorologique long-terme à haute résolution sur la France) et FYRE Hydro (réanalyse hydrologique long-terme sur 661 bassins versants français). Les réanalyses combinent des simulations issues d'un modèle et des observations : FYRE Climate, par exemple, combine SCOPE Climate et des observations météorologiques anciennes (Devers *et al.*, 2019). Ainsi, Caillouet *et al.*, (2017) et Caillouet *et al.* (2018) ont montré que les conditions hydrologiques de la fin du XIX^e étaient assez similaires aux conditions hydrologiques non influencées (module, QMNA5) observées pour le début du XXI^e s. (Fig. 10 et 11). La figure 10 présente les anomalies du QMNA5 (anomalies par rapport à 1991-2010, en %) dans SCOPE Hydro (Caillouet *et al.*, 2017).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

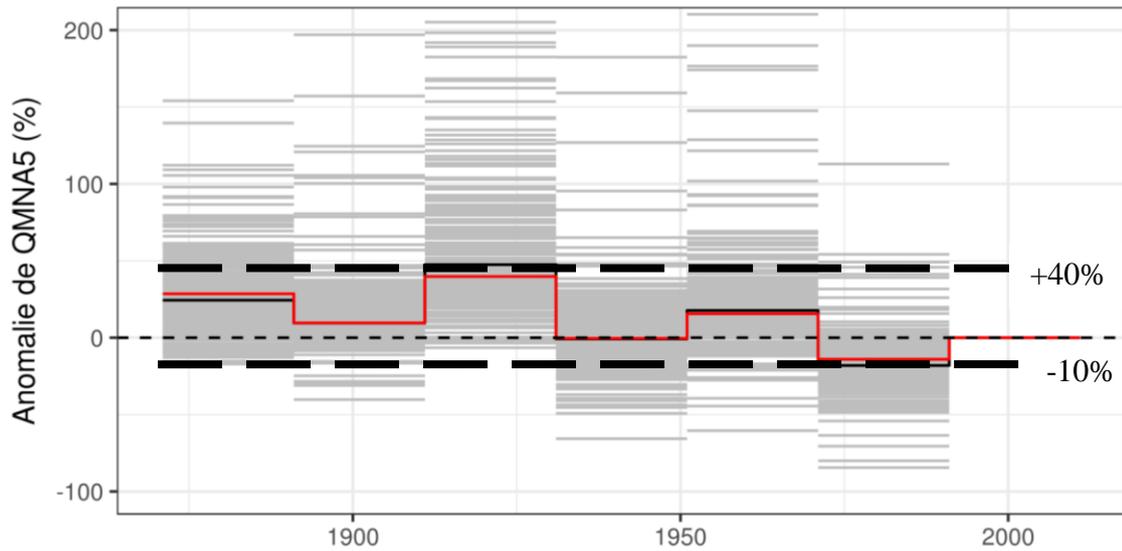


Figure 10 — Anomalie de QMNA5 (en %) par décennie pour plus de 600 stations étudiées issus de la reconstruction SCOPE Hydro. Ces anomalies sont calculées par rapport à la période de référence [1991-2010]. En rouge, la valeur moyenne ; chaque trait gris correspond à un bassin versant. Source : Caillouet et al. (2017).

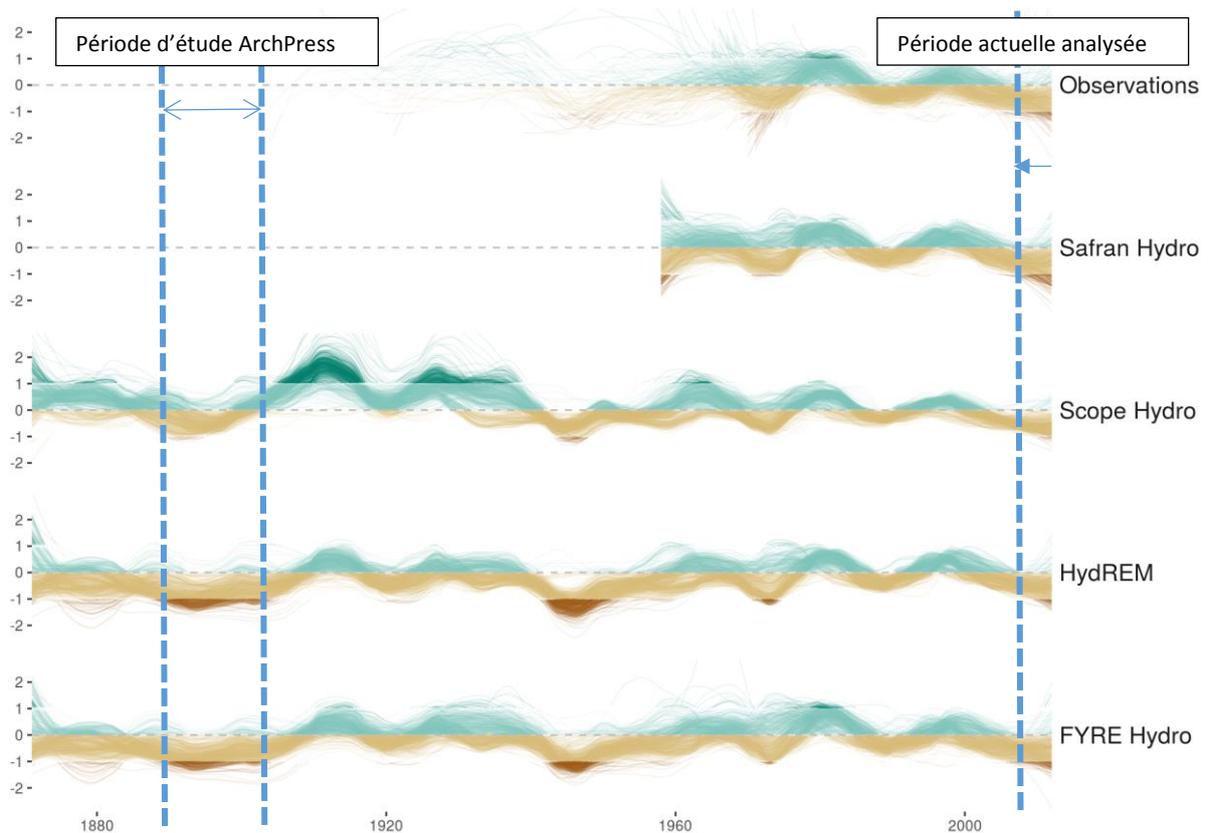


Figure 11 — Anomalies des moyennes multidécennales des débits annuels avec tous les jeux de données. Sont représentées les observations, les sorties des analyses SAFRAN Hydro, Scope Hydro, HydREM et FYRE Hydro (Caillouet *et al.*, 2017). Les valeurs des différents jeux de données sont cohérentes entre elles.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

On peut donc considérer que les données hydrologiques fournies par le RHT nous permettront d'évaluer de façon assez fiable les pressions industrielles et agricoles qui s'exerçaient à la fin du XIX^e siècle. Autrement dit, on peut, en première approche, appliquer ces pressions à la ressource en eau actuelle. Compte tenu de la variabilité des résultats de ré-analyse sur la période 1890-1910, nous avons utilisés les valeurs QMNA5 et module du RHT avec une fourchette de valeurs comprises entre $[-10\% * Q ; +40\% * Q]$; gamme de valeur comprenant 90% des anomalies (Fig. 10). Par la suite, nous testerons la sensibilité de nos résultats à ces différentes valeurs de conditions hydrologiques.

3.3 - La constitution des bases de données

Les informations collectées (Fig. 12) ont été organisées en une base de données de façon à pouvoir les intégrer dans un système d'informations géographiques, en vue du traitement quantitatif et spatial.

Nom_fichier	Description de la donnée	source	type_donnée	nombre de champs	nbr_attributs
Inventaire industriel pour le bassin versant de l'ardeche	Inventaire de tous les moulins et ouvrages hydrauliques présents sur le BV de l'Ardèche	Archives datant de 1891 pour la partie de l'Ardèche et datant de 1900 pour le département de la Lozère, collectés aux Archives Nationales (Pierrefite-sur-Seine)	Moulins	28	550
Inventaire des puissances des arcs sur le BV ardeche	inventaire des puissances des arcs ainsi que les puissances hydraulique maximum et minimum situé sur chaque arc	Archives/RHT	RHT	12	483
Réseau hydrographique théorique du bassin versant de l'ardeche (RHTbv_ardeche)	Ensemble du réseau hydrographique du bassin versant de l'Ardèche avec les puissances des arcs joint au bassin versant unitaire	RHT	Rht/ bassin versant unitaire	18	461
Repartition pression	Répartition de la pression agricoles et industrielles sur les communes du BV de l'ardeche	partie de l'Ardèche et datant de 1900 pour le département de la Lozère, collectés aux Archives Nationales (Pierrefite-sur-Seine)	industrielle/ agricole	5	180
tableur_utilisations_agricoles_synthese_modif	Synthèse des surfaces agricoles par communes sur le BV d'ardeche	Benchiboub & Meriaux	agricoles	11	117
tableur_utilisations_agricoles_partie_ardeche_aval_gard	Surfaces agricoles par communes en aval du BV d'ardeche	Archives datant de 1891 récupéré à pierrefitte-sur-seine.	agricoles	18	12
Prairies artificielles en 1912	Surfaces agricoles par communes en amont du BV d'ardeche	Archives Départementales de l'Ardèche	agricoles	3	64
tableur_utilisations_agricoles_partie_lozere	Synthèse des surfaces agricoles par communes sur le département de la Lozère	Archives datant de 1900 collectés aux Archives Nationales (Pierrefite-sur-Seine)	agricoles	18	1082
Inventaire_EDF_prelevement	Inventaire des différentes prises d'eau localisé sur le BV de l'ardeche	EDF	Prise_eau	7	114
Inventaire des prélèvements actuels 2010-2013	Inventaire des prélèvements industriels et agricoles actuels entre 2010 et 2013	Données Agence de l'eau	industrielle/ agricole	6	1596

Figure 12 — Liste et caractéristiques principales des fichiers thématiques constitués grâce aux informations acquises. Source : O. Benchiboub (2017).

3.3.1 - Le choix de l'échelle spatiale d'analyse

Au-delà du choix des informations et des référentiels et en amont de la structuration de la base informatique, la question des échelles d'analyse se posait également.

Travailler à l'échelle du cours d'eau et de son bassin aurait ainsi permis de respecter parfaitement les informations contenues dans *l'Atlas statistique des cours d'eau*, mais cela n'aurait pas été très satisfaisant, surtout pour les longs cours d'eau, pour rendre compte de situations contrastées entre différents tronçons d'un même cours.

Les statistiques industrielles anciennes ont une résolution spatiale très fine puisque les canaux, moulins et usines ont été visités par les ingénieurs et par les conducteurs des Ponts et Chaussées et sont localisés précisément sur les branches du réseau hydrographique. Nous disposons donc de données ponctuelles (moulin ou débit dérivé à la prise d'eau), rattachées sans ambiguïté possible à l'un des cours d'eau du bassin versant. La possibilité de localiser les sites, grâce aux cartes, aux photographies aériennes et aux images satellitaires a ainsi permis de travailler à l'échelle du site industriel et de tirer pleinement parti de la précision spatiale du RHT et de la segmentation du réseau hydrographique en arcs. Dans le cadre des modélisations, les dérivations industrielles enregistrées au XIX^e siècle ont pu être ainsi confrontées aux paramètres hydrologiques des arcs et des bassins versants unitaires sur lesquels elles se situent. Cette méthode ne génère qu'un nombre extrêmement réduit d'erreurs et d'imprécisions.

Dans le cas des prélèvements agricoles, les approximations sont plus importantes, car les statistiques anciennes annoncent les surfaces irriguées à l'échelle de la commune et non du cours d'eau ou de son bassin. Il a donc été nécessaire de redistribuer spatialement cette information agricole et de l'affecter aux bassins unitaires et aux arcs qui sont présents sur le territoire communal, ce qui entraîne inévitablement une incertitude faute de pouvoir faire une approche plus fine, par le cadastre, par exemple (cf. *infra* "Traitement des données dans un SIG"). Les délimitations des communes actuelles ont été obtenues grâce à la BDTPO de l'IGN. Une des principales incertitudes provient des fusions ou des scissions de communes survenues entre le XIX^e siècle et nos jours (Annexe 5). Les cas de fusion ont été simples à gérer puisqu'il a suffi d'additionner les informations données à l'échelle des anciennes communes. En cas de scission il a fallu redistribuer les surfaces irriguées dans les nouvelles communes ; le choix a été fait de répartir la surface irriguée de la commune primitive au *pro rata* de la surface des communes créées. Ceci induit un biais supplémentaire qui est cependant limité par le nombre de communes concernées, huit au total (Annexe 5).

3.3.2 - Structuration de la base de données issues d'archives

Les informations brutes issues d'archives ont été saisies manuellement dans les différents tableaux présentés dans la figure 12, de façon à permettre d'effectuer des jointures dans le SIG par la suite. Nous détaillerons ci-dessous la façon dont ont été saisies les informations relatives aux pressions industrielles et agricoles.

Le choix a été fait de conserver la majorité des informations contenues dans les tableaux A et B de *l'Atlas statistique des cours d'eau*, dans la mesure où d'autres traitements de l'information pourraient se révéler pertinents ou intéressants par la suite.

3.3.2.1 Les données industrielles

Nous avons conservé les informations suivantes :

- Le nom des cours d'eau
- La désignation des prises d'eau
- Le nom de la commune où est située la prise d'eau
- Le nom du moulin
- La nature du moulin (exemple : moulin à blé, moulin à huile, fabrique, usine ...)
- Le « volume des eaux motrices » (le débit dérivé pour alimenter le moulin)
- La chute d'eau ordinaire (la différence de hauteur entre l'arrivée d'eau et la sortie, au niveau de la roue)
- La force brute en chevaux-vapeurs (la force actionnée par la roue)
- La nature du mécanisme
- La force utilisée exprimée en chevaux-vapeurs
- La durée de fonctionnement du moulin (en heures par jour)
- Les observations éventuelles

Nous avons décidé de rajouter également dans nos tableurs des champs complémentaires :

- L'identifiant de la source de données (identifiant des archives)
- La date des archives
- La provenance des archives (l'endroit de conservation des documents utilisés)
- L'acquisition de la donnée
- Un identifiant pour les moulins
- Un identifiant pour les canaux de dérivations des moulins (pour les moulins qui ont été localisés sur le même canal de dérivation, nous avons décidé de mettre le même identifiant canal)
- Une deuxième nature du moulin (pour les moulins polyvalents, nous avons décidé de rajouter un deuxième champ nature pour éviter les doublons)
- Longueur court-circuitée des cours d'eau
- Longueur court-circuitée arrondie
- Le débit restitué au cours d'eau après dérivation
- L'existence d'un bassin à écluses
- La puissance hydraulique des moulins (nous avons multiplié le volume des eaux motrices (débit) par la hauteur de chute pour pouvoir avoir une puissance hydraulique des moulins exprimée en watts)
- La force brute en watts (dans ce champ, la force brute en chevaux-vapeurs a été convertie en watts pour permettre la comparaison avec la puissance hydraulique des moulins)
- Identification (commentaire sur la localisation des moulins)
- Trois champs de métadonnées ajoutées (pour savoir quelle carte nous avons utilisée pour localiser les moulins) :
- La présence du moulin sur carte IGN
- La présence du moulin sur la carte État-major
- La présence du moulin sur la carte Cassini

3.3.2.2 Les données agricoles

Comme pour la partie des ouvrages hydrauliques, les données agricoles ont été numérisées dans un fichier Excel. Ce travail n'a toutefois été fait que pour le bassin versant de l'Ardèche.

Nous avons choisi de conserver les informations ci-dessous :

- Désignation du cours d'eau
- Désignation de la prise d'eau
- Nom de la commune
- Le débit moyen de la prise d'eau
- La surface des prairies naturelles permanentes
- La surface des prairies temporaires artificielles
- La surfaces des autres cultures irriguées (si existantes)
- Total des surfaces
- Commentaire comprenant le nom des moulins existant sur la prise d'eau
- Le nom du moulin
- La hauteur de chute
- Le volume des eaux motrices
- La nature du mécanisme
- Observations sur le moulin

Nous avons également ajouté les champs suivants :

- L'identifiant de la source
- La date de la source (des archives)
- Provenance des archives
- Un champ source de l'acquisition des données

Dans la partie lozérienne du bassin du Chassezac *l'Atlas des cours d'eau* a permis de numériser plus de 1000 données agricoles. Après avoir testé notre modèle d'évaluation des données agricoles, nous avons convenu de ne conserver que les surfaces des prairies naturelles permanentes et prairies temporaires artificielles par commune. En effet, les canaux d'irrigation étaient destinés à irriguer en grande partie que ces surfaces agricoles.

Finalement pour simplifier l'information, nous avons créé un fichier de synthèse ne contenant l'information relative à l'irrigation qu'à l'échelle communale, dans les limites du bassin versant de l'Ardèche ; il contient les champs suivants :

- L'identifiant de la source
- La date de la source (des archives)
- Provenance des archives
- Code INSEE de la commune
- Le nom de la commune
- Le canton
- Le total des surfaces agricoles par commune
- La source de l'acquisition de la donnée agricole

3.3.3 - La géolocalisation des informations et la constitution des tables attributaires

Après leur collecte, les données ont été localisées en vue de leur géoréférencement dans un SIG. Cette opération a été effectuée grâce aux informations données dans *l'Atlas des cours d'eau* et sur les cartes disponibles sur le Géoportail (carte de Cassini, carte d'État-major, carte topographique IGN, Cadastre). L'utilisation du logiciel Google Earth® a facilité le géoréférencement des ouvrages hydrauliques et le passage sur les logiciels SIG. Après positionnement des repères correspondant aux sites industriels, leur exportation sous le format (KMZ), a permis, après conversion, de générer une couche *shapefile* des moulins dans les logiciels SIG. L'ensemble de ces opérations représente un travail long : pour le seul bassin de l'Ardèche, il a fallu localiser et vérifier la position de plus de 550 ouvrages hydrauliques.

Les informations collectées dans les bases de données ont permis de constituer les tables attributaires qui permettent de relier à chaque objet spatial géoréférencé (point, ligne, surface) une ou plusieurs informations qualitatives ou quantitatives. Trois bases de données ont ainsi été produites à partir des archives :

- une base relative aux sites industriels : *moulins.dbf* ;
- une base relative aux pressions agricoles dans le bassin de l'Ardèche : *utilisationagricole_synthese.dbf* ;
- une base plus détaillée, relative aux pression agricoles dans la partie lozérienne du bassin de l'Ardèche (Altier, Chassezac amont, Borne rive droite)

Les dictionnaires d'attributs de ces trois bases sont décrits dans les annexes 6, 7 et 8.

Une fois les bases constituées, il était possible de commencer le traitement des informations.

4 - Traitements dans un Système d'Information Géographique

4.1 - Présentation de l'approche

Afin de permettre une représentation et une exploitation optimale des données recueillies, un SIG a été constitué. La majorité des opérations et des représentations a été réalisée à partir du logiciel QGIS 2.18 (logiciel libre). Seules quelques opérations ont été effectuées à l'aide du logiciel ArcMAP de la suite ArcGIS10 (logiciel propriétaire du groupe ESRI) parce que leur réalisation n'était pas possible (ou beaucoup plus complexe et générant des erreurs) avec QGIS ou l'un de ses *plugins*. En entrée, nous disposons des fichiers suivants :

- trois fichiers de formes *commune.shp* issues de la BDTOP0 de l'IGN, pour les départements de l'Ardèche, de la Loire et de la Lozère, renommés *commune07.shp*, *commune30.shp*, *commune48.shp* ;
- un fichier de formes *rhtvs2.shp* correspondant au Réseau Hydrographique Théorique à l'échelle du territoire français et un fichier base de données *Att_rht.dbf* contenant l'ensemble des paramètres attributs (cf. *supra*) ;
- un fichier de formes *50mod_bvunit.shp* correspondant aux bassins versants unitaires (bassins versants de chacun des arcs) du Réseau Hydrographique Théorique à l'échelle du territoire français ;
- un fichier *moulin.kml* correspondant aux localisations des moulins et produit sous *Google Earth* à l'échelle des trois bassins versants étudiés et un fichier base de données *moulins.dbf* contenant toutes les informations portant sur les moulins à l'échelle des trois bassins versants étudiés ;
- un fichier base de données *utilisationagricole_synthese.dbf* produit par Oumaima Benchiboub et Germain Mériaux à partir du dépouillement des archives à l'échelle du bassin versant de l'Ardèche.

Nous rappelons ici que le bassin versant de l'Ardèche étant celui pour lequel nous disposons d'un maximum d'informations, et le seul pour lequel les données de prélèvements agricoles avaient été dépouillées systématiquement, il a été sélectionné pour la suite de l'étude.

Les mêmes traitements pourront être appliqués aux bassins versants de la Cèze et des Gardons dans un second temps, quand l'ensemble des données agricoles auront été recueillies et mises en base. La base de données sur les moulins et usines est en revanche complète et exploitable pour ces deux autres bassins.

Afin de permettre la représentation cartographique des données et leurs analyses, quelques traitements de base ont dû être appliqués et de nouveaux fichiers de formes ont été créés afin d'associer les bases de données aux entités spatiales géoréférencées.

4.1.1 - Isolement des arcs et des bassins versants unitaires de la rivière Ardèche

Afin d'alléger les traitements, seuls les arcs appartenant au bassin versant de l'Ardèche ont été sélectionnés manuellement ; un nouveau fichier de forme *rht_ard.shp* a ainsi été créé. La même démarche de sélection et d'export a été appliquée pour les bassins versants unitaires, par sélection spatiale automatique à partir de la couche *bvu.shp*, en utilisant les entités de

rht_ard.shp comme référence. Le fichier de forme ainsi créé a été nommé *bvu_ard.shp*. Une jointure attributaire a ensuite été effectuée grâce à l'identifiant unique commun entre les arcs (*rht_ard.shp*), les bassins versants unitaires (*bvu_ard.shp*) et leurs attributs (*att_rht.dbf*). Pour permettre de représenter une partie des données par des figurés ponctuels (cercles proportionnels par exemple), un fichier de formes constitué des centroïdes des bassins versants unitaires a été créé (*centro_bvu.shp*).

4.1.2 - Création d'un fichier de forme communes_BVArd.shp

Afin de disposer d'un fichier unique de communes à l'échelle du bassin versant de l'Ardèche, les trois fichiers issus de la BDTOPO de l'IGN ont été ouverts. Pour chacun d'entre eux, une sélection spatiale par la géométrie des bassins versants unitaires de du fichier *bvu_ard.shp* a été effectuée. Les trois sélections ont été rassemblées en un seul fichier de forme : *communes_BVArd.shp*.

4.2 - L'estimation des prélèvements agricoles

4.2.1 - Prélèvements agricoles par communes

Les informations issues des archives et portant sur les surfaces irriguées par commune ont été jointes au fichier de formes *communes_BVArd.shp*, au moyen d'un champ comportant le code INSEE. Les données issues des archives sont donc associées sans modification à l'emprise spatiale des communes (sauf pour les cinq communes créées postérieurement à la collecte des données à la fin du XIX^e siècle, Annexe 5).

4.2.2 - Prélèvements agricoles par arcs du RHT

Les surfaces irriguées ne sont pas localisées systématiquement dans *l'état statistique des irrigations et des usines*, sauf lorsqu'elles étaient associées à une prise d'eau collective ayant quelque importance. Il y a donc des lacunes importantes car dans les Cévennes, l'irrigation individuelle est très majoritaire. Il convenait donc de partir d'une information disponible à une échelle moins précise, les surfaces irriguées annoncées par commune par les recensements agricoles. Or il était impossible de rattacher empiriquement ces valeurs aux arcs effectivement concernés, c'est-à-dire aux tronçons du réseau traversant le territoire concerné et alimentant les béalières d'irrigation. Afin de permettre la prise en compte du cumul des pressions agricoles et des pressions industrielles à une même échelle et de permettre des modélisations fondées sur l'élément hydrographique de base retenu (les arcs), il était ainsi nécessaire de créer une chaîne de traitement visant à rapporter les données disponibles à l'échelle de la commune aux arcs concernés :

- calcul automatisé de la surface totale de chacune des communes du bassin versant à partir du fichier *communes_BVArd.shp* contenant la géométrie des communes et les données de prélèvements agricoles en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (obtenues en multipliant les surfaces cultivées en hectares par $0,003 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ;
- intersection du fichier *communes_BVArd.shp* et du fichier *bvu_ard.shp* et création du fichier de formes *inter_com_bvu.shp* contenant à la fois les attributs des deux fichiers sources.

- dans le fichier *inter_com_bvu.shp*, calcul automatisé des surfaces intersectées et calcul d'un champ Dderagri (surface de l'entité intersectée multipliée par le débit dérivé agricole par commune et divisé par la surface totale des communes) qui permet ainsi d'attribuer à chacune des portions de bassins versants unitaires redécoupées selon les limites communales une valeur de surfaces cultivées et de débits agricoles (correspondant à l'hypothèse, faute de mieux, que la répartition des surfaces irriguées à l'échelle d'une commune est uniforme). Ce calcul induit le biais principal de notre modélisation. Par exemple, si au sein d'une commune, l'un des bassins versants unitaires comprend l'ensemble des surfaces irriguées, notre modèle ne respectera pas cette situation.
- fusion attributaire entre les entités d'*inter_com_bvu.shp* portant le même *GRIDID* (identifiant unique communs aux arcs et aux bassins versants unitaires) avec un calcul de somme dans le champ Dderagri. Cette opération permet de réunifier les différents bassins versants unitaires en agrégeant les prélèvements agricoles correspondants aux différentes communes. Le champ Dderagri peut ensuite être associé aux arcs et/ou aux bassins versants unitaires (*rht_ard.shp* ou *bvu_ard.shp*) grâce au champ d'identifiant unique (*GRIDID* pour les bassins versants unitaires, *IDDRAIN* pour les arcs).

Les données ainsi obtenues permettent ensuite de soustraire aisément, pour les représentations ou pour les analyses, tout ou partie des prélèvements agricoles (selon le taux de retour au cours d'eau envisagé) aux paramètres hydrologiques du RHT.

4.3 – Les prélèvements industriels

4.3.1 - Création d'un fichier de forme correspondant aux moulins du bassin versant de l'Ardèche

Une jointure attributaire entre les fichiers *moulins.kml* et *moulins.dbf* a permis de créer le fichier *moulins.shp* contenant à la fois la localisation des moulins et l'ensemble des attributs enregistrés dans les archives à la fin du XIX^e siècle. Seuls les moulins effectivement inclus dans l'un des bassins versants unitaires du bassin de l'Ardèche sont intégrés à ce fichier de forme.

4.3.2 - Calcul des prélèvements industriels

Afin de calculer les prélèvements des moulins par arc, les étapes suivantes ont été nécessaires :

- jointure spatiale entre les moulins et les bassins versants unitaires afin d'ajouter au fichier *moulin.shp* un champ contenant les *GRIDID* correspondant à leur bassin versant unitaire et à l'arc sur lequel ils prélèvent l'eau ;
- suppression manuelle des doublons (en cas de moulins multiples sur une seule prise d'eau) par comparaison avec les archives du XIX^e siècle ;
- après création d'un nouveau fichier de forme *moulinsfusion.shp*, application d'une fusion attributaire sur le champ *GRIDID* avec création de nouveaux champs (un champ avec la somme des prélèvements des moulins, un champ avec le prélèvement du moulin

prélevant le plus grand débit pour chacun des arcs (valeur maximale constatée pour un même identifiant *GRIDID*) ;

- jointure attributaire de la couche *moulinsfusion.shp* aux couches *rht_ard.shp* et *bvu_ard.shp* grâce aux champs *GRIDID* et *IDDRAIN*, permettant d'ajouter les champs correspondants aux prélèvements industriels aux fichiers des bassins versants unitaires et au fichier des arcs.

À partir de ces champs, il devient donc aisé d'appliquer les pressions industrielles aux les paramètres hydrologiques du RHT, en faisant varier les taux de retour au cours d'eau si nécessaire.

4.3.3 - Estimations des longueurs court-circuitées par les prises d'eaux industrielles

Cette donnée n'ayant pas été mesurée à la fin du XIX^e siècle, nous avons produit une approximation à partir des canaux d'amenée et de fuite encore visibles sur les photographies aériennes et/ou sur les prises d'eau. Les longueurs retenues sont donc celle des biefs, et non du cours d'eau. Afin de produire des valeurs de longueurs court-circuités correspondant au plus petit court-circuit, au plus grand court-circuit, à la moyenne des longueurs de court-circuit et à la somme des longueurs de court-circuit pour chaque arc, une démarche similaire à celle présentée en 4.2.2., a été appliquée, mais lors de la fusion attributaire, nous avons créé un champ max, un champ min, un champ moyenne et un champ somme.

4.4 – Les cumuls de pressions

4.4.1 - Cumul des pressions de l'amont vers l'aval à l'échelle du bassin versant de l'Ardèche

Cumuler les pressions de l'amont vers l'aval, et les différents types de pression impliquait également quelques transformations des données.

Le cumul des pressions industrielles de l'amont vers l'aval n'a pas été considéré utile, en raison des excellents taux de retour de l'eau dérivée aux cours d'eau, en dehors de prélèvements agricoles sur les canaux de fuite qui apparaissent de toute manière déjà dans les pressions agricoles. Pour le cumul des pressions agricoles, nous avons choisi d'opérer manuellement dans un fichier Excel, en partant de l'amont. Il aurait également été possible d'opérer automatiquement, à l'aide du langage R, par exemple, mais le temps de calcul manuel étant très réduit, l'opération de codage n'était pas utile. Elle le deviendrait pour travailler sur des réseaux hydrographiques plus étendus et/ou plus complexes.

4.4.2 - Cumul des pressions agricoles et industrielles

Le cumul des pressions agricoles et industrielles à l'échelle de l'arc, ainsi que le cumul des pressions industrielles par arc et des pressions agricoles cumulées depuis l'amont n'a pas été effectué par un calcul : il était en effet peu pertinent de cumuler les valeurs en $m^3.s^{-1}$ des deux types de prélèvements, en raison de la très grande différence du taux de retour des eaux dérivées au cours d'eau. De plus, une part non négligeable des prises d'eau de moulins dérivant de gros débits servait également à alimenter des parcelles agricoles à partir du canal de fuite ; le risque de double compte de certaines dérivations était ainsi non négligeable.

Nous avons donc fait le choix d'appliquer ce cumul entre les deux types de pressions par les représentations cartographiques, permettant d'identifier des secteurs où elles sont toutes deux très prégnantes, et, à l'inverse, des secteurs de faible pression. La modélisation SIG produite ne permet donc pas pour le moment de représenter un indice de pression, mais permet de représenter l'une ou/et l'autre des pressions et d'identifier des secteurs clefs.

4.5 - Synthèse des apports et incertitudes ou limites de l'approche

Pour notre approche, il ressort d'après les réanalyses de données hydrométéorologiques que la situation hydrologique actuelle peut être transposée à la fin du XIX^e s. Mais subsistent les limites propres des modèles hydro-climatiques qui ne peuvent être prises en compte à ce stade : les changements d'occupation des sols ne sont ainsi pas considérés alors qu'ils peuvent jouer un rôle hydrologique important (les prairies ou cultures au XIX^e s. devenues des forêts ou des friches actuellement).

Subsistent aussi des incertitudes liées à la construction du RHT : la complexité locale, notamment dans les karsts, n'est pas prise en compte (pertes, sources, émergences d'écoulements alimentés par d'autres bassins versants), bien que, comme nous l'avons souligné plus haut, cette incertitude n'affecte pas réellement les résultats de notre démarche car les secteurs karstiques ne comportaient pas de forte pressions agricoles ou industrielles dans le bassin de l'Ardèche.

Des incertitudes demeurent aussi sur l'estimation des prélèvements :

- **la saisonnalité de l'irrigation est importante** : en particulier parce que cette dernière n'était pratiquée que lors de la saison végétative (mars/avril à début octobre en général) ; le reste de l'année, la pression agricole sur les écoulements est pour ainsi dire nulle ;
- **le rendement des dérivations et le taux de retour des eaux à la rivière** : on ne possède aucune information historique précise sur le rapport entre les débits dérivés à la prise d'eau et les débits réellement consommés par les cultures, ni sur la part de cet écoulement qui retournait à la rivière, par infiltration ;
- **la double utilisation de l'eau, agricole et industrielle, était une pratique sur quelques canaux** : les eaux du canal de fuite à la sortie du moulin irriguaient des cultures avant de retourner (ou pas) à la rivière ;
- **l'absence de prise en compte des règles de gestion ou du jeu des négociations propre à chaque bassin** : dans notre approche, nous estimons les pressions qui s'exercent sur la ressource de façon théorique, sans pouvoir entrer dans le détail des accommodements qui pouvaient exister entre des usagers en concurrence pour cette ressource (eg. partage horaire ou diurne de l'eau, renoncement contraint d'un des deux ayants-droits). Les archives permettent de connaître les circonstances d'un certain nombre de conflits qui

révèlent des pratiques hydrauliques. Mais il est impossible de les extrapoler à tous les segments concernés par les prélèvements ;

- **la concomitance des prélèvements pour l'irrigation et/ou industriels dans les bassins, enfin, est difficile à mesurer exactement** : de nombreux documents font états de conflits, ou au moins de fortes concurrences pour l'usage de l'eau et montrent que dans les périodes d'écoulements faibles, la situation pouvait être assez tendue entre les ayant-droit (Jacob-Rousseau, 2005). Mais on ne connaît pas clairement le fonctionnement ordinaire des rapports entre industriels et arrosants.

5 - Bilan des activités industrielles et agricoles au XIX^e siècle dans le bassin de l'Ardèche

L'information collectée et traitée permet de présenter les usages agricoles et industriels de l'eau sous différents aspects : leur structure spatiale à l'échelle des bassins et sous-bassins, la nature des différents usages de la ressource, la distribution des prélèvements le long des cours d'eau et les effets de discontinuités qu'elle induit sur les écoulements. La situation décrite peut être considérée comme le maximum historique connu, puisque, à la fin du XIX^e siècle, l'équipement industriel de l'Ardèche comme des cours d'eau voisins est à son apogée et que, malgré un début de déprise rurale, les campagnes sont encore pleines.

5.1 - Synthèse des données industrielles et agricoles disponibles

La quasi-totalité du bassin versant de l'Ardèche était soumis à des pressions agricoles et/ou industrielles (Fig. 13). Seuls les secteurs des gorges de l'Ardèche, très encaissées, et le bas Vivarais étaient faiblement concernés, ce qui tient en grande partie à la présence du karst, donc à l'absence d'écoulement pérenne en surface.

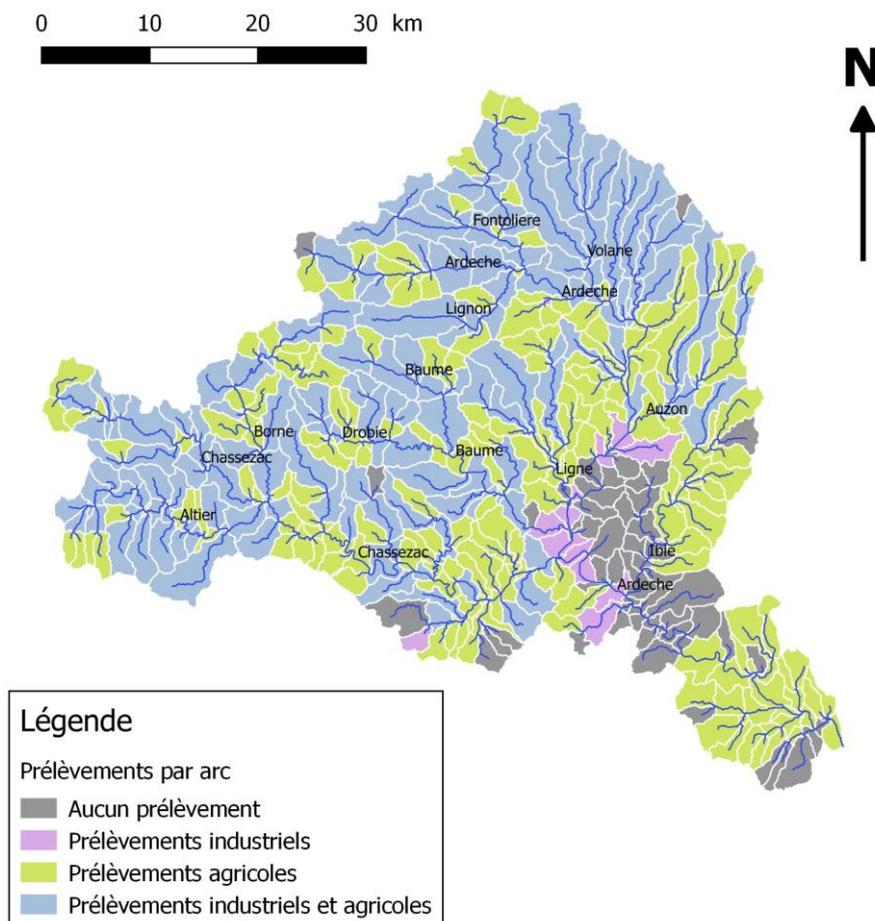
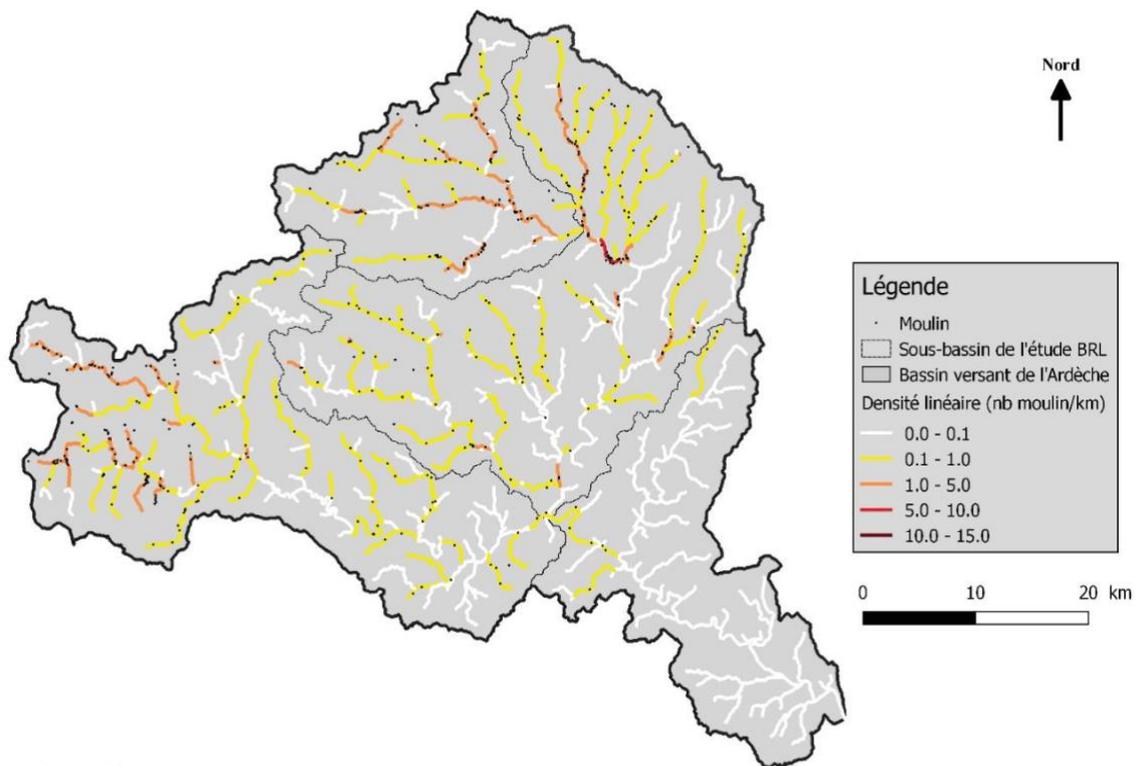


Figure 13 — Prélèvements industriels et agricoles recensés à la fin du XIX^e à l'échelle des arcs et bassins unitaires du RHT.

5.1.1 - La présence industrielle en cartes

L'industrie est essentiellement décrite par l'*Atlas des cours d'eau* (1891 pour le département de l'Ardèche, 1900 pour la Lozère et le Gard), complété par un recours à la carte de Cassini ou à la carte d'État-major. La base de données sur les moulins recense 550 ouvrages dans le bassin versant de l'Ardèche. Ils sont implantés en majorité sur le cours supérieur de l'Ardèche et sur ses sous-bassins, dans la partie N-O du bassin. La densité moyenne linéaire de moulins est de 0,45 moulin/km de cours d'eau sur l'ensemble des 1216 km de cours d'eau étudiés, soit en moyenne un ouvrage tous les 2,2 km (fig. 14). Cette densité peut atteindre 1 à 5 moulins/km de cours d'eau, soit parfois un moulin tous les 200 mètres : la Volane, l'Ardèche dans le secteur de Vals-Aubenas puis autour de Lalevade, le Lignon à Jaujac, la basse Fontolière ainsi que de nombreux tributaires du haut Chassezac et de l'Altier. La densité par unité de surface est très importante, i.e. 0,25 moulins/km² répartis sur les 2200 km² du bassin versant de l'Ardèche. Ces densités sont comparables aux valeurs hautes estimées dans l'État de Pennsylvanie aux États-Unis pour les années 1840 par Walter et Merritts (2008) ou à celles d'autres bassins français à la fin du XIX^e siècle (Jacob, 2005 ; Jacob *et al.*, 2016 ; Beauchamp, 2018).



MERIAUX Germain, 2017

Figure 14 — Les dérivations industrielles recensées à la fin du XIX^e sur l'Ardèche.

Cette densité de moulin entraîne donc une fragmentation très importante des petits cours d'eau de tête de bassin en raison de la présence des seuils placés en travers des lits afin de dériver l'écoulement. Ces seuils ont une hauteur moyenne de 1,3m (min=0.9m ; max=1.6m). D'un point de vue hydrologique, cette fragmentation s'exprime par un court-circuit de nombreux tronçons de rivières par les canaux de dérivation (ou *béals*) assurant l'alimentation en eau au moulin ou, sous une autre forme, par la pratique de retenues temporaires, dans le lit

même du cours d'eau, lorsqu'ils fonctionnent par écluse (Fig. 15). Ce mode d'alimentation est une adaptation à des débits faibles et produit une interruption de l'essentiel de l'écoulement pendant plusieurs heures, voire plus d'une journée parfois. De très longs linéaires de cours d'eau ont ainsi été court-circuités, ce qui réduit la quantité d'eau s'écoulant dans le lit entre le point de prise d'eau (au niveau du seuil) et son point de restitution, à l'issue du canal de fuite (Fig. 16). Les statistiques comme les observations faites sur les photographies aériennes nous ont permis de dénombrer 101 moulins fonctionnant toute l'année par écluse et 5 moulins fonctionnant au moins 2 mois/ans par écluse (au maximum 10 mois/an au fil de l'eau ; Fig. 15).

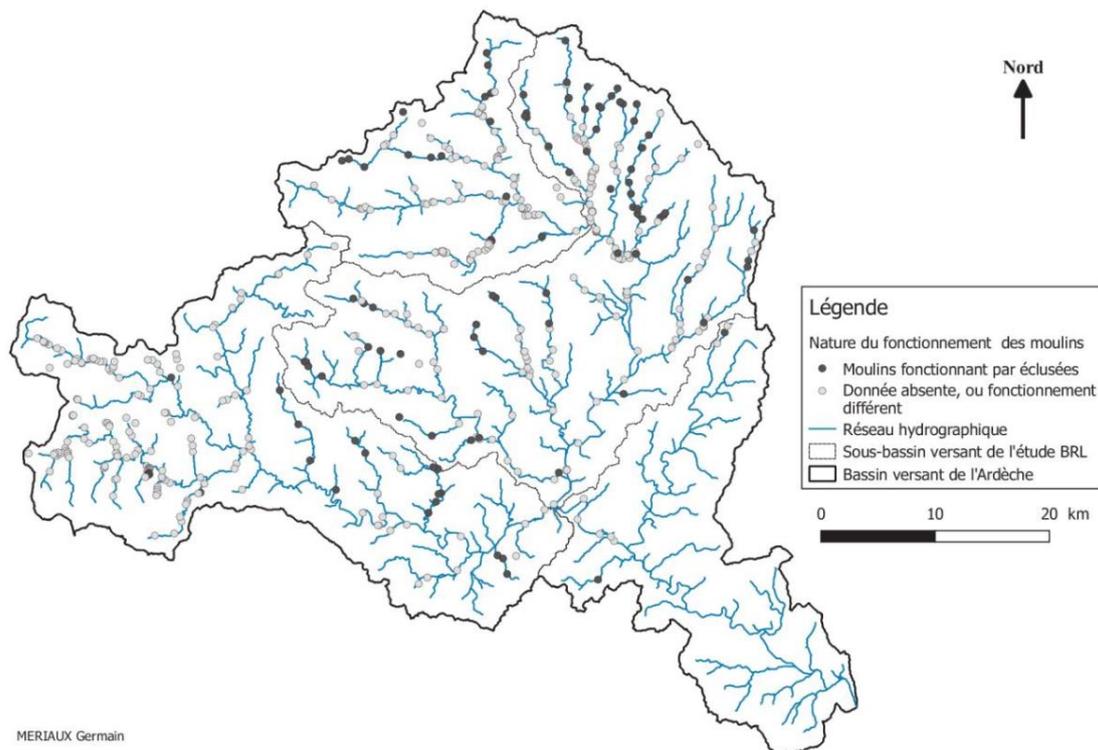


Figure 15 — Nature du fonctionnement des moulins (par écluse ou autres).

Le long de 463 km de cours d'eau dans lesquels nous avons pu définir clairement les points de prise d'eau et de restitution de ces canaux, 77 km de béals ont été identifiés au total ($n = 324$ moulins ; colorés à la Fig. 17). La longueur totale court-circuitée de cours d'eau est de l'ordre de 73 km. Une valeur de 124 km de cours d'eau court-circuité a été estimée à l'échelle du bassin de l'Ardèche, en affectant aux moulins ne disposant pas de cette donnée la valeur moyenne de longueur court-circuitée (231 m). Cette longueur court-circuitée représente alors 10% de la longueur totale du réseau hydrographique (ie. 1217 km de cours d'eau considérés). Mais comme pour la densité linéaire des moulins, ces valeurs masquent de très grandes disparités spatiales entre les tronçons. Dans certains, la longueur cumulée des béals est très supérieure à la longueur du chenal de rivière où sont pratiquées de multiples dérivations (Fig. 16 et 17).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

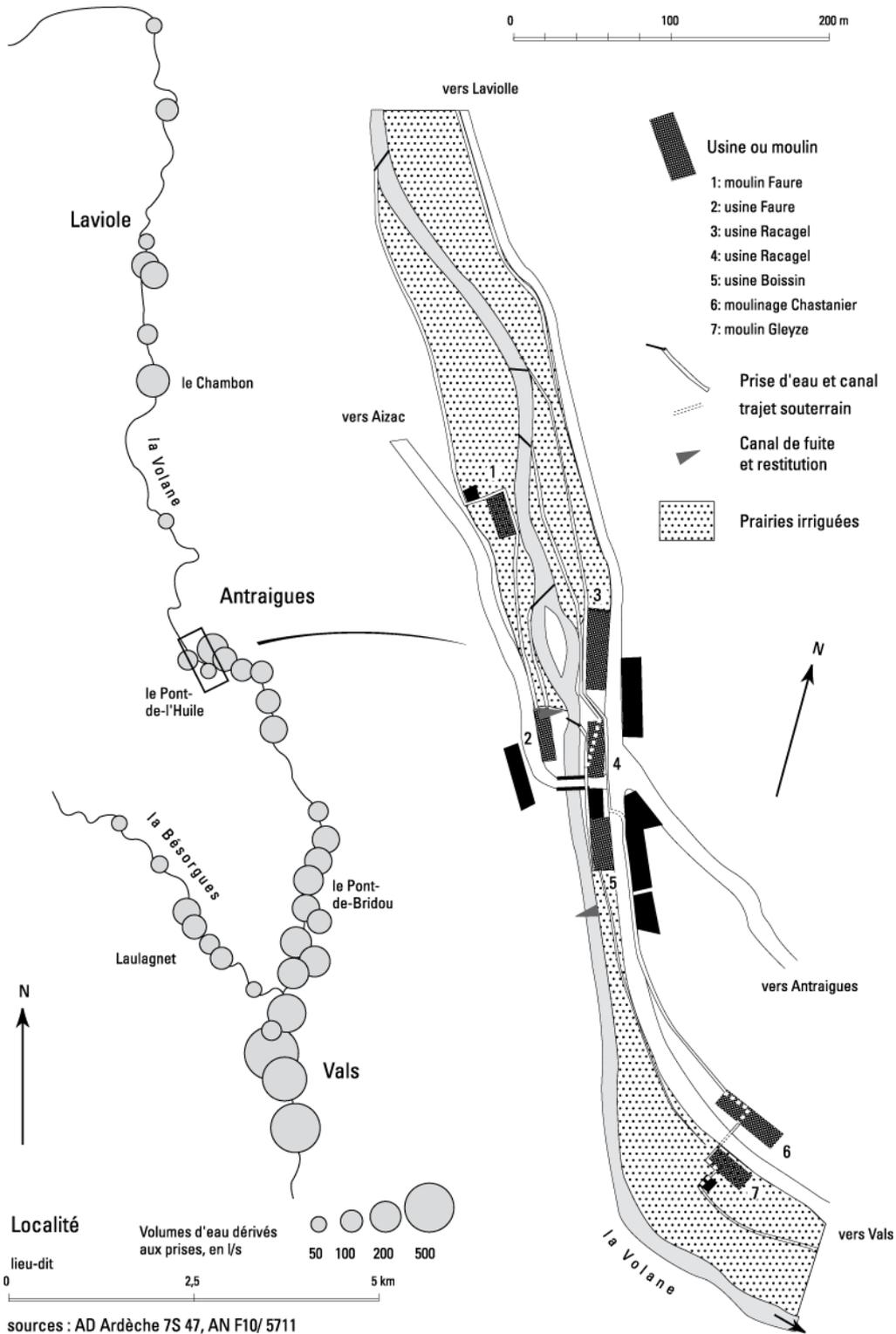
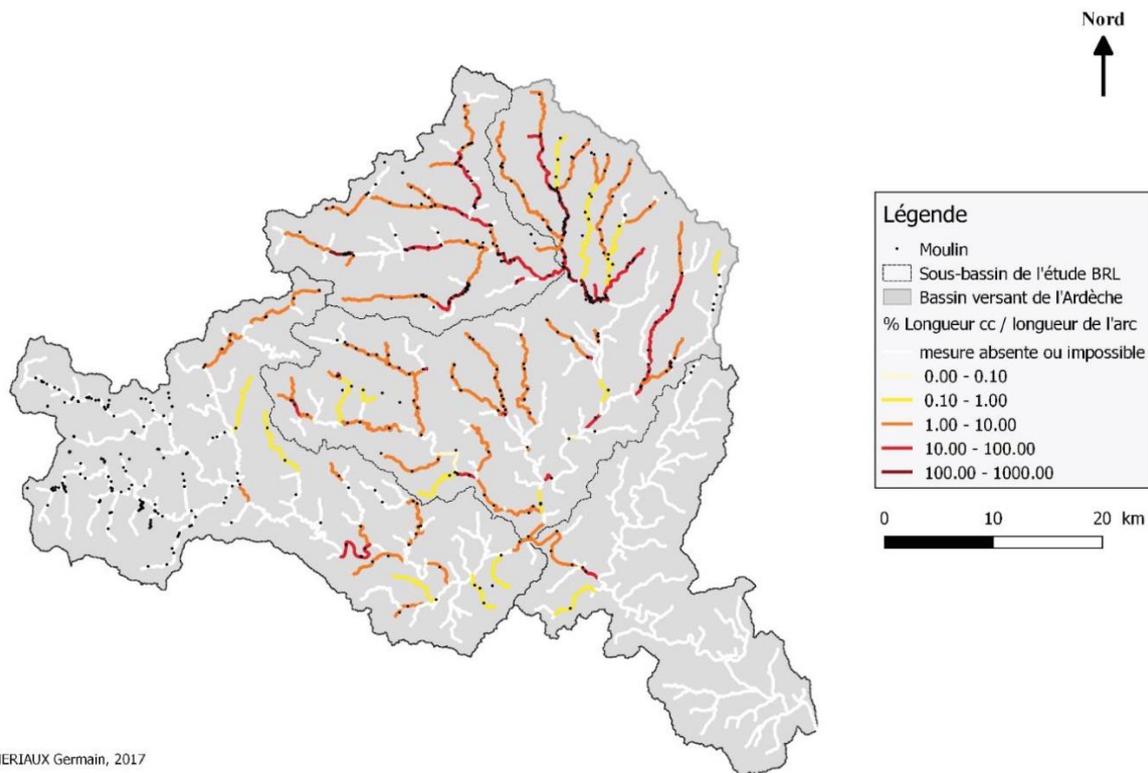


Figure 16 — Succession de prises d'eau à Antraigues (Jacob, 2005) illustrant la longueur et la complexité du réseau hydraulique artificiel associé au moulinage et à l'irrigation.



MERIAUX Germain, 2017

Figure 17 — Longueurs court-circuitées par les moulins, rapportées à la longueur de chaque arc (lorsque ce calcul a été possible).

Sur certains tronçons, la longueur des canaux représentait plus de 5 fois la longueur de l'arc de cours d'eau principal, complexifiant et allongeant alors de manière significative le réseau hydrographique. Ces béals ont une longueur moyenne de 237 m et se succèdent le long du cours d'eau, créant ainsi des chaînes industrielles. Cinq dériviations de plus de 3 km ont été identifiées sur le bassin, sans qu'aucune restitution directe ne soit faite au cours d'eau le long du tracé.

Toutes ces installations dérivent en moyenne 200 l/s à la fin du XIX^e s, avec une grande variabilité en fonction des ressources hydrologiques de chaque cours d'eau (min = 12 l/s ; max = 9 m³/s ; Fig. 18). Ces dériviations sont donc logiquement plus importantes sur le cours principal de l'Ardèche, où le débit est élevé, que sur les petits affluents.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

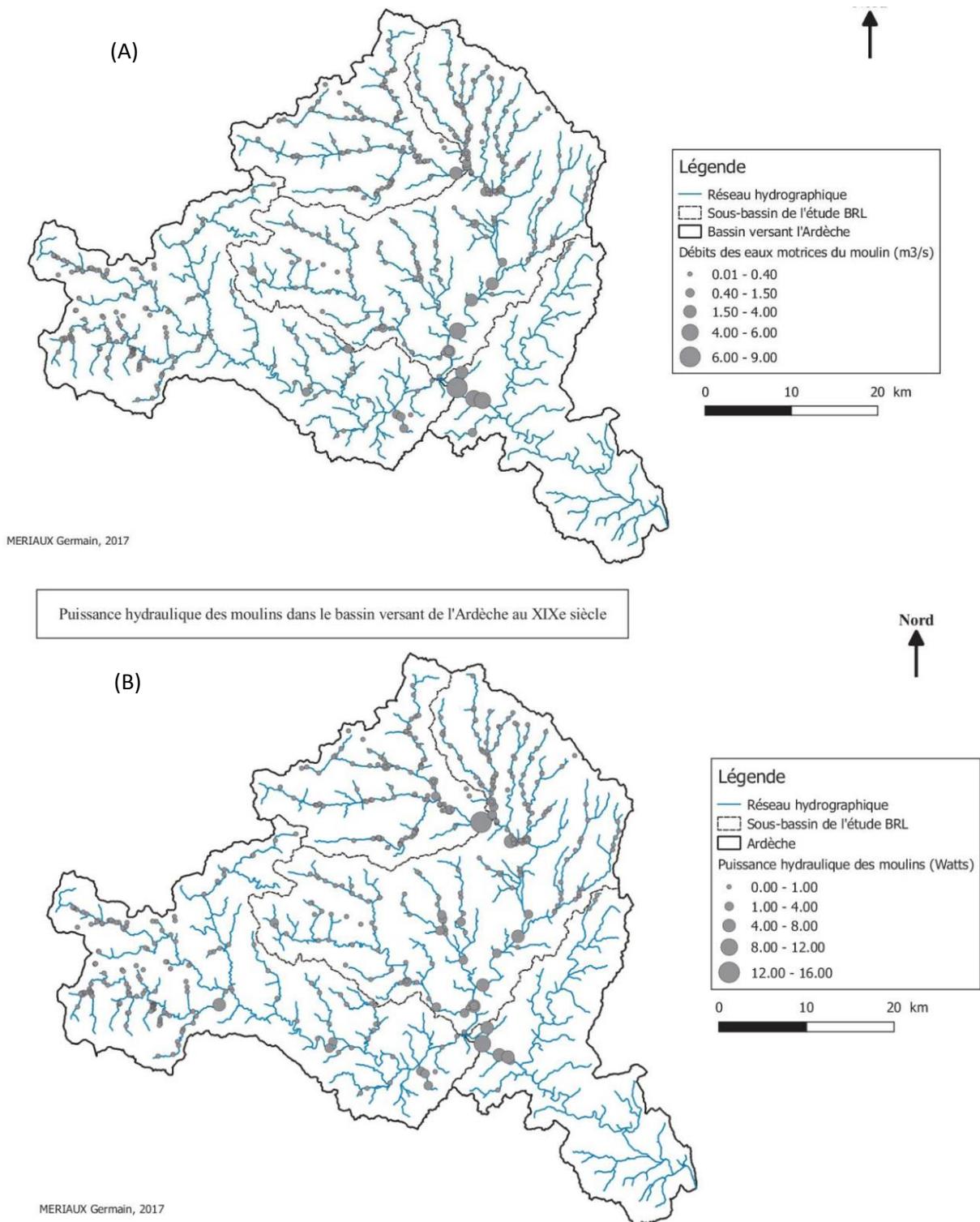


Figure 18 — A) Débit des eaux motrices (m³/s) et B) puissance hydraulique brute des moulins à la fin du XIX^e s. (produit de la hauteur de chute, du débit dérivé et de l'accélération due à la gravité ; en watt).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Ces moulins fournissent une puissance brute totale estimée à 2,7 MWatt. Ces installations hydrauliques seraient classées actuellement, pour l'essentiel (99 %), comme des ouvrages de pico-hydraulique (<100 kW). Deux moulins situés sur le cours de l'Ardèche appartiennent à la catégorie de la petite hydraulique (>100 kW). Ils produisent à eux seuls environ 10 % de la puissance totale brute estimée.

Type d'ouvrage	Répartition en % [effectif]	% Puissance/puissance totale, ie. 2,7 MW (%)
Petite hydraulique (>100kW)	0,4 [2]	9,6
Pico-hydraulique (<100kW)	99,6 [524]	90,4

Tableau 2 — Répartition de la puissance industrielle brute au XIX^e s. ; 2,7 MWatts au total sont disponibles sur le bassin.

Ces moulins, pour environ 70 % de l'effectif (Fig. 19), sont essentiellement destinés à la production de farine (surtout de châtaigne dans la partie cévenole du bassin, de blé et autres céréales ailleurs), ainsi qu'à la production d'huile. Les fabriques textiles (de soie surtout, la laine et le coton étant très marginaux dans ce bassin) occupent la seconde place de l'activité industrielle du bassin de l'Ardèche (*ca.* 25%) alors que les scieries et les papeteries représentent moins de 10% des effectifs de moulins en place (*ca.* 5%).

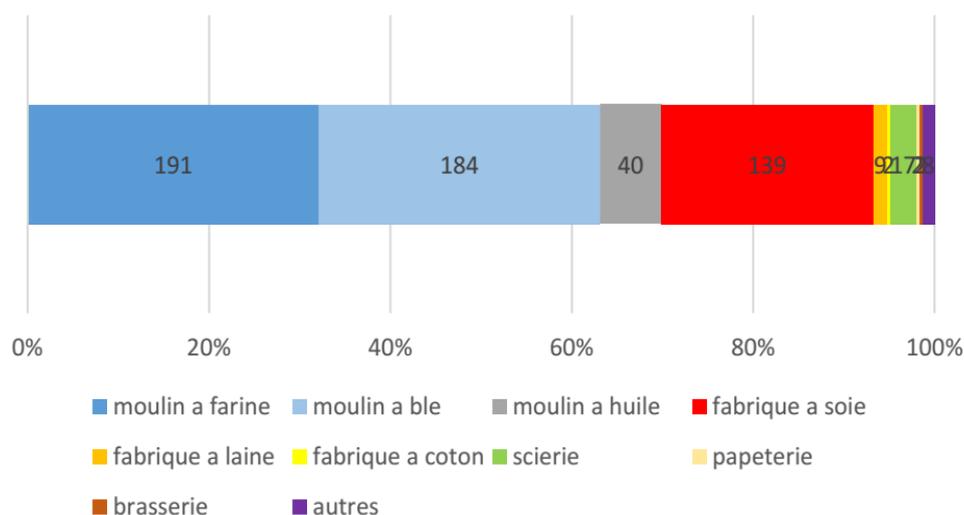


Figure 19 — Répartition des activités industrielles (effectifs de moulin par activité)

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Ces installations fonctionnent avec des rendements (*i.e.* le rapport entre la puissance utile et la puissance brute) variables en fonction des installations (Tab. 3) : de 17% de rendements pour les moulins équipés de roues horizontales à cuillères, jusqu'à 72% de rendement pour les turbines. Les installations et leur rendement dépendent de la nature de la production : la papeterie, les mines et les scieries sont associés aux meilleurs rendements observés (Tab. 4).

Nature mécanique	Rendement moyen	
	(%)	Effectif
Aube	50	5
Auget	60	191
Cuillère	17	145
Horizontale	42	61
Palette	33	7
Rouet	43	48
Turbine	72	85
Pas d'information	47	7

Tableau 3 — Rendement des installations (en %) en fonction du mécanisme d'entraînement, *i.e.* le rapport entre la puissance utile et la puissance brute. Source : *Atlas des cours d'eau*, tableau B.

Type de production	Rendement moyen (%)	Effectif
Farine	44	414
Laine	56	6
Minerai	75	1
Papier	70	1
Scie	64	11
Soie	58	103

Tableau 4 — Rendement par type de production. Source : *Atlas des cours d'eau*, tableau B.

Globalement ces moulins sont installés sur les cours d'eau à haut potentiel hydraulique (proportionnel à la pente du cours d'eau et à son débit moyen ; Fig. 20). On remarquera que les cours d'eau présentant les puissances les plus élevées sont évités par les mouliniers afin de préserver les installations des crues violentes.

Toutefois, le chevauchement des distributions statistiques montre que cette disponibilité de la ressource naturelle hydraulique ne peut pas expliquer à elle seule les stratégies d'implantations des moulins le long des cours d'eau. La proximité de l'industrie de moulinage avec i) les lieux de production de la matière première (champs de blé, châtaigneraies), ii) le réseau de transport pour l'acheminement des marchandises (routes/chemin d'accès aux moulins, chemin de fer), et iii) les centres de vente (villes et villages) sont des paramètres socio-économiques essentiels à prendre en compte pour comprendre l'implantation de ces ouvrages et les stratégies d'optimisation du réseau de production d'énergie hydraulique.

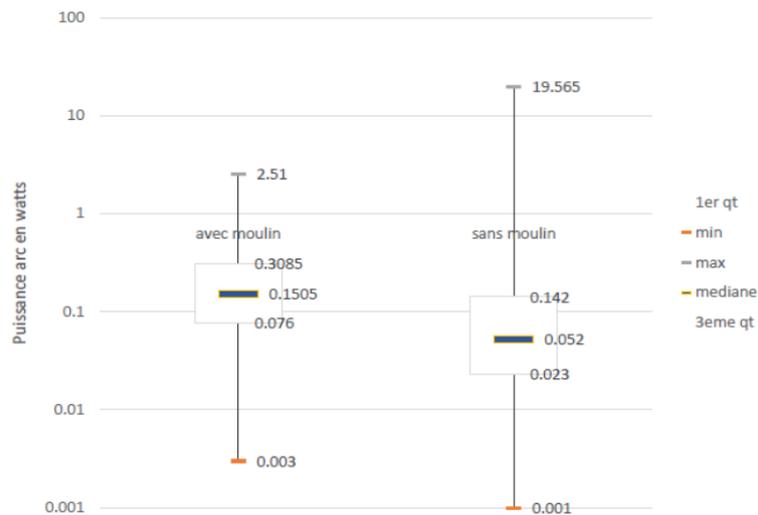


Figure 20 — Puissance des arcs de cours d’eau (α pente * débit module) et leurs répartitions statistiques selon qu’ils hébergent ou non des activités industrielles.

5.1.2 - La base de données agricoles

Notre base de données agricoles sur le bassin de l’Ardèche a permis de recenser 110 communes avec une surface agricole irriguée totale estimée à 15500 ha (Fig. 21), soit un peu moins de 7 % du bassin versant ; les surfaces irriguées de chaque commune varient entre 140 ha (min= 0.64 ha ; max=3235 ha) et se situent essentiellement dans la moitié N-O du bassin.

Pour l’Ardèche et le Gard, seules les données à l’échelle de la commune ont été recensées. Les statistiques indiquent un nombre de 1020 secteurs irrigués (prairies naturelles et prairies temporaires artificielles). Chaque secteur dépend d’une prise d’eau et regroupe plusieurs parcelles foncières ; elles sont réparties dans 10 communes. Au total, 144 prises d’eau étaient partagées avec des moulins. Pour 39 de ces secteurs, nous disposons du débit dérivé et du nom du cours d’eau où se trouvait la prise d’eau ; ces prises d’eau étaient réservées à l’agriculture, sans partage avec un moulin. Pour la Lozère, nous disposons de données agricoles très précises (cf. Fig. 12) qui indiquent le débit dérivé aux prises d’eau pour 60 secteurs irrigués. La valeur moyenne s’établit à 5,3 l/s/ha (Max = 48 l/s/ha ; Min 0,06 ; médiane = 1,92). Ces données sont intéressantes car elles tendraient à valider l’ordre de grandeur de 3 l/s/ha admise couramment pour l’irrigation gravitaire au XIX^e s dans les rapports des Ponts-et-Chaussées (cf. *supra*, 3.1.1). Par la suite de notre étude, nous considérerons cette valeur de 3 l/s/ha. En considérant 15500 ha de surface agricole sur le bassin de l’Ardèche, ce serait donc environ 46 m³/s qui étaient potentiellement dérivés pendant la saison végétative (d’avril à fin septembre).

Ces surfaces agricoles ont été redistribuées par sous-bassin versant de chaque arc du RHT afin de pouvoir confronter ces données de prélèvements agricoles avec les débits non influencés de chaque cours d’eau (e.g. QMNA5, module).

Légende

Surface (ha) irriguée par commune

0.80 - 50
50 - 100
100 - 250
250 - 500
500 - 1000
1000 - 1120
Aucune surface irriguée

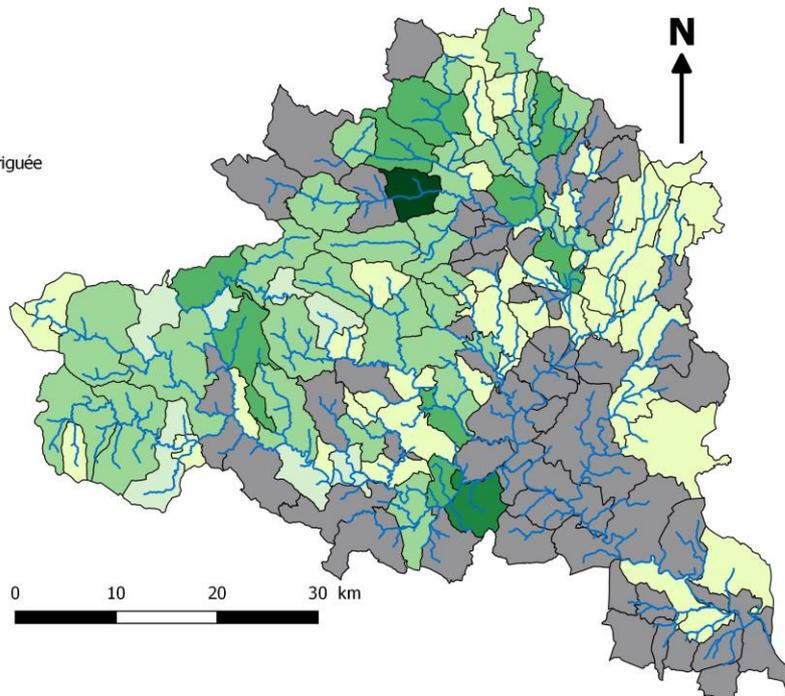


Figure 21 — Distribution des surfaces irriguées (en hectare) par commune. Source : AD 07, série M.

5.2 - Quantification des pressions humaines sur les cours d'eau à la fin du XIX^e siècle

5.2.1 - Les pressions industrielles seules dans le bassin de l'Ardèche

Les valeurs obtenues pour les prélèvements industriels et agricoles ont ensuite été comparées aux débits des cours d'eau non influencés. Pour cela, nous avons utilisé les données de module, QMNA5 et débits classés du RHT, qui permettent ainsi de caractériser les pressions sur les débits actuels et sur les débits potentiels de la fin du XIX^e s (reconstruction hydrologique de SCOPE-Hydro).

Les Figures 22 et 23 résument nos résultats pour les prélèvements industriels. En condition de module, 20 % des moulins induisent une pression très forte sur les cours d'eau (>75 % du module prélevé) et, sur environ 5 % des arcs, les plus grosses installations industrielles engendrent une pression très forte. Lorsque l'on passe au QMNA5, 80 % des 550 moulins prélèvent potentiellement la totalité des débits. Les pressions sont alors très importantes. Les résultats sont peu sensibles aux incertitudes que l'on a sur l'estimation des débits de références (QMNA5 et modules ; Fig. 23 A et B).

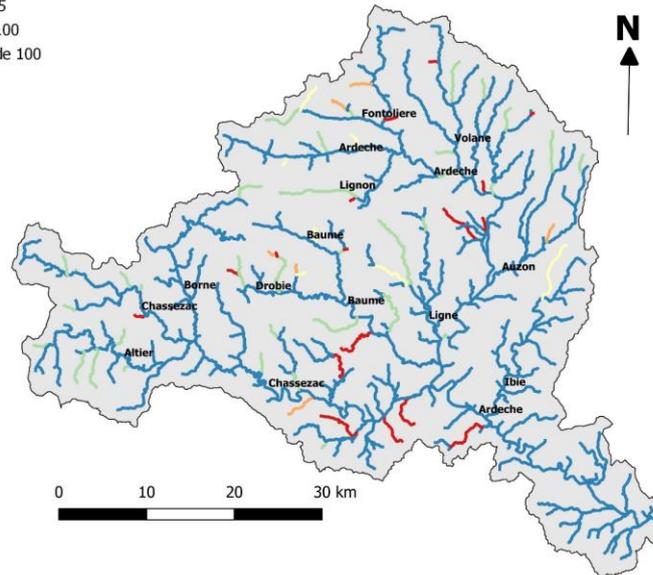
Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

(B)

Pourcentage du module potentiellement dérivé par la plus grosse unité industrielle, par arc

- 0,0000 - 25
- 25 - 50
- 50- 75
- 75- 100
- Plus de 100



(A)

Pourcentage du QMNA5 potentiellement dérivé par la plus grosse unité industrielle, par arc

- 0,0000 - 25
- 25 - 50
- 50- 75
- 75- 100
- Plus de 100

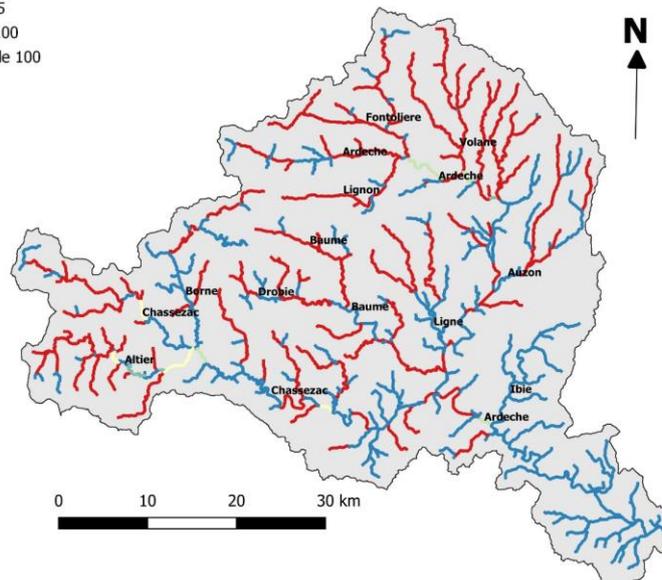


Figure 22 — Pourcentage du débit du cours d'eau potentiellement prélevé par la plus grosse unité industrielle de chaque arc (en %) dans des conditions de module (A) et de QMNA5 (B).

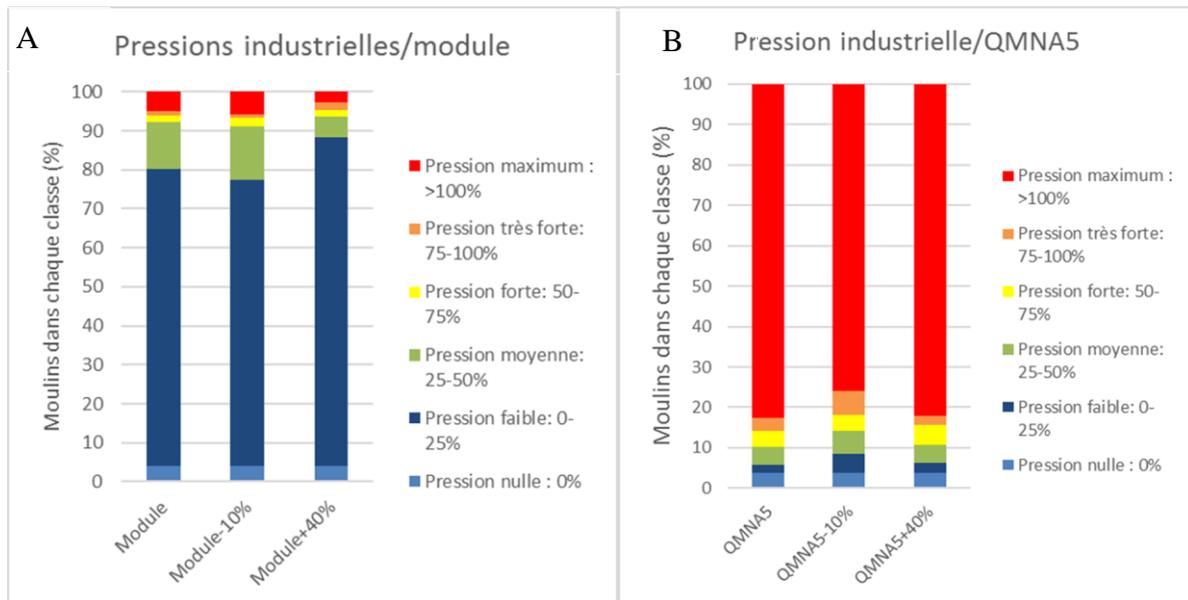


Figure 23 — Répartition des moulins (en % de l'effectif total, n = 550) en fonction du pourcentage du débit naturel prélevé pour leur alimentation, en situation de module (A) et de QMNA5 (B) ; classes de prélèvement : 0-25% ; 25-50% ; 50-75% ; 75-100% et >100% des écoulements. Une incertitude de [Q-10% ; Q+40%] est prise en compte afin de considérer la variabilité des résultats de la reconstruction SCOPE-Hydro.

5.2.2 - Les pressions agricoles dans le bassin de l'Ardèche

La carte des pressions agricoles pour le QMNA5 montre que les cours d'eau de tête de bassin sont fortement impactés par l'agriculture (Fig. 24A). Nous avons dans ce cas pris en compte un rendement d'irrigation de 40 %, ce qui signifie que 60% de l'eau dérivée retournent au cours d'eau par infiltration, une estimation haute du retour du débit dérivé vers le cours d'eau.

Lorsque l'on cumule les pressions de l'amont vers l'aval (toujours en considérant un rendement de 40 %) la quasi-totalité des rivières sont à sec (Fig. 24B). Les seules rivières qui ne présentent pas d'impact sont situées en aval du bassin, car les nombreuses sections en gorges ou canyons font qu'elles sont exemptes de prélèvements pour l'irrigation. En conditions hydrologiques de module, 25 % du linéaire de cours d'eau sont dans une situation hydrologique de très forte pression (>75%) et 20 % à sec (Fig. 25A). En conditions de QMNA5, c'est plus de 90% du réseau hydrographique de l'Ardèche qui se trouveraient sans écoulement (Fig. 25B).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

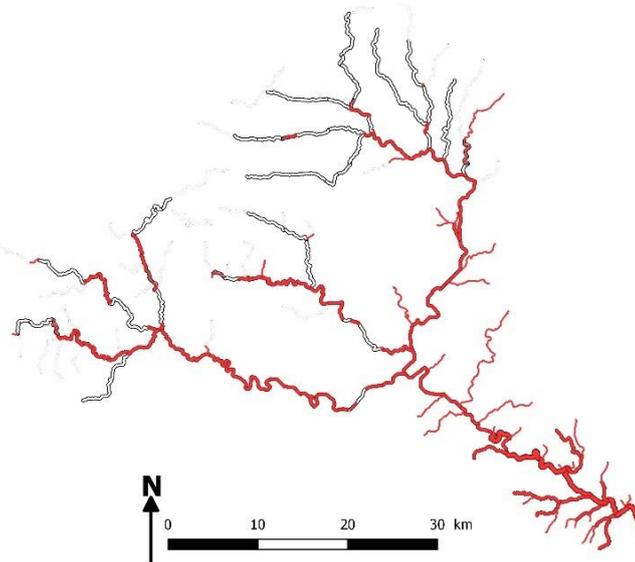
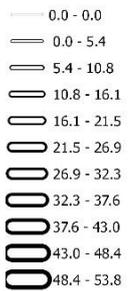
A

Légende

QMNA5 du RHT corrigé par les prélèvements agricoles (sans cumul amont-aval) en m³.s⁻¹



QMNA5 du RHT en m³.s⁻¹



B

Légende

QMNA5 du RHT corrigé par les prélèvements agricoles (avec cumul amont-aval) en m³.s⁻¹



QMNA5 du RHT en m³.s⁻¹

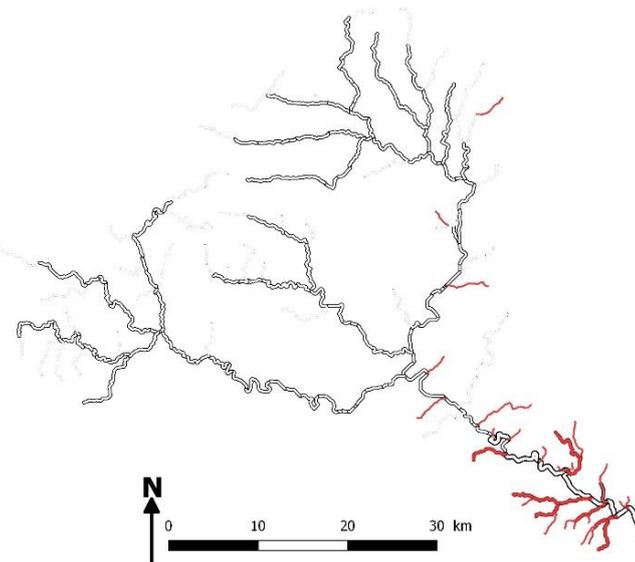
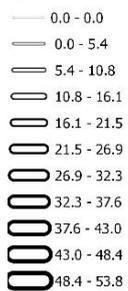


Figure 24 — Débit potentiel de chaque arc en situation de QMNA5, en prenant en compte uniquement les prélèvements de chaque arc (A), puis les prélèvements cumulés de l'amont vers l'aval (B).

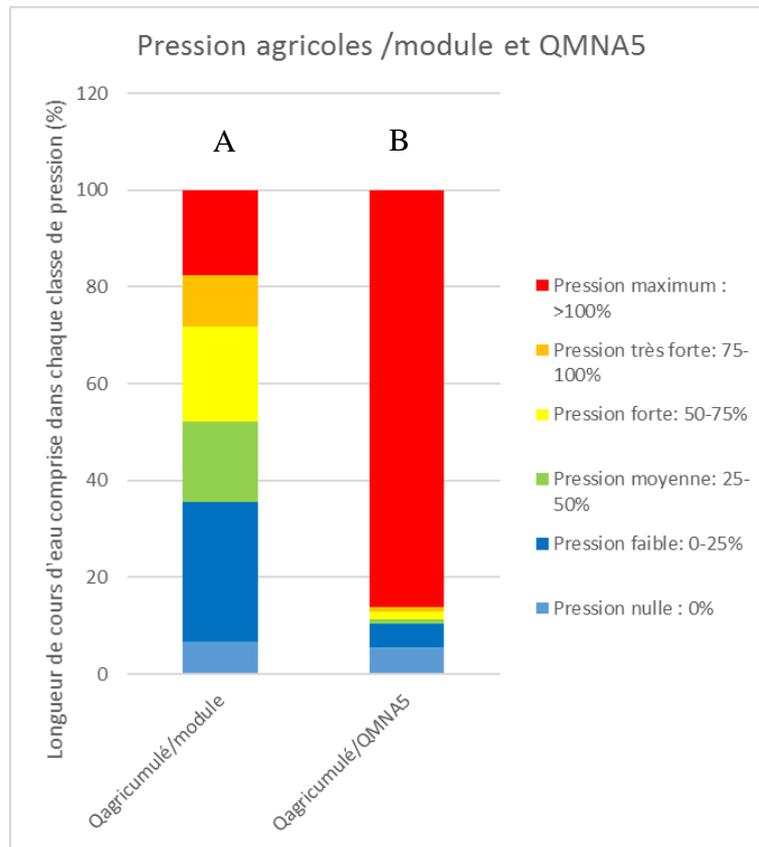


Figure 25 — Longueur de cours d'eau (en % de la longueur totale) pour lesquels les prélèvements du module (Fig. A) et du QMNA5 (Fig. B) sont nuls ou faibles (<25%), moyens (25-50%), forts (50-75%), très forts (75-100%) et maximums (>100%).

5.2.3 - Le cumul des pressions industrielles et agricoles

La Fig. 26 présente une synthèse, à l'échelle du bassin de l'Ardèche, de la pression qu'exercent les moulins (en % de l'effectif total, $n = 550$) sur le débit de leur tronçon en situation de module, en prenant en compte uniquement le prélèvement industriel (Fig. 26A) ou en cumulant les pressions industrielles et agricoles (Fig. 26 B). Une incertitude de [Q-10% ; Q+40%] est prise en compte afin de considérer la variabilité des résultats de la reconstruction SCOPE-Hydro. La figure 27 présente les mêmes résultats pour les conditions de QMNA5.

Lorsque l'on cumule les prélèvements industriels et agricoles on observe que plus de 50% des moulins ne peuvent fonctionner pour des conditions hydrologiques de module et aucun moulin ne peut fonctionner au QMNA5. Ces résultats mettent en évidence des conditions environnementales potentiellement très conflictuelles entre les activités industrielles et agricoles sur l'ensemble du bassin versant.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

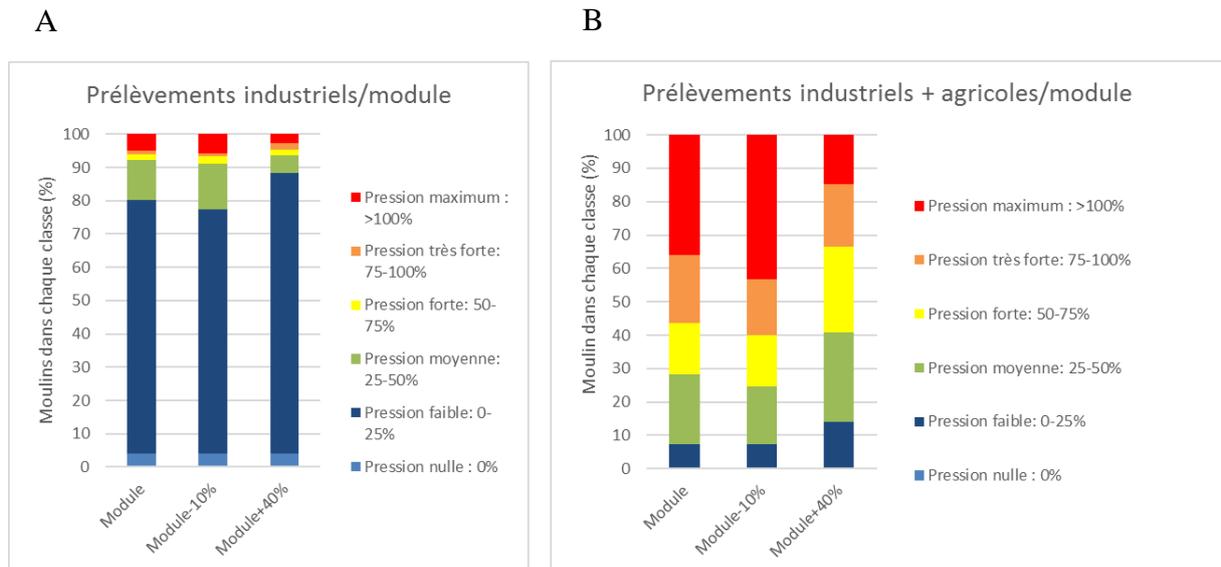


Figure 26 — A : Répartition des moulins (en % de l'effectif total, n = 550) en fonction de la pression qu'ils exercent sur le débit de leur tronçon en situation de module ; B : Répartition des moulins (en % de l'effectif total, n = 550) en fonction de la pression qu'ils exercent, avec les prélèvements agricoles, sur le débit de leur tronçon en situation de module. Une incertitude de [Q-10% ; Q+40%] est prise en compte afin de considérer la variabilité des résultats de la reconstruction SCOPE-Hydro.

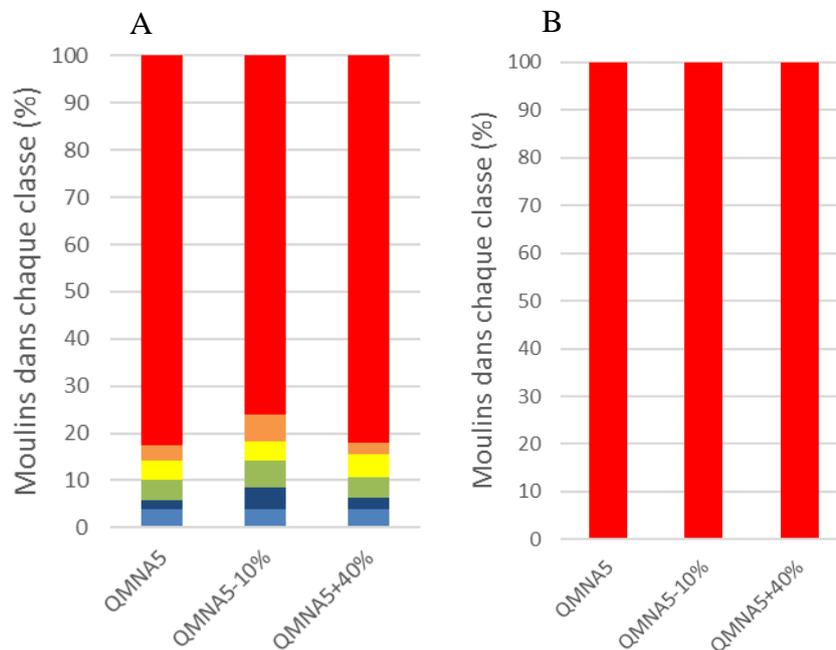


Figure 27 — A : Répartition des moulins (en % de l'effectif total, n = 550) en fonction de la pression qu'ils exercent sur le débit de leur tronçon en situation de module ; B : Répartition des moulins (en % de l'effectif total, n = 550) en fonction de la pression qu'ils exercent, avec les prélèvements agricoles, sur le débit de leur tronçon en situation de module. Une incertitude de [Q-10% ; Q+40%] est prise en compte afin de considérer la variabilité des résultats de la reconstruction SCOPE-Hydro.

5.2.4 - Un indicateur de risque de tension entre les différents usages

Pour évaluer la distribution spatiale du risque de pénurie et donc de tension potentielle entre les usages de l'eau à l'échelle du bassin de l'Ardèche, nous introduisons un indicateur calculé à l'échelle de chaque arc de cours d'eau (défini par le RHT) et pour différentes conditions hydrologiques.

Cet indicateur de risque de pénurie (noté I , Eq. 1) intègre i) d'une part l'aléa hydrologique dépendant du contexte local, *ie.* la disponibilité en eau de chaque arc (noté $Q_{\text{non-influencé}}$, qui peut être le module, le QMNA5 ou les débits classés), et ii) d'autre part l'intensité des prélèvements nets agricoles et les prélèvements industriels (respectivement $40\% \cdot Q_{\text{irrigation}}$ et $Q_{\text{dérivation_moulins}}$). Cet indicateur s'exprime comme suit :

$$I = \frac{Q_{\text{non-influencé}} - 40\% \cdot Q_{\text{irrigation}}}{\max\{Q_{\text{dérivation_moulins}}\}_{\text{arc}}} \cdot 100 \quad \text{Équ. 1}$$

I (en %) correspondant à la part des surfaces agricoles pouvant être irriguées, à l'échelle de chaque sous bassin versant (ou fraction du débit net dérivé pour l'irrigation, en %), tout en maintenant dans le cours d'eau un débit assurant le fonctionnement du moulin le plus important de l'arc (*i. e.* $\max\{Q_{\text{dérivation_moulins}}\}_{\text{arc}}$).

Pour une valeur de $I=100\%$, chaque usage peut être mené sans nuire aux autres usages. Dans cette situation, le risque de pénurie et tension sociale est supposé être très bas. A l'inverse, pour $I=0$ ou $<0\%$, le risque de tension sociale est à son maximum, et peut prendre la forme de négociation entre usagers (dans le meilleur des cas), de demande d'arbitrage externe, voire de conflit ouvert (*e.g.* destruction de prises d'eau, ou leur contournement par une autre dérivation). La figure 28 représente la distribution de ce risque sur le bassin de l'Ardèche pour Q40%, Q60%, Q80% et selon sept classes : $>100\%$, 80-100%, 60-80%, 40-60%, 20-40%, 0-20% et 0%. Q40%, Q60% et Q80% correspondent aux débits dépassés pendant 40% du temps (*ie.* 146 jours/an, ou non-dépassé pendant près de 7 mois/an), 60% (219 jours/an, ou non-dépassé pendant près de 5 mois/an) et 80% (292 jours/an, ou non-dépassé pendant près de 2 mois/an).

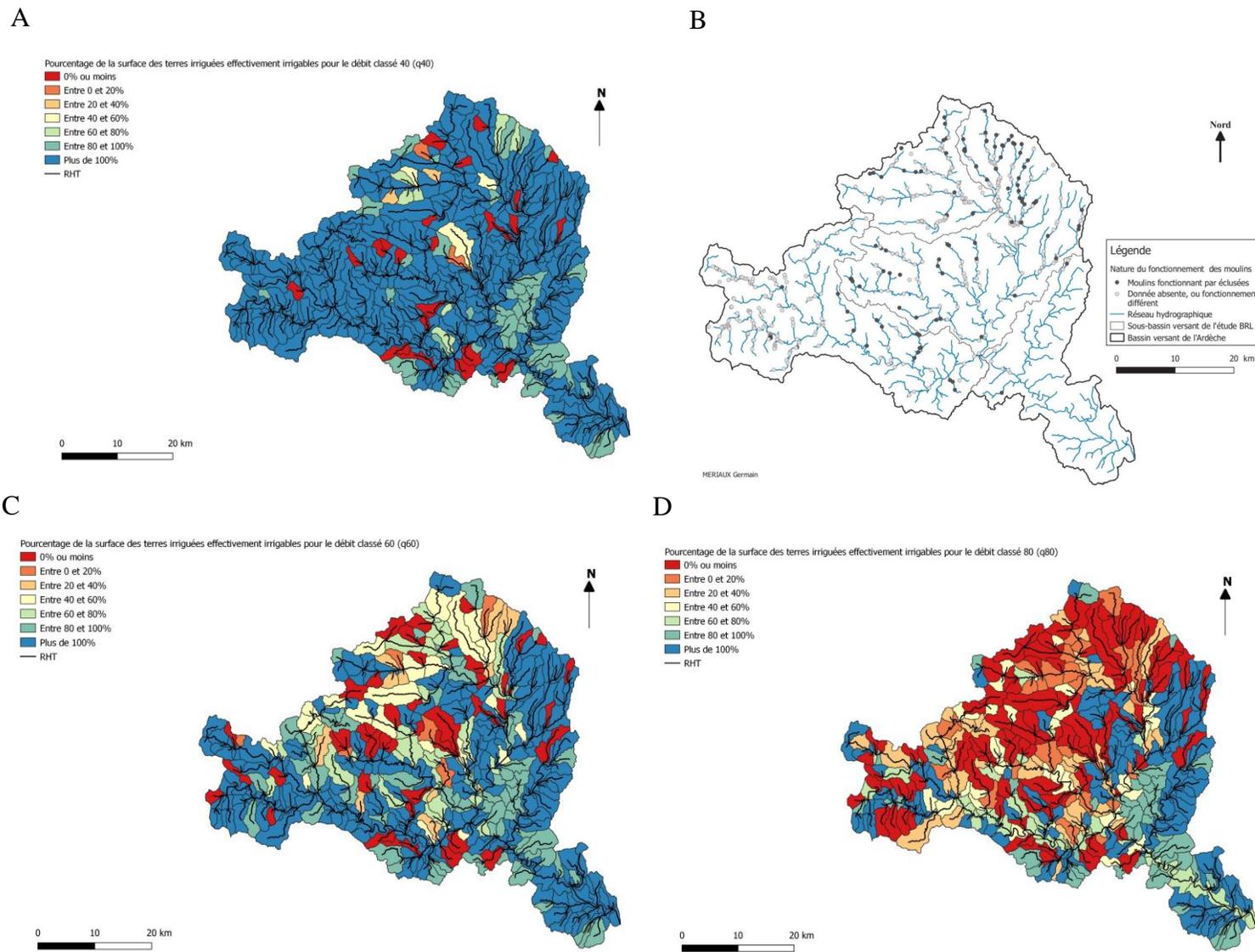


Figure 28 — Fraction des terres pouvant être irriguées tout en assurant le fonctionnement du moulin exigeant le débit le plus élevé par arc pour Q40% (A), Q60% (C), Q80% (D) et nature du fonctionnement des moulins (B).

Ainsi, on peut noter que des conditions critiques apparaissent très tôt pour 5 % des arcs, dès Q40 % (Fig. 28A). Ces arcs sont distribués dans tout le bassin, sans aucune organisation spatiale. Une adaptation technologique permet probablement de faire face à une situation de pression ; en effet, ces arcs présentent un nombre important de moulins fonctionnant par éclusée (Fig. 28B). La situation évolue rapidement à Q60 % (5 mois par an ; Fig. 28C), avec des risques de tension qui se concentrent essentiellement dans la partie N-O du bassin, *i.e.* dans les bassins où se trouvent les principales surfaces agricoles irriguées et la plus grande concentration industrielle, comme nous l'avons exposé plus haut.

On peut aussi représenter le pourcentage des arcs à l'échelle du bassin de l'Ardèche pour lesquels les besoins agricoles et industriels sont tous deux satisfaits, pour différentes valeurs de débits classés (Fig. 29). On voit que le risque de tension se généralise à la quasi-totalité de la moitié amont du bassin à Q80 % (soit 2 mois/an ; Fig. 28D). Pour environ 70 % des arcs, il n'est plus possible de faire fonctionner le moulin demandant le débit le plus élevé si 100 % des surfaces irriguées situées en amont de ce moulin satisfont leurs besoins en eau (Fig. 29). À Q99 % (soit env. 3 jours/an en moyenne), seuls 10 % des arcs permettent d'irriguer 100 % des champs qui en dépendent et plus de 60 % des arcs ne permettent plus du tout d'irrigation. C'est une situation de très forte tension.

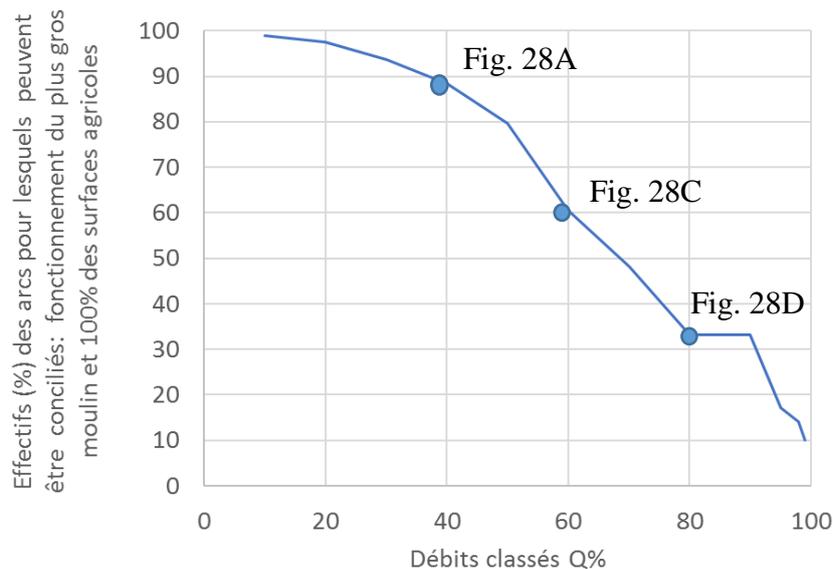


Figure 29 — Pourcentage des arcs (par rapport au nombre total d'arcs du bassin de l'Ardèche) dans lesquels le plus gros moulin de l'arc fonctionne alors que 100% des surfaces irriguées situées en amont satisfont leurs besoins en eau, en fonction de différentes situations hydrologiques (*i.e.* les zones en bleu foncé sur la figure 28 A, C et D).

Ces situations de très fortes tensions se traduisent localement par des séries de conflits entre les usagers, conflits qui pouvaient durer de nombreuses années. Voici deux exemples d'échanges pour des arbitrages extraits respectivement des archives AD_Loz_7_S_40 et AD_Ard_1109_W_140 :

"Planchamp le 5 aout 1877 :

Monsieur le Préfet,

A lé réception de vorte [sic] aretté [sic] du 5 juillet consernan [sic] le partage des eau [sic] de la Borne, les interesés [sic] de la commune de Saint Jean Chazorne et ceux de Planchamp se son [sic] empressé [sic] de [illisible] vos ordres.

Mas [sic] le cotté de l'ardèche ils non [sic] rien fait pour sela [sic] au contraire ils dises [sic] qu'il [sic] ne veule [sic] pas le faire. Depuis un mois nous sommes privés des eaux, et toutes nos récoltes perisses [sic] par la privations de ses eau [sic].

Nous vous prion [sic] Monsieur le Préfet de faire exequer [sic] vos ordres par l'ardèche, et nous faire connaitre seque [sic] nous aurons à faire en cas ou [sic] ils ne les exequite [sic] pas prontemen [sic].

Dans l'espoir que vous voudrer [sic] bien faire droit à notre juste réclamation nous avons l'honneur de nous dire de Monsieur le Préfet les très humbles et très dévoue sujet [sic].

[4 signatures]"

"Supplique à Monsieur le Préfet de la Lozère

Nous soussignés, Jean Antoine Fournier père, et Jean Antoine Odilon Fournier fils, propriétaires dans la commune de St Jean Chazorne (Lozère) et dans celle de Ste Marguerite-La-Figère (Ardèche) nous trouvant les plus forts riverains intéressés à ces deux canaux qui sont en contestation,

Avons l'honneur de prier Monsieur le Préfet de la Lozère de régler administrativement la jouissance des eaux de la rivière de Borne.

La jouissance de ces eaux a donné lieu depuis plusieurs années à de violentes contestations entre les propriétaires des deux rives. Comme nous nous trouvons des deux côtés il nous semble d'une grande utilité qu'il s'opère un partage entre les riverains des deux rives.

Sans un partage, il n'y a plus moyens de vivre en de semblables guerres et des rixes sans fin et à tous les moments et à de grandes dépenses fort inutiles de tout côté. Au nom de l'équité et de la paix nous vous prions de faire à notre requête un accueil favorable.

Signé : Fournier, Fournier

Vu pour la légalisation des signatures

Le Maire,

Signé : Fournier

Pour copie conforme

L'ingénieur ordinaire

[signature illisible]"

5.3 - Influence de ces activités sur la durée des étiages critiques et la durée moyenne annuelle de tension sur la ressource dans le bassin de l'Ardèche

Une estimation plus fine de la durée moyenne annuelle de ce risque (fonctionnement des moulins en intégrant les prélèvements agricoles) apporte une information importante et complémentaire aux données cartographiques précédentes. Pour l'estimer nous avons utilisé deux méthodes.

Une première méthode a consisté à utiliser les données de 134 moulins, issues de la base de données des moulins, dont nous connaissions la durée de fonctionnement moyenne annuelle. Dans cet effectif, nous avons exclu les moulins fonctionnant par éclusée ainsi que les moulins ne fonctionnant que de façon sporadique au cours de l'année. Ainsi, pour 102 moulins, nous avons pu estimer une durée moyenne de fonctionnement de 8,7 mois/an (min=3 mois ; max=12mois). La durée moyenne annuelle de l'arrêt des moulins est donc de 99 j/an (3,3 mois/an).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Une seconde méthode a consisté à utiliser les débits classés non-influencés, puis de les corriger par les débits irrigués et les débits dérivés industriels. Toutefois, nous ne pouvons pas simplement soustraire les débits dérivés pour l'agriculture au débit non-influencé, sans prendre en considération la saisonnalité de ces prélèvements. En effet, l'irrigation était pratiquée seulement 6 mois dans l'année, d'avril à septembre pendant la saison végétative. Nous ne pouvons donc pas utiliser les courbes de débits classés issues du RHT ; il nous faut revenir aux chroniques de débit. Nous avons donc considéré les données hydrologiques de 16 stations hydrométriques disponibles sur le bassin de l'Ardèche (données DREAL), puis retenu uniquement les 11 stations hydrométriques qui se trouvaient sur un arc possédant au moins un moulin (Tab. 5). Ces stations ne sont pas influencées ou ne le sont que faiblement. Nous disposons ainsi de 5 à 54 ans de chroniques sur des bassins versants de tailles variées (entre 62 et 1958 km²), avec des prélèvements pour l'agriculture au XIX^e variant de 1,6 à 11,6 m³/s. Nous avons ainsi calculé les courbes de débits classés influencées par l'agriculture, puis la durée de fonctionnement du moulin le plus important de l'arc (exemple à la Fig. 30), ainsi que la durée de l'étiage critique, *i.e.* la durée pendant laquelle il n'y a plus aucun écoulement dans la rivière.

Code Hydro	Nom	Surface du bassin versant (km ²)	Qirrigation (m ³ /s)	Qdérivé_moulinmax (m ³ /s)	Influence
V5045010	Le Chassezac à Berrias-et-Casteljau [Chalet]	600	8.22	0.15	pas ou faiblement
V5054010	L'Ardèche à Vallon-Pont-d'Arc	1958	11.58	0.2	pas ou faiblement
V5006210	La Fontolière à Meyras [Pont de Pourtalou]	131	3.82	0.3	pas ou faiblement
V5004030	L'Ardèche à Meyras [Pont de Barutel]	98.7	4.4	0.2	pas ou faiblement
V5004010	L'Ardèche à Pont-de-Labeaume	292	9.66	0.25	pas ou faiblement
V5035020	La Beaume à Rosières	200	3.25	0.8	pas ou faiblement
V5035010	La Beaume à Saint-Alban-Auriolles	241	4.32	0.3	pas ou faiblement
V5014030	L'Ardèche à Ucel	477	15.1	1.5	pas ou faiblement
V5035005	La Beaume à Saint-Alban-Auriolles [Peyroche]	239	4.32	0.4	pas ou faiblement
V5045020	Le Chassezac à Chambonas [Les Bertrannes]	507	7.41	0.5	pas ou faiblement
V5045810	La Borne à Saint-Laurent-les-Bains [Pont de Nicoulaud]	62.7	1.61	0.15	pas ou faiblement

Tableau 5 — Caractéristiques des 11 stations hydrométriques utilisées pour cette analyse.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

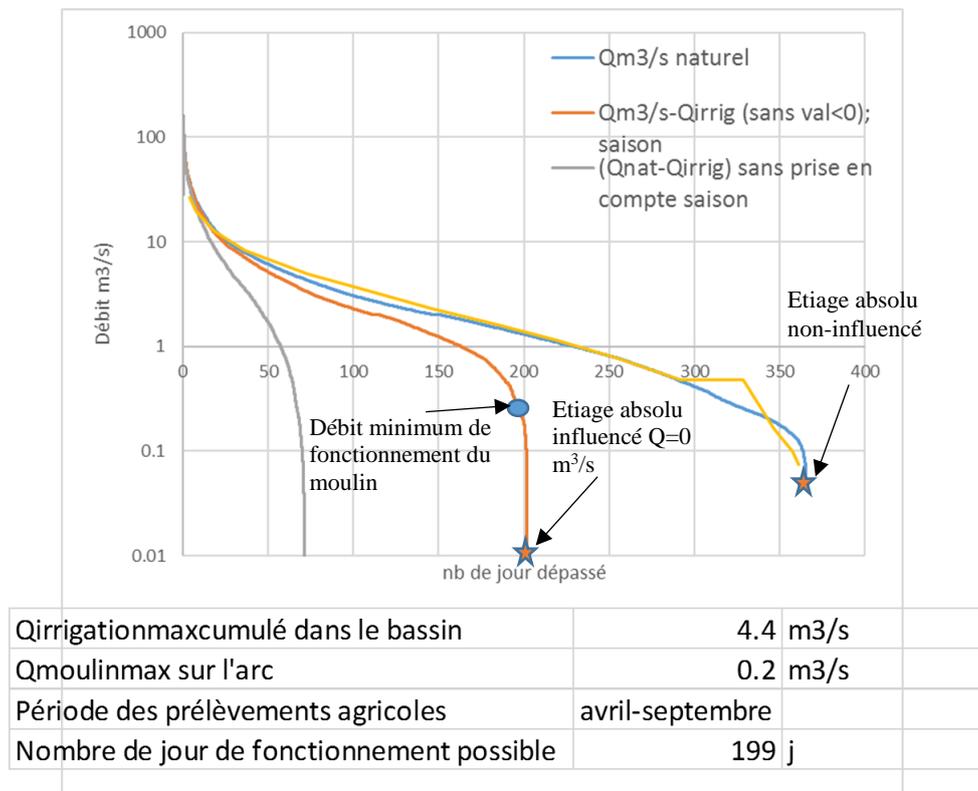


Figure 30 — Courbes des débits classés pour l'Ardèche à Meyras (Pont de Barutel ; moulin de Chantadru) en considérant i) les débits non-influencés (RHT et données de la banque hydro ; courbes bleue et jaune), ii) en prenant en compte un fonctionnement de l'irrigation toute l'année (courbe grise) et iii) la saisonnalité des prélèvements dans le bassin versant (de début avril à fin septembre, courbe orange). Le moulin local (de Chantadru) pouvait potentiellement fonctionner pendant 199j/an, sans contrainte sur l'activité agricole. L'étiage critique durait potentiellement 165 j/an en moyenne pour cette station.

Nous avons ainsi estimé que la durée moyenne de tension potentielle entre les usages était de 122 j/an en moyenne, soit 4.3 mois/an (min= 3.1 mois/an; max = 5.5 mois/an ; écart type de +/-19%). Cette estimation est cohérente avec les données d'archive qui renseignent une durée moyenne de chômage de 98 jours (sur un effectif de 102 moulins renseignés). Cette durée est étonnamment peu variable entre les stations étudiées. D'autre part, ces estimations ne sont corrélées ni à la surface du bassin versant (invariance d'échelle), ni à la valeur du débit dérivé pour le moulin, ni à celle du débit destiné à l'irrigation.

Ainsi, une période de 3-4 mois/an devait être très critique d'un point de vue économique et social, entraînant alors des négociations/conflits entre l'agriculture et l'industrie pour assurer un fonctionnement prolongé des fabriques : par exemple la diminution de l'activité journalière des moulins, le recours au fonctionnement par éclusees, la diminution des surfaces irriguées en amont, la demande d'un arbitrage extérieur.

La durée moyenne de débit estimé nul dans le cours d'eau (Fig. 31), en dehors des tronçons court-circuités, est estimé à 118 j/an en moyenne, soit 3,9 mois/an (+/-19%). Ce résultat montre un allongement significatif de la durée de l'étiage absolu en lien avec les activités humaines, en faisant l'hypothèse que toute l'irrigation ait été mise en œuvre de manière concomitante dans chaque bassin.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

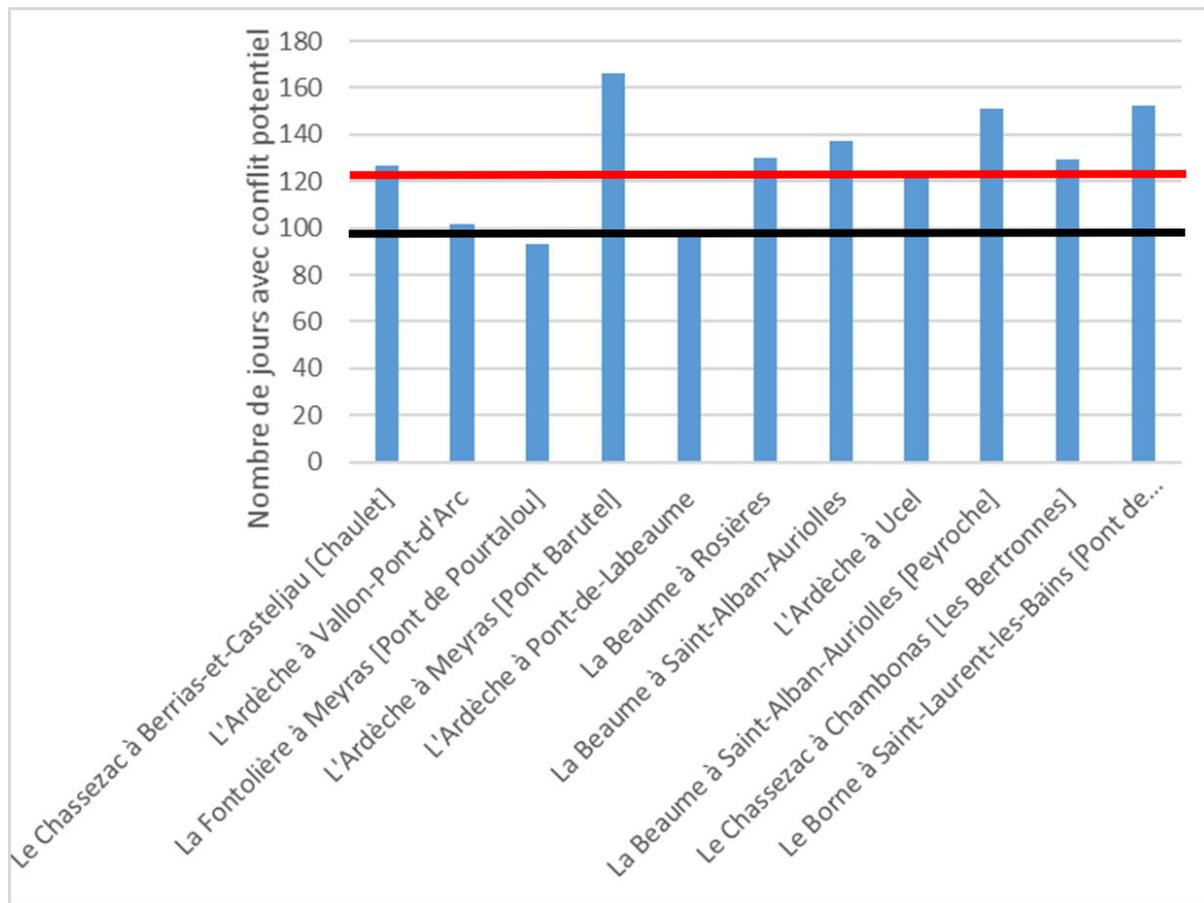


Figure 31 — Nombre moyen de jours donnant lieu à des négociations ou des conflits entre les différents usages au cours de l'année. Le trait horizontal rouge correspond à la moyenne des estimations (soit 122 j/an). Le trait noir horizontal correspond à la moyenne des durées de chômage des moulins fournies par les archives (soit 98 jours/an pour n=102 moulins).

Ces résultats démontrent que les durées importantes des sécheresses hydrologiques dans le bassin de l'Ardèche sont donc essentiellement d'origine anthropique. Leur sévérité et chronicité annuelle sont gouvernées par l'intensité et la fréquence des usages. Un témoignage recueilli dans les archives départementales de l'Ardèche de 1861 (Jacob, 2005 ; *AD Ard.*, 7S5) corrobore en tout point cette conclusion :

« Heureux temps que celui de 1821 ! [...] Si l'on souffrait, de loin en loin, par suite des sécheresses produites par la main de Dieu, du moins on ne connaissait pas la sécheresse que la main des hommes tend à produire annuellement à notre époque ».

Ces conclusions établies à large échelle présentent toutefois des biais et des limites que nous pouvons rappeler ici rapidement. Tout d'abord, l'estimation de la ressource disponible dans les cours d'eau fait l'hypothèse forte que la situation hydrologique actuelle peut être transposée à la fin du XIX^e s. Si cela semble assez bien contrôlé du point de vue strictement climatique grâce à la ré-analyse de données météorologiques, des incertitudes non négligeables subsistent du fait des changements importants qui ont caractérisé l'occupation des sols depuis

un siècle et qui influencent immanquablement les conditions d'écoulement (interception, évapotranspiration).

Le recours au RHT, s'il est incontournable, expose aussi aux incertitudes que recèlent des valeurs issues de calculs et non de jaugeages. D'autre part, notre méthode ne nous permet pas de prendre en compte les particularités locales importantes, comme la prise en compte des pertes, des sources et des résurgences notamment dans les bassins karstiques. Des incertitudes demeurent aussi sur l'estimation des prélèvements : la saisonnalité de l'irrigation, les rendements des dérivations, la concomitance des prélèvements d'irrigations et/ou industriels dans les bassins, la non prise en compte des règles de gestion ou des jeux de négociation propre à chaque bassin.

Ces différents facteurs et incertitudes ne peuvent pas être appréhendés à l'aide de cette méthode à l'échelle du bassin versant de l'Ardèche. Ils doivent être analysés à des échelles plus locales. La partie suivante présente un exemple de travail de reconstitution historique locale à partir d'informations qualitatives contenues dans les archives visant à présenter le vécu des habitants en situation de pénurie et les conflits communautaires liés à cette ressource.

5.4 - Évolution des conflits liés à l'exploitation des ressources en eau du bassin versant de la Borne : quels rôles respectifs de l'intensification des prélèvements et de l'assèchement hydroclimatique ?

5.4.1 - Le bassin versant de la Borne, un espace en tension (1870-1914)

Afin d'évaluer la part que représentent les changements de volumes prélevés et l'évolution climatique dans l'augmentation des pressions sur les ressources hydriques, nous avons tenté de confronter les données de reconstructions/réanalyses hydrométéorologiques issues de SCOPE Climate et SCOPE Hydro (Caillouet *et al.* 2017, 2019) aux données issues des archives portant sur des conflits liés à l'eau. L'objectif était de mieux distinguer dans l'émergence de crises la part des variations de débit naturel et celle qui proviendrait de changements des conditions d'exploitation de l'eau. Afin de tester cette méthode, il était nécessaire de procéder à un changement d'échelle, la documentation fine des conflits à l'échelle d'un bassin versant tel que celui de l'Ardèche, de la Cèze ou des Gardons nécessitant un temps et une masse de travail hors d'atteinte dans le cadre de ce projet.

La zone d'étude choisie correspond à l'un des sous-bassins versants de l'Ardèche, le bassin versant de la Borne (env. 135 km²), affluente du Chassezac, lui-même affluent de l'Ardèche (Figure 32). Ce bassin a été choisi en raison d'une situation particulièrement tendue, et bien documentée dans les archives, à partir de 1872 et jusqu'aux premières années du XX^e siècle (Jacob, 2004) et de la présence d'un point de mesure des débits de la Borne (à Saint-Laurent-les-Bains) facilitant le changement d'échelle (ie. *rescaling*) des reconstructions SCOPE (qui couvrent la période 1871 - 2012).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

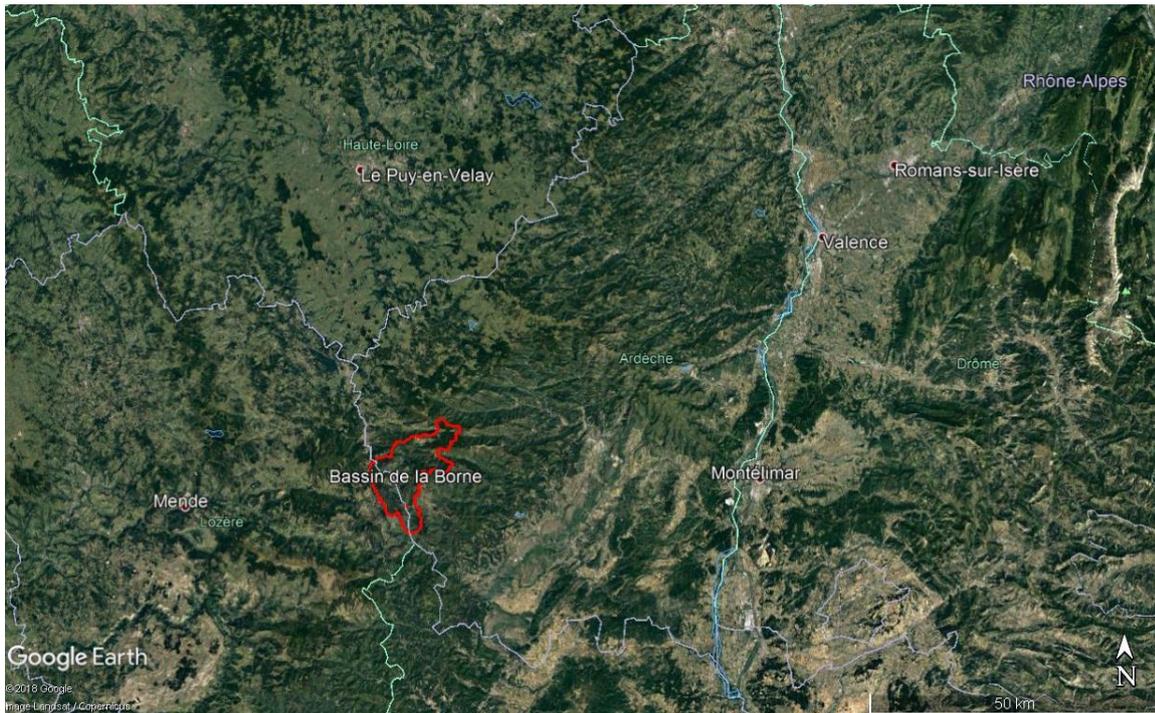


Figure 32 — Localisation du bassin versant de la Borne, à cheval sur les départements de la Lozère et de l'Ardèche, dont le cours de la rivière Borne trace la limite.

Alors que dans la majeure partie du bassin versant de l'Ardèche, l'irrigation n'était pratiquée que dans les parcelles riveraines, ce secteur cévenol (bassins de la Borne, du Chassezac et de l'Altier) a connu le développement d'une irrigation des versants, à partir de grandes béalières (plusieurs kilomètres de longueur). Ce phénomène, amorcé dès le XVII^e siècle (Thibon, 1994), s'est amplifié à la fin du XVIII^e s. et durant les premières décennies du XIX^e s., du fait de la croissance démographique, mais aussi de la proximité d'un débouché pour les productions agricoles à la gare de Villefort (Jacob, 2004). Dans le bassin de la Borne, les initiatives se multiplient à partir des années 1830, de part et d'autre du cours d'eau, au profit d'irrigants des communes de Saint-Jean-Chazorne, des Balmelles et de Planchamp (ces communes ont ensuite fusionné pour former la commune actuelle de Pied-de-Borne) pour la Lozère, et de Sainte-Marguerite-Lafigère pour l'Ardèche (Fig. 33 et 34). En 1872, on trouvait un total de 13 canaux sur la rive lozérienne, et de 13 en Ardèche, juste avant le surgissement d'une crise majeure (AD_Loz_7S40). L'un des plus longs d'entre eux, le canal de Lamouroux, dépassait les 9 km de longueur (AD_Ard_1019W_140), donnant une idée de l'importance des tronçons court-circuités du cours d'eau de la Borne.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

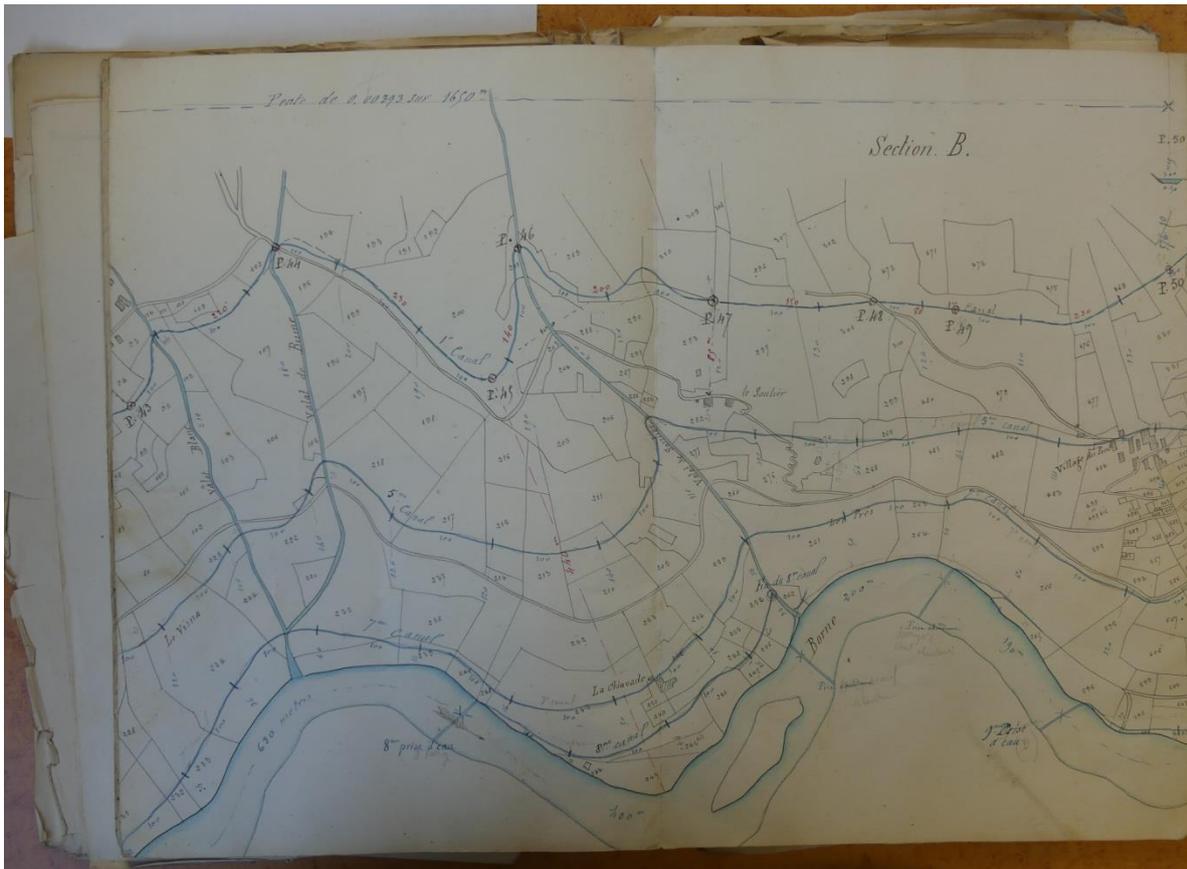


Figure 33 — Extrait d'un plan cadastral reprenant les positions des principales béalières à Sainte-Marguerite-Lafière (AD_Ard_1109W_140).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

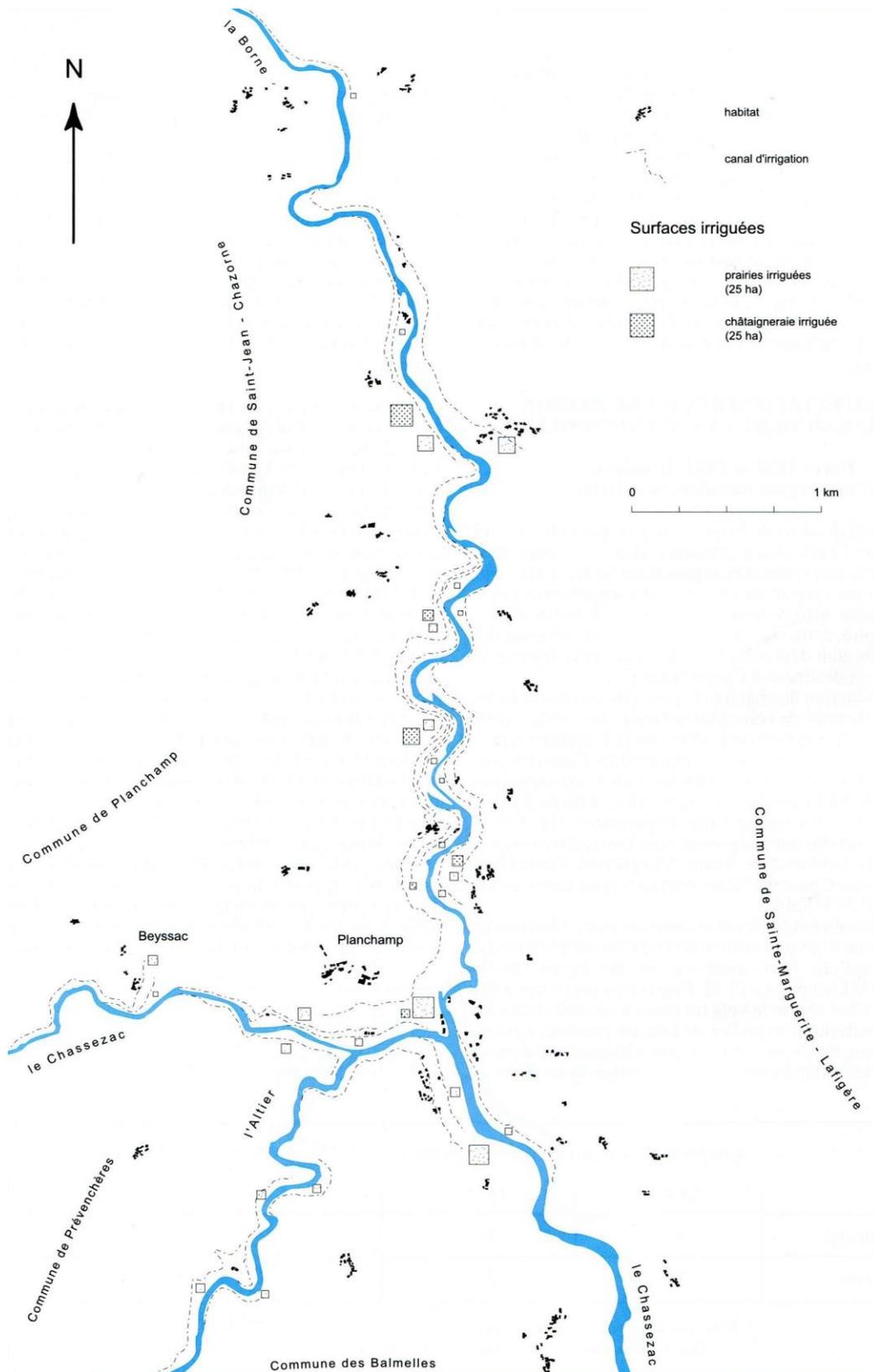


Figure 34 — Canaux et surfaces irriguées vers 1872 dans la région de Sainte-Marguerite-Lafigère (Archives EDF, A.N. F10/3475, AD_Ard_1009W_140, AD_Loz_7S_535). Figure issue de Jacob (2004).

5.4.2 - Validation de la méthode et recueil des données d'archives

La démarche mise en œuvre a d'abord consisté à tester la capacité de SCOPE Climate et SCOPE Hydro à reproduire, à l'échelle de ce sous-bassin, des étiages prononcés et des épisodes de précipitations et de crues décrits dans les archives. Malgré des limites déjà soulignées par Caillouet *et al.* (2017, 2019) pour la reconstruction des épisodes de fortes précipitations et de crues, largement sous-évalués, les données permettaient d'identifier l'ensemble des événements extrêmes testés.

Une fois cette vérification effectuée, une mission a eu lieu durant le mois de février 2018 aux archives départementales de l'Ardèche (AD_Ard) à Privas et aux archives départementales de la Lozère (Ad_Loz) à Mende (la Borne constitue la limite entre ces deux départements, ce qui contraint donc à consulter les archives dans deux centres différents) afin de consulter et de numériser les fonds d'archives concernant les conflits (ou permettant de comprendre les conditions de leur mise en place) dans le bassin versant étudié. Afin de faciliter l'étude, *a posteriori*, de l'ensemble des conflits liés à l'usage de l'eau à la fin du XIX^e siècle dans la zone d'étude, 2412 clichés ont été réalisés à partir de 59 cotes : AD_Ard_1S_73 ; AD_Ard_7S12, 20, 40, 51, 79, 85, 105, 119, 120 ; AD_Ard_1W196, 211 ; AD_Ard_1019W_140 ; AD_Ard_1262W_159; AD_Loz_EDT21_F3; AD_Loz_EDT119_F1; AD_Loz_EDT159_O2, O3 ; AD_Loz_7S_1, 40, 179, 207, 208, 214, 221, 231, 247, 256, 257, 258, 268, 301, 310, 313, 314, 315, 316, 319, 320, 420, 452, 467, 505, 532, 534, 711, 712, 834, 835, 896, 1027, 1043, 1063, 1066, 1089 ; AD_Loz_4U25_78, 79, 124 ; AD_Loz_2W_856.

Dans le temps du projet, il n'a pas été possible de dépouiller et d'analyser l'ensemble des fonds numérisés, et il n'a donc pas été possible de dresser une chronologie complète et aussi fine que le permettent les archives pour l'ensemble des événements survenus pour la période étudiée (1872-1920). Une trame générale a tout de même pu être développée ; elle pourra être complétée à l'avenir.

5.4.3 - Émergence et évolutions de la crise

La construction de deux grands canaux est à l'origine de la crise, l'un sur la rive lozérienne (canal des Beaumes achevé en 1866) et l'autre sur la rive ardéchoise (canal de Lamouroux). La prise d'eau ardéchoise, située en amont de la lozérienne, fut achevée en 1869 (AD_Ard_1109W_140).

Pour la suite, les pièces enregistrées dans AD_Loz_7S_40 nous ont permis de constituer une chronologie d'événements structurants.

Privés de la majeure partie de l'eau, les irrigants de Lozère mirent en place à une date inconnue (mais après le 7 août 1869 avant le 19 septembre 1872) une prise d'eau et un canal (Fig. 35 et 36) visant à court-circuiter la prise d'eau ardéchoise, et à rendre l'eau à la Borne en amont de la prise du canal des Beaumes ;

En parallèle, en juin 1872, les irrigants de Lozère adressent une pétition à la préfecture pour demander un règlement d'eau.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Le 19 septembre 1872, les irrigants de l'Ardèche portent l'affaire devant le tribunal de Paix du canton de Villefort. Le jugement est rendu le 11 décembre 1872 et les irrigants lozériens sont condamnés à détruire leur prise d'eau amont.

Ce ne sera pas utile, car sans attendre le règlement de l'affaire, les plaignants ardéchois ont démantelé la prise d'eau lozérienne, "pendant le cours de l'instance" et sont donc condamnés pour cela à dédommager les dégâts et à payer tous les frais de justice.

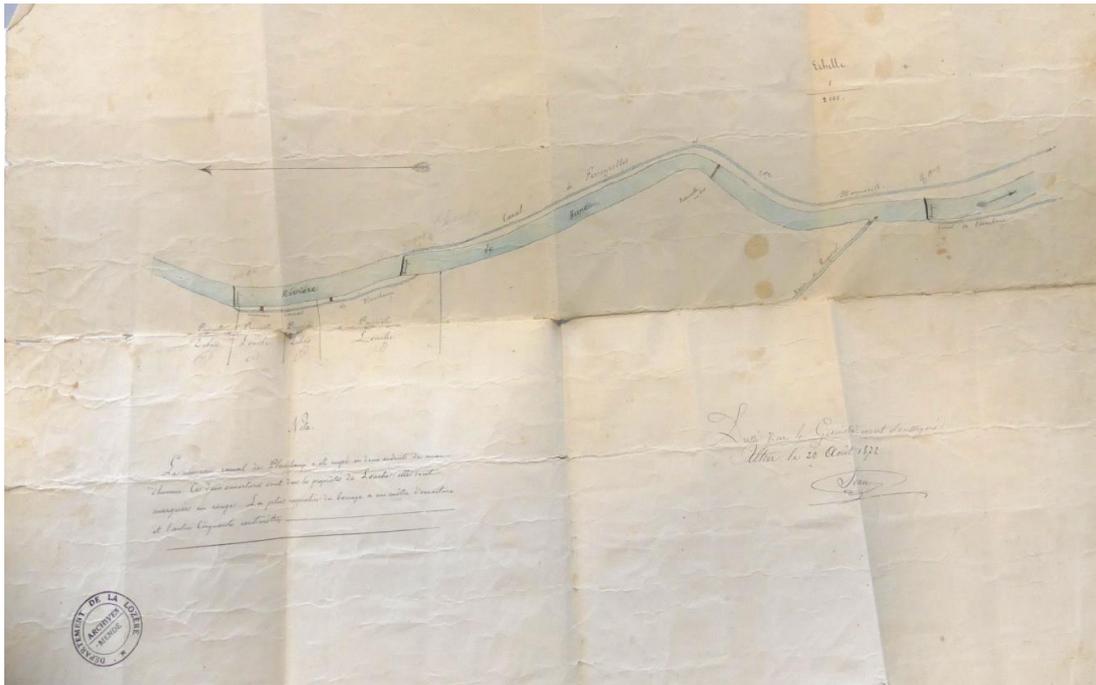


Figure 35 — Plan annexé à la décision de la justice de paix du canton de Villefort présentant la situation litigieuse.

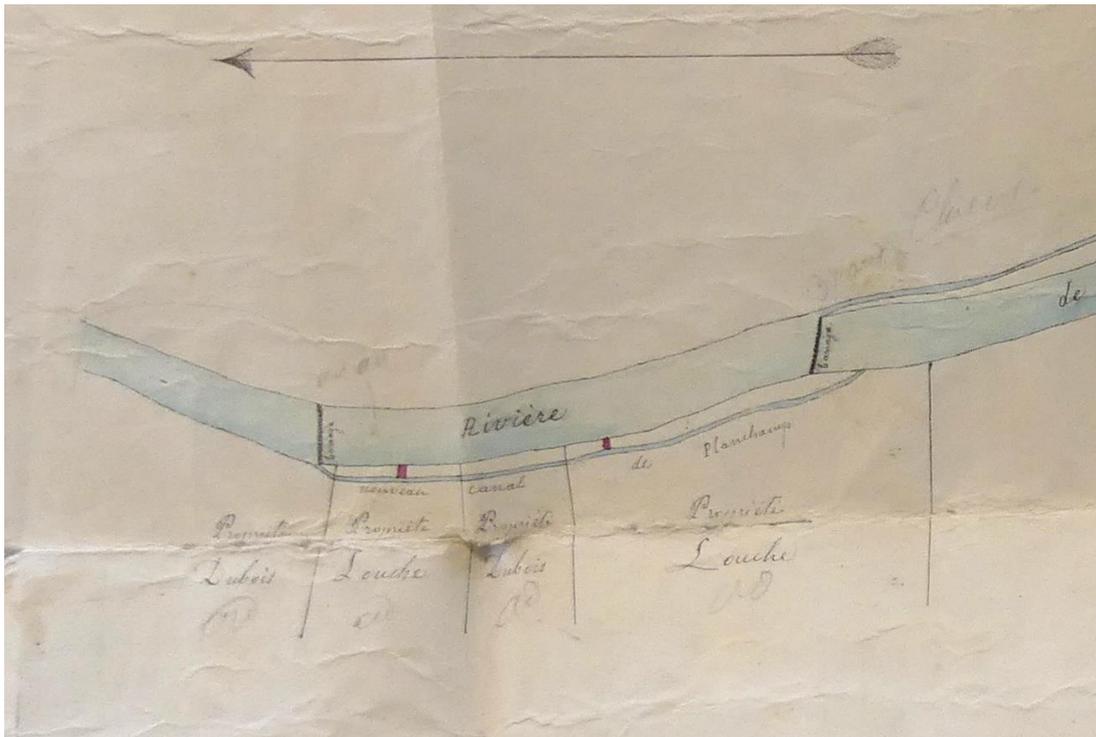


Figure 36 — Agrandissement du plan annexé à la décision de la justice de paix du canton de Villefort présentant la situation litigieuse.

D'autres pièces enregistrées sous la même cote retracent ensuite l'ensemble des visites de terrain visant à la mise en place de ce règlement d'eau. Elles aboutiront en 1877, après des difficultés administratives liés à la discontinuité des compétences territoriales (le cours d'eau constituant la limite entre deux départements), à un règlement suivant la proposition de l'ingénieur ordinaire de l'arrondissement de Mende, Paul Séjourné, d'un partage des eaux en temps sur l'intégralité des canaux : ouverts du dimanche midi au mercredi soir à minuit pour les ardéchois, du jeudi matin à minuit jusqu'à dimanche midi pour les lozériens.

Ce règlement ne résout cependant pas la question : lors d'une visite de contrôle fin 1877, il apparaît que seuls 5 canaux sur 12 ont été équipés de vannes du côté lozérien, et aucun des 13 du côté ardéchois. En mars 1878, la situation n'a pas changé. Les tensions se maintiennent ainsi pendant des années et d'autres conflits surgissent par ailleurs à chaque nouvelle demande d'autorisation pour des prises d'eau, qu'elles soient agricoles ou industrielles, où à la suite d'orages importants ayant dégradé les canaux.

L'analyse fine de la genèse de cette crise laisse donc supposer que l'émergence des conflits dans la vallée de la Borne n'est pas liée à l'évolution naturelle du climat ou des débits mais bien plus à une évolution des pratiques. On peut relier ces dernières au débouché ouvert pour les productions agricoles par l'arrivée du chemin de fer à Villefort en 1867 après l'obtention de la concession en 1862 (Ministère des Travaux Publics 1873). La décennie 1870 ne semble pas particulièrement plus sèche dans les reconstructions SCOPE. En revanche, les archives numérisées permettent d'observer différentes phases où les pétitions d'irrigants transmises aux préfets se font plus nombreuses ou plus pressantes. La reconstitution d'une chronologie plus

fine permettrait d'identifier si ces phases correspondent à des années pour lesquelles les étiages ont été plus prononcés et/plus précoces.

Pour l'heure, il apparaît donc que c'est surtout le manque de conciliation et d'habitude du partage de l'eau dans la région lors d'un essor agricole important et très rapide qui a posé problème et qui a mené à l'émergence d'une grande crise de l'eau. La ressource en eau disponible ne semble pas avoir changé, mais son exploitation a connu une intensification sans précédent, menant à une tension majeure dont le règlement a été compliqué par les discontinuités administratives.

5.4.4 – Perspectives

Ce travail, bien qu'ébauché seulement, permet d'envisager le grand potentiel de la démarche pour mieux comprendre l'émergence des crises liées à l'eau et permettre de les anticiper. Comme indiqué plus haut, il serait bon de pousser la démarche plus loin par une analyse combinant i) une analyse fine du déroulement de la crise décrite dans les archives, et d'autre part ii) les reconstructions hydroclimatiques.

Dans ce cadre, la réanalyse menée par Devers *et al.* (2019) offre des outils adaptés (FYRE Climate et FYRE Hydro) pour mener ce travail à une échelle temporelle plus fine et traiter de variations plus subtiles. L'étude d'autres crises, dans la vallée de la Borne ou ailleurs en France, en suivant cette démarche, permettrait également de mieux comprendre les mécanismes généraux de survenue de conflits liés à l'eau.

5.5 - Analyse diachronique de la pression sur l'eau (fin XIX^e siècle et période actuelle)

Un autre objectif du projet était de caractériser l'évolution de la pression entre la fin du XIX^e siècle et le temps présent. Pour réaliser ce travail, nous avons utilisé les données de prélèvements fournis par l'Agence de l'Eau de 2010-2013, ainsi que les données du PGE du SAGE Ardèche (Aucéa, 2007).

5.5.1 – Comparaison des prélèvements industriels

En 2007, 48 unités de production hydroélectrique ont été recensées dans le bassin de l'Ardèche (Annexe 3). La puissance hydraulique actuelle est plutôt issue d'ouvrages du XX^e (ie. n=28 installations construites après 1900 ; eg. Fontaulière). Quelques ouvrages de la petite hydraulique du XIX^e subsistent et ont été dans de nombreux cas transformés pour assurer une production électrique plus importante (n=15).

L'utilisation énergétique de l'eau est actuellement plus localisée qu'à la fin du XIX^e siècle, mais elle dérive des débits beaucoup plus importants. Elle est issue d'un nombre réduit d'installations (n=48 en 2004 contre n=550 à la fin du XIX^e), mais présente une puissance totale env. 5 fois supérieure (Tab. 6). Cette puissance s'explique par des débits dérivés et des hauteurs de chute 5 fois plus importants actuellement que par le passé (estimé pour n=83 installations). La production actuelle est fournie à 95% par des installations d'une puissance >100KWatt alors que par le passé, la pico-hydraulique dominait (cf. *supra*).

Les volumes dérivés actuellement pour l'industrie sont beaucoup plus importants que par le passé : de l'ordre de 12 000 Mm³/an contre 2 300 Mm³/an à la fin du XIX^e siècle (calculés sur 8 mois de fonctionnement par an en moyenne). Toutefois, actuellement, la majeure partie des installations turbinent toute l'année ; seules 13 installations sur 48 arrêtent leur production pendant les 4 mois d'été. La durée moyenne de fonctionnement des installations est de 3 mois supérieure à celle du XIX^e siècle.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Type d'ouvrage et caractéristiques	Fin XIX ^e siècle		2007 (PGE)	
	Répartition en % [effectif]	% Puissance/puissance totale (%)	Répartition en % [effectif]	% Puissance/puissance totale (%)
Petite hydraulique >100kW	0.4 [2]	10.6	68[26]	95
Pico-hydraulique <100kW	99.6 [524]	89.4	31[12]	5
Nombre d'ouvrage	526		38	
Puissance totale (MWatt)	2.7		15.3	
Longueur cumulée de cours d'eau court-circuitée (km)	[77 – 124] ¹		15 ²	
Hauteur de chute moyenne (m)	3 [min=1 ; max=16]		15 [min=1 ; max=173]	
Somme des débits dérivés sur 8 mois (m ³ /s)	76		407	
Durée moyenne de fonctionnement (mois/an)	7.7-8.7		10.9	
Volumes dérivé sur 8 mois/an (Mm ³)	2 300		12 000	

(1) La valeur basse a été estimée sur la base des mesures cartographiques réalisés pour 324 moulins ; la valeur haute est estimée en affectant aux moulins ne disposant pas de cette donnée, la valeur moyenne de longueur court-circuitée (soit 231 m).

(2) Estimation basse, basée sur le recensement de la DDAF 07 des installations concernées par un régime de débit réservé.

Tableau 6 — Comparaison des puissances hydrauliques à la fin du XIX^e siècle et en 2007 (PGE).

Le réseau hydrographique actuel reste très fragmenté (504 ouvrages ; 46% du réseau avec seuil). Cette fragmentation est principalement héritée des ouvrages de dérivation industrielles existant au XIX^e siècle (Tab. 7), les longueurs de cours d'eau sans seuil étant similaires d'un siècle à l'autre. Il s'agit essentiellement des barrages des industriels car les prises d'eau des irrigants étaient édifiées en « pierres volantes », donc non maçonnées, et ont rapidement disparu faute d'entretien (Jacob, 2005). Toutefois les longueurs court-circuitées ont significativement diminué (de 124 km cumulé au XIX^e, à 15 km en 2004 ; Tab. 7).

	Effectif/fraction
Nombre d'ouvrages existant actuellement (ROE)	504
Longueur du réseau avec moulin XIX ^e s. (%)	54
Longueur du réseau avec seuil (actuel ROE) (%)	46
Longueur du réseau avec moulin au XIX ^e s. et sans seuil actuel (ROE) (%)	17
Longueur du réseau avec seuil actuellement et sans moulin au XIX ^e s. (%)	9

Tableau 7 — Nombre de seuils estimé pour le XIX^e siècle (base de données moulins de ce travail) et actuel (base de données ROE ; l'essentiel des ouvrages pour le bassin de l'Ardèche sont des seuils transversaux)

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

À ces activités de production d'énergie s'ajoutent aujourd'hui des activités industrielles avec un prélèvement global de 0.34Mm³/an en 2004 à l'échelle du bassin de l'Ardèche (données AE, 2004 ; hors distribution AEP). La Chambre du Commerce et de l'Industrie recense 36 établissements industriels polluants (Aucéa, 2007). Ces prélèvements utilisent actuellement essentiellement les eaux souterraines (Fig. 37) et sont localisés dans la partie nord du bassin.

On note toutefois, sur les trois décennies, un affaiblissement des prélèvements industriels dans l'Ardèche, et particulièrement des prélèvements d'eau superficielles (Fig. 37 et 38). Ceci est certainement à mettre en lien avec la poursuite de la déprise industrielle dans l'Ardèche. Dans les années 1990-2000, il existait encore quelques unités de production textiles, héritées en droite ligne du moulinage des XVIII^e et XIX^e siècle. Mais actuellement la plupart de ces sites ont fermé.

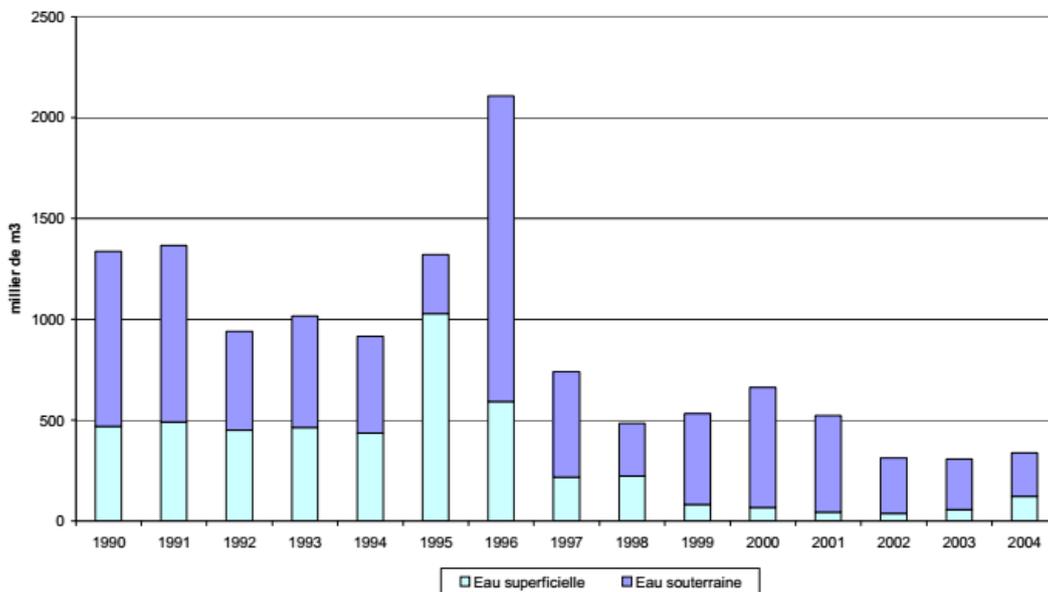


Figure 37 — Évolution des prélèvements industriels de 1990 à 2004 (source Aucéa, 2007).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

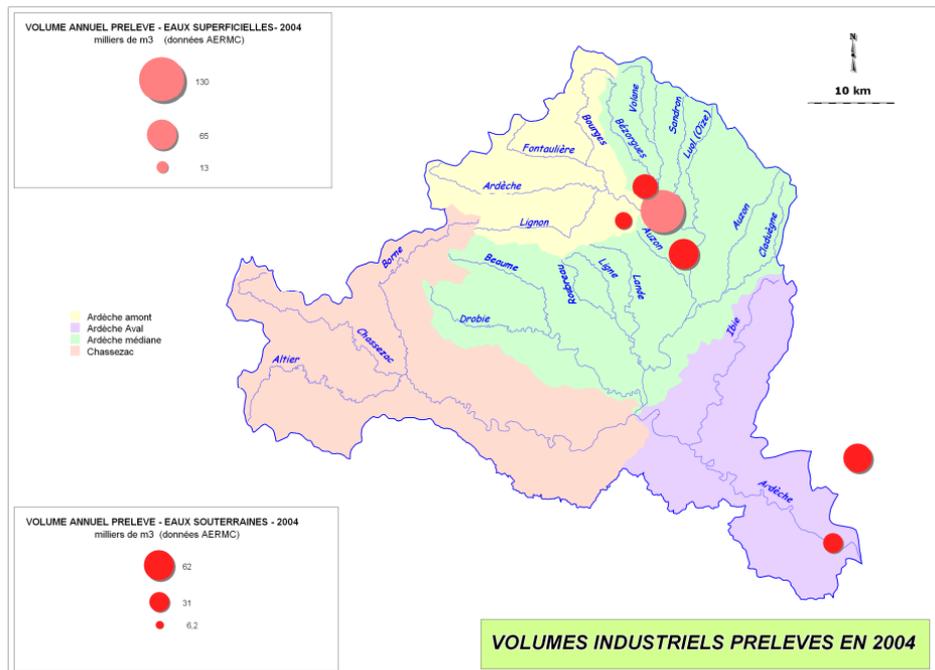


Figure 38 — Volumes prélevés par l'usage industriel en 2004 (source : PGE Ardèche, 2004).

5.5.2 - Les prélèvements liés à l'agriculture

À l'inverse, les surfaces irriguées ont fortement diminué depuis la fin des années 80 (Tab. 8). L'irrigation gravitaire et les prélèvements en rivière dominent actuellement (env. 1100 ha ; Fig. 39). Cette diminution est sans commune mesure avec celle qui s'est opérée depuis la fin du XIX^e siècle avec une diminution de 93% des surfaces irriguées entre ces deux périodes.

		Evolution surfaces irriguées PGE (ha)			
Bassins	Sous bassins	1979	1988	2000	2006
Ardèche amont	Ardèche amont	59	5	5	5
	Lignon	-	-	-	-
	Fontautière	128	45	25	25
Ardèche médiane	Volane-Sandron-Luol	78	27	38	38
	Ardèche médiane	445	377	243	243
	Auzon-Claduègne	525	1 006	390	390
Chassezac	Ligne-Lande-Roubreau	138	75	75	75
	Beaume-Drobie	229	146	93	93
Ardèche aval	Chassezac amont	285	165	59	59
	Chassezac aval	721	804	596	596
Ardèche aval	Ardèche aval	64	70	77	77
	Ibie	-	-	-	-
Total surfaces irriguées (ha)		2 673	2 721	1 601	1 601

Tableau 8 — Surfaces irriguées de 1979 à 2006 (source : Aucéa, 2007).

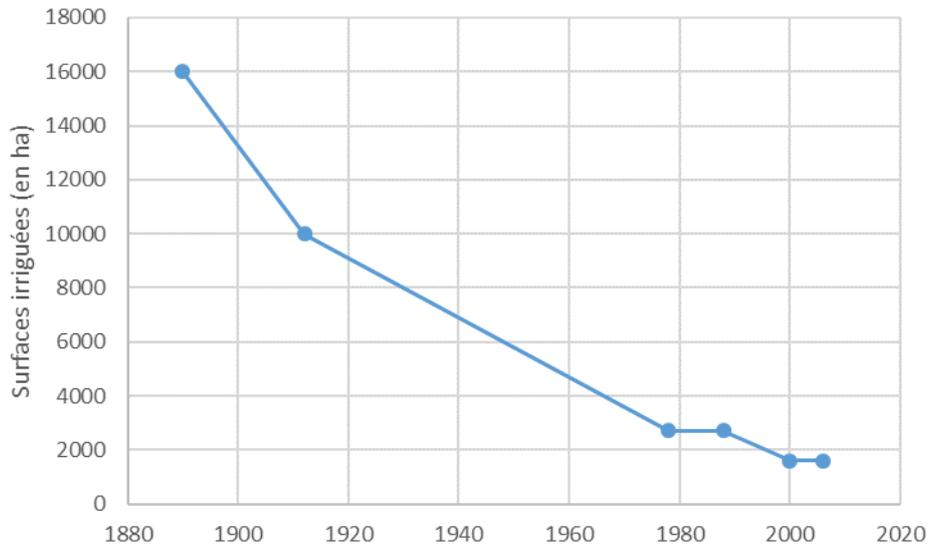


Figure 39 — Évolution des surfaces irriguées de 1890 à 2006

La distribution spatiale de ces surfaces agricoles est aussi totalement différente : toute la moitié amont du bassin au XIX^e s. est utilisée, contre le centre du bassin actuellement (Fig. 40 et 41). La pression liée à l'irrigation des têtes de bassin a très nettement diminué. Celle maintenue actuellement dans ces territoires est essentiellement soutenue par les barrages (Fontaulière et Chassezac/Altier).

Pressions au XIXieme

Légende

Surface (ha) irriguée par commune

- 0.80 - 50
- 50 - 100
- 100 - 250
- 250 - 500
- 500 - 1000
- 1000 - 1120
- Aucune surface irriguée

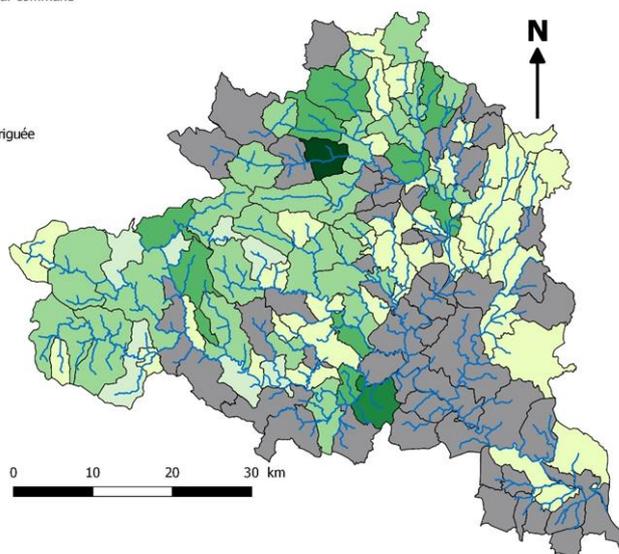


Figure 40 — Répartition spatiale des pressions agricoles par commune au XIX^e siècle. Source : *Atlas des cours d'eau*, tableau A.

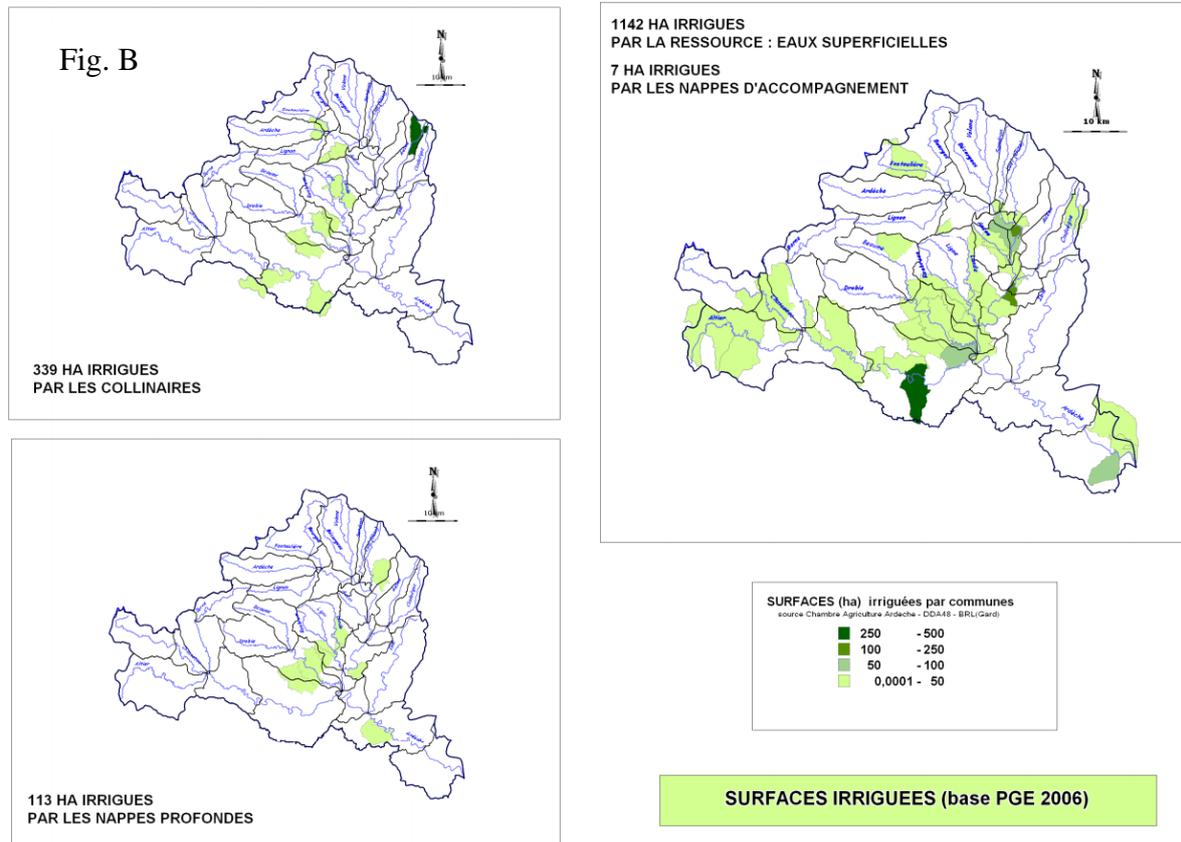


Figure 41 — Répartition spatiale des pressions agricoles dans le bassin de l'Ardèche au début du XXI^e siècle.

Les prélèvements ont ainsi mécaniquement diminué de 300 Mm³/an à la fin du XIX^e s. à 26 Mm³/an en 2004 en raison de la diminution des surfaces et de la technologie utilisée (Tab. 9).

	XIX ^e s.	Actuel (2004)
Surface agricoles (ha)	16 000	1 600
Prélèvements bruts (l/s/ha)	3	0.5- 1
Prélèvements brut total (m ³ /s)	48	1.67
Prélèvements nets annuels (Mm ³ /an)	300 ¹	26 ²

¹ Estimation sur 6 mois (période végétative) et 40% de rendement

² Estimation sur 6 mois et 100% de rendement

Tableau 9 — Comparaison des prélèvements bruts agricoles au XIX^e siècle et à la période actuelle (Aucéa, 2007).

Une analyse plus fine des prélèvements agricoles réalisée par Aucéa (2007) estime la consommation d'eau actuelle pour l'agriculture à 4,1 Mm³/an, soit moins de 1% des prélèvements réalisés à la fin du XIX^e s. Nous retiendrons que les prélèvements agricoles actuels représentent entre 1 et 10 % des prélèvements de la fin du XIX^e s.

5.5.3 - Les prélèvements pour l'eau potable

L'AEP (1990-2004) représente 13 Mm³/an en moyenne. Elle est essentiellement liée aux prélèvements dans les nappes et dans la Fontaulière pour la ressource superficielle (il s'agit dans ce second cas d'une eau importée de la Loire ; Fig. 42). Dans ce domaine de l'eau à usage domestique, aucune donnée permettant une comparaison n'est disponible pour la fin XIX^e s. Toutefois, une grande partie de ces eaux sont rejetées dans le milieu après épuration ; la question de la qualité de l'eau écartée, les prélèvements nets actuels pour l'AEP peuvent donc être considéré comme relativement faibles.

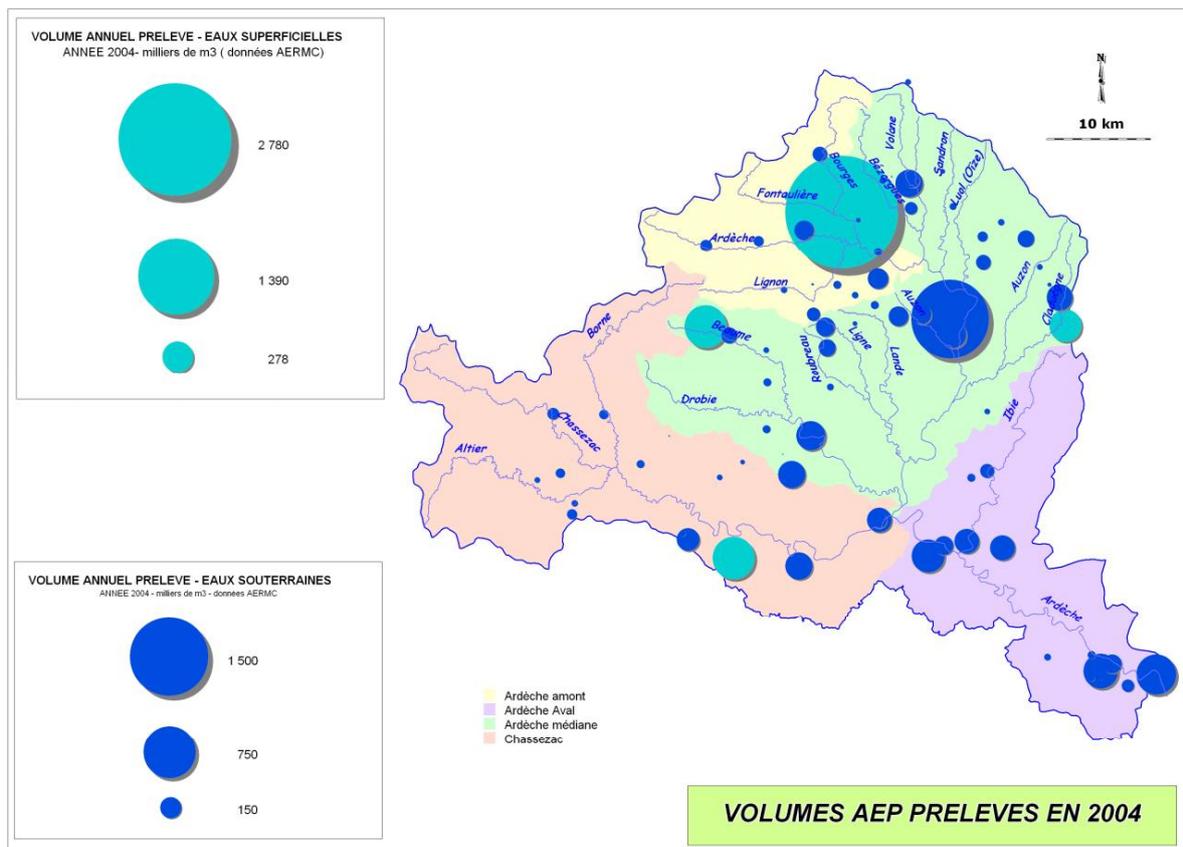


Figure 42 — Volumes d'eau AEP prélevés en 2004.

5.5.4 - Synthèse

Malgré les difficultés de l'exercice, qui tiennent autant à la différence des sources et des types de mesures qu'à des changements très forts survenus dans les usages de l'eau, on peut tenter de dresser une synthèse des prélèvements en eau de surface dans le bassin de l'Ardèche (Tab. 10).

D'une façon générale, les prélèvements agricoles nets étaient plus de 40 fois plus importants au XIX^e s. qu'actuellement. À l'inverse, pour l'énergie hydraulique, les prélèvements bruts sont quatre fois plus importants actuellement (Tab. 10). Au total, les

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

prélèvements nets par rapport aux précipitations représentaient environ 8% au XIX^e s. contre 0.2% actuellement.

Les prélèvements hydrauliques sont actuellement ponctuels, mais très importants, tandis qu'à la fin du XIX^e s., ils concernaient l'ensemble du bassin. Actuellement de grandes retenues et un transfert important d'eau du bassin de la Loire assurent, outre la production hydro-électrique, un soutien d'étiage pour l'AEP, l'agriculture et les activités touristiques. Les longueurs de cours d'eau court-circuités étaient environ 8 fois plus importantes à la fin du XIX^e s. qu'en 2004. La discontinuité liée aux seuils était probablement à peu près similaire à l'actuelle (si l'on ne compte pas les prises d'eau pour l'agriculture qui, dans leur majorité, étaient saisonnières et n'ont pas résisté aux crues). Par contre, lors des étiages prononcés, l'agriculture générait potentiellement à la fin du XIX^e s. une discontinuité temporelle très forte sur l'ensemble du bassin versant : de nombreux tronçons de cours d'eau pouvaient être intermittents pendant la saison d'irrigation, soit près de 4 mois par an. Les archives conservent de nombreux témoignages de conflits liés à la forte pression de prélèvement et aux affaiblissements temporaires de l'écoulement qu'elle entraînait. Le réseau hydrographique à la fin du XIX^e s. présentait ainsi une très forte segmentation temporaire.

Prélèvements par usage	Fin XIX ^e s. [Mm ³ /an]	Actuel (2007) [Mm ³ /an]
Agriculture	300	4 (26 ²)
Industrie polluante	na	0.3
Énergie hydraulique	2 300	12 000
AEP	na	13
Total des prélèvements bruts	2 600	12 017.3
Total des prélèvements nets	300	4.6-26.3 ²
Prélèvements nets/précipitations ¹ (en %)	8%	0.2-1%

¹ En considérant des précipitations moyennes annuelles de 1600mm/an et une surface du bassin de l'Ardèche de 2360 km²

² Varie en fonction de la méthode d'estimation (surface irriguée et Aucéa, 2007)

Tableau 10 — Synthèse des prélèvements dans le bassin de l'Ardèche à la fin du XIX^e s. et en 2004. Sources : *Atlas des cours d'eau* et Aucéa (2007)

6 – Le rôle de ces aménagements passés sur les biocénoses aquatiques actuelles

Le deuxième volet du travail était de déterminer de quelle façon les pressions qui s'exercent sur les écoulements à l'échelle du tronçon pouvaient influencer les caractéristiques des biocénoses.

6.1 - Objectifs

Il s'agit de déterminer si les informations historiques présentées précédemment sont révélées dans le diagnostic écologique basé sur les stratégies biologiques (traits) adoptées par les différentes espèces composant les communautés de macroinvertébrés benthiques.

Nous avons fait l'hypothèse que les trajectoires historiques d'utilisation et d'assèchement des biefs ont induit la sélection d'espèces aux caractéristiques écologiques différentes et donc des types de communauté différents. On sait par exemple que l'assèchement des cours d'eau induit l'expression d'une grande diversité de stratégies dans les communautés dans les environnements changeants (e.g. Bonada et al., 2007). De plus, on peut faire l'hypothèse que les formes de résistance et/ou les formes de résilience comme un temps de génération court associé à une petite taille domineront les communautés soumises à une plus forte pression de moulinage. A l'inverse, les biefs régulièrement en eau devraient induire une certaine convergence des formes biologiques des espèces susceptibles de s'adapter aux contraintes hydrauliques de ceux-ci (forme longiligne ou aplatie, respiration branchiale et tégumentaire, pontes aquatiques cimentées, e.g. Statzner & Beche, 2010).

Il s'agit donc de mener une approche exploratoire visant à comparer trois situations de pression hydraulique actuelle (forte, moyenne, faible) afin de déterminer si les biocénoses aquatiques peuvent servir d'indicateur des pressions hydrauliques passées. Si les hypothèses sont avérées, cette analyse pourrait aider à dessiner les trajectoires écologiques des biefs choisis, à mesurer la réaction des biocénoses à l'évolution temporelle des pressions et in fine, à mieux orienter les choix de restauration à travers une mesure de l'écart entre stratégies biologiques attendues et observées.

6.2 - Matériel et méthodes

6.1.1 - Stations d'échantillonnage

Sur la base d'une expertise liée aux connaissances sur les dérivations actuelles et passées et en lien avec les impératifs habituels de terrain (accès, comparabilité des sites), trois cours d'eau ont été retenus : la Volane, la Bésorgues et la Bourges et trois sites ont été considérés sur chacun de ces cours d'eau (Fig. 43). Un site dit « naturel », c'est-à-dire non soumis à dérivation par les moulins ; un site représentant un tronçon avec une dérivation pour des microcentrales ou pour de simples béals encore en activité (noté **; Tab. 11) ; un site correspondant à la restitution de l'eau après dérivation (noté *; Tab. 11).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

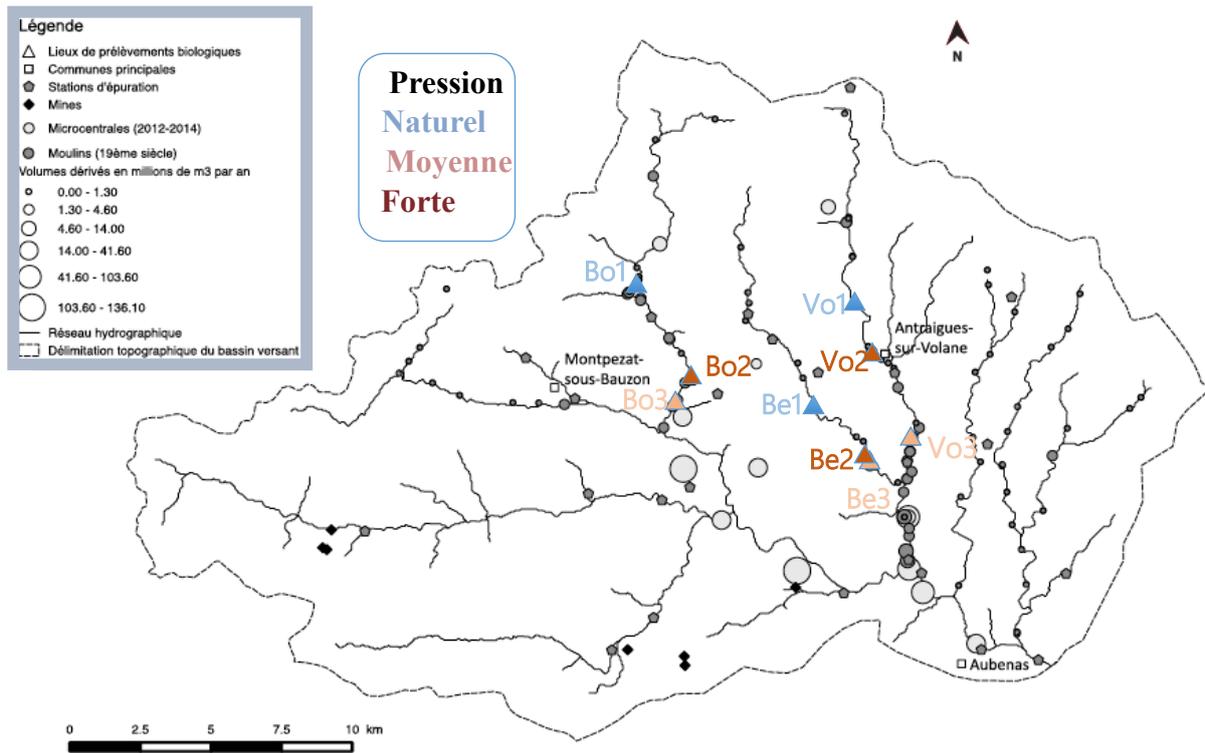


Figure 43 — Carte de situation des stations d'échantillonnage.

Rivière	Commune	Nom station	Code	Latitude WGS	Longitude WGS	Altitude (m)
Volane	Antraigues sur volane	Le Terret	VO1	44°44.145N	4°20.771E	533
Volane	Antraigues sur volane	Antraigues centre	VO2**	44°42.150N	4°21.044E	427
Volane	Asperjoc	Teoulas	VO3*	44°41.558N	4°22.174E	318
Besorgues	Asperjoc	Les Cayres	BE1	44°42.158N	4°19.545E	463
Besorgues	Asperjoc	L'Aulagnet Béal	BE2**	44°41.074N	4°20.970E	322
Besorgues	Asperjoc	L'Aulagnet restitution	BE3*	44°41.074N	4°20.970E	322
Volane	Burzet sur volane	Burzet	VO1	44°45.200N	4°15.126E	598
Volane	St-Pierre-de-Colombier	Pont Prat	VO2**	44°42.851N	4°16.207E	429
Volane	St-Pierre-de-Colombier	Micro-centrale	VO3*	44°42.288N	4°15.839E	412

Tableau 11 — Coordonnées GPS, altitude et pression en termes de dérivation des eaux (** pression forte, * pression moyenne) des stations d'échantillonnage sur les trois rivières sélectionnées.

6.1.2 - Mesures physiques et chimiques

6.1.2.1. Hydraulique et granulométrie

Une description physique de l'habitat suivant le protocole estimhab (Lamouroux & Capra, 2002) a été réalisée à deux dates. Par ailleurs, des mesures de vitesse de courant (m.s-1) et de

hauteur d'eau (m) ont été effectuées pour caractériser l'hydraulique de chacun des douze points d'échantillonnage de benthos réalisés à chaque station (voir ci-dessous). Pour caractériser l'écoulement local, le nombre de Froude a été obtenu par $Froude = \frac{vitesse}{\sqrt{hauteur \times g}}$.

6.1.2.2. Conditions hydrologiques et thermiques

Des enregistrements en continu (du 19/07/2016 au 19/07/2017) des variations horaires de la température et la hauteur d'eau ont été réalisés à l'aide de sondes de marque HOBO™. Les données thermiques ont été utilisées pour le calcul des degrés-jours nécessaire au calcul du taux de dégradation de la litière. A noter que des évènements hydrologiques de type cévenol au cours de l'année ont occasionnés la perte d'une partie des données.

6.1.2.3. Physico-chimie

Sur les douze points d'échantillonnage de benthos de chaque station, des mesures physico-chimiques ponctuelles de concentration en oxygène dissous (mg.L⁻¹) et de saturation en oxygène (%), de conductivité (µS.cm⁻¹) ont été réalisées.

De plus, lors de l'expérimentation de dégradation de la litière, la concentration en ammonium (NH₄⁺, µg.L⁻¹), en phosphates (PO₄³⁻, µg.L⁻¹) et en nitrates (NO₃⁻, mg.L⁻¹) a été mesurée.

6.1.3 - Mesures biologiques

6.1.3.1. Approche taxonomique

- Indicateurs biologiques

Une seule campagne d'échantillonnage a été réalisée les 19-20 juillet 2016 au cours de la période la moins favorable pour les cours d'eau en terme d'écoulement. Le protocole IBGN-DCE a été appliqué selon les préconisations en vigueur (AFNOR, NFT90-333, 2016). Aucun sous-échantillonnage n'a été effectué. Les calculs de l'IBGN-DCE ont été réalisés à partir du portail du Système d'Evaluation de l'Etat des Eaux (<http://see.eaufrance.fr>). La composition faunistique a été également synthétisée par les métriques usuelles (richesse et diversité).

- Différences entre types de pression

La composition faunistique des échantillons a fait l'objet d'une analyse des correspondances suivie d'un test d'effet des pressions humaines liées à l'hydraulique par permutations aléatoires (Dolédec & Chessel, 1987). Une analyse de type *simper* (Clarke, 1993) a été menée pour identifier les taxons contribuant le plus aux différences entre types de pression.

- Différences intra-rivière

Une analyse des correspondances intra-rivière (Dolédec & Chessel, 1989) a enfin été menée pour déterminer si les différences observées ci-dessus était constante d'une rivière à une autre.

6.1.3.2. Traits biologiques

- Indicateurs biologiques

La base de données de traits biologiques (Tachet et al., 2010) qui regroupe les connaissances sur les caractéristiques biologiques associés à la résilience et à la résistance des communautés aux modifications de conditions hydrauliques a été utilisée. L'utilisation relative de différentes métriques biologiques dans les communautés a été calculée. Les métriques biologiques prises en compte représentent des caractéristiques générales des organismes en termes de cycle vitaux, physiologie ou régime alimentaire mais également de spécialisation de la niche ou de redondance fonctionnelle. L'outil diagnostic en cours de développement a été utilisé pour caractériser les risques d'exposition des communautés pour différentes pressions anthropiques et notamment l'altération de l'hydromorphologie (Mondy & Usseglio, 2013).

- Différences entre types de pression

De manière symétrique à la composition faunistique, l'utilisation relative des traits biologiques dans les échantillons a fait l'objet d'une analyse des correspondances floue (Chevenet et al., 1994) suivie d'un test d'effet des pressions humaines liées à l'hydraulique par permutations aléatoires. Une analyse de type *simper* a été menée pour identifier les catégories de traits biologiques contribuant le plus aux différences entre types de pression.

- Différences intra-rivière

Une analyse des correspondances floue intra-rivière a enfin été menée pour déterminer si le pattern global observé ci-dessus était constant d'une rivière à une autre.

6.1.3.3. Perte de masse des litières

Pour identifier l'impact fonctionnel effectif des modifications hydrauliques, nous avons conduit une expérimentation de mesure de dégradation de litière en suivant le protocole proposé par Barlöcher (2007). Neuf sacs de litière (10x10cm, maille de 1cm) permettant le passage des invertébrés ont été déposés à chaque station par paquet de trois sacs posés dans des habitats différents, le 16/10/2017. Trois sacs ont été relevés les 24/10/17, 31/10/17 et 6/11/17 respectivement. Des feuilles d'aulne (espèce présente localement) préalablement séchées ont été pesées au mg près ($M_0=3\pm 0.05g$) puis placées dans un sac de litière. Le poids perdu par manipulation des sacs ("*Handling*") a été estimé en plongeant trois sacs de litière dans le cours d'eau pendant 30s directement ramenés ensuite au laboratoire dans une glacière. Les sacs relevés (manipulation et expérimentation) ont été placés à l'étuve à 60°C pendant 48h. Puis les feuilles ont été pesées.

Nous avons ainsi pu estimer la masse perdue par la manipulation ($h=\%$ de perte). La perte de poids a été estimée par un pourcentage du poids initial après avoir corrigé du pourcentage de perte par la manipulation des sacs. Le taux de décomposition a été calculé en utilisant le modèle simple d'Olson (1963), $R = e^{-kt}$, avec k , le taux de décomposition, t , le temps exprimé en degrés-jours et R , correspondant à la proportion de masse restante. En pratique, on utilise une régression linéaire (sur les log des pourcentages de masse restante). La pente de la régression donne le taux de décomposition k . Il est à noter que les hautes eaux qui ont précédées la relève du dernier lot de sac de feuilles ont pu entraîner des biais de pesée.

6.1.3.4. Activité du biofilm

Dans les milieux aquatiques, la croissance microbienne permet d'estimer la capacité trophique du milieu (assimilation de la matière organique par le compartiment microbien). Cette activité peut être modifiée en fonction de l'hydraulique. Pour mesurer la croissance microbienne, des

billes de verres dépolies d'un diamètre de 4 mm ont été utilisées pour incubation sur le terrain. Un total de 25 billes ont été insérées dans des sacs grillagés (maille 0.5 mm). Trois sacs de billes ont été déposés le 16/10/2017 dans chaque station et récupérer après quatre semaines d'incubation. La biomasse microbienne du biofilm a été estimée par la méthode de LOWRY microbien et l'activité microbienne a été quantifiée à l'aide de la méthode d'activité hydrolytique au Di-acétate de fluorescéine (FDA).

6.2 - Résultats

6.2.1 - Mesures physiques et chimiques

6.2.1.1. Hydraulique et granulométrie

La granulométrie des situations sous pression historique (S2 et S3) apparaît sensiblement différentes et moins stables que la situation naturelle (S1) (Fig. 44).

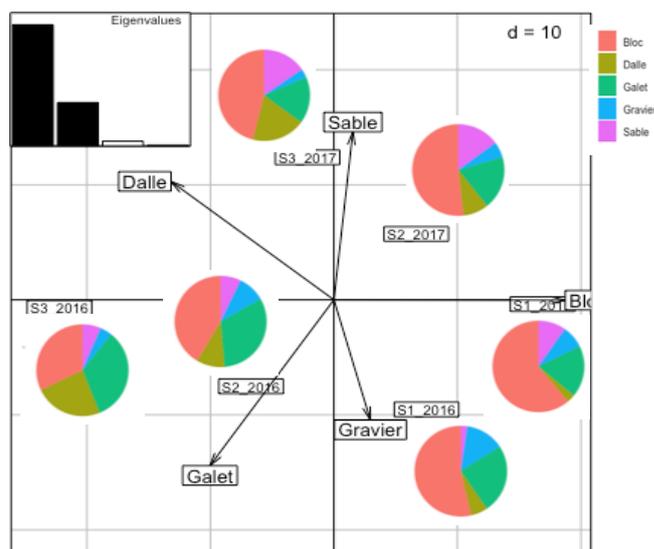


Figure 44 — Analyse en composantes principales de la granulométrie de chaque secteur en 2016, et en 2017 (S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible). Les proportions de chaque classe granulométrique sont figurées par des diagrammes en camembert.

En effet, en situation naturelle, blocs et graviers dominant. En 2016, Les dalles et les galets dominant dans les stations sous pression, tandis qu'en 2017, on y voit des accumulations de sable. Malgré tout, les variations de proportions s'effectuent à la marge. Comme attendu, la diversité granulométrique augmente de l'amont vers l'aval (S1, simpson=0.60; S2, IS=0.68; S3, IS=0.71). Seule la différence entre S1 et S3 est statistiquement significative.

En 2016, les hauteurs d'eau moyenne (Fig. 3) augmentent de l'amont vers l'aval avec des valeurs respectives égales à 0.23 ± 0.16 m (S1), 0.35 ± 0.31 m (S2) et 0.54 ± 0.52 m (S3).. En 2017, les hauteurs d'eau moyenne respectives sont égales à 0.38 ± 0.23 m (S1), 0.47 ± 0.39 m (S2) et

0.62±0.46 m (S3). Dans les deux cas, ces différences de hauteur d'eau moyenne sont statistiquement significatives ($P < 0.001$) et suivent un pattern attendu.

Les largeurs mouillées moyennes (Fig. 45) en 2016 sont, respectivement, égales à 7.55±1.73 m (S1), 10.94±1.88 m (S2) et 10.35±3.46 m (S3). Ces différences sont statistiquement significatives ($P < 0.001$). En revanche les mesures effectuées en 2017 respectivement, égales à 11.90±3.96 m (S1), 12.73±2.00m (S2) et 12,18±3.42 m (S3) ne présentent pas une différence statistiquement significative.

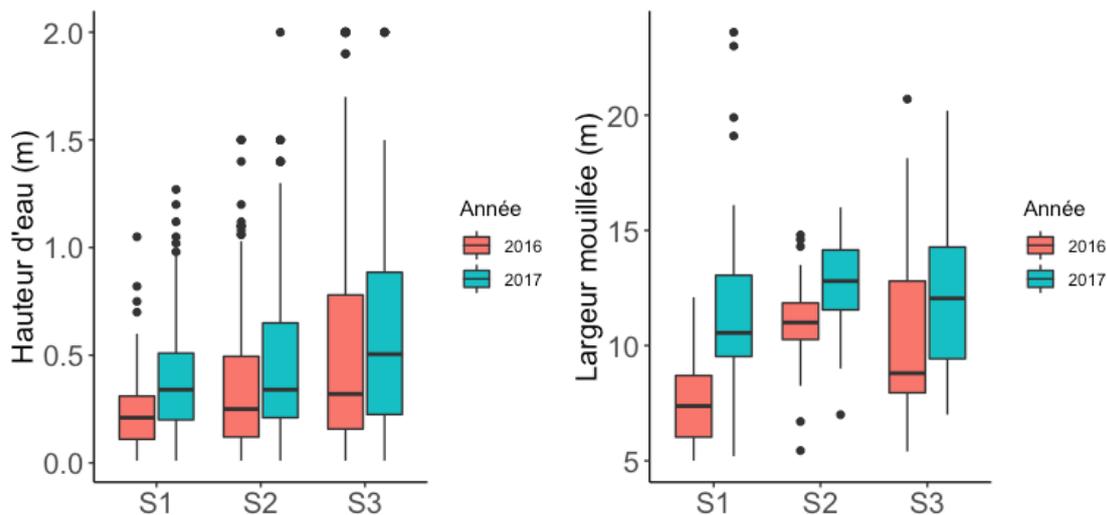


Figure 45 — Variations des hauteurs d'eau et des largeurs mouillées de chaque secteur en 2016 et en 2017 par type de pression (S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible).

6.2.1.2. Conditions hydrologiques et thermiques

Les évolutions thermiques temporelles suivent le gradient amont-aval habituel (Fig. 46). Les stations où la pression hydromorphologique a été plus forte ne présentent pas de profil thermique particulier. L'examen de quelques caractéristiques thermiques à deux périodes de l'année ne permet pas de déceler d'anomalies au niveau thermique. Les différences thermiques se situent plutôt entre rivières avec la Bourges qui est sensiblement plus froide, la Bésorgues qui est sensiblement plus chaude et la Volane se situant entre les deux (Tab. 12).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Eté : du 2/07/2016 au 25/09/2016		
V01 : 17.2 ±1.5°C	BE1 : 15.3±1.0°C	BO1 : 16.1±1.1°C
V02 : 17.9 ±1.3°C	BE2 : 17.5±1.4°C	BO2 : 17.8±1.3°C
V03 : 18.9 ±1.4°C	BE3 : 17.5±1.4°C	BO3 : 18.2±1.4°C
Hiver : du 17/02/2017 au 6/04/2017		
V01 : 7.6 ±1.4°C	BE1 : 8.0±1.2°C	BO1 : 6.8±1.2°C
V02 : 8.0±1.5°C	BE2 : 8.5±1.4°C	BO2 : 7.8±1.4°C
V03 : 8.5 ±1.5°C	BE3 : 8.5±1.4°C	BO3 : 7.9±1.4°C

Tableau 12 — Valeurs moyennes et écarts-types en été et en hiver dans les 9 stations échantillonnées.

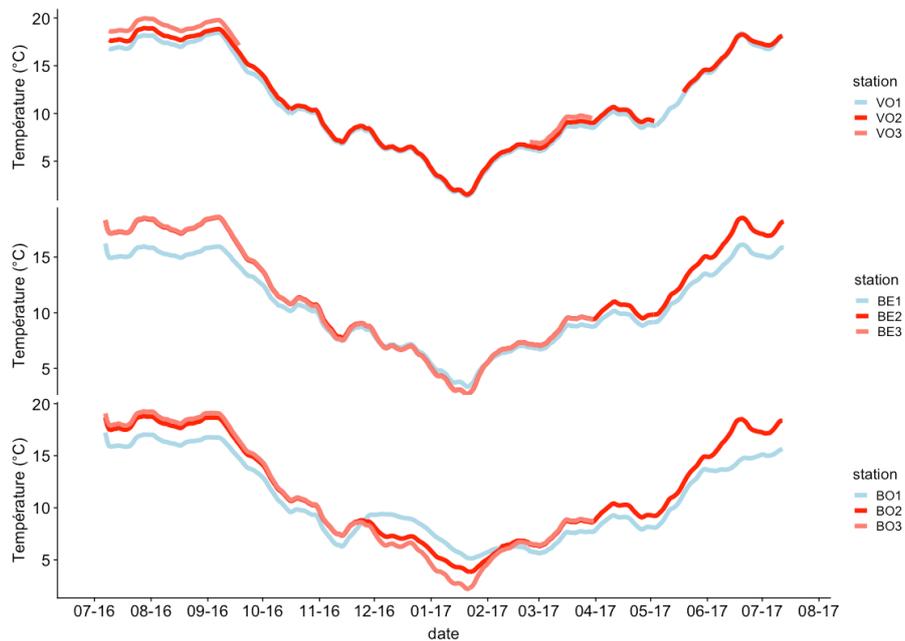


Figure 46 — Profil thermique lissé enregistré à chaque station (lissage à 15 jours) (bleu, naturel, rouge, pression plus forte, saumon, pression plus faible).

L'évolution temporelle des hauteurs d'eau est difficile à exploiter car de nombreuses données sont manquantes du fait d'évènements hydrologiques intenses sur ces rivières (Fig. 47).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

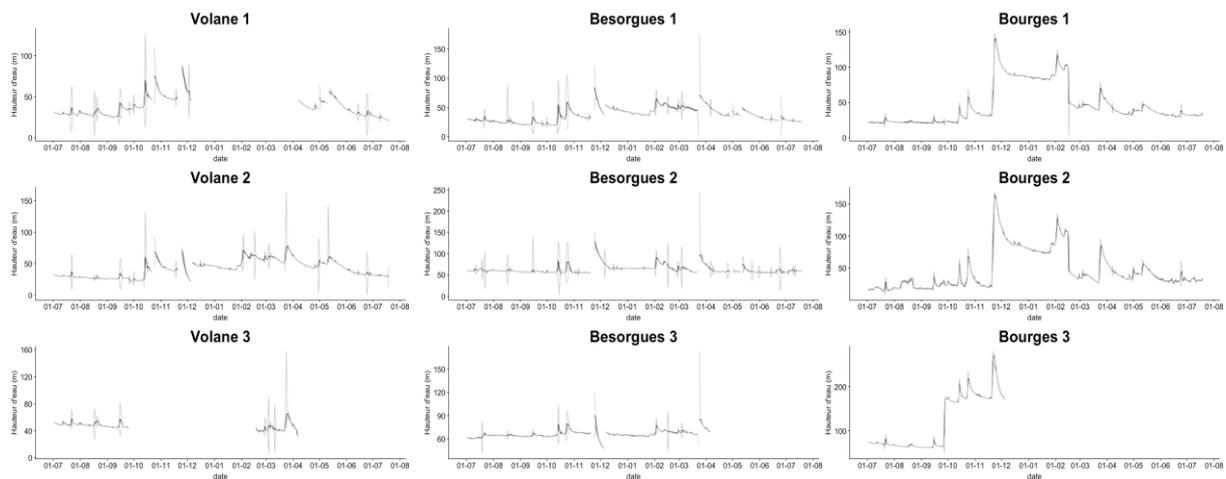


Figure 47 — Évolution temporelle des hauteurs d'eau à chaque station.

6.2.1.3. Physico-chimie

Les valeurs obtenues au Tableau 3 sont significativement différentes entre pressions, pour le colmatage (présent en S2), le pourcentage d'oxygène (>S3 et <S2), la température et la conductivité. Ces mesures restent très ponctuelles et ne doivent pas être sur-interprétées. De plus, le colmatage a été essentiellement évalué qualitativement sans mesure effective. Il ressort de ces données que quelque soit la pression, les eaux étudiées sont d'excellente qualité physico-chimique et situe les cours d'eau dans la classe de très bon état chimique pour l'oxygène ($[O_2] > 8$ mg/L, saturation en oxygène >90%).

Pression	Colmatage (qual)	Hauteur (m)	Vitesse (m/s)	Froude	[O ₂] (mg/L)	%O ₂ (%)	Température (°C)	Conductivité (µS/cm)
S1	0.0±0.0	0.20±0.08	0.18±0.27	0.16±0.27	9.0±0.3	98±2	16.7±0.8	54.0±5.9
S2	0.5±0.5	0.25±0.13	0.13±0.19	0.10±0.15	8.8±0.7	96±7	17.6±0.7	54.3±4.1
S3	0.0±0.0	0.26±0.14	0.19±0.37	0.19±0.39	8.9±0.3	100±3	19.1±1.9	60.2±5.3

Tableau 13 — Valeurs moyennes et écarts-types des données physico-chimiques par type de pression (n=36 par type de pression).

Les nutriments (Tab. 14) signalent également un très bon état chimique ($[NH_4] < 0.1$ mg/L, $[NO_3] < 10$ mg/L, $[PO_4] < 0.1$ mg/L).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Pression	NH4 (mg/L)	PO4 (mg/L)	NO3 (mg/L)
S1	0.007±0.003	0.026±0.017	3.1±0.8
S2	0.008±0.003	0.027±0.005	3.4±1.0
S3	0.008±0.003	0.019±0.004	2.8±1.0

Tableau 14 — Valeurs moyennes et écarts-types des concentrations en nutriments par type de pression (n=36 par type de pression).

6.2.2 - Mesures biologiques

6.2.2.1. Approche taxonomique

- Indicateurs biologiques

Les métriques biologiques usuelles ne montrent pas de différences statistiquement significatives entre les types de pression (Tab. 15).

Pression	Richesse	Indice de Shannon	Indice de Dominance	Richesse en EPT	Proportion d'EPT
S1	20±5	2.04±0.34	0.22±0.09	8.6±2.0	0.41±0.08
S2	19±6	1.99±0.52	0.24±0.17	8.0±2.7	0.41±0.09
S3	18±6	2.02±0.53	0.23±0.15	8.0±2.9	0.43±0.13

Tableau 15 — Valeurs moyennes et écarts-types de différentes métriques biologiques (n=36 par type de pression).

De même, les différents indices biologiques calculés et les métriques associées (Tab. 16) ne montrent pas de différences statistiquement significative entre les types de pression. Les valeurs d'IBG-DCE>16 caractérisent dans tous les cas un excellent état biologique. De la même manière, les valeurs d'I2M2 converge vers un très bon état écologique (I2M2>0.70).

Pression	IBG-DCE	I2M2	I2M2-ASPT	I2M2-Shannon	I2M2-Richesse	I2M2-ovoviviparité	I2M2-polyvoltinisme
S1	18.7±0.6	0.81±0.04	0.97±0.05	0.59±0.15	0.56±0.03	0.92±0.05	0.89±0.08
S2	18.3±1.5	0.82±0.09	0.96±0.06	0.63±0.18	0.65±0.16	0.98±0.03	0.78±0.21
S3	18.7±1.5	0.80±0.07	0.94±0.08	0.61±0.11	0.59±0.13	0.95±0.06	0.79±0.13

Tableau 16 — Valeurs moyennes et écarts-types des indicateurs biologiques par type de pression (n=3 par classe de pression).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

De plus les communautés ne présentent pas de risque d'exposition à des pressions sur l'hydromorphologie très élevées ni de différences significatives entre pression historique (Tab. 17).

Pression	Ripisylve	Urbanisation à 100m	Risque de colmatage	Instabilité hydrologique	Anthropisation du bassin
S1	0.40±0.6	0.08±0.04	0.09±0.05	0.26±0.15	0.23±0.03
S2	0.39±1.5	0.12±0.09	0.16±0.06	0.31±0.18	0.28±0.16
S3	0.39±1.5	0.13±0.07	0.13±0.08	0.24±0.11	0.42±0.13

Tableau 17 — Valeurs moyennes et écarts-types des risques d'exposition des communautés d'invertébrés à des altérations de l'hydromorphologie par type de pression (n=3 par classe de pression).

- Composition faunistique : différences entre types de pression

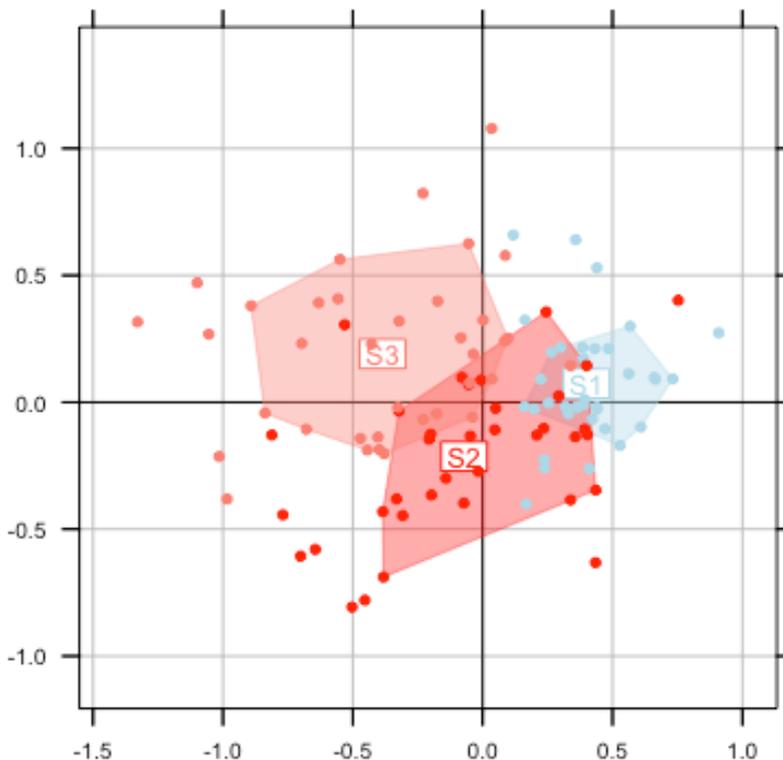


Figure 48 — Premier plan factoriel d'une analyse des correspondances inter-pressions de la composition faunistique. Les échantillons sont groupés par type de pression (n=36 par type de pression; S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible).

L'analyse factorielle des correspondances inter-pression permet de montrer des différences de composition faunistique entre les situations naturelles et les situations sous pression hydraulique historique. Compte-tenu de la sélection des points, il était attendu que la situation s3 serait plus proche de la situation S1, la situation S2 étant considérée comme représentant la pression la plus forte. En moyenne, on a bien une séparation significative des types de pressions mais d'une part elle ne suit pas rigoureusement ce qui était attendu et d'autre part, les

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

recouvrements de composition entre situation sont importants. Le test interclasses est significatif ($P < 0.001$). Mais seuls 5% de variance concerne cette différence ce qui est très peu et se matérialise par un fort chevauchement des compositions faunistiques (Fig. 48).

Tableau 18 — Résultat d'une analyse simper montrant les différences de composition entre situations (a) S1 et S2, (b) S1 et S3, et (c) S2 et S3. (S1, S2, S3 : abondance moyenne du taxon ; *cumsum* : contributions cumulées des taxons à la différence entre pressions ; p : probabilité d'obtenir une contribution supérieure ou égale à la contribution observée après permutations aléatoires du groupe (pression)).

(a)	S1	S2	cumsum	p	
<i>Habrophlebia</i>	37.1	11.5	0.5	0.01	**
<i>Hydrocyphon</i>	1.1	0.2	0.95	0.03	*
Hydroporinae	1.2	0.2	0.97	0.05	*
<i>Polycelis</i>	0.3	0.0	0.99	0.05	*
<i>Nemoura</i>	0.2	0.1	0.99	0.04	*

(b)	S1	S3	cumsum	p	
<i>Baetis</i>	47.6	21.8	0.14	0.01	**
<i>Habrophlebia</i>	37.1	2.1	0.4.0	0.01	**
<i>Elmis</i>	13.9	7.6	0.65	0.01	**
<i>Ecdyonurus</i>	9.9	3.4	0.74	0.01	**
<i>Gammarus</i>	5.0	0.5	0.89	0.01	**
<i>Rhyacophila</i>	1.3	2.7	0.92	0.02	*
<i>Hydrocyphon</i>	1.1	0.1	0.94	0.01	**
<i>Dinocras</i>	0.9	0.1	0.97	0.04	*
Hydroporinae	1.1	0.2	0.97	0.03	*
Limnephilinae	0.8	0.1	0.97	0.01	**
<i>Polycelis</i>	0.4	0.0	0.99	0.01	**
<i>Gyrinus</i>	0.1	0.0	0.99	0.01	**
<i>Rhithrogena</i>	0.1	0.0	0.99	0.01	**
<i>Philopotamus</i>	0.1	0.0	0.99	0.02	*
<i>Plectrocnemia</i>	0.1	0.0	0.99	0.03	*
<i>Perlodes</i>	0.1	0.0	0.99	0.01	**

(c)	S2	S3	cumsum	p	
Chironomini	75.3	29.7	0.15	0.01	**
Hydracarina	2.3	4.9	0.76	0.01	**
<i>Proclleon</i>	5.3	3.6	0.78	0.02	*
<i>Mystacides</i>	3.0	3.9	0.84	0.01	**
<i>Hydroptila</i>	4.0	1.1	0.88	0.01	**
<i>Epeorus</i>	1.2	0.9	0.91	0.05	*
Tinodes	0.9	1.5	0.92	0.01	**
<i>Psychomyia</i>	0.2	1.1	0.95	0.02	*
Tabanidae	1.7	0.8	0.96	0.01	**

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

<i>Centroptilum</i>	1.1	0.4	0.97	0.01	**
<i>Boyeria</i>	0.6	0.1	0.98	0.01	**
<i>Caenis</i>	0.3	0.5	0.98	0.01	**
Tipulidae	0.4	0.1	0.99	0.01	**
Cloeon	0.3	0	0.99	0.02	*
Laccobius	0.3	0.1	0.99	0.02	*
Ilybius	0.1	0	0.99	0.02	*

L'analyse *simper* permet d'identifier quels taxons diffèrent significativement en termes d'abondance entre les différents types de pression. De manière assez surprenante la différence entre les situations que nous avons considérée comme extrêmes (S1 et S2) présentent des différences pour 5 taxons avec essentiellement *Habrophlebia* trois fois plus abondants en S1 qu'en S2 et qui contribue à 50% de la différence faunistique. Par contre, le nombre de taxons différant entre la situation S1 (naturel) et S3 (pression moins forte) est significativement supérieure (16 taxons). On y retrouve *Habrophlebia*, *Baetis*, *Elmis* et *Ecdyonurus* significativement plus abondants en S1 et qui contribuent à 75% des différences entre S1 et S3. On peut retrouver dans cette liste des taxons sensiblement plus rhéophiles. Enfin la différence entre les situations sous pression (S2 et S3) est également liée à 16 taxons. Trois taxons (Chironomini, Hydracariens et *Procloeon*) contribuent à 75% des différences d'abondance. La liste intègre plutôt des taxons limnophiles.

- Composition faunistique : différences intra-rivière

Une analyse des correspondances intra-rivière a été menée pour voir si le pattern inter-pression global observé ci-dessus se reproduisait fidèlement d'une rivière à une autre.

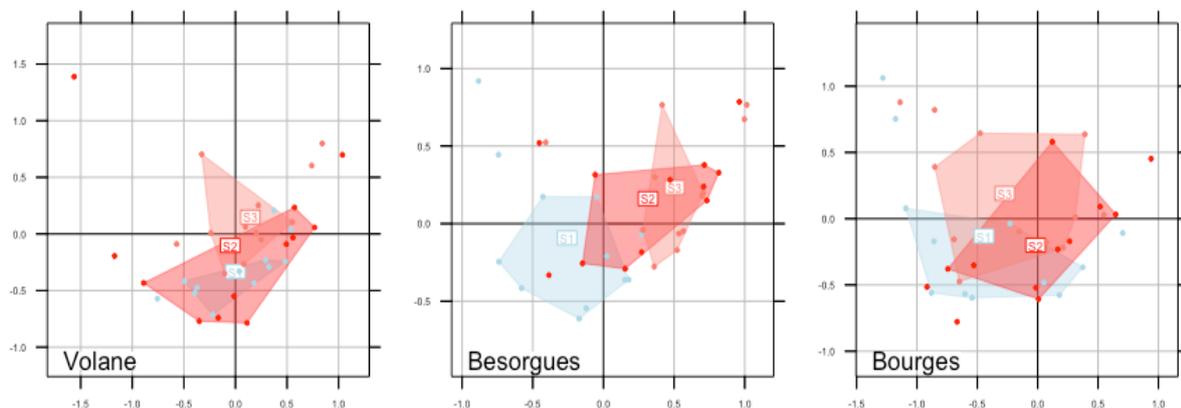


Figure 49 — Premier plan factoriel d'une analyse des correspondances intra-rivière de la composition faunistique. Chaque graphe regroupe les échantillons d'une rivière. Les échantillons sont groupés par type de pression (n=36 par type de pression ; S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible)

La variance de la composition faunistique expliquée par les types de pression est égale à 11.1% ($P < 0.001$), 10.9% ($P < 0.003$), et 8.9% ($P < 0.035$) pour la Volane, la Bésorgues et la Bourges respectivement.

6.2.2.2. Traits biologiques

• Différence entre types de pression

L'analyse factorielle des correspondances de la composition en traits biologiques inter-pressions permet de montrer des différences entre les situations naturelles et les situations sous pression hydraulique historique. Comme pour la composition faunistique on a bien une séparation significative des types de pressions ce qui suggère que ce ne sont pas les mêmes traits qui composent les communautés suivant les différentes pressions.

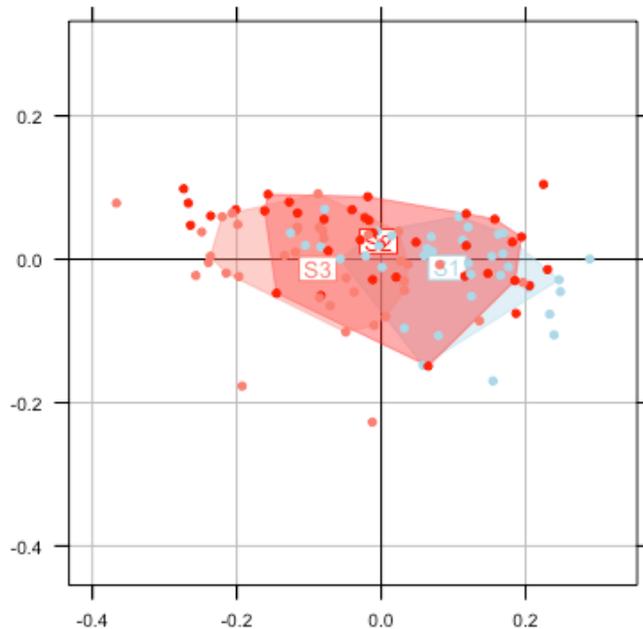


Figure 50 — Premier plan factoriel d'une analyse des correspondances flou inter-pression de la composition en traits biologiques. Les échantillons sont groupés par type de pression (n=36 par type de pression ; S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible).

Cependant, ici encore, cette séparation ne suit pas rigoureusement ce qui était attendu puisqu'on observe suivant l'axe 1 la succession S1>S2>S3 alors qu'on attendait la succession S1>S3>S2. Comme pour la composition faunistique, les recouvrements de composition en traits entre situations de pression hydraulique sont importants ce qui indique que les différences sont ténues. Le test interclasse est significatif (P<0.001). Mais seuls 9.3% de la variance concerne cette différence ce qui est peu et se matérialise par un fort chevauchement des compositions en traits biologiques (Fig. 50, Tab. 19).

Tableau 19 — Résultats d'une analyse simple montrant les différences de proportion des différentes catégories de traits entre situations (a) S1 et S2, (b) S1 et S3, et (c) S2 et S3. (S1, S2, S3 : proportion moyenne de la catégorie de trait; Diff : Différences de proportion moyenne; cumsum : contribution cumulée des catégories de trait à la différence; p : probabilité d'obtenir une contribution supérieure ou égale à la contribution observée après permutations aléatoires du groupe (pression)).

(a)	S1	S2	Diff	cumsum	p	
Durée de vie <1 a.	0.74	0.79	-0.05	0.06	0.02	*
pontes cimentées	0.46	0.45	0.00	0.11	0.01	**

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Pref Courant moyen	0.31	0.29	0.02	0.51	0.02	*
Nageur	0.15	0.17	-0.02	0.55	0.02	*
Mangeurs de dépôt	0.12	0.14	-0.02	0.75	0.03	*
Préf litière	0.08	0.08	0.00	0.90	0.02	*
Volant	0.03	0.03	0.00	0.96	0.04	*

(b)	S1	S3	Diff	cumsum	p	
Durée de vie <1 a.	0.74	0.83	-0.09	0.05	0.05	*
Respiration tégumentaire	0.44	0.55	-0.11	0.11	0.01	**
Plurivoltins	0.26	0.35	-0.10	0.13	0.01	**
Respiration branchiale	0.41	0.32	0.09	0.15	0.01	**
Milieus oligotrophes	0.46	0.38	0.08	0.17	0.01	**
stade aquatique = nymphe	0.13	0.22	-0.09	0.19	0.01	**
Déchiquetteurs	0.29	0.20	0.09	0.23	0.01	**
Rampant	0.58	0.50	0.08	0.28	0.01	**
Préf Courant nul	0.12	0.18	-0.06	0.34	0.03	*
Univoltins	0.65	0.58	0.06	0.35	0.01	**
Milieus eutrophes	0.13	0.20	-0.07	0.40	0.01	**
stade aquatique = oeufs	0.37	0.31	0.06	0.42	0.05	*
Attachés au substrat	0.08	0.14	-0.06	0.43	0.01	**
Taxons de lacs	0.13	0.17	-0.04	0.52	0.01	**
Filtreurs	0.06	0.10	-0.04	0.57	0.02	*
Taxons de "non rivières"	0.10	0.14	-0.04	0.61	0.03	*
Alpha mesosaprobic	0.12	0.17	-0.04	0.63	0.01	**
Nourriture = végétaux morts	0.14	0.09	0.05	0.65	0.01	**
Oligosaprobies	0.35	0.31	0.04	0.72	0.01	**
Dispersion aérienne active	0.29	0.25	0.03	0.74	0.01	**
Taxons de piedmont	0.29	0.27	0.02	0.76	0.01	**
Nourriture = micro-detritus	0.20	0.23	-0.03	0.77	0.01	**
Taxons d'epirithron	0.19	0.16	0.03	0.79	0.02	*
Taxons de metarithron	0.21	0.18	0.03	0.83	0.01	**
Ponte d'oeufs libres	0.07	0.04	0.02	0.84	0.01	**
Nourriture = macrophytes	0.09	0.11	-0.02	0.85	0.04	*
Taxons de metapotamon	0.06	0.08	-0.02	0.93	0.01	**
Interstitial	0.08	0.08	0.00	0.93	0.04	*
Taxons d'hyporithron	0.20	0.18	0.02	0.95	0.02	*
Taxons d'epipotamon	0.12	0.13	-0.01	0.98	0.01	**
Taxons d'estuaire	0.02	0.03	-0.01	0.98	0.01	**
Parasite	0.01	0.03	-0.01	0.99	0.01	**
(c)	S2	S3		cumsum	p	
Pref pH>6	0.37	0.35	0.01	0.53	0.04	*
Nageurs	0.17	0.17	0.00	0.55	0.05	*
Filtreurs	0.07	0.10	-0.03	0.62	0.02	*
Perceurs	0.03	0.04	-0.02	0.75	0.03	*

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Pref substrat = macrophytes	0.22	0.23	-0.01	0.84	0.01	**
Thermophiles	0.09	0.11	-0.02	0.88	0.03	*
Pref 4<pH<4.5	0.06	0.07	0.00	0.96	0.03	*
Pref pH <4	0.05	0.05	0.00	0.98	0.02	*
Parasite	0.02	0.03	-0.01	0.98	0.01	**

L'analyse *simper* permet d'identifier les catégories de traits différenciant significativement en termes de proportion entre les différents types de pression. En termes quantitatifs, on retrouve des tendances très proches de ce qui est observé avec les compositions faunistiques. Peu de catégories séparent S1 et S2 et les différences de proportions sont faibles. Les tendances observées suivent ce qui pourrait être attendu. La pression hydraulique S2 se solde par une proportion plus forte d'animaux à durée de vie courte (plus fort *turn-over*), et plus de nageurs et de mangeurs de dépôts signe d'une diminution de courant locale. La différence entre S1 et S3 est beaucoup plus importante en termes de traits avec plus de 32 catégories montrant des changements significatifs de proportions en lien avec une différence amont-aval classique des cours d'eau mais non attendue ici. La situation S3 (pression hydraulique modérée) se distingue notamment par plus d'organismes plurivoltins (plus fort *turn-over*), préférant un faible courant, ou de filtreurs de matière organique dérivante, ou mangeant des micro-détritus, moins de déchiqueteurs (plus faible apport allochtone), ou d'organismes pondant des œufs libres (plus forte pression environnementale), ou de rampants (plus faible influence hydraulique), ou de taxons polluo-sensibles. La typologie amont-aval est respectée (plus forte proportion d'organismes liée au rhithron en S1 et plus forte proportion d'organismes liés au potamon en S3). Enfin la différence entre les deux niveaux de pression hydrauliques historiques se soldent par une plus forte proportion de filtreurs (matière organique dérivante), de perceurs (développement d'algues) ou d'organismes thermophiles en S3 par rapport à S2.

• Différences intra-rivière

La variance de la composition en traits biologiques expliquée par les types de pression est égale à 14.4% ($P < 0.007$), 21.3% ($P < 0.003$), et 10.7% ($P < 0.035$) pour la Volane, la Bésorgues et la Bourges respectivement (fig. 51).

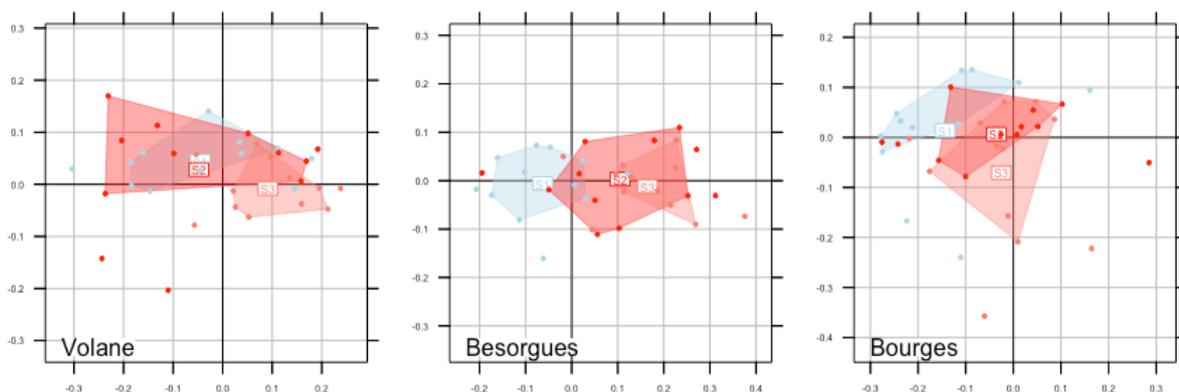


Figure 51 — Premier plan factoriel d'une analyse des correspondances floue intra-rivière de la composition en traits biologiques. Chaque graphe regroupe les échantillons d'une rivière. Les échantillons sont groupés par type de pression ($n=36$ par type de pression; S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible)

6.2.2.3. Perte de masse des litières

L'examen de l'évolution de la perte de masse des feuilles avec l'accumulation des degrés-jours au cours de l'expérience montre que celle la dégradation est très lente dans les cours d'eau quel que soit le niveau typologique (Fig. 52).

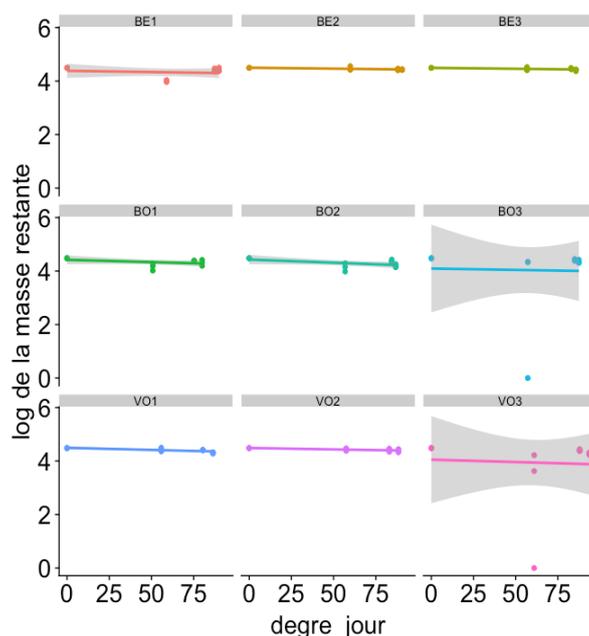


Figure 52 — Relation entre le nombre de degrés-jour et la masse restante de feuilles dans les paniers dans les 9 stations échantillonnées.

Les différences de taux de dégradation entre rivière laissent apparaître à la marge statistiquement ($P=0.06$) une valeur inférieure en moyenne des taux exprimés en degré-jour dans la Bésorgues par rapport aux autres rivières (Tab. 20).

Station	Pression	k1	k2	Classification (k2)
Volane	S1	0.0016	0.0039	Moyen
Volane	S2	0.0010	0.0027	Moyen
Volane	S3	0.0018	0.0819	Mauvais
Bésorgues	S1	0.0009	0.0210	Bon
Bésorgues	S2	0.0007	0.0013	Moyen
Bésorgues	S3	0.0007	0.0029	Moyen
Bourges	S1	0.0017	0.0147	Bon
Bourges	S2	0.0023	0.0171	Bon
Bourges	S3	0.0010	0.0690	Mauvais

Tableau 20 — Valeurs des taux de dégradation mesuré en degrés jour (k1) et en jour⁻¹ (k2) dans les 9 stations suivies.

En moyenne le taux de dégradation exprimé en jour^{-1} est de 0.013 j^{-1} pour S1, 0.007 j^{-1} pour S2, et 0.051 pour S3 (Fig. 53). Ceci classe chaque situation respectivement dans un bon état pour S1, un état moyen pour S2 et un mauvais état pour S3. Compte-tenu de la grande variabilité de ces données, les différences moyennes ne sont cependant pas statistiquement significatives.

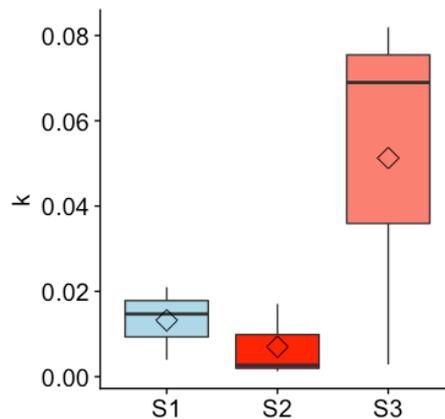


Figure 53 — Distribution des taux de dégradation (en jour^{-1}) dans les différentes situations de pression hydraulique historiques (S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible).

6.2.2.4. Activité du biofilm

La biomasse microbienne ne montre pas de différences significatives entre type de pression (Fig. 54). L'activité microbienne semble sensiblement supérieure en situation naturelle (Fig. 54) mais cette différence n'est pas statistiquement significative.

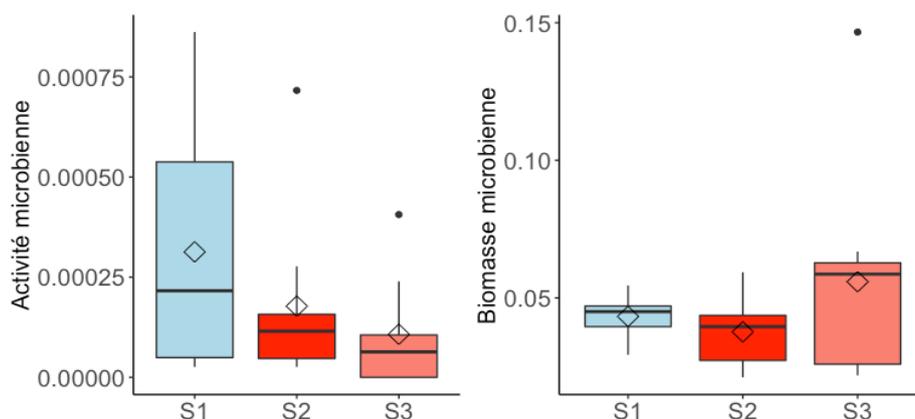


Figure 54 — Activité (à gauche) et biomasse du biofilm microbien en réponse aux pressions hydrauliques historiques (S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible).

6.3 Conclusion de la partie

Les attendus de cette étude étaient liés au fait que les modifications de paramètres physiques et chimiques engendrées par les pressions hydrauliques actuelles et passées s'accompagneraient de réponses biologiques différenciées.

Il était attendu que les potentielles plus faibles hauteurs d'eau du tronçon court-circuité (noté S2) devaient impacter négativement la température de l'eau et induire une qualité chimique moindre. Les réponses biologiques attendues comprenaient une qualité biologique moindre associée à la limitation en apport d'eau et aux modifications hydrauliques associées, des différences de composition faunistique associée à une sélection de taxons ayant des stratégies biologiques différentes notamment celles qui favorisent la résilience (petite taille, temps de génération court) ou la résistance (protection des œufs, vie enfouie dans le sédiment).

Enfin, l'examen des processus fonctionnels devait montrer une dégradation de la litière plus rapide liée à des températures plus élevées et un développement de biofilm plus important lié avec les plus faibles hauteurs d'eau en situation de pression hydraulique.

Nos résultats ne montrent pas d'anomalie thermique particulière entre les situations de pression hydraulique étudiées, ni d'anomalie de profondeur remarquable. La qualité physico-chimique n'est pas altérée par les pressions hydrauliques. De ce fait les réponses biologiques mesurées soulignent la très bonne qualité biologique globale des sites étudiés tant au plan des métriques usuelles (richesse, diversité) que des indices biologiques (IBG-DCE, I2M2) et quelles que soient les pressions hydrauliques actuelles ou passées.

On observe seulement un léger risque d'exposition des communautés à l'anthropisation dans les sites de pression hydraulique actuelle moyenne qui correspond en fait à une emprise plus importante à l'aval des cours d'eau. De nombreux traits de résilience ou de résistance montrent des différences significatives essentiellement liées au gradient amont-aval et non aux pressions hydrauliques. Ceci se traduit par une absence de différence de diversité fonctionnelle entre les différentes situations de pressions hydrauliques.

7 - Conclusions et perspectives

Le travail effectué dans le cadre de cette action de recherche montre que les informations issues d'archives sont utilisables pour caractériser les pressions anciennes sur la ressource en eau. Elles montrent que les pressions étaient potentiellement très fortes dans la seconde moitié du XIX^e siècle, qui correspond à un maximum démographique et économique dans les régions rurales françaises. Malgré des incertitudes, il est possible de comparer avec les situations actuelles.

La situation la plus répandue (dans les trois bassins étudiés) est l'effondrement des pressions industrielles qui ne subsiste que dans quelques secteurs (essentiellement le bassin de l'Ardèche supérieure et de ses affluents : Volane, Bésorgues, Fontolière, Bourges). En revanche, dans ces sites, la pression de dérivation semble avoir sensiblement augmenté si on compare les dérivations des microcentrales à celles des moulins correspondant à la fin du XIX^e siècle.

Les pressions agricoles semblent avoir beaucoup diminué aussi, mais l'incertitude résiduelle est plus importante. D'une part le mode d'évaluation à partir des archives était moins précis que pour les dérivations industrielles car il était indirect et dépendait d'une information statistique agricole et non d'une mesure hydrologique ancienne. D'autre part, la situation actuelle est également moins certaine du point de vue statistique car on observe de nombreux prélèvements qui ne semblent pas déclarés et qui échappent donc aux quantifications récentes. Une tendance semble en revanche très claire : l'essentiel de la pression agricole se concentrait jadis dans la partie cévenole du bassin de l'Ardèche, où elle a beaucoup diminué, alors que les prélèvements ont connu une augmentation dans les basses vallées.

Les cours d'eau de l'Ardèche présentent actuellement, comme au XIX^e s., une forte densité de seuils constituant des entraves ponctuelles à la libre circulation de la faune aquatique. Cette discontinuité physique est liée pour l'essentiel aux prises d'eau des moulins, sachant toutefois que cette situation est contrastée d'un bassin à l'autre car 1) certaines prises d'eau ont entièrement disparu alors que 2) d'autres se maintiennent et que 3) certaines discontinuités sont dues à des chutes naturelles dans le lit rocheux (vallée de la Bourges, notamment). À cette discontinuité spatiale, s'ajoutait au XIX^e s. une très forte discontinuité temporelle liée aux prélèvements agricoles. Ainsi, pendant environ 4 mois chaque année, ces prélèvements pouvaient entraîner un net affaiblissement voire un assèchement partiel des cours d'eau et donc un régime d'intermittence très marquée sur la plupart des biefs (en plus des tronçons court-circuités par les moulins).

Des comparaisons avec d'autres bassins sont certainement envisageables en mettant en œuvre la même méthode de travail : d'une part les archives statistiques sont identiques puisque le projet de *l'Atlas statistique des cours d'eau* a été conçu à l'échelle nationale, d'autre part la base de donnée du RHT est disponible sur tout le territoire national. Enfin, les reconstructions ou ré-analyses hydrométéorologiques ont été menées sur plus de 660 bassins versants et sont disponibles comme élément de contrôle des confrontations entre informations historiques anciennes et données hydrologiques récentes.

Certaines approches permettraient de réduire les incertitudes qui persistent à l'issue de cette première analyse. Une caractérisation des pressions industrielles serait possible à une échelle encore plus fine si on disposait de la totalité de l'information relative aux aménagements hydrauliques (localisation exacte de la prise d'eau, longueur du bief et localisation de la restitution au cours d'eau, donc localisation et dimension exactes des tronçons court-circuités).

Dans le cas des pressions agricoles, il peut être possible d'affiner la résolution spatiale en travaillant à partir de l'information cadastrale ancienne. En mesurant et en localisant très exactement les cultures irriguées, à l'échelle des bassins unitaires et des drains élémentaires, il sera possible de préciser notre vision de la pression et de sa répartition spatiale et de mieux évaluer la façon dont elle pouvait se combiner avec la pression industrielle. Ceci permettrait aussi une approche modélisatrice plus fine des consommations hydriques réelles des parcelles irriguées. Mais ceci nécessite un changement d'échelle car des analyses de ce type ne peuvent se concevoir que sur des bassins représentatifs, du fait de la masse d'informations à traiter (archives cadastrales) ou de paramètres à définir (ETR, infiltration, taux de retour à l'écoulement fluvial, changements paysagers dans les bassins versants...). Certains secteurs peuvent s'y prêter, comme la partie lozérienne des bassins de l'Ardèche et de la Cèze, à la fois parce qu'il existe des archives plus précises, à la fois parce qu'il subsiste une pratique de l'irrigation gravitaire qui aiderait sans doute à étalonner les paramètres de la modélisation (haut Altier).

L'approche des différents niveaux de pression sur les macroinvertébrés benthiques ne permet pas de déceler d'effet. Les trois situations de pression caractérisées dans trois rivières différentes ne font apparaître aucune tendance significative ; les tronçons concernés semblent de très bonne qualité biologique. Ces résultats soulèvent plusieurs questions :

- Peut-on extrapoler ces résultats à la situation ancienne ? Le cas échéant, l'impact des dérivations était-il aussi faible par le passé ? quelle pouvait être l'influence d'un bassin versant à l'état de surface différent, celle de chenaux plus alimentés en sédiments ? Quel pouvait être le rôle de pressions agricoles plus importantes ?
- Est-il possible de poursuivre l'analyse en augmentant le nombre de cas étudiés, ce qui permettrait peut-être de faire apparaître des différences ?

Cette première analyse suggère que la pression agricole pouvait affaiblir sensiblement les débits des basses eaux. En s'efforçant de réduire les incertitudes subsistant dans l'évaluation de cette pression, ces résultats invitent à préciser dans quelle mesure cela a-t-il pu avoir une influence sur la durée et l'intensité des étiages. Il serait intéressant de combiner cette approche avec les ré-analyses météorologiques qui ont été récemment développées.

D'autre part, une analyse plus systématique de la conflictualité liée à l'exploitation des eaux de surface (recherche historique des conflits, étude de leur distribution spatio-temporelle) serait également intéressante. Elle permettrait d'associer les approches historiques et hydrométéorologiques dans une analyse des effets environnementaux de la gestion de l'eau et de ses évolutions depuis le XIX^e siècle.

Bibliographie

- Adam P., Debiais N., Malavoi JR. (2007). *Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau*. Agence de l'eau Seine-Normandie, Paris.
- AUCEA (2007). Plan de gestion des étiages du bassin versant de l'Ardèche. CLE, Toulouse.
- Balestrat M. & Théron O. (2014). *Enjeux de la gestion quantitative de l'eau en France. Quels données et outils de modélisation pour les institutions publiques en charge de la gestion des étiages ?* Rapport d'étude, ONEMA et INRA, 75 p.
- Barraud R. (2007). *Vers un « tiers-paysage » ? Géographie paysagère des fonds de vallées sud-armoricaines. Héritage, évolution, adaptation*. Thèse de géographie, Université de Nantes, 407 p.
- Barraud R. (2009). La rivière aménagée et le moulin à eau. Un héritage en déshérence ? Trajectoires, modèles et projets de paysages. Exemples des vallées sud-armoricaines. *Bulletin de l'Association de géographes Français* 86(1), 32-45.
- Barraud R. et Germaine M.-A. (coord.) (2017). *Démanteler les barrages pour restaurer les cours d'eau. Controverses et représentations*. Éd. Quæ, 260 p.
- Beauchamp A. (2018). *Impacts des aménagements hydrauliques sur les systèmes fluviaux bas-normands depuis 2000 ans*. Thèse de géographie, Université de Caen-Normandie, 556 p. + annexes.
- Benchiboub O. (2017). *L'apport des données des archives pour l'étude des pressions sur la ressource en eau dans le bassin versant de l'Ardèche depuis le XIX^e siècle*. Mémoire de master 1 de géographie, Université Lumière Lyon 2, 78 p. + annexes.
- Benoît P., Berthier K., Boët P., Rézé Ch. (2004). Les aménagements hydrauliques liés au flottage du bois, leur impact sur le milieu fluvial (XVI^e-XVIII^e s.). In Burnouf J. & Leveau P. (dir) *Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture*, CTHS, 311-320.
- Berger L. (1998). *Développement et ressources en eau dans trois vallées de la bordure orientale du Massif central (XIX^e-XX^e siècle), la Turdine, le Gier et la Cance*. Thèse de géographie, Université de Paris IV-Sorbonne, 583 p.
- Berger L. (1999). Annonay et la Cance vers 1880 : impacts hydrologiques et écologiques d'une ville industrielle. In Regrain R. & Auphan E. (éd.) *L'eau et la ville*, CTHS, Paris, 175-196.
- Bloch M. (1935). Avènement et conquête du moulin à eau. *Annales d'histoire économique et sociale*, 7, 538-563.
- Bonada N., Dolédec S., & Statzner B. (2007). Taxonomic and biological trait differences of stream macroinvertebrate communities between mediterranean and temperate regions: Implications for future climatic scenarios. *Global Change Biology*, 13(8), 1658–1671.
- Brown T., Lespez L., Sear D. A., Macaire J.-J., Houben P., Klimek K., Brazier R. E., Van Oost K., Pears B. (2018). Natural vs Anthropogenic Streams in Europe : History, Ecology and Implications for Restoration, River-Rewilding and Riverine Ecosystem Services. *Earth-Science Reviews*, 180, 185-205. doi : [10.1016/j.earscirev.2018.02.001](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.001).

- Caillouet L., Vidal J.-P., Sauquet E., Devers A. et Graff B. (2017). Ensemble reconstruction of spatio-temporal extreme low-flow events in France since 1871. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21 (6), 2923-2951. DOI : 10.5194/hess-21-2923-2017.
- Caillouet L., Vidal J.-P., Sauquet E., Graff B. et Soubeyroux J.-M. (2019). SCOPE Climate: a 142-year daily high-resolution ensemble meteorological reconstruction dataset over France. *Earth System Science Data*, 11 (1), 241-260. DOI : 10.5194/essd-11-241-2019.
- Chevenet F., Dolédec S., & Chessel D. (1994). A fuzzy coding approach for the analysis of long-term ecological data. *Freshwater Biology* (Special Issue), 31, 295–309.
- Cheysson E. (1879). Notice sur l'Atlas statistique des cours d'eau, usines et irrigations. *Journal de la société statistique de Paris*, 20, 172-180.
- Clarke K. R. (1993). Non-Parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18, 117–143.
- Devers A., Vidal J.-P., Lauvernet C., Graff B. & Vannier O. (2019). A framework for high-resolution meteorological surface reanalysis through offline data assimilation in an ensemble of downscaled reconstructions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, 1-21. <https://doi.org/10.1002/qj.3663>
- Devreux L. (2016). *La pression des dérivations industrielles sur les écoulements de rivières cévenoles (Gardon, Cèze et haute Ardèche) depuis la fin du XIX^e siècle : une approche par les archives statistiques et la cartographie, fin XIX^e siècle – début XXI^e siècle*. Mémoire de master 1 de géographie, Université Lumière Lyon 2, 92 p. + annexes
- Dolédec S., & Chessel D. (1987). Seasonal successions and spatial variables in freshwater environments. I. Description of a complete 2-way layout by projection of variables. *Acta Oecologica – Oecologia Generalis*, 8, 403–426.
- Dolédec S., & Chessel D. (1989). Rythmes saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique. II. Prise en compte et élimination d'effets dans un tableau faunistique. *Acta Oecologica - Oecologia Generalis*, 10(3), 207–232.
- Fabre J., & Pelte T. (2013). *Étude de caractérisation des vulnérabilités du bassin Rhône-Méditerranée aux incidences du changement climatique dans le domaine de l'eau*. Rapport de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, Lyon, 48 p.
- Germaine M.-A., Barraud R. (2013a). Les rivières de l'Ouest de la France sont-elles seulement des infrastructures naturelles ? Les modèles de gestion à l'épreuve de la DCE, *Natures Sciences Sociétés*, 21/3, 373-384, <http://www.nss-journal.org/articles/nss/abs/first/nss140003/nss140003.html>
- Germaine M.-A., Barraud R. (2013b). Restauration écologique et processus de patrimonialisation des rivières dans l'ouest de la France, *VertigO, Revue électronique en sciences de l'environnement*, <http://vertigo.revues.org/13583>
- Jacob N. (2004). Les canaux de la Borne et du Chassezac, une huerta cévenole. *Mémoire d'Ardèche et Temps Présent*, 82, 83-96.
- Jacob N. (2005). Prélèvements hydriques de l'agriculture et de l'industrie en Cévenne vivaraise depuis le XIX^e siècle : l'apport des archives à la gestion contemporaine. *La Houille Blanche Revue Internationale de l'Eau*, 3, 97-102.

Jacob-Rousseau N. (2005). Aspects de la pénurie hydrique et de sa gestion dans la Cévenne vivaraise au XIX^e siècle. *Géocarrefour*, 80(4), 297-308.

Jacob-Rousseau N. (2015). Water diversions, environmental impacts and social conflicts: the contribution of quantitative archives to the history of hydraulics. French cases (19th century). *Water History*, vol. 7(1), 101-129.

Jacob-Rousseau N., Météry F., Tscheiller C. et Navratil O., (2016). La petite hydraulique agricole et industrielle, de l'histoire économique à l'évaluation quantitative des pressions sur les écoulements, XIX^e - début XX^e siècle. Bassins de l'Arroux, de la Grosne et de la Petite Grosne (Bourgogne, France). *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 67, 143-160.

Lamouroux N. & Capra H. (2002). Simple predictions of instream habitat model outputs for target fish populations. *Freshwater Biology*, 47, 1543-1556.

Lespez L. (dir.) (2012). *Paysages et gestion de l'eau. Sept millénaires d'histoire de vallées et de plaines littorales en Basse-Normandie*. Presses universitaires de Caen, Caen, 333 p.

Lespez L., Viel V., Cador J.-M., Germaine M.-A., Germain-Vallée C., Rollet A.-J., Delahaye D. (2013). Environmental dynamics of small rivers in Normandy (western France) since the Neolithic era. What lessons for today in the context of the European Water Framework Directive ? In Arnaud-Fassetta G., Masson E., Reynard E. (dir.), *European Continental Hydrosystems under Changing Water Policy*, Friedrich Pfeil Verlag, München, 71-90.

Lucas A. (2005). *Wind, Water, Work: Ancient And Medieval Milling Technology (Technology and Change in History)*. Brill Academic Publishers, Leiden, 439 p.

Malavoi J.-R. et D. Salgues, 2010. *Arasement et dérasement de seuils, Aide à la définition de cahier des charges pour les études de faisabilité*. Onema/Cemagref, 83 p.

Mériaux G. (2017). *Mise en place des bases de données et cartographie des pressions industrielles et agricoles sur la ressource en eau dans les rivières cévenoles depuis la fin du XIX^e siècle*. Mémoire de stage de Licence professionnelle, Université Lumière – Lyon 2, 75 p. + annexes

Ministère des Travaux Publics (1873). *Statistique centrale des chemins de fer, chemin de fer français, situation au 31 décembre 1873*, 265 p.

Mondy C. P. & Usseglio-Polatera P. (2013). Using conditional tree forests and life history traits to assess specific risks of stream degradation under multiple pressure scenario. *Science of the Total Environment*, 461-462, 750-760.

Morel Y. (2002). *Les maîtres du fil. Histoire du moulinage vivarois du XVIII^e siècle à nos jours*. Mémoire d'Ardèche et Temps Présent et Conseil Général de l'Ardèche, Privas, 679 et 343 p + annexes.
Mousnier M. (Ed) (2002). *Moulins et meuniers dans les campagnes européennes (IX^e- XVIII^e siècle)*. Presses universitaires du Mirail, Toulouse, 286 p.

Olson J. S., (1963). Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 44, 322-331.

Palsky G. (1996). *Des chiffres et des cartes. La cartographie quantitative au XIX^e siècle*. CTHS, Paris.

Pella H., Lejot J., Lamouroux N. et Snelder T. (2012). Le réseau hydrographique théorique (RHT) français et ses attributs environnementaux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 3/2012, 317-336.

Ponce J-L., Didond-Lescot J-F. & Vayssade B. (2008). *Recherches historiques sur le Gardon d'Anduze*. SMAGE des Gardons. 87 p. + annexes.

Poux A.-S., Gob F., Jacob-Rousseau N. (2011). Reconstitution des débits des crues artificielles destinées au flottage du bois dans le massif du Morvan (centre de la France, XVI^e-XIX^e siècles) d'après les documents d'archive et la géomorphologie de terrain. *Géomorphologie : Relief, processus, environnement*, 2, 143-156.

Richard-Schott F. (2010). *L'irrigation dans le bassin du Rhône - Gestion de l'information géographique sur les ressources en eau et leurs usages*. Thèse de géographie, Université de Lyon, 596 p.
SMAGE des Gardons (2014a). *SAGE des Gardons, État des lieux*. 394 p.

SMAGE des Gardons (2014b). *Rapport provisoire n°9, Étude des résultats de l'IEM sur les anciens sites miniers de Saint Felix de Pallières et Thoiras*. Rapport provisoire, 52 p.

Statzner, B., & Beche, L. A. (2010). Can biological invertebrate traits resolve effects of multiple stressors on running water ecosystems? *Freshwater Biology*, 55, 80–119.

Syndicat mixte Ardèche Claire (2012). *SAGE du bassin versant de l'Ardèche, Partie I : synthèse de l'état des lieux*. 68 p.

Tachet, H., Richoux, P., Bournaud, M., Usseglio-Polatera, P., 2010. Invertébrés d'eau douce : systématique, biologie, écologie.

Thibon R. (1994). Vivre à Beyssac, paroisse de Saint-Jean-Chazorne, aux siècles passés. *Revue du Vivarais*, 48, 245-260.

Walter R.C., Merritts D.J. (2008). Natural streams and the legacy of water-powered mills. *Science*, 319, 299-304.

<http://www.abceze.fr/le-bassin-de-la-ceze.html>

Site du syndicat de gestion mixte du bassin versant de la Cèze

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Annexes

Annexe 1

Information statistique disponible dans le tableau A de *l'Atlas des cours d'eau*.

1 : « Numéro d'ordre des cours d'eau »	Identifiant du cours d'eau
2 : « Désignation des cours d'eau »	Nom du cours d'eau
3 : « N ^{os} des affluents »	inconnu
4 : « Principales localités du département situées sur le cours d'eau »	Nom des localités
5 : « Limites dans le départements des cours d'eau ou de leurs sections à l'aval »	Nom du département ou de la ville marquant la limite du cours d'eau
6 : « Limites dans le départements des cours d'eau ou de leurs sections à l'amont »	Nom du département ou de la ville marquant la limite du cours d'eau
7 : « Longueurs comprises dans le département par section »	Longueurs en mètre des sections du cours d'eau
8 : « Longueurs comprises dans le département par cours d'eau »	Longueurs en mètre du cours d'eau
9 : « Largeur moyenne des cours d'eau ou de leur section »	Largeur en mètres
10 : « Profil mouillé des pleines rives des cours d'eau ou de leurs sections »	Distance en mètre du profil mouillé (périmètre mouillé)
11 : « Pente totale par cours d'eau ou par section »	Différence d'altitude en mètre entre l'amont et l'aval du cours d'eau ou de la section. Cette hauteur a été calculée à partir de cartes à l'échelle 1/40 000 et de cotes d'altitudes.
12 : « Surface du bassin versant de chaque cours d'eau dans le département »	Surface en hectares des bassins versants
13 : « Volume par seconde des eaux ordinaire »	Débits des eaux moyennes en m ³ /s, pouvant être assimilés aux modules du cours d'eau
14 : « Volume par seconde des eaux d'étiages »	Débits en période d'étiage en m ³ /s
15 : « Volume par seconde des grandes eaux »	Débits en période de hautes eaux en m ³ /s
16 : « Observations »	Remarques complémentaires

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Annexe 2

Information statistique disponible dans le tableau B de *l'Atlas des cours d'eau*.

1 : « Numéro des cours d'eau (voir tableau A) »	Identifiant du cours d'eau
2 : « Désignation des cours d'eau alimentant des irrigations ou des usines »	Noms des cours d'eau
3 : « Désignations des prises d'eau et des communes »	Nom de la prise d'eau et de la commune
4 : « Débits moyen de la prise d'eau par seconde »	Débits utilisés par les prélèvements agricoles en m ³ /s
5 : « Surfaces arrosées par commune : arrosages irréguliers par les crues ou les eaux sauvages »	Surfaces en hectares
6 : « Surfaces arrosées par commune : irrigations régulières des prairies naturelles permanentes »	Surfaces en hectares
7 : « Surfaces arrosées par commune : irrigations régulières des prairies temporaires artificielles »	Surfaces en hectares
8 : « Surfaces arrosées par commune : irrigations régulières des autres cultures »	Surfaces en hectares
9 : « Surfaces arrosées par commune total »	Surfaces en hectares
10 : « Usine nature »	Nature de l'ouvrage
11 : « Usine désignation »	Nom de l'ouvrage
12 : « Nombre de paires de meules de moulins »	Nombre de paires de meules de moulins
13 : « Volumes des eaux motrices »	Débits au niveau de l'ouvrage en m ³ /s
14 : « Chute en eaux ordinaire »	Hauteur de la chute d'eau en mètre pour un débit ordinaire (module)
15 : « Force brute en chev.-vap. »	Force disponible en chevaux-vapeurs
16 : « Nature du moteur hydraulique »	Nature du moteur hydraulique de l'ouvrage
17 : « Force utilisée en chev.-vap. »	Force utilisée en chevaux-vapeurs
18 : « Observations »	Remarques complémentaires ; état de fonctionnement, nombre d'heure de fonctionnement...etc.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Annexe 3

Liste et caractéristiques des microcentrales du bassin en 2007, issue du PGE de l'Ardèche (Aucéa, 2007)

PGE Ardèche – Tendances d'évolution

Commune Situation de la chute	Cours d'eau	Nom et adresse du propriétaire	Date AP	Ech.	H de Chute (m)	Q dérivé (m ³ /s)	BV (km ²)	Module (m ³ /s)	Q réservé (l/s)	H Barrage (m)	Long. du canal (m)	Long. court-circuitée (m)	Ouvr. de franch. (E.P. ou G.C.K.)	Utilisat. (EDF ou AUTO)	Arrêt estival	Droit d'irrigation attaché au droit usinier	Observations
BURZET	Bourges	SARL MOULIN DE LAMADES	Fondé en titre		17.43	2.05	56	2.24	56				non	EDF			
BURZET	Bourges	SNC TEYSSIER et Cie	1987	2017	36.6	1.2		1.2	100	1.2	700	670	non	EDF			
CHIROLS MEYRAS	Fontaulière	EDF GRPH	1984	2024	19.3	19	114	4.72	1350	20	0	0	non	EDF		20	
CHIROLS MEYRAS	Fontaulière	Ste VERYTEX	1999	2029	14.97	2	114	4.72	500	5.5	755	800		AUTO	oui		
JAUJAC	Lignon	Mr DEGUILHEM	2001	Perpet	11.14	1.3		1.5	150	0	596	647	non	AUTO	oui		
JAUJAC	Lignon	Mr DUSSAUD T.	1867	Perpet	9.06	1.48	48.32	2	50	2.5	235	235	non	EDF			E.P. prévue
LABASTIDE SUR BESORGUES	Besorgues	FRANCOIS	Fondé en titre		38.05	0.5		0.45	11					EDF			
LABEGUDE	Ardèche	BARTHELEMY N.	1977	2007	5	5	280	13	2000	1.5	500	500	non	EDF			
LABEGUDE VALS LES BAINS	Ardèche	BSN Emballages	1994	2024	8.79	5.7		17	2000	3.8	1400	1400	E.P. G.C.K.	AUTO	oui		
LAVEVADE	Ardèche	DUMAS P. et F.	2003	2033	5.81	8.37		11.8	1180	1.8	280	350	E.P. G.C.K.	EDF	oui		Récolement provisoire réalisé
LAVEVADE	Ardèche	DUMAS P et F.	Fondé en titre		8.13	3.37		11.8	1180 hiver 3180 été	2.4		500	non	EDF			
LAVEVADE	Ardèche	SARL HV	2004	2034	4.4	11.5		11.88	1188	4.1		40	E.P. G.C.K.	EDF	oui	70	Récolement provisoire réalisé
LAVIOLLE	Volane	EURL SUEL	1893 1913	Perpet	13.98	0.75	15	0.517	13		100			EDF			
LAVIOLLE	Volane	SARL Hydrovolane	Fondé en titre		14.21	0.54		1	25	1.5	150			EDF			
MEYRAS CHIROLS PONT DE LABEAUME	Fontaulière	S.N.C. du PRADEL	1995	2025	14.84	17	116	4.8	500	4.1	990	1000	E.P.	EDF	oui		
MONTPEZAT	Pourselle Fau Chalias	MONTPEZAT TEXTILES	1997	2027	P : 9 F : 14 C : 13,87 14,46	P : 0,2 F : 0,3 C : 0,1		P : 0,330 F : 0,210 C : 0,120	P : 0,033 F : 0,021 C : 0,012	P : 0,81 F : 0,63 C : 0,46	P : 148 F : 225 C : 40	P : 172 F : 265	E.P.	AUTO	oui		
PONT DE LABEAUME	Ardèche	Société Vivaraise d'Electricité	1995	2025	3	14		13	2000	2.4	0	0	non	EDF	oui		

Commune Situation de la chute	Cours d'eau	Nom et adresse du propriétaire	Date AP	Ech.	H de Chute (m)	Q dérivé (m ³ /s)	BV (km ²)	Module (m ³ /s)	Q réservé (l/s)	H Barrage (m)	Long. du canal (m)	Long. court-circuitée (m)	Ouvr. de franch. (E.P. ou G.C.K.)	Utilisat. (EDF ou AUTO)	Arrêt estival	Droit d'irrigation attaché au droit usinier	Observations
AIZAC	Besorgues	JOUANNY Madeleine	1900	Abrogé	6.09	1.5	22.6	0.8	20	1.5	100	100	non				Non utilisé
ANTRAIQUES	Volane	ACKE Christine	1904	Perpet	5.2	1.28	58	2.48	62				non				Non utilisé
ANTRAIQUES	Volane	JOUANNY Yves	1889	Perpet													Non utilisé
ANTRAIQUES	Volane	Mr BARATIER Lazuel															Non utilisé
ANTRAIQUES	Volane	Mr MAUREL															Non utilisé
ANTRAIQUES	Volane	EVERAERT Hermann	1895	Perpet	8	0.75		3	75	4.2	140	140	non	AUTO			
ASPERJOC	Besorgues	BERTHINIER J. C.	1873	Perpet	4.2	0.4		1.2	30				oui	AUTO			
ASPERJOC	Besorgues	BONNET	1903	Perpet				1.2	30				non	AUTO			
ASPERJOC	Besorgues	CHAMBON Moulinage	1897	Perpet	8.5	0.8	31.8	1.2	30				non	AUTO			
ASPERJOC	Volane	Ets PONOT MARTIN											non				
ASPERJOC	Volane	Montpezat Textiles	1979	2054	3.8	4	66	3	500	3.8	60		non	EDF			
ASPERJOC	Volane	REALE CHRISTIAN	1855	Perpet	6.8	2	65	2.8	70	7			non				Non utilisé
AUBENAS	Ardèche	ASL Canal de BAZA	2006 ?	2035 ?		1 du 15/06 au 15/09 3,5 le reste du temps					3400	3400	non	AUTO et EDF		1000	En bout du canal, rejet des eaux dans le canal de l'ASA de la PRADE (environ 300l/s)
BARNAS	Ardèche	Mme GARDE M.	1965							0.85							
BURZET	Bourges	ALLARD J. M.	1927	2002	19	0.2		1.4	35								En cours de renouvellement
BURZET	Bourges	CHAMBOULEYRON	1944	2019	21.8	0.7	38.5	1.46	100	1.27	550		non	EDF			
BURZET	Bourges	Mr POUCHET F.	2002	perpet	8	1	49	1.8	200	1,5 à 3	259	269	ouvrage de dévalaison	AUTO	oui		
BURZET	Bourges	PEREYRON J.L.	Fondé en titre		12.13	0.99	40	1.6	40				non	EDF			

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

PGE Ardèche – Tendances d'évolution

Commune Situation de la chute	Cours d'eau	Nom et adresse du propriétaire	Date AP	Ech.	H de Chute (m)	Q dérivé (m ³ /s)	BV (km ²)	Module (m ³ /s)	Q réservé (lis)	H Barrage (m)	Long. du canal (m)	Long-courtcircuitée (m)	Ouvr. de franch. (E.P. ou G.C.K.)	Utilisat. (EDF ou AUTO)	Arrêt estival	Droit d'irrigation attaché au droit usinier	Observations
ROUX (LE)	Fontaulière	GRANGIER Robert	2001	2031	173.11	0.29		0.164	16.4	2.8	1300	1300	oui	EDF	oui		Ouvrage de dévalaison
RUOMS	Ardèche	ELDIN Minoterie			12.2	0.64		25		2.2	300	300					
RUOMS	Ardèche	EUURL SUEL	1945	2011		6		25						EDF			
RUOMS	Ardèche	TARDY Filature	1985	2015	7.65	6		60		3	200	200		EDF			
SALAVAS	Ardèche	Moulin de Salavas EDF															
SAMPZON	Ardèche	Moulin de Sampzon	1988	2024		45		65						EDF			
ST PIERRE DE COLOMBIER	Bourges	AUDIGIER M.	1997	2027	6.76	1.5	58.5	2.27	227	2.5	70.2	80	E.P.	EDF	oui		
ST PIERRE DE COLOMBIER	Bourges	SCI du Courtiol	1979	2054	19	4	59.5	2.26	56	3.5 3	530		non	EDF			
ST PIERRE DE COLOMBIER	Bourges	VERNET René	1873	Perpet	14.85	0.8	58	2.2	55	3.08	440	440	non	EDF			
ST PIERRE DE COLOMBIER	Fontaulière Bourges	SCI Aulueyres	Fondé en titre		12.5	0.6	50	1.93	50	2	440		E.P.	EDF			
VALLON PONT D'ARC	Ardèche	SNC des Mazes	1984	2024										EDF			
VALS LES BAINS	Volane	EUURL SUEL	Fondé en titre		12.06	1.8	110	4.8	hiver=120 été=480	1 à 5	730	700	non	EDF			E. P. proposée
VALS LES BAINS	Volane	SCI LE MAS	1999	2029	6.34	2	110	4.8	0.44	1 à 5	261.52	298.5	E.P.	EDF	oui		Réalisation de l'échelle à poissons Délai 5 ans
VALS LES BAINS LABEGUDE	Ardèche	SARL ARDECHE VOLANE	1995	2025	7.76	9		13	1300	1.5	750	750	E.P. G.C.K.	EDF	oui		

Annexe 4

Information statistique disponible sur les prélèvements d'eau de surface entre 2008 et 2013
(source ; AE RMC)

- Année : année du prélèvement
- Code-Point_Prélèvement : identification du point de prélèvement
- Nom_ouvrage_Prélèvement : nom du point de prélèvement
- Volume_Capté : débit annuel prélevé en milliers de m3.
- Code_mode_determination_volume : code du procédé de mesure
- libelle_mode_determination_volume : nom du procédé de mesure
- Code_Type_usage : code du type de l'usage
- libelle_Type_usage : nom du type de l'usage
- Libellé_Type_milieu_prélevé : nom du type de milieu prélevé
- Code_Commune : code communal (INSEE)
- Nom_Commune : nom de la commune
- Code_département : code départemental
- code_domaine_sout : code du domaine souterrain
- libellé_domaine_hydrogéologique : nom du domaine hydrogéologique
- Nom_Maître_Ouvrage : nom du propriétaire du point de prélèvement
- Lambert_X : coordonnées Lambert en X
- Lambert_Y : coordonnées Lambert en Y
- Qualité localisation : code de la qualité de la géolocalisation du point de prélèvement

Annexe 5

Fusions, scissions ou changements de noms de communes survenues depuis 1890 dans le secteur étudié

Fusions et changements de noms

Communes actuelles	Communes d'origine
Pied-de-Borne	Saint-Jean-Chazorne Planchamp Les Balmelles
Les Vans	Brahic Chassagnes Naves
Mazan	Mazan-l'Abbaye
Saint-Alban-Auriolles	Auriolles Saint-Alban-sous-Sampzon
Saint-Andéol-de-Vals	Saint-Andéol-de-Bourlenc
Saint-Just-d'Ardèche	Saint-Just
Saint-Pierre - Saint-Jean	Saint-Jean-de-Pourcharesse Saint-Pierre-le-Déchausselat
Vallon-Pont-d'Arc	Vallon

Scissions

Communes actuelles	Communes d'origine
Barnas Thueyts	Thueyts
Lalevade-d'Ardèche Pont-de-Labeaume	Niègles
Issanlas Mazan-l'abbaye	Mazan
Saint-Genest-de-Beauzon Faugères	Faugères

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Annexe 6

Dictionnaire d'attributs de la base de données des pressions industrielles (moulins.dbf)

<u>Base de données sur les moulins bassin versant de l'Ardèche</u>	
<u>Dictionnaire d'attributs :</u>	
1891 : date de conception des données des archives du département de l'Ardèche	
1900 : date de conception des données des archives du département de la Lozère	
Attributs :	Source :
· id_src : identifiant de la source, identifiant des archives	archive
· date_src : date de la source, date à laquelle a été éditée les archives	archive
· provenance : origine/département des archives	archive
· acquis : source de l'information (archives, autres...)	N.Jacob
· id_moulin : identifiant du moulin	archive
· cours_eau : cours d'eau où est localisé le moulin	archive
· nom_prise : nom de la prise d'eau du moulin	archive
· nom_moulin : nom attribué au moulin	archive
· id_canal : identifiant pour les moulins se trouvant sur le même canal de dérivations des eaux	Benchiboub/Devreux Mériaux
· commune	archive
· nat_1 : 1 ^{er} nature/fonction de l'ouvrage (moulin, fabrique ...)	archive
· nat_2 : 2 ^{ème} nature/fonction de l'ouvrage s'il y en a	archive
· nat_meca : nature du mécanisme de l'ouvrage	archive
· vol_eau_mo : volume des eaux motrices du moulin, correspond à un débit en m ³ /s	archive
· h_chute : hauteur de chute en mètres	archive
· fb_cv : force brute des moulins en chevaux-vapeur	archive
· fu_cv : force utilisé en chevaux-vapeur	archive
· l_cc : longueur court-circuitée du cours d'eau en mètres	Benchiboub/Devreux Mériaux
· l_cc_ar : longueur court-circuitée arrondie en mètres	Benchiboub/Devreux Mériaux
· q_rest : quantité restituée dans le cours d'eau par le moulin (total/nulle)	Benchiboub/Devreux Mériaux
· p_hydro : puissance hydro du moulin en watts, calculé en utilisant la formule :	Benchiboub/Devreux Mériaux
Hauteur chute * volume des eaux motrices	
· f_watt : force brute convertis en watts, en utilisant la formule :	Benchiboub/Devreux Mériaux
(force brute en chevaux vapeurs*735)/10000	
· nb_h_jour : nombre d'heures d'activité journalière des moulins	archive
· commentaire : informations complémentaires sur les moulins d'après les archives	Benchiboub/Devreux Mériaux
· identif : informations sur la localisation des moulins	Benchiboub/Devreux Mériaux
Type d'identification :	
- localisation pas précise	
- localisation peu précise	
- pas localisé	

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

-	absence de remarque vaut localisation précise	
·	carte_ign : présence du moulin sur la carte ign	Benchiboub/Devreux Mériaux
·	carte_e_m : présence du moulin sur la carte d'État-major	Benchiboub/Devreux Mériaux
·	carte_cas : présence du moulin sur la carte cassini	Benchiboub/Devreux Mériaux
	code	explication
	1	présent
	0	absent

Annexe 7

Dictionnaire d'attributs de la base de données des pressions agricoles dans le bassin de l'Ardèche (*utilisationagricole_synthese.dbf*)

<u>Utilisation agricole de l'eau</u>	
<u>Synthèse BV Ardèche</u>	
<u>Dictionnaire d'attributs :</u>	
1900 : date de la conception des données des archives du département de la lozère	
1891/1899 : date de la conception des données des archives du département de l'Ardèche et du Gard successivement	
Attributs :	Source :
· id_src : identifiant archive	archive
· date_src : date des archives	archive
· provenance : origine des archives (département et ville)	N. Jacob
· code_insee : Le code officiel géographique rassemblant les codes et libellés des communes	BD_topo_IGN
· commune : commune ayant des prélèvements d'eau pour des usages agricoles	archive
· canton : nom du canton où est effectué le prélèvement	BD_topo_IGN
· surf_agri: total des surfaces agricoles irriguées par commune en hectares	BENCHIBOUB & MERIAUX
· Q_deriv_agri : débits dérivés agricoles en m3/s, conversion de la surface agricole en multipliant par 3*10 ⁻³ m3/s	BENCHIBOUB & MERIAUX
· observ : observation sur l'ouvrage	archive
· acquis : source de l'information (archives, autres...)	N. Jacob

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Annexe 8

Dictionnaire d'attributs de la base de données des pressions agricoles dans la partie lozérienne du bassin de l'Ardèche (*utilisationagricole_lozere.dbf*)

<u>Utilisation agricole de l'eau sur la Lozère</u>	
<u>Feuille agri_lozere et agri_ardeche</u>	
<u>Dictionnaire d'attributs :</u>	
1900 : date de conception des données des archives du département de la Lozère	
1891/1899 : date de conception des données des archives du département de l'Ardèche et du Gard (respectivement)	
Attributs :	Source :
· id_src : identifiant archive	archive
· date_src : date des archives	archive
· provenance : origine des archives (département et ville)	N.Jacob
· commune : communes ayant des prélèvements d'eau pour des usages agricoles	archive
· cours : Nom du cours d'eau	archive
· prise : Nom de la prise d'eau	archive
· debit : débit du prélèvement sur le cours d'eau en m ³ /s	archive
· prairie_na : prairies naturelles en ha	archive
· prairie_ta : prairies temporaires artificielles en ha	archive
· total : total des surfaces agricoles irriguées en ha	Benchiboub & Mériaux
· com : commentaire des archives sur la présence d'un ouvrage sur le point de prélèvement (ex : moulin...)	archive
· designat : nom de désignation de l'ouvrage situé sur le point de prélèvement	archive
· vol_eau_mo : volume des eaux motrices du moulin en m ³	archive
· h_chute : hauteur de chute en mètres	archive
· nat_meca : nature du mécanisme de l'ouvrage	archive
· observ : observation sur l'ouvrage	archive
· acquis : source de l'information (archives, autres...)	N.Jacob

Table des figures

Figure 1 — Schéma de présentation de la méthode employée dans cette étude – Source : L. Devreux (2016)..	11
Figure 2 — Précipitations mensuelles à Nîmes. Diagramme pluviométrique – Source : Météo-France.	13
Figure 3 — Débit mensuel interannuel et module de l’Ardèche à Pont-de-Labeaume, calculés sur 30 ans – Source : Banque hydro.	14
Figure 4 — Fréquence des débits mensuels minimums dans l’année pour la Cèze à La Roque-sur-Cèze - Source : Banque hydro.	14
Figure 5 — Extrait d’une double page du tableau B de l’ <i>Atlas des cours d’eau...</i> (Utilisation agricoles et industrielle des cours d’eau), département de l’Ardèche (1891) – source : AN F ¹⁰ 5711.	18
Figure 6 — Moulin de Caveirac sur la carte de Cassini (Feuille n°90, 1772) - Source : Géoportail.	19
Figure 7 — Moulin de Caveirac sur la Claysse dans le bassin versant de la Cèze, sur la carte d’État-Major (mi XIX ^e siècle) - Source : Géoportail.....	20
Figure 8 — Origine et emprise spatiale des sources d’informations utilisées pour étudier les pressions agricoles. Source G. Mériaux (2017).	21
Figure 9 — Représentation schématique du découpage du réseau en arcs dans le RHT. Source : L. Devreux, 2016.....	23
Figure 10 — Anomalie de QMNA5 (en %) par décennie pour plus de 600 stations étudiées issues de la reconstruction SCOPE Hydro. Ces anomalies sont calculées par rapport à la période de référence [1991- 2010]. En rouge, la valeur moyenne ; chaque trait gris correspond à un bassin versant. Source : Caillouet et al. (2017).....	25
Figure 11 — Anomalies des moyennes multidécennales des débits annuels avec tous les jeux de données. Sont représentées les observations, les sorties des analyses SAFRAN Hydro, Scope Hydro, HydREM et FYRE Hydro (Caillouet <i>et al.</i> , 2017). Les valeurs des différents jeux de données sont cohérentes entre elles. .	25
Figure 12 — Liste et caractéristiques principales des fichiers thématiques constitués grâce aux informations acquises. Source : O. Benchiboub (2017).	26
Figure 13 — Prélèvements industriels et agricoles recensés à la fin du XIX ^e à l’échelle des arcs et bassins unitaires du RHT.	36
Figure 14 — Les dérivations industrielles recensées à la fin du XIX ^e sur l’Ardèche.	37
Figure 15 — Nature du fonctionnement des moulins (par éclusée ou autres).	38
Figure 16 — Succession de prises d’eau à Antraigues (Jacob, 2005) illustrant la longueur et la complexité du réseau hydraulique artificiel associé au moulinage et à l’irrigation.	39
Figure 17 — Longueurs court-circuitées par les moulins, rapportées à la longueur de chaque arc (lorsque ce calcul a été possible).....	40
Figure 18 — A) Débit des eaux motrices (m ³ /s) et B) puissance hydraulique brute des moulins à la fin du XIX ^e s. (produit de la hauteur de chute, du débit dérivé et de l’accélération due à la gravité ; en watt).	41
Figure 19 — Répartition des activités industrielles (effectifs de moulin par activité)	42
Figure 20 — Puissance des arcs de cours d’eau (α pente * débit module) et leurs répartitions statistiques selon qu’ils hébergent ou non des activités industrielles.	44
Figure 21 — Distribution des surfaces irriguées (en hectare) par commune. Source : AD 07, série M.	45
Figure 22 — Pourcentage du débit du cours d’eau potentiellement prélevé par la plus grosse unité industrielle de chaque arc (en %) dans des conditions de module (A) et de QMNA5 (B).	46
Figure 23 — Répartition des moulins (en % de l’effectif total, n = 550) en fonction du pourcentage du débit naturel prélevé pour leur alimentation, en situation de module (A) et de QMNA5 (B) ; classes de prélèvement : 0-25% ; 25-50% ; 50-75% ; 75-100% et >100% des écoulements. Une incertitude de [Q- 10% ; Q+40%] est prise en compte afin de considérer la variabilité des résultats de la reconstruction SCOPE-Hydro.	47
Figure 24 — Débit potentiel de chaque arc en situation de QMNA5, en prenant en compte uniquement les prélèvements de chaque arc (A), puis les prélèvements cumulés de l’amont vers l’aval (B).....	48
Figure 25 — Longueur de cours d’eau (en % de la longueur totale) pour lesquels les prélèvements du module (Fig. A) et du QMNA5 (Fig. B) sont nuls ou faibles (<25%), moyens (25-50%), forts (50-75%), très forts (75- 100%) et maximums (>100%).	49

Figure 26 — A : Répartition des moulins (en % de l’effectif total, n = 550) en fonction de la pression qu’ils exercent sur le débit de leur tronçon en situation de module ; B : Répartition des moulins (en % de l’effectif total, n = 550) en fonction de la pression qu’ils exercent, avec les prélèvements agricoles, sur le débit de leur tronçon en situation de module. Une incertitude de [Q-10% ; Q+40%] est prise en compte afin de considérer la variabilité des résultats de la reconstruction SCOPE-Hydro.	50
Figure 27 — A : Répartition des moulins (en % de l’effectif total, n = 550) en fonction de la pression qu’ils exercent sur le débit de leur tronçon en situation de module ; B : Répartition des moulins (en % de l’effectif total, n = 550) en fonction de la pression qu’ils exercent, avec les prélèvements agricoles, sur le débit de leur tronçon en situation de module. Une incertitude de [Q-10% ; Q+40%] est prise en compte afin de considérer la variabilité des résultats de la reconstruction SCOPE-Hydro.	50
Figure 28 — Fraction des terres pouvant être irriguées tout en assurant le fonctionnement du moulin exigeant le débit le plus élevé par arc pour Q40% (A), Q60% (C), Q80% (D) et nature du fonctionnement des moulins (B).....	52
Figure 29 — Pourcentage des arcs (par rapport au nombre total d’arcs du bassin de l’Ardèche) dans lesquels le plus gros moulin de l’arc fonctionne alors que 100% des surfaces irriguées situées en amont satisfont leurs besoins en eau, en fonction de différentes situations hydrologiques (<i>i.e.</i> les zones en bleu foncé sur la figure 28 A, C et D).	53
Figure 30 — Courbes des débits classés pour l’Ardèche à Meyras (Pont de Barutel ; moulin de Chantadru) en considérant i) les débits non-influencés (RHT et données de la banque hydro ; courbes bleue et jaune), ii) en prenant en compte un fonctionnement de l’irrigation toute l’année (courbe grise) et iii) la saisonnalité des prélèvements dans le bassin versant (de début avril à fin septembre, courbe orange). Le moulin local (de Chantadru) pouvait potentiellement fonctionner pendant 199j/an, sans contrainte sur l’activité agricole. L’étiage critique durait potentiellement 165 j/an en moyenne pour cette station.....	56
Figure 31 — Nombre moyen de jours donnant lieu à des négociations ou des conflits entre les différents usages au cours de l’année. Le trait horizontal rouge correspond à la moyenne des estimations (soit 122 j/an). Le trait noir horizontal correspond à la moyenne des durées de chômage des moulins fournies par les archives (soit 98 jours/an pour n=102 moulins).	57
Figure 32 — Localisation du bassin versant de la Borne, à cheval sur les départements de la Lozère et de l’Ardèche, dont le cours de la rivière Borne trace la limite.	59
Figure 33 — Extrait d’un plan cadastral reprenant les positions des principales béalières à Sainte-Marguerite-Lafigère (AD_Ard_1109W_140).....	60
Figure 34 — Canaux et surfaces irriguées vers 1872 dans la région de Sainte-Marguerite-Lafigère (Archives EDF, A.N. F10/3475, AD_Ard_1009W_140, AD_Loz_7S_535). Figure issue de Jacob (2004).	61
Figure 35 — Plan annexé à la décision de la justice de paix du canton de Villefort présentant la situation litigieuse.	63
Figure 36 — Agrandissement du plan annexé à la décision de la justice de paix du canton de Villefort présentant la situation litigieuse.....	64
Figure 37 — Évolution des prélèvements industriels de 1990 à 2004 (source Aucéa, 2007).	68
Figure 38 — Volumes prélevés par l’usage industriel en 2004 (source : PGE Ardèche, 2004).	69
Figure 39 — Évolution des surfaces irriguées de 1890 à 2006.....	70
Figure 40 — Répartition spatiale des pressions agricoles par commune au XIX ^e siècle. Source : <i>Atlas des cours d’eau</i> , tableau A.....	70
Figure 41 — Répartition spatiale des pressions agricoles dans le bassin de l’Ardèche au début du XXI ^e siècle...	71
Figure 42 — Volumes d’eau AEP prélevés en 2004.	72
Figure 43 — Carte de situation des stations d’échantillonnage.....	75
Figure 44 — Analyse en composantes principales de la granulométrie de chaque secteur en 2016, et en 2017 (S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible). Les proportions de chaque classe granulométrique sont figurées par des diagrammes en camembert.	78
Figure 45 — Variations des hauteurs d’eau et des largeurs mouillées de chaque secteur en 2016 et en 2017 par type de pression (S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible).	79
Figure 46 — Profil thermique lissé enregistré à chaque station (lissage à 15 jours) (bleu, naturel, rouge, pression plus forte, saumon, pression plus faible).	80
Figure 47 — Évolution temporelle des hauteurs d’eau à chaque station.	81

Figure 48 — Premier plan factoriel d'une analyse des correspondances inter-pressions de la composition faunistique. Les échantillons sont groupés par type de pression (n=36 par type de pression; S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible).	83
Figure 49 — Premier plan factoriel d'une analyse des correspondances intra-rivière de la composition faunistique. Chaque graphe regroupe les échantillons d'une rivière. Les échantillons sont groupés par type de pression (n=36 par type de pression ; S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible)	85
Figure 50 — Premier plan factoriel d'une analyse des correspondances flou inter-pression de la composition en traits biologiques. Les échantillons sont groupés par type de pression (n=36 par type de pression ; S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible).....	86
Figure 51 — Premier plan factoriel d'une analyse des correspondances floue intra-rivière de la composition en traits biologiques. Chaque graphe regroupe les échantillons d'une rivière. Les échantillons sont groupés par type de pression (n=36 par type de pression; S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible).....	88
Figure 52 — Relation entre le nombre de degrés-jour et la masse restante de feuilles dans les paniers dans les 9 stations échantillonnées.....	89
Figure 53 — Distribution des taux de dégradation (en jour ⁻¹) dans les différentes situations de pression hydraulique historiques (S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible).....	90
Figure 54 — Activité (à gauche) et biomasse du biofilm microbien en réponse aux pressions hydrauliques historiques (S1, naturel, S2, pression plus forte, S3, pression plus faible).	90

Table des tableaux

Tableau 1 – Date de constitution de l'Atlas des cours d'eau dans les départements étudiés.	18
Tableau 2 – Répartition de la puissance industrielle brute au XIX ^e s. ; 2,7 MWatts au total sont disponibles sur le bassin.	42
Tableau 3 – Rendement des installations (en %) en fonction du mécanisme d'entraînement, <i>i.e.</i> le rapport entre la puissance utile et la puissance brute. Source : Atlas des cours d'eau, tableau B.	43
Tableau 4 – Rendement par type de production. Source : Atlas des cours d'eau, tableau B.	43
Tableau 5 – Caractéristiques des 11 stations hydrométriques utilisées pour cette analyse.	55
Tableau 6 – Comparaison des puissances hydrauliques à la fin du XIX ^e siècle et en 2007 (PGE).	67
Tableau 7 – Nombre de seuils estimé pour le XIX ^e siècle (base de données moulins de ce travail) et actuel (base de données ROE ; l'essentiel des ouvrages pour le bassin de l'Ardèche sont des seuils transversaux).	67
Tableau 8 – Surfaces irriguées de 1979 à 2006 (source : Aucéa, 2007).	69
Tableau 9 – Comparaison des prélèvements bruts agricoles au XIX ^e siècle et à la période actuelle (Aucéa, 2007).	71
Tableau 10 – Synthèse des prélèvements dans le bassin de l'Ardèche à la fin du XIX ^e s. et en 2004. Sources : Atlas des cours d'eau et Aucéa (2007).	73
Tableau 11 – Coordonnées GPS, altitude et pression en termes de dérivation des eaux (** pression forte, * pression moyenne) des stations d'échantillonnage sur les trois rivières sélectionnées.	75
Tableau 12 – Valeurs moyennes et écarts-types en été et en hiver dans les 9 stations échantillonnées.	80
Tableau 13 – Valeurs moyennes et écarts-types des données physico-chimiques par type de pression (n=36 par type de pression).	81
Tableau 14 – Valeurs moyennes et écarts-types des concentrations en nutriments par type de pression (n=36 par type de pression).	82
Tableau 15 – Valeurs moyennes et écarts-types de différentes métriques biologiques (n=36 par type de pression).	82
Tableau 16 – Valeurs moyennes et écarts-types des indicateurs biologiques par type de pression (n=3 par classe de pression).	82
Tableau 17 – Valeurs moyennes et écarts-types des risques d'exposition des communautés d'invertébrés à des altérations de l'hydromorphologie par type de pression (n=3 par classe de pression).	83
Tableau 18 – Résultat d'une analyse simper montrant les différences de composition entre situations (a) S1 et S2, (b) S1 et S3, et (c) S2 et S3. (S1, S2, S3 : abondance moyenne du taxon ; <i>cumsum</i> : contributions cumulées des taxons à la différence entre pressions ; p : probabilité d'obtenir une contribution supérieure ou égale à la contribution observée après permutations aléatoires du groupe (pression)).	84
Tableau 19 – Résultats d'une analyse simper montrant les différences de proportion des différentes catégories de traits entre situations (a) S1 et S2, (b) S1 et S3, et (c) S2 et S3. (S1, S2, S3 : proportion moyenne de la catégorie de trait; Diff : Différences de proportion moyenne; <i>cumsum</i> : contribution cumulée des catégories de trait à la différence; p : probabilité d'obtenir une contribution supérieure ou égale à la contribution observée après permutations aléatoires du groupe (pression)).	86
Tableau 20 – Valeurs des taux de dégradation mesuré en degrés jour (k1) et en jour ⁻¹ (k2) dans les 9 stations suivies.	89

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Table des annexes

Annexe 1	98
Annexe 2	99
Annexe 3	100
Annexe 4	102
Annexe 5	103
Annexe 6	104
Annexe 7	105
Annexe 8	106

Table des matières

Sommaire	3
Remerciements	5
Index et sigles	6
Fiche synthétique	7
1 – Introduction	8
1.1 - Les perturbations des écoulements, un aspect mal connu des pressions sur les rivières	8
1.2 - L’objectif : la caractérisation quantitative, spatiale et temporelle des pressions anciennes.....	9
2 - Le terrain d’étude : les bassins de l’Ardèche, de la Cèze et des Gardons.....	12
2.1 - Les bassins versants	12
2.2 - Aspects climatiques	12
2.3 - Les écoulements	13
2.4 - Les usages de l’eau et leurs héritages.....	15
3 - Les archives statistiques et bases de données hydrologiques.....	17
3.1 - L’inventaire des archives disponibles	17
3.1.1 - L’information historique.....	17
3.1.2 - Les statistiques récentes	21
3.2 - L’hydrologie des chenaux : le recours au RHT	22
3.2.1 - Le choix du RHT	22
3.2.2 - Un référentiel pour évaluer les pressions industrielles et agricoles passées.....	23
3.3 - La constitution des bases de données	26
3.3.1 - Le choix de l’échelle spatiale d’analyse.....	27
3.3.2 - Structuration de la base de données issues d’archives.....	27
3.3.3 - La géolocalisation des informations et la constitution des tables attributaires	29
4 - Traitements dans un Système d'Information Géographique	30
4.1 - Présentation de l’approche.....	30
4.1.1 - <i>Isolement des arcs et des bassins versants unitaires de la rivière Ardèche</i>	30
4.1.2 - <i>Création d'un fichier de forme communes_BVArd.shp</i>	31
4.2 - L’estimation des prélèvements agricoles	31
4.2.1 - <i>Prélèvements agricoles par communes</i>	31
4.2.2 - <i>Prélèvements agricoles par arcs du RHT</i>	31
4.3 – Les prélèvements industriels.....	32
4.3.1 - <i>Création d'un fichier de forme correspondant aux moulins du bassin versant de l'Ardèche</i>	32
4.3.2 - <i>Calcul des prélèvements industriels</i>	32
4.3.3 - <i>Estimations des longueurs court-circuitées par les prises d'eaux industrielles</i>	33
4.4 – Les cumuls de pressions	33
4.4.1 - <i>Cumul des pressions de l'amont vers l'aval à l'échelle du bassin versant de l'Ardèche</i>	33
4.4.2 - <i>Cumul des pressions agricoles et industrielles</i>	33
4.5 - Synthèse des apports et incertitudes ou limites de l’approche	34
5 - Bilan des activités industrielles et agricoles au XIX ^e siècle dans le bassin de l’Ardèche	36
5.1 - Synthèse des données industrielles et agricoles disponibles	36
5.1.1 - La présence industrielle en cartes	37

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

5.1.2 - La base de données agricoles	44
5.2 - Quantification des pressions humaines sur les cours d'eau à la fin du XIX ^e siècle	45
5.2.1 - Les pressions industrielles seules dans le bassin de l'Ardèche	45
5.2.2 - Les pressions agricoles dans le bassin de l'Ardèche	47
5.2.3 - Le cumul des pressions industrielles et agricoles	49
5.2.4 - Un indicateur de risque de tension entre les différents usages	51
5.3 - Influence de ces activités sur la durée des étiages critiques et la durée moyenne annuelle de tension sur la ressource dans le bassin de l'Ardèche	54
5.4 - Évolution des conflits liés à l'exploitation des ressources en eau du bassin versant de la Borne : quels rôles respectifs de l'intensification des prélèvements et de l'assèchement hydroclimatique ?	58
5.4.1 - Le bassin versant de la Borne, un espace en tension (1870-1914)	58
5.4.2 - Validation de la méthode et recueil des données d'archives	62
5.4.3 - Émergence et évolutions de la crise	62
5.4.4 - Perspectives	65
5.5 - Analyse diachronique de la pression sur l'eau (fin XIX ^e siècle et période actuelle)	66
5.5.1 - Comparaison des prélèvements industriels	66
5.5.2 - Les prélèvements liés à l'agriculture	69
5.5.3 - Les prélèvements pour l'eau potable	72
5.5.4 - Synthèse	72
6 - Le rôle de ces aménagements passés sur les biocénoses aquatiques actuelles	74
6.1 - Objectifs	74
6.2 - Matériel et méthodes	74
6.1.1 - Stations d'échantillonnage	74
6.1.2 - Mesures physiques et chimiques	75
6.1.3 - Mesures biologiques	76
6.2 - Résultats	78
6.2.1 - Mesures physiques et chimiques	78
6.2.2 - Mesures biologiques	82
6.3 Conclusion de la partie	91
7 - Conclusions et perspectives	92
Bibliographie	94
Annexes	98
Table des figures	107
Table des tableaux	110
Table des annexes	112
Table des matières	113