



Rapport préliminaire en vue de l'expertise collective sur l'impact cumulé des retenues

Décembre 2015

- **AUTEURS**

Nadia CARLUER, Irstea
Béatrice LEBLANC, Irstea
Sophie ALLAIN, INRA
Marc BABUT, Irstea
Jérôme BELLIARD, Irstea
Ivan BERNEZ, Agrocampus Ouest
Simon DEVIN, Université de Lorraine
Olivier DOUEZ, BRGM
Jean-Marcel DORIOZ, INRA
Simon DUFOUR, Université de Rennes II
Catherine GRIMALDI, INRA
Florence HABETS, CNRS
Nicolas LAMOUREUX, Irstea
Yves LE BISSONNAIS, INRA
Delphine LEENHARDT, INRA
Elise LEVINSON, Sol et Civilisation
Jérôme MOLENAT, INRA
Véronique ROSSET, Irstea
José-Miguel SANCHEZ-PEREZ, CNRS
Sabine SAUVAGE, CNRS
Philippe USSEGLIO-POLATERA, Université de Lorraine

- **CORRESPONDANTS**

Onema : **Bénédicte AUGÉARD**. Chargée de mission "Gestion quantitative" (ONEMA), benedicte.augeard@onema.fr
Romuald BERREBI. Directeur de la politique de formation et de l'expertise. romuald.berrebi@onema.fr

Droits d'usage : Tout public

Niveau géographique : national

Couverture géographique : nationale

Niveau de lecture : professionnels, experts

Table des matières

Abréviations	9
Partie A. Introduction	11
A.I Contexte. Objectifs de l'expertise	11
A.II Déroulement de la première phase de l'expertise	11
A.III Domaines abordés	12
Partie B. Typologie des retenues	15
B.I Usages	15
B.II Mode d'alimentation	15
B.III Mode de restitution au milieu aquatique	17
Partie C. Effets à l'échelle d'une retenue	19
C.I Hydrologie – hydrogéologie	19
C.I.1 Effets lors de la création de la retenue	19
C.I.2 Effets lors du fonctionnement de la retenue	19
C.I.3 Effets sur l'hydrogéologie du bassin versant	23
C.II Effets d'une retenue sur la qualité physico-chimique des eaux	25
C.II.4 La notion de qualité physico-chimique et ses déterminants	25
C.II.5 Les méthodes utilisées dans les études d'impact	26
C.II.6 Processus et effets attendus d'une retenue sur la qualité physico-chimique des eaux	26
C.II.7 Facteurs de variation	29
C.II.8 Des effets aux impacts	31
C.III Ecologie	32
C.III.9 Zone d'emprise de la retenue	32
C.III.10 Cours d'eau adjacent (amont-aval)	33
Encadré 1 : Retenues d'altitude pour neige de culture.	38
Partie D. Effets cumulés	41
D.I Données, observations, études disponibles	41
D.I.1 Hydrologie-hydrogéologie	41
D.I.2 Qualité physico-chimique des eaux	46
D.I.3 « Les zones humides, mares et étangs : des modèles pour évaluer l'impact cumulé des retenues ? »	47
D.II Effets rétroactifs : Exemple de l'influence de la création de retenues d'irrigation sur les systèmes de culture	51
Partie E. Méthodes existantes	53
E.I Méthodes et données pour la spatialisation	53
E.I.1 Données complémentaires, éléments de contexte disponibles à l'échelle nationale	53
E.I.2 Données d'inventaire des plans d'eau : bases de données, méthodes d'acquisition	54

E.II Modélisation hydro(géo)logique	56
E.II.3 Démarche générale adoptée dans les études	56
E.II.4 Les indicateurs d'impact hydrologique	57
Encadré 2	59
E.II.5 Le bilan hydro(géo)logique du bassin versant	59
E.II.6 La modélisation hydro(géo)logique numérique	61
E.II.7 Conclusion sur les méthodes existantes pour l'hydrologie	67
E.III Méthodes disponibles pour évaluer l'assolement et la dynamique des prélèvements sur un bassin	67
E.III.8 Comptabiliser et localiser les systèmes de culture	67
E.III.9 Simuler les choix d'assolements	68
E.IV Méthodes utilisées pour évaluer les effets cumulés sur la qualité physico-chimique des eaux	70
E.V Méthodes disponibles pour aborder les effets biologiques sur un bassin versant	70
E.V.10 Apports et limites des méthodes hydrologiques / habitat hydraulique.	70
E.V.11 Apports et limites des métriques basées sur les compartiments biologiques	72
Partie F. Visites de bassin et analyse science politique/sciences sociales	75
F.I Présentation des bassins visités	75
F.I.1 Bassin-versant du Doux	75
F.I.2 Bassins-versants des Autizes et de la Vendée	79
F.I.3 Bassin-versant du Midour - Midouze	84
F.II Synthèse science politique / sciences sociales	89
F.II.4 Introduction : des territoires variés qui partagent le point commun du risque de manque d'eau	89
F.II.5 Comment se pose la problématique de l'impact cumulé des retenues dans les territoires étudiés ?	90
F.II.6 Conditions et moyens pour une intégration de l'impact cumulé des retenues : la question-clé de la gouvernance et de sa mise en place	95
F.II.7 Conclusion: aux côtés de l'individuel et du collectif, la nécessité de développer le « commun », pour mieux gérer cette « res communis » qu'est l'eau	98
Partie G. Discussion et analyse du besoin d'expertise	101
G.I Acquis et limites de l'existant	101
G.I.1 Nécessité d'une banclarisation des données et d'une capitalisation des études déjà menées	101
G.I.2 Intérêt d'une démarche à deux échelles emboîtées	102
G.I.3 Connaissances et méthodes mobilisables	103
G.II Domaines de connaissances et questions à aborder dans la phase d'expertise scientifique collective	105
G.II.4 Caractérisation des retenues, de leur mode de gestion, de leur organisation spatiale	105
G.II.5 Connaissances disciplinaires à approfondir	106
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	109
Annexe I : Note de projet de l'expertise collective sur l'impact cumulé des retenues	117
Contexte	117
Objectif de l'expertise	118

Pilotage de l'expertise	119
Organisation de l'expertise	119
Déroulement et calendrier de l'expertise	120
Les rendus de l'expertise et leur diffusion	121

Annexe II : Liste des experts 124

Table des figures

Figure 1 : Emplacement des retenues selon leur type d'alimentation (Source : Irstea)	16
Figure 2 : Evolution du stock de deux retenues (en m ³) sur 4 ans. Figure issue de Delbreilh (1993)	20
Figure 3 : Evolution du volume stocké dans une grande retenue Gasconne (Synthèse Piren, 1996)	20
Figure 4 : Impact de grands réservoirs situés sur les cours d'eau, illustrés par la comparaison entre les débits amont (en vert) et aval (en rouge) : à gauche : sur l'Aube à Blaincourt, après deux retenues de 170 Mm ³ dédiées au soutien d'étiage, à droite : sur la Romanche à Bourg d'Oissan, après deux retenues de 183 Mm ³ dédiées à la production d'hydroélectricité. Figures issues de Cipriani et Sauquet (2014) ¹⁰	22
Figure 5 : Evolutions temporelles du niveau d'eau d'une retenue de 140 000m ³ dédiée à l'alimentation en eau potable la neige de culture et du débit en aval de la retenue. Figure issue de Magnier (2013) ¹¹	23
Figure 6 : Les différentes relations nappes-rivières (Winter et al., 1998)	24
Figure 7 - Effet possible d'un pompage à proximité d'un cours d'eau (Winter et al., 1998) ¹² A - Condition naturelle de drainage de la nappe par la rivière ; B - Puits avec pompage Q1 à proximité d'un cours d'eau qui intercepte une partie du flux de la nappe alimentant le cours d'eau ; C - Puits avec pompage Q2 (Q2>Q1) avec inversion de flux entre la rivière et la nappe	24
Figure 8 : Schéma récapitulatif du fonctionnement d'une retenue pour neige de culture	39
Figure 9 : taux de prélèvement (Volume total des retenues/Volume écoulé annuel) sur le bassin versant de la Séoune (463 km ²) et sur un de ses sous bassins versants, la Gandaille (25 km ²)	42
Figure 10 : Débits moyens mensuels du Layon à Saint Lambert du Latay sur la période 1960-2006, sans retenue collinaire (bleu), et avec retenues collinaires s'étendant sur des portions du bassin allant de 0.5/1000 à 10/1000 remplies sur 5 mois (rouge) et 3 mois (noir)	43
Figure 11 : Volumes captés par les retenues sur le bassin de la Séoune (Delbreilh, 1991) ⁸	43
Figure 12 : Simulation de la crue du 10-08-1994 sur le bassin versant de l'Yvel en contexte actuel et selon 3 scénarios : 100, 300 et 500 retenues dans la partie aval du bassin versant	44
Figure 13 : Schéma du Modèle NAM	62
Figure 14 : Principe du modèle SIM utilisé dans l'étude DREAL Pays de Loire (Philippe et al., 2012)	64
Figure 15 : Découpage du bassin versant de la Diège (615 sous bassins, 570 biefs, 229 retenues)	65
Figure 16 : Projets de retenues de substitution simulés à l'aide du modèle de Poitou-Charentes	65
Figure 17 : Variation des débits mensuels entre une situation avec et sans retenue	66
Figure 18 : Réseau hydrographique et sous-bassins versants du Doux	76
Figure 19 : Retenue de la Jointine (Source : Irstea)	78
Figure 20 : Localisation des bassins-versants de la Vendée et des Autizes (Source : Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (2013))	80
Figure 21 : Carte géologique du Marais Poitevin	81
Figure 22 : Réserve créée hors de tout thalweg par déblai / remblai (Source : http://www.charentelibre.fr)	83
Figure 23 : Localisation du bassin-versant du Midour (Source : Institution Adour 2012)	86
Figure 24 : Retenue collinaire sur le bassin-versant du Midour (Source : Irstea)	88
Figure 25 : Schéma du fonctionnement du système d'acteurs sur le bassin versant du Doux	94
Figure 26 : Schéma du fonctionnement du système d'acteurs sur les bassins versants de la Vendée et des Autizes, pour les projets de réserves de substitution des pompages dans la nappe	94
Figure 27 : Schéma du fonctionnement du système d'acteurs sur le bassin versant du Midou(r), pour la problématique irrigation	95

ABREVIATIONS

AAPPMA : Association Agréée de Pêche et de Protection des Milieux Aquatiques
ADES : Accès aux Données sur les Eaux Souterraines
AEP : Adduction d'Eau Potable
ASA : Association Syndicale Agricole
BACI : Before After Control Impact
BD : Base de Données
BNPE : Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BV : Bassin-Versant
CACG : Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne
CEMAGREF : Centre d'Etude du Machinisme Agricole et du Génie Rural
CGEDD : Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable
CIEPT : The Coleoptera genera richness (I), the macroinvertebrate family richness and the EPT family richness (EPT)
CLE : Commission Locale de l'Eau
CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques
CODERST : Conseil Départemental de l'Environnement, des Risques Sanitaire et Technologique
COP : Carbone Organique Particulaire
COD : Carbone Organique Dissous
CREN : Conservatoire Régional des Espaces Naturels
CTF : Conditional Tree Forest
CTGQ : Contrat Territorial de Gestion Quantitative
CTMA : Contrat Territorial des Milieux Aquatiques
DCE : Directive Cadre sur l'Eau
DE : Discriminatory Efficiency
DEB : Direction de l'Eau et de la Biodiversité
DIREN : Direction Régionale de l'Environnement
DMB : Débit Minimum Biologique
DOE : Débit d'Objectif d'Etiage
DDT : Direction Départementale des Territoires
DOCOB : DOcument d'OBjectifs
DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
ESCo : Expertise Scientifique Collective
ETP : Evapo Transpiration Potentielle
EVHA : Evaluation de l'Habitat
EVP : Etude Volumes Prélevables
GAME : Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique
GES : Gaz à Effet de Serre
GR2M : Génie Rural 2 paramètres Mensuel
GR4j : Génie Rural 4 paramètres Journalier
H2U : Hydrogramme Unitaire Universel
IBD : Indice Biologique Diatomées
IBGN : Indice Biologique Global Normalisé

IBML : Indice Biologique Macrophytique en Lac
IBMR : Indice Biologique Macrophytique en Rivière
IGN : Institut Géographique National
IIL : Indice Ichtyofaune en Lac
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
IOBL : Indice Oligochètes de Bioindication Lacustre
IPR : Indice Poissons Rivière
IRSTEA : Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
LEMA : Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques
MAELIA : Multi-Agent for Environmental Norms Impact Assessment
MARTHE : Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements
MES : Matières En Suspension
MNT : Modèle Numérique de Terrain
NAM : Nedbor-Afstromnings-Model
NDWI : Normalized Difference Water Index
ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
OUGC : Organisme Unique de Gestion Collective
Q : Abréviation pour débit
QMNA : Débit Mensuel Minimal de l'Année
RFU : Réserve d'eau Facilement Utilisable par les plantes
RGA : Recensement Général Agricole
RHT : Réseau Hydrographique Théorique
ROE : Référentiel des Obstacles à l'Écoulement
RPG : Recensement Parcelaire Graphique
SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SAU : Surface Agricole Utile
SDAGE : Schéma Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SEQ-Eau : Système d'Évaluation de la Qualité de l'eau
SIM : Safran-Isba-Modcou
SYRAH-CE : SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau
VCN : Débit minimal sur N jours consécutifs
ZNIEFF : Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique
ZPS : Zone de Protection Spéciale
ZRE : Zone de Répartition des Eaux

Partie A. INTRODUCTION

A.I Contexte. Objectifs de l'expertise

L'expertise collective sur l'impact cumulé des retenues s'inscrit dans le cadre conjoint de la réforme sur les volumes prélevables et de la réforme des études d'impact des projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements, établi en application de la loi Engagement National pour l'Environnement (dite loi Grenelle 2) du 12 juillet 2010 (décret du 29 décembre 2011¹) (cf. note de projet de l'expertise en annexe I). L'application de la réforme des volumes prélevables, issue de la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques du 30 décembre 2006, peut conduire dans certains cas à la création de nouvelles infrastructures de stockage d'eau. La réforme des études d'impact implique quant à elle que les dossiers de construction de retenues soumis par les pétitionnaires prennent en compte l'impact cumulé des ouvrages en projet. Par ailleurs, certains SDAGE ont pris des dispositions demandant aux services de l'Etat de s'assurer que l'impact cumulé de l'ensemble des retenues présentes sur un bassin est bien pris en compte lors de l'instruction du projet. Dans ce cas, la compatibilité du projet avec le SDAGE peut donc nécessiter une évaluation de l'impact cumulé du ou des projets de retenues avec les retenues déjà existantes dans le bassin concerné.

Pourtant, **il n'existe pas pour l'instant au niveau national de méthodologie permettant d'appréhender cette question de l'impact cumulé d'ouvrages de stockage d'eau sur un même bassin versant.** Dans ce contexte, le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie a chargé Irstea, en lien avec l'INRA et l'ONEMA, de conduire une expertise collective sur l'impact cumulé des retenues. La présente expertise, conduite dans une démarche pluridisciplinaire, cherche donc à recenser, et le cas échéant élaborer, des éléments méthodologiques opérationnels permettant d'améliorer la qualité des procédures d'instruction. Elle est organisée en trois phases : la première vise à faire le bilan des méthodes déjà utilisées dans les notices d'incidence ou études d'impact, pour analyser les bonnes pratiques, mais aussi relever les champs peu ou mal couverts, qui feront l'objet de la deuxième phase. Celle-ci consistera en une expertise scientifique collective « classique » sur les points identifiés comme n'étant pas suffisamment stabilisés actuellement pour être traduits directement en éléments méthodologiques opérationnels. La troisième phase intégrera les résultats de la phase précédente pour proposer des éléments de méthode pouvant améliorer les études d'impacts et leurs instructions ; elle identifiera également les champs du savoir encore incertains et les pistes de recherche et développement.

A.II Déroulement de la première phase de l'expertise

Ce rapport rend compte de la première phase de l'expertise. Celle-ci avait pour objectifs de familiariser les experts avec la thématique, et de leur permettre de faire le point, du point de vue opérationnel, sur les acquis, les méthodes mobilisables et les méthodes mises en œuvre pour aborder l'impact cumulé des retenues dans les études d'impact ou notices d'incidence. Le résultat attendu était d'identifier les connaissances qu'il sera nécessaire d'approfondir dans la deuxième phase, ainsi que les domaines qu'il sera utile d'investir pour pouvoir ensuite élaborer des éléments méthodologiques qui permettront d'avancer sur cette problématique.

Le parti choisi dans cette première phase a été de consulter essentiellement la littérature opérationnelle. Il s'agissait en effet de juger des données, connaissances et méthodes qui sont réellement mises en œuvre actuellement. **La littérature opérationnelle mobilisée consiste notamment en textes règlementaires, rapports d'études des volumes prélevables, notices d'incidence ou études d'impact pour l'implantation de nouvelles retenues.** Ces lectures ont été complétées par **trois visites de terrain**, choisies chacune dans le territoire d'une des trois agences de l'eau a priori les plus concernées par la question : Adour Garonne, Loire Bretagne, et

¹ Décret n° 2011-2019

Rhône Méditerranée Corse. Ces visites ont permis de mesurer la diversité des situations que doit recouvrir l'expertise, tant pour ce qui concerne les caractéristiques du milieu physique, la densité, la taille ou le mode de gestion des retenues, que du contexte socio-économique. Le rapport rend également compte des connaissances propres à chaque expert, qui ont été ici mises à profit pour organiser et mettre en perspective les connaissances et méthodes issues de la littérature opérationnelle.

Parmi les références consultées, **une attention particulière mérite d'être apportée à l'étude inter-agence sur l'impact des petites réserves artificielles sur les milieux**². Cette étude a été menée au tout début des années 2000 ; elle faisait un point relativement exhaustif sur les connaissances existant sur les retenues et est allée jusqu'à la proposition d'indicateurs pour évaluer tant la pression que l'impact cumulé des retenues sur un bassin, ainsi que jusqu'à la préconisation d'actions pour limiter cet impact. L'étude se limitait aux retenues d'un volume inférieur au million de m³, alimentées par de l'eau de surface. Elle reste en grande partie d'actualité, et sera ici considérée comme un acquis.

Pour autant, certains éléments de contexte ont évolué depuis que l'étude inter-agence a été menée, et justifient de renouveler le regard sur la question :

- La directive cadre sur l'eau, adoptée le 23 octobre 2000, qui vise une reconquête de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques en donnant une cohérence à la politique communautaire dans le domaine de l'eau dans une perspective de développement durable. Celle-ci impose à tous les Etats membres des objectifs d'atteinte du bon état de l'ensemble des masses d'eaux en 2015, sauf exemption motivée qui permet un report de délai à 2021 voire 2027 et/ou un objectif moins strict pour un des paramètres. Pour les eaux superficielles, cette notion de bon état suppose un bon état chimique et un bon état écologique. Des paramètres hydromorphologiques en soutien à la biologie sont également à prendre en compte, uniquement pour l'évaluation du très bon état écologique. L'état des eaux souterraines est quant à lui évalué en référence à leur état quantitatif et chimique. La **loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006** dénommée « LEMA » vient compléter la réglementation en posant clairement les conditions pour atteindre les objectifs fixés par la DCE.
- Certains domaines ont connu une évolution significative depuis le début des années 2000. En particulier, les outils d'observation de la terre et les méthodes associées se sont beaucoup améliorés, et la précision que l'on peut attendre de leur mise en œuvre pour acquérir des données relatives aux retenues s'est potentiellement accrue.
- De la même façon, un effort important d'acquisition de données a été réalisé dans certaines zones, qui permet de disposer de données relatives au milieu (géologie, pédologie, climat) et à ses usages (occupation du sol, retenues et autres aménagements, gestion de l'eau), dont on verra qu'elles sont essentielles pour aborder la question de l'impact cumulé des retenues sur un bassin versant.
- Des avancées méthodologiques sont également à noter, en partie impulsées par la nécessité de répondre aux exigences de reportage de la DCE : des indices d'évaluation du bon état écologique des cours d'eau ont été développées ou améliorées ; les modèles d'écologie quantitative permettent de faire le lien entre l'altération hydrologique dans un cours d'eau et l'altération constatée au niveau biologique. Enfin, les modèles hydrologiques et leurs applications, à différentes échelles, se sont également étoffés. L'ensemble constitue un corpus de méthodes dont on verra plus loin ce qu'elles peuvent apporter pour aborder la question de l'impact cumulé des retenues.

A.III Domaines abordés

L'expertise se limite aux effets des retenues sur l'environnement. Les aspects sociaux et économiques, s'ils ont été en partie considérés comme éléments de contexte dans le cadre notamment des visites de terrain, ne font

² Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, Hydrosphère and Géosys (2001). Etude de l'impact des petites réserves artificielles sur les milieux

pas partie du champ de l'expertise. En particulier, celle-ci n'abordera pas la question du bien-fondé ou non de la construction d'une retenue du point de vue socio-économique.

On distinguera ici le terme **d'effet**, désignant la résultante d'un processus induit par la retenue, sans notion de valeur, et le terme **d'impact**, associé à une notion de jugement (impact positif ou négatif) et supposant donc la définition de critères d'évaluation, et de seuils pour juger qu'un impact est positif ou non. Le parti pris dans cette phase a été de considérer les effets liés aux retenues, sans pour l'instant chercher à les traduire en termes d'impacts au sens DCE. On verra en effet que l'état des connaissances et méthodes mobilisables ne permet pas encore ce passage.

Les types d'effet abordés ici sont ceux liés à l'hydrologie et l'hydrogéologie du bassin versant, aux évolutions physico-chimiques, à la dynamique des sédiments et à l'hydromorphologie, à différents compartiments biologiques : poissons, invertébrés, végétaux, c'est-à-dire les organismes présents dans les zones d'influence des retenues (la liste des scientifiques participant à cette expertise figure en Annexe II). Ces différents types d'effets seront considérés à différentes échelles d'espace et de temps. Les oiseaux, et les diatomées, plus généralement le phyto ou zooplancton ne sont pas étudiés. On verra toutefois qu'on envisage de considérer les diatomées dans la phase 2, comme éléments susceptibles de renseigner sur le niveau trophique des milieux, y compris soumis à des courants forts. Le changement climatique n'est pas considéré explicitement, il paraît néanmoins essentiel que les pétitionnaires l'intègrent dans leurs études pour évaluer la capacité de remplissage future des retenues en projet.

Ce rapport propose tout d'abord une brève proposition de typologie des retenues (Partie B), nécessaire tant l'effet que peut avoir une retenue sur le milieu dépend de ses caractéristiques. Il aborde ensuite les connaissances disponibles sur l'effet d'une retenue (Partie C), avant de passer aux données, connaissances et observations relatives à l'effet cumulé de plusieurs retenues (Partie D). La Partie E présente alors les méthodes existantes et dont l'usage pourrait contribuer à évaluer l'effet cumulé de retenues sur un bassin versant, pour un ou plusieurs des compartiments considérés. Les limites, avantages et perspectives d'évolution de ces méthodes sont abordés. Cette première phase s'est appuyée également sur la visite de trois bassins versants, qui sont brièvement présentés, afin de mettre en évidence leurs particularités, et le contexte dans lequel s'inscrit la synthèse sociologique qui explore les conditions à respecter et les moyens à mettre en œuvre pour intégrer l'impact cumulé des retenues dans la gestion de l'eau d'un bassin versant (Partie F). Enfin, la Partie G conclut sur les acquis et limites des connaissances et méthodes existantes, et présente les domaines qui seront explorés ou affinés au cours de la phase 2.

Il convient de souligner que le corpus de connaissances et de méthodes mobilisables varie énormément selon la thématique considérée. En conséquence, le type même de documents consultés et analysés par les experts varie d'une thématique à l'autre :

- Ainsi, les hydrologues et hydrogéologues ont pu s'appuyer sur des études d'impact, notices d'incidence, études de volumes prélevables, rapports d'étude ou mémoires d'étudiants pour leur analyse, et n'ont consulté des articles scientifiques de la littérature internationale qu'à la marge,
- Par comparaison, les aspects liés à la qualité physico-chimique des eaux ou au transport sédimentaire sont beaucoup moins fouillés dans les études d'impacts et notices d'incidence consultées. Les experts se sont alors surtout appuyés sur leurs connaissances propres pour synthétiser les effets attendus et les connaissances disponibles dans cette première phase ; en outre il n'existe pas, selon nous, dans les rapports consultés de méthode vraiment opérationnelle et pertinente pour mesurer ces effets.
- Pour les aspects relatifs à l'écologie, la situation est encore différente : les documents opérationnels consultés se limitent le plus souvent à un état des lieux, parfois quelques études amont/aval ou avant/après installation d'une retenue. Les éléments méthodologiques cités sont très limités, les méthodes permettant de faire le lien entre altérations hydrologiques et altérations d'habitats faisant exception. Les experts ont donc été contraints dès cette phase 1 de s'appuyer sur de la littérature internationale pour permettre de faire émerger les domaines qui seront à considérer dans la suite.

Partie B. TYPOLOGIE DES RETENUES

Une des difficultés pour aborder l'impact des retenues et a fortiori leur impact cumulé est liée à la grande variété des types de retenues que l'on peut rencontrer, qu'il s'agisse des usages qui leur sont associés, de leur mode d'alimentation, de leur mode de restitution de l'eau, de la qualité de l'eau qu'elles collectent, ou d'autres caractéristiques de leur environnement. Cette diversité s'accroît encore quand on envisage l'ensemble des retenues existant sur un bassin donné, puisque la distribution dans l'espace des différents types de retenues peut montrer des configurations très diverses.

L'effet d'une retenue isolée sur les différents compartiments de l'écosystème dépendant notamment de son(s) usage(s), de ses modes d'alimentation et de restitution, une typologie liée à chacun de ces aspects est proposée, afin d'assurer un langage commun dans la suite du rapport. Cette approche est similaire à celle adoptée par l'étude InterAgences de l'Eau (2001)².

B.I Usages

En première approche, on peut distinguer les usages **1** - qui ne consomment pas d'eau, en restituant directement les apports en eau tout au long de l'année, **2** - qui n'en consomment pas à l'échelle annuelle mais influencent significativement le régime des débits en stockant et déstockant les flux entrants, et **3** - qui consomment effectivement de l'eau. A noter que les usages 1 et 2 influencent le régime hydrologique via l'évaporation.

Les usages de première catégorie sont par exemple les usages de loisirs (attrait paysager, baignade, loisirs nautiques, pêche, mares de chasse) ou la pisciculture. Ils n'entraînent pas de consommation d'eau mais peuvent avoir des effets par exemple sur la qualité de l'eau (Partie C).

L'usage pour l'hydroélectricité appartient typiquement à la deuxième catégorie. Certains prélèvements pour des activités industrielles peuvent aussi être rattachés à cette catégorie, selon qu'ils restituent l'essentiel de l'eau prélevée ou non au milieu. Les retenues de **restitution / réalimentation**, qui servent à réalimenter le cours d'eau en période sèche et à soutenir les étiages sont également à classer dans cette catégorie. L'eau qu'elles restituent au cours d'eau est parfois toutefois reprise pour l'irrigation, ce qui les classe alors entre la 2^{ème} et la 3^{ème} catégorie.

La troisième catégorie comprend tous les usages prélevant de l'eau qui ne sera pas restituée directement au cours d'eau : eau potable³, irrigation, réalimentation / restitution, abreuvement du bétail, neige de culture. De façon générale, les retenues peuvent avoir des usages multiples.

B.II Mode d'alimentation

On distingue ici essentiellement 5 types de retenues, en fonction de leur position par rapport au cours d'eau et de leur mode de remplissage (Figure 1). Notons que les types de retenues selon leur mode d'alimentation ne sont pas strictement indépendants de leurs usages. Ils sont présentés ci-dessous selon un ordre croissant de connexion au réseau hydrographique. Du point de vue du vocabulaire, on appellera **substitution** la pratique qui permet de prélever l'eau dans le milieu hors période de tension (en automne-hiver dans le cas général) pour diminuer d'autant les prélèvements dans le milieu en période d'étiage. Une **retenue** stocke l'eau qui s'écoule de façon gravitaire, alors qu'une **réserve** est remplie par pompage.

³ Il est considéré généralement que les prélèvements pour eau potable sont quantitativement restitués à hauteur de 80% : pas toujours dans le même milieu, ni au même moment, et généralement avec une altération sensible de qualité.

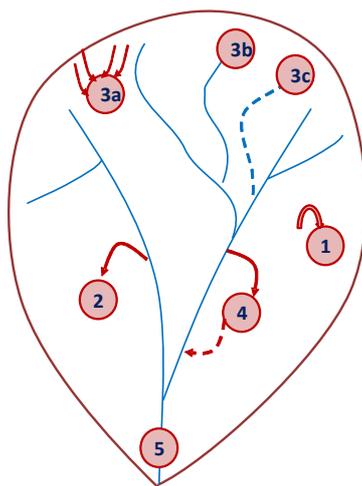


Figure 1 : Emplacement des retenues selon leur type d'alimentation (Source : Irstea)

1. **Réserve** alimentée par pompage dans **la nappe**. Il s'agit d'une réserve déconnectée du réseau hydrographique superficiel, alimentée strictement par pompage dans un aquifère proche.
2. **Réserve** alimentée par pompage dans **la rivière**. Il s'agit comme dans le premier cas d'une réserve déconnectée du réseau hydrographique superficiel, et alimentée strictement par pompage dans la rivière. Ces deux types de réserves peuvent avoir des échanges avec la nappe si elles ne sont pas étanches.
3. **Retenue collinaire**. Ces retenues sont alimentées **par ruissellement (3a)** et normalement **déconnectées du réseau hydrographique**. Parce qu'elles sont situées dans des talwegs de manière à intercepter plus de ruissellement, il s'avère que des ouvrages considérés comme des retenues collinaires peuvent être installés **sur des sources ou drainées des nappes (3b)** : il s'agit alors en réalité de retenues sur cours d'eau, qui devraient être soumises au débit minimum. Enfin, un cas intermédiaire est représenté par les retenues sur **cours d'eau intermittent (3c)** : elles peuvent être considérées comme des retenues collinaires du point de vue hydrologique, mais ont probablement un effet différent du point de vue écologique. Les retenues alimentées par réseaux de drainage peuvent être assimilées à du (3a) mais seront a priori situées plus à l'aval des versants.
4. **Retenue en dérivation**. Dans le principe, une telle retenue s'apparente à une retenue alimentée par pompage dans la rivière (2), mais l'alimentation est ici gravitaire. Toutefois, la déconnexion de la retenue une fois celle-ci remplie est rarement complète, et souvent seul un débit minimum, parfois busé depuis l'amont de la retenue, assure la continuité du cours d'eau.
5. **Retenue en barrage**. Ce type de retenue est situé sur un cours d'eau : sauf dispositif particulier de débit minimum (avec prise de l'eau en amont), toute l'eau qui rejoint le cours d'eau à l'aval a transité par la retenue.

Certaines retenues peuvent être alimentées par écoulement d'eau pluviale urbaine ou d'eaux usées traitées provenant de stations d'épuration ou d'industries ; elles ne seront pas abordées spécifiquement ici.

Nota bene : La terminologie employée au sein de cette typologie s'applique uniquement à ce rapport préliminaire.

B.III Mode de restitution au milieu aquatique

Pour les types d'alimentation **3 – 4 – 5**, le mode de restitution de l'eau au cours d'eau a une grande influence, celle-ci dépendant de la profondeur de la retenue, de la présence ou non d'une stratification thermique ou biogéochimique et du temps de séjour moyen dans la retenue, comme cela sera abordé dans la partie suivante.

On peut notamment distinguer les retenues selon :

- La restitution ou non d'un débit minimum
- Le dispositif de restitution au milieu : vanne de fond, surverse, moine⁴, tour de prise d'eau étagée
- La périodicité de la vidange totale ou son absence

Certains équipements peuvent venir nuancer l'influence que peut avoir la retenue : zone de décantation à l'amont, bassin de tranquillisation à l'aval, dispositif d'oxygénation de l'eau restituée au milieu.

D'autres approches typologiques auraient pu être adoptées, basées par exemple sur la taille ou la position de la retenue dans le bassin. Dans la mesure où les effets hydrologiques pilotent en grande partie les autres effets, mais aussi où ces différentes typologies ne sont pas indépendantes (par exemple une retenue collinaire sera souvent de petite taille et située en tête de bassin alors qu'une grande retenue en barrage sera située plus en aval). Ce sont ces trois approches typologiques qui ont été les plus utilisées dans la suite du rapport.

Aboutir à la proposition d'éléments méthodologiques suffisamment concrets pour évaluer l'impact cumulé des retenues supposera probablement d'aller plus loin dans cette typologie, en caractérisant également la répartition de ces différents types de retenues sur un bassin versant. La deuxième phase de l'expertise pourrait ainsi tenter d'identifier si des distributions types existent pour ces différentes catégories de retenues, en fonction des caractéristiques physiques et d'occupation du sol du bassin considéré.

⁴ Le moine est un ouvrage de vidange permettant l'évacuation des eaux et la mise à sec progressive du plan d'eau. Le moine permet notamment de régler progressivement le débit d'évacuation. Contrairement aux autres ouvrages de vidange (vanne par exemple), le moine permet de vidanger en évacuant les eaux du fond les plus froides (SMARL, Bureau d'études Sinbio and Agence de l'eau Rhin-Meuse (2011). Etude préalable pour une gestion raisonnée des étangs du bassin-versant de la Largue - Fiche B : installation d'un moine.

Partie C. EFFETS A L'ECHELLE D'UNE RETENUE

Avant d'aborder l'impact cumulé des retenues, il est important de faire le point des effets induits par une seule retenue, afin d'esquisser la variété des impacts qui dépendent du type de retenue, notamment de son usage et de ses modes d'alimentation et de restitution.

C.I Hydrologie – hydrogéologie

C.I.1 Effets lors de la création de la retenue

D'un point de vue chronologique, le premier impact d'une retenue est la modification du milieu pré-existant au niveau de l'emprise de la retenue. Il s'avère que certainement afin de maximiser les capacités de remplissage, de nombreuses retenues ont été construites sur des milieux alimentés par des eaux de subsurface, i.e., soit des sources, soit des zones humides^{5, 6, 7}.

Ainsi, d'un point de vue hydrologique, la construction de ces retenues capte des sources ou détruit les milieux tampons que sont les zones humides, réduisant pour certains types de gestion les écoulements naturels en période de basses eaux. Cet effet peut être difficile à quantifier, car il est difficile a posteriori de savoir sur quel environnement ont été construites les retenues, mais il doit être considéré lors de tout nouveau projet.

C.I.2 Effets lors du fonctionnement de la retenue

L'effet hydrologique d'une retenue va différer en fonction de son mode d'alimentation, son mode de restitution, et son usage. Ces différentes caractéristiques vont influencer le **marnage** de la retenue, i.e., la différence entre son niveau d'eau maximale et minimale dans l'année.

En première approche, on peut considérer que plus celui-ci est important, plus l'effet hydrologique de la retenue sera marqué, soit en terme de volume d'eau prélevé au milieu, soit en terme de déphasage de l'hydrodynamique naturel. Ainsi :

- les retenues ayant un faible marnage auront un effet hydrologique peu marqué. Il s'agit des retenues où l'eau n'est pas consommée, à usage piscicole ou de loisir. Pour ces retenues, en dehors des vidanges pour entretien, l'effet est réduit à la compensation des pertes par évaporation et infiltration du point de vue hydrologique. Les pertes par évaporation étant maximales en été, on peut s'attendre à ce que ces retenues contribuent à capter une partie des écoulements estivaux pour se remplir, en fonction de leur mode d'alimentation.
- Les retenues avec un marnage marqué sont celles dont le volume d'eau stocké est utilisé pour remplir certaines fonctions au sein ou en dehors du réseau hydrographique. Ainsi, malgré un marnage important, les retenues visant à produire de l'hydroélectricité ou à soutenir les débits d'étiage ne vont pas générer des pertes importantes en volume pour le réseau hydrographique (celles-ci seront limitées aux pertes par évaporation), mais vont essentiellement différer l'écoulement, avec souvent un écrêtement des crues et un soutien des bas débits. A l'inverse, le marnage des retenues utilisées pour irrigation ou pour production de la neige artificielle se traduit par à une réduction nette des

⁵ Dugleux, E. (2002). "Impact de la production de neige de culture sur la ressource en eau."

⁶ Gueguen, M. (2013). Contribution à l'évaluation des impacts des retenues collinaires et des plans d'eau d'irrigation sur les ressources en eau et les milieux aquatiques du Morbihan. Rapport d'étude, Observatoire Départemental de l'Environnement du Morbihan.

⁷ Martin, A. (2013). Etude de l'impact cumulé des petites retenues artificielles sur la ressource en eau de surface : préambule d'une gestion équilibrée. Approche quantitative à l'échelle du bassin versant de la Sérène. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, VetAgro Sup.

volumes d'eau dans le réseau hydrographique, et par des déphasages ou écrêtements des écoulements pendant la période de remplissage, en fonction des modes d'alimentation et de restitution.

Malgré son importance, on dispose de peu d'informations sur le marnage des retenues de petites tailles dans la littérature, alors que ce sont les plus nombreuses. Une exception est donnée par Delbreilh (1993)⁸ : la Figure 2 illustre ainsi l'évolution mensuelle du volume stocké dans deux retenues collinaires moyennes (quelques dizaines de milliers de m³) du bassin de la Séoune entre 1989 et 1992. Ce type d'information est plus courante pour les grandes retenues, et souvent, à des pas de temps plus fins (Cf. Figure 3). Dans les deux cas, on voit que le marnage peut évoluer de façon importante d'une année sur l'autre.

D'un point de vue hydrologique, on considère que la retenue est « transparente » lorsqu'elle est pleine, puisque par le système de surverse, elle restitue autant d'eau en aval qu'il n'en rentre en amont. Son effet est par contre toujours marqué en période de remplissage. Même pleine, elle peut par ailleurs atténuer les pics de crues.

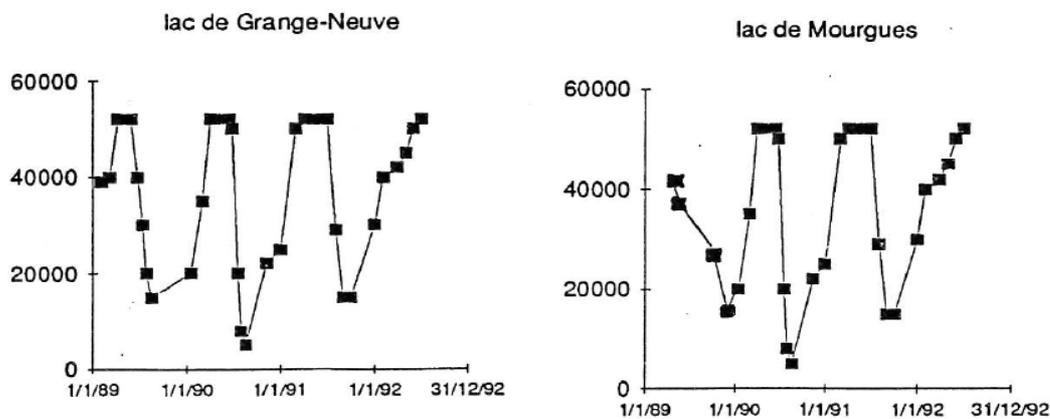


Figure 2 : Evolution du stock de deux retenues (en m³) sur 4 ans. Figure issue de Delbreilh (1993)

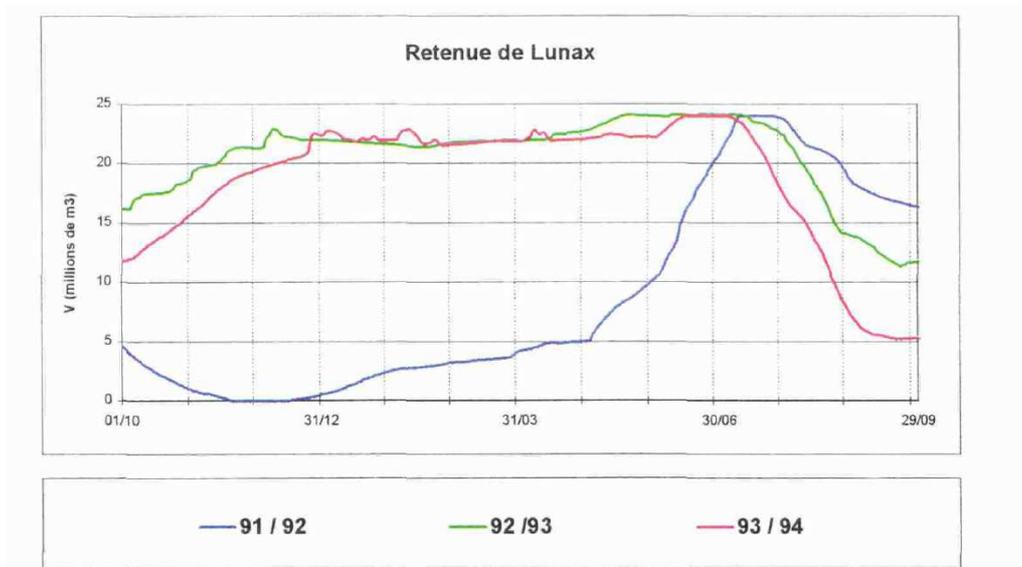


Figure 3 : Evolution du volume stocké dans une grande retenue Gasconne (Synthèse Piren, 1996⁹)

⁸ Delbreilh, N. (1993). Approche de l'impact sur l'environnement d'un ensemble de retenues collinaires - Cas du bassin de la Séoune. DEA d'Ecologie des Systèmes Aquatiques Continentaux de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.

⁹ CACG and Cemagref (1996). Suivi de la qualité des eaux des rivières et retenues gasconnes - Programme PIREN – Note de synthèse.

A marnage équivalent, l'effet de la retenue se traduira de façons différentes en fonction de la combinaison des modes d'alimentation et de restitution de la retenue.

En particulier, **en phase de déstockage**, qui peut correspondre à la période de basses eaux (barrages de soutien d'étiage) mais qui peut être différente (barrages hydroélectriques):

- Si la retenue est connectée en permanence au cours d'eau (type 5), elle a la possibilité de se remplir durant la période d'exploitation, et ainsi de prélever de l'eau à la rivière en période de basses eaux. Ceci est également vrai pour les petites retenues, même si elles respectent un débit de restitution. En effet, ce débit est souvent limité au débit minimum réglementaire (débit plancher) soit le 10^{ième} du module (valeur moyenne du débit sur plusieurs années). On peut remarquer que sur 2544 stations hydrologiques de la BD hydro pour lesquelles ces valeurs sont référencées, le 10^{ième} du module du débit est inférieur au débit mensuel minimum de période de retour 5 ans pour 38% d'entre elles. De ce fait, pour 38% de ces stations, le débit réservé fixé au 10^{ième} du module, même s'il est respecté, ne permet pas de garantir un débit supérieur à la moyenne mensuelle quinquennale sèche. De plus, tant que le débit est supérieur au débit réservé, les retenues situées en barrage peuvent prélever de l'eau. Elles peuvent donc se remplir toute l'année et avoir un effet sur l'ensemble du cycle hydrologique. Cet effet hydrologique est cependant limité lorsque le barrage est rempli. Les plus grosses retenues en barrage peuvent avoir des débits de restitution variables dans le temps : cela peut permettre de favoriser les écoulements à certaines saisons, par exemple, en fin d'étiage.
- Si la retenue est déconnectée du réseau hydrographique durant la phase de déstockage soit parce qu'elle est alimentée par pompage ou en dérivation déconnectable d'un cours d'eau (types 1, 2 et 4), la retenue ne peut pas se réalimenter en période d'exploitation, et ne peut donc pas combler les pertes de volume. A capacité équivalente, elle prélève ainsi moins d'eau dans le milieu hydrographique que les retenues connectées.
- Pour les retenues collinaires, i.e. celles qui sont alimentées par les écoulements sur le bassin d'alimentation, les prélèvements d'eau ont lieu dès qu'il y a un écoulement et que la retenue n'est pas pleine, en toutes saisons. Ces écoulements peuvent être particulièrement réduits en période de basses eaux, qui peut correspondre à la période de déstockage, ce qui limite les capacités de remplissage en cette période. Néanmoins, l'ensemble des écoulements sont captés durant cette période. Certaines de ces retenues (**3b**) sont en fait situées sur des sources, et on a alors un effet similaire à celles situées en rivière.

En période de remplissage, l'effet d'une retenue dépendra encore de son mode de remplissage et de son mode de restitution :

- S'il s'agit d'une retenue collinaire, ou si la retenue est connectée en permanence au cours d'eau (type 5, 4 parfois), mais sans mode de restitution autre qu'un déversoir, même si il y a le maintien d'un débit réservé limité au 1/10^{ième} du débit moyen annuel, la majorité de l'écoulement est intercepté pour remplir la retenue, ce qui peut induire des étiages significativement plus longs.
- S'il s'agit d'une retenue dont le débit d'alimentation est contrôlé, via le débit de la pompe d'alimentation ou par la taille du canal d'alimentation (type 1, 2 ou 4), le volume d'eau pouvant transiter par la dérivation ou le débit de pompage peuvent limiter les quantités d'eau qui sont interceptées par la retenue, et ainsi, limiter la proportion de débit capté, prolonger la phase de prélèvement, et donc avoir une influence moins brutale sur le cycle hydrologique.
- Si la retenue est connectée au cours d'eau, mais que son mode de restitution permet une gestion des débits aval, le remplissage peut également s'étaler dans le temps, et l'effet hydrologique peut être alors moins brutal.

L'effet d'une retenue sera d'autant plus marqué que le débit d'alimentation sera faible par rapport à son volume.

Dans tous les cas, en période de remplissage, la présence de retenue peut diminuer fortement les pics de crues. Certaines retenues sont de fait maintenues à un niveau permettant l'écrêtage des crues automnales ou hivernales.

Cette présentation des effets hydrologiques d'une retenue peut être illustrée à partir d'observations. Les observations sont plus nombreuses pour quantifier l'impact hydrologique des grandes retenues situées en barrage en rivière, car il est possible de comparer les débits amont et aval¹⁰ (cf. Figure 4).

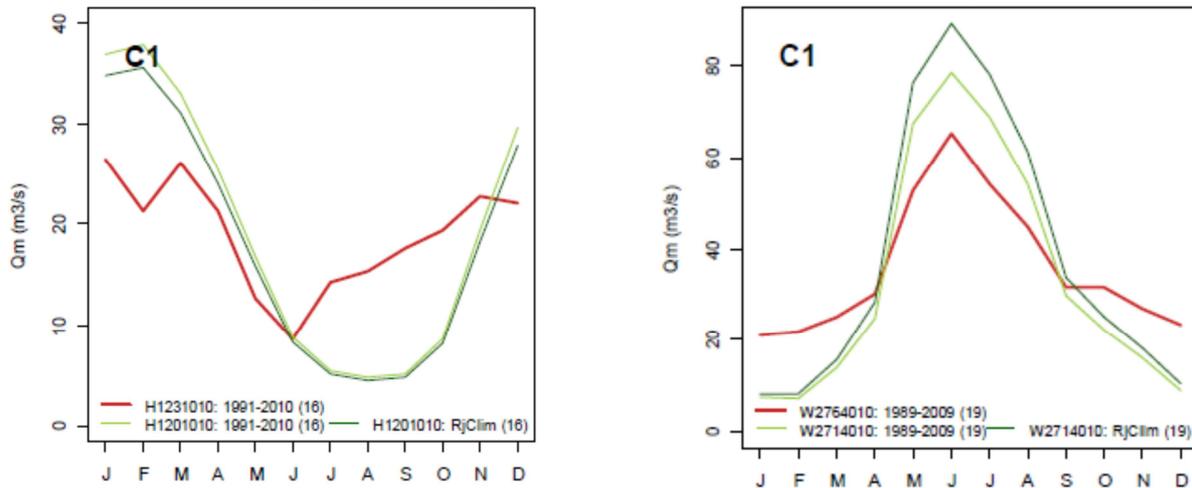


Figure 4 : Impact de grands réservoirs situés sur les cours d'eau, illustrés par la comparaison entre les débits amont (en vert) et aval (en rouge) : à gauche : sur l'Aube à Blaincourt, après deux retenues de 170 Mm³ dédiées au soutien d'étiage, à droite : sur la Romanche à Bourg d'Oissan, après deux retenues de 183 Mm³ dédiées à la production d'hydroélectricité. Figures issues de Cipriani et Sauquet (2014)¹⁰

En revanche, l'impact hydrologique des retenues de type collinaire est plus rarement directement observé. Une des exceptions est présentée dans la thèse de E. Magnier (2013)¹¹, qui s'intéresse à l'impact des retenues dédiées à la neige de culture. Elle y présente les évolutions temporelles simultanées du volume d'une retenue et du débit en sortie de la retenue (Figure 5). Il apparaît que les débits sont toujours faibles, voire nuls lorsque la retenue n'est pas pleine. Cet effet hydrologique est supposé typique des retenues collinaires.

¹⁰ Cipriani, T. and E. Sauquet (2014). Altération des étiages et du régime hydrologique des cours d'eau français par des ouvrages hydrauliques. Rapport final, Irstea Onema.

¹¹ Magnier, E. (2013). Neige artificielle et ressource en eau en moyenne montagne : impacts sur l'hydrosystème. Les exemples d'Avoriaz (France) et de Champéry (Suisse) Thèse, Université Paris Sorbonne Université de Lausanne.

Figure. 136 Niveau du lac 1730 et débits de la Dranse de Sous-Saix pour l'année 2010-2011. (D'après les données de la Lyonnaise des eaux pour la hauteur d'eau du lac et le niveau du trop plein et les mesures de la sonde des Prodains pour le débit de la Dranse).

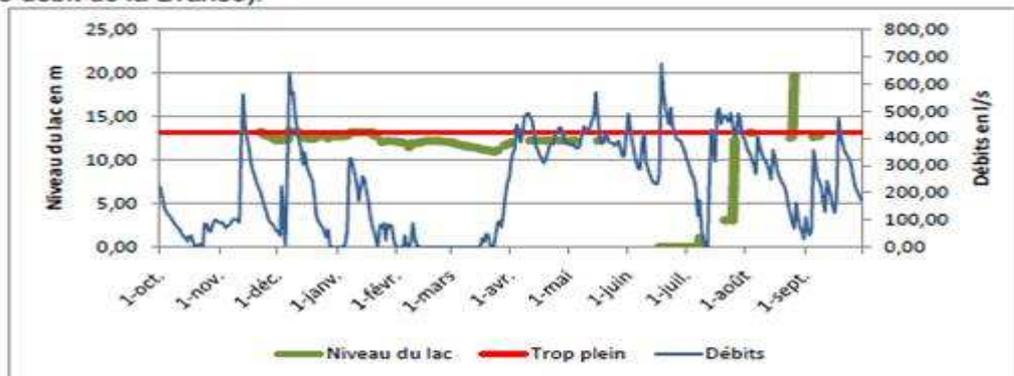


Figure 5 : Evolutions temporelles du niveau d'eau d'une retenue de 140 000m³ dédiée à l'alimentation en eau potable la neige de culture et du débit en aval de la retenue. Figure issue de Magnier (2013)¹¹.

C.1.3 Effets sur l'hydrogéologie du bassin versant

3.a Alimentation par pompage en nappe :

La baisse des niveaux de nappe au cours de la période de remplissage hivernal par pompage direct dans les nappes, peut :

- Influencer le débit, voire assécher une source à proximité des ouvrages de remplissage
- Influencer une zone humide
- Induire, si la nappe est en relation forte avec les eaux de surface, un changement de comportement d'un cours d'eau (débit, hauteur d'eau) soit :
 - Si la nappe alimente la rivière (Figure 6 – a) : baisse des flux de la nappe vers la rivière (Figure 7 – B) ou inversion de flux (Figure 7– c).
 - Si la rivière alimente la nappe (Figure 6 – b) : augmentation des échanges de la rivière vers la nappe.
- Influencer les niveaux des ouvrages voisins (puits, forages...).

En fonction de l'inertie ou non de la nappe, l'impact peut être plus ou moins différé dans le temps. Ainsi dans certains cas, des pompages hivernaux auront un impact visible à l'aval (sur un débit de cours d'eau par exemple) au cours de l'été.

3.b Alimentation par pompage en rivière :

La baisse des débits de cours d'eau ou du niveau d'eau dans le cours d'eau peut venir impacter les flux de nappes vers la rivière ou vice-versa en augmentant ces échanges. Par exemple dans le cas d'une rivière drainant la nappe, la vidange de la nappe peut être accélérée.

Pour ces deux types de réserves, lorsqu'il s'agit de réserves de substitution, leurs effets sur le cours d'eau et la nappe méritent d'être mis en regard des effets qu'ils permettent d'éviter pendant la période de tension.

3.c Retenues sur cours d'eau :

Les retenues sur cours d'eau où les débits sont susceptibles d'être impactés en automne au cours du remplissage peuvent influencer la nappe : vidange augmentée du fait d'une baisse du niveau du cours d'eau par rapport à des conditions naturelles sans retenue.

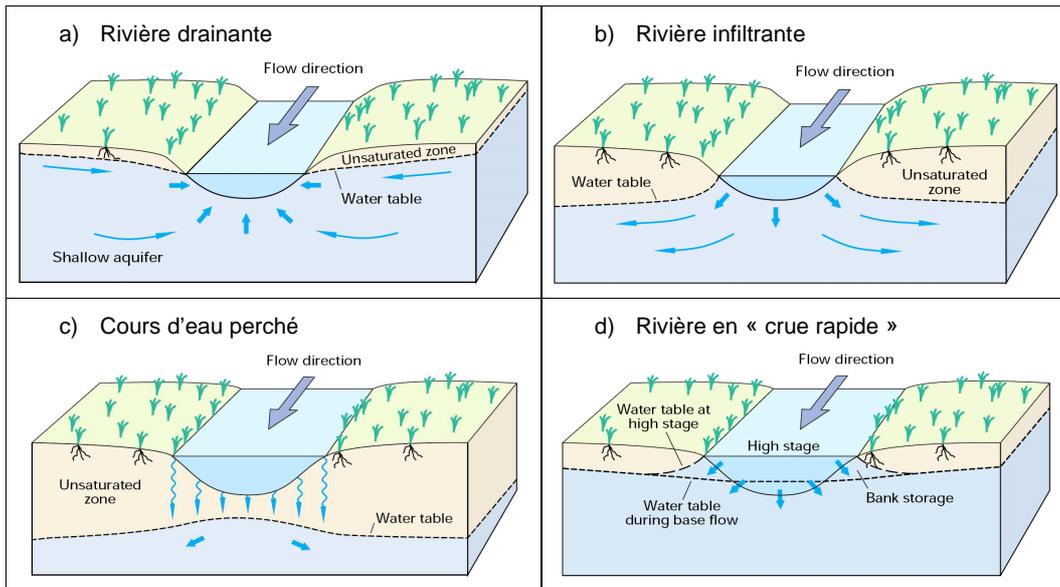


Figure 6 : Les différentes relations nappes-rivières (Winter et al., 1998)¹²

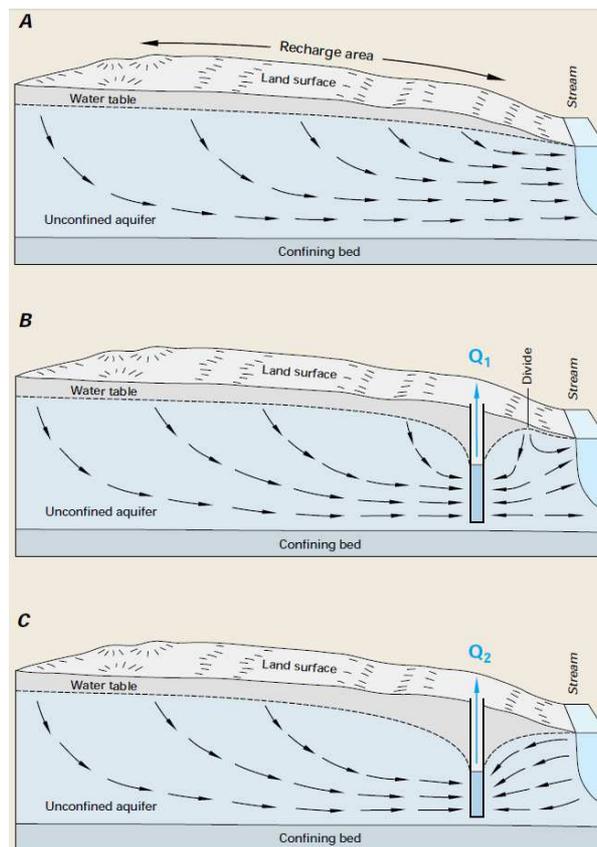


Figure 7 - Effet possible d'un pompage à proximité d'un cours d'eau (Winter et al., 1998)¹² A - Condition naturelle de drainage de la nappe par la rivière ; B - Puits avec pompage Q_1 à proximité d'un cours d'eau qui intercepte une partie du flux de la nappe alimentant le cours d'eau ; C - Puits avec pompage Q_2 ($Q_2 > Q_1$) avec inversion de flux entre la rivière et la nappe

¹² Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L. and Alley, W.M., 1998, Ground water and surface water—A single resource: U.S. Geological Survey Circular 1139, 79 p.

3.d Les méthodes

L'incidence sur l'hydrosystème d'un point de vue local est généralement testée par essai de pompage. Les objectifs de ces essais sont notamment de s'assurer des capacités de production du forage (essai par pallier) mais également d'évaluer l'influence du futur prélèvement (essai longue durée ou essai de nappe).

Le pompage d'essai de longue durée à débit constant permet ainsi de préciser l'influence du futur prélèvement sur les ouvrages voisins (baisse ou non du niveau de la nappe au droit de l'ouvrage et estimation de la baisse), d'une source (assèchement ou non, possible baisse du débit) et d'identifier la présence de limites (réalimentation par la rivière, colmatage des berges d'une rivière, limite étanche) avec détermination de cette limite au forage d'essai. L'arrêté du 11 septembre 2003 fixe une durée minimale de 12 heures pour apprécier l'impact du prélèvement sur l'environnement immédiat du forage. Toutefois des tests d'une durée supérieure sont généralement préconisés, la durée la plus communément admise étant de 72 heures minimum.

Du point de vue de la qualité de l'eau, le seul aspect indiqué dans les études d'impact en termes d'hydrogéologie est la contamination potentielle via le forage de prélèvement.

C.II Effets d'une retenue sur la qualité physico-chimique des eaux

C.II.4 La notion de qualité physico-chimique et ses déterminants

La « qualité physico-chimique » d'une eau est une notion associée à la gestion environnementale des milieux aquatiques. Elle exprime les effets attendus de sa composition sur les divers usages de l'eau et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Elle intervient en particulier dans l'évaluation de l'état écologique d'une masse d'eau de la DCE. Elle s'apprécie à travers un ensemble de paramètres physiques et chimiques divers (température, turbidité, concentrations dissoutes et particulières, minérales et organiques, macro ou micropolluants, etc.), plus ou moins interdépendants et comparés à des normes plus ou moins étayées.

La qualité physico-chimique de l'eau en un point donné d'un réseau hydrographique dépend (1) des processus de transfert hydrique dans le bassin versant et des interactions avec les écosystèmes naturels ou anthropisés (acquisition de la composition chimique et transformations biogéochimiques au cours de ces transferts) (2) des processus de transfert et de transformation dans le cours d'eau (processus « in-stream »), (3) des apports anthropiques sur le bassin versant liés en particulier à l'usage des sols et des rejets directs d'eaux usées dans le réseau hydrographique,

En conséquence une retenue peut influencer la qualité de l'eau à travers (1) l'interruption ou le ralentissement des transferts hydriques de surface sur le versant ou dans le cours d'eau, (2) l'apparition d'une discontinuité modifiant les processus naturels in-stream pour les retenues sur un cours d'eau ou en dérivation, (3) l'évolution de l'usage des sols et des pratiques, surtout pour les retenues d'irrigation (augmentation de certaines cultures irriguées et de leurs intrants). Tous les paramètres physico-chimiques sont affectés dans la retenue elle-même où le ralentissement de l'eau permet l'expression de certains processus physiques et transformations biogéochimiques caractéristiques des milieux lenticques, et dans le cours d'eau récepteur, lorsque l'eau de la retenue y est partiellement restituée.

De nombreux facteurs régulent ces processus et l'intensité de leur impact : la composition initiale de l'eau, le temps de séjour dans la retenue..., facteurs qui dépendent eux-mêmes du contexte physique, hydro-climatique, agronomique du bassin versant drainé, et bien sûr du type de retenue : modes d'alimentation, de restitution, usages, caractéristiques morphologiques (taille, profondeur, position dans le bassin versant), etc.

C.II.5 Les méthodes utilisées dans les études d'impact

Rares sont les études d'impact qui s'intéressent aux paramètres physico-chimiques dans la retenue. Leur grande majorité considère la retenue comme une boîte noire. Lorsque la retenue est installée sur un cours d'eau ou en dérivation, l'effet est évalué en comparant la qualité physico-chimique du cours d'eau entre l'amont et l'aval de la retenue.

Cependant, bien que plus abordé dans les études d'impact que l'évolution dans la retenue elle-même, l'effet d'une retenue sur la qualité physico-chimique du cours d'eau en aval est encore mal connu. Des paramètres sont mesurés mais sans réelle étude et quantification des processus en cause et de leurs déterminants, ce qui rend toute généralisation et extrapolation difficiles. La variabilité hydrologique qui est un facteur clé de variabilité de la composition des eaux (relations concentrations – débits) n'est pas prise en compte dans l'échantillonnage. En fait, les campagnes de mesure des paramètres physico-chimiques en amont et en aval de la retenue sont ponctuelles et peu nombreuses, ne permettant pas d'apprécier l'effet de la variabilité hydrologique et saisonnière.

Dans ce contexte, pour l'état de l'art sur le sujet présenté ci-dessous, nous nous sommes basés principalement sur nos connaissances d'experts¹³. Nous extrapolons aux retenues nos connaissances sur les processus physiques, chimiques et biologiques actifs dans les rivières, dans des plans d'eau plus naturels (lacs et étangs) et dans certaines zones humides artificielles construites pour dénitrifier l'eau ou y dégrader les pesticides¹⁴.

C.II.6 Processus et effets attendus d'une retenue sur la qualité physico-chimique des eaux

Les deux types d'effets, dans la retenue et à l'aval de la retenue, seront traités ici successivement.

6.a Evolution dans la retenue elle-même

Le stockage de l'eau dans la retenue pendant une durée plus ou moins longue permet le développement des processus physiques, chimiques et biologiques, qui affectent diversement les paramètres de qualité physico-chimique de la colonne d'eau. L'intensité des effets dépend du temps de séjour de l'eau lié à ses modalités de renouvellement, ainsi que d'un éventuel gradient vertical des conditions biogéochimiques lié à la profondeur de la colonne d'eau. Dans certaines situations la retenue peut aussi recevoir des apports directs de son environnement proche, notamment de sa zone de marnage et de sa « zone benthique », qui contribuent aussi à l'évolution de la qualité de l'eau.

- a. **Température** : l'augmentation du temps de séjour de l'eau dans la retenue augmente les échanges caloriques avec l'atmosphère, avec en particulier un réchauffement estival significatif pour des retenues peu profondes et sans ombrage du plan d'eau. Lorsque la retenue est profonde, une stratification thermique peut apparaître. Ce réchauffement estival a des conséquences importantes sur certaines réactions biogéochimiques (ex : transformation de NH_4^+ en NH_3 , dénitrification, production et absorption biologique) et en conséquence sur l'état écologique de la retenue. Certaines études montrent un refroidissement hivernal, de moindre ampleur, qui a moins de conséquences.
- b. **Oxygène dissous** : en absence de renouvellement par des eaux oxygénées de surface, la teneur en oxygène dissous dans la retenue diminue généralement, d'autant plus en été quand la température de l'eau augmente (diminution de la solubilité d' O_2). La dégradation microbienne de matière organique consomme de l'oxygène. Si l'eutrophisation se développe dans la retenue, la biomasse primaire

¹³ On pourra se reporter aussi à l'étude InterAgences (Rapport de Phase 1, 2001) qui présente un tel état des connaissances.

¹⁴ Regazzoni, C., S. Payraudeau and C. Grégoire (2010). Evaluation du potentiel de rétention et de remédiation des flux de produits phytosanitaires dans les eaux de surface par des Ouvrages de Rétention et de Remédiation (OR2) - Les Ouvrages de Rétention et de Remédiation (OR2), Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg.

(biofilm, phytoplancton, macrophytes) s'accroît, augmentant la quantité de matière organique à décomposer et la consommation d'oxygène en zone benthique. Les conditions anoxiques qui en résultent s'accompagnent de conditions réductrices conduisant à certaines transformations biogéochimiques dans la colonne d'eau et les sédiments du fond : dénitrification, mobilisation de PO_4 et de métaux lourds par dissolution des phases porteuses (réduction des oxydes de fer), désorption et dégradation de certains pesticides, complexation avec la matière organique.

- c. **Sédiments** : les sédiments dans la retenue proviennent soit de la charge solide de l'eau d'alimentation, soit de l'érosion autour de la retenue si celle-ci n'est pas protégée par des digues ou des zones tampons (bandes enherbées, talus boisés...), soit de la dégradation de la biomasse initiale. Le ralentissement du transfert hydrique entraîne un dépôt rapide des particules les plus grossières dès l'amont de la retenue et leur stockage au fond de la retenue. Les particules plus fines ou moins denses (organiques) peuvent rester en suspension dans la colonne d'eau ou se déposer plus progressivement sur le fond. Dans les contextes de forte production sédimentaire, ces dépôts peuvent conduire à un envasement qui peut perturber la gestion de la retenue (prise d'eau ou vannes de fond) et finalement aboutir à son comblement réduisant la capacité de stockage et nécessitant des interventions de curage parfois difficiles et coûteuses.
- d. **Substances associées aux sédiments** : les sédiments (charge de fond et matières en suspension) transportés par l'eau dans les bassins versants comprennent des phases minérales et organiques porteuses de substances chimiques, comme le phosphore, les métaux lourds, certains pesticides, ainsi que de microorganismes (bactéries coliformes et pathogènes), qui peuvent se déposer et donc s'accumuler dans la retenue. Ces substances sont souvent sorbées sur les particules fines (de l'ordre de quelques micromètres), géochimiquement actives et à forte surface d'échange, présentes sous forme dispersée ou agrégée. Avec le temps ou dans certaines conditions biogéochimiques (anoxie, pH acide), ces substances peuvent être désorbées et se retrouvent dans la colonne d'eau. Notons que l'on dispose de très peu d'informations sur la survie des microorganismes dans les retenues, toutefois, la biblio nous indique que matière organique et anoxie ne sont pas défavorables aux microorganismes fécaux (survie en marais).
- e. **Nutriments N et P** : l'azote et le phosphore sont apportés avec l'eau d'alimentation de la retenue, sous forme particulaire, et sous des formes dissoutes, dont NO_3^- et PO_4^{3-} sont les plus abondantes et biodisponibles. La grande majorité des eaux de surface en France sont largement concentrées en ces nutriments. L'eutrophisation se développe quand la concentration du phosphore dissous, élément naturellement limitant de la productivité en eau douce, augmente au-delà d'un certain seuil. Ce seuil est de l'ordre de 30 à 50 $\mu\text{g/L}$ de P- PO_4 , facilement atteint dans les milieux anthropisés. Lorsque l'azote est en faible disponibilité relativement au phosphore ($\text{N/P} < 7$), des cyanobactéries fixatrices d'azote atmosphérique se développent. Lorsque l'azote est abondant et que les conditions sont anoxiques, le processus de dénitrification transforme NO_3^- en N_2O et N_2 gazeux (GES) ; l'azote organique peut être de son côté transformé en ammonium NH_4^+ et éventuellement en NH_3 gazeux.
- f. **Carbone Organique Particulaire et Dissous (COP et-COD)**: la matière organique dans une retenue peut être libérée à partir de la végétation présente à l'installation et/ou à partir du sol en place. L'origine du COP peut être allochtone (sédiments organiques, litière de la végétation en bordure de retenue) ou autochtone (production primaire). La décomposition incomplète de cette matière organique, favorisée par la faible teneur en oxygène, a pour conséquence la production de COD. Le COP et le COD jouent un rôle important pour la complexation de contaminants (métaux lourds, pesticides), en fonction des conditions d'oxydo-réduction mais aussi en fonction du type de carbone organique.
- g. **Autres paramètres** : d'autres paramètres de qualité évoluent aussi dans une retenue avec des conséquences moindres en termes de qualité des eaux :
 - Le pH influe sur de nombreuses réactions et interagit avec la plupart des processus cités précédemment. Du fait de ce caractère intégrateur son évolution est complexe à interpréter ou à

prévoir. Par ailleurs sa variation est généralement limitée grâce au pouvoir tampon des eaux stockées.

- La silice est consommée dans certaines retenues par les diatomées.

En conclusion, une retenue est un réacteur biogéochimique et un décanteur de sédiments, qui produit à la fois une eau différente de l'eau qui l'alimente, parfois partiellement restituée au réseau hydrographique, et un stock (volume dissous et particulaire) périodiquement remobilisable selon les perturbations hydrologiques naturelles (fortes crues) ou anthropiques (vidanges).

6.b Conséquences sur le cours d'eau en aval

Dans les cas où une partie de l'eau de la retenue est directement restituée au cours d'eau en aval (retenue sur un cours d'eau ou en dérivation), la qualité physico-chimique de celui-ci va être diversement influencée par la qualité de l'eau de la retenue. Plus la qualité de l'eau restituée est différente de celle de l'amont, plus l'effet de la retenue pourra être important à l'aval. D'où un rôle clé du temps de résidence. Mais l'effet dépend aussi fortement de la contribution relative, c'est-à-dire de la proportion relative entre les flux d'eau et de sédiments restitués et les flux d'eau et de sédiments du cours d'eau récepteur. Par ailleurs la retenue exerce, en aval, un effet tampon sur la variabilité temporelle des paramètres physico-chimiques, à cause du mélange partiel des flux entrants avec le volume du réservoir. Enfin, le retour à des conditions hydrauliques lotiques réactivent certains processus, corrigeant parfois à courte distance l'impact de la retenue.

- Température** : les références disponibles montrent qu'à l'aval de la retenue le rééquilibrage de la température de l'eau avec la température de l'air et le contexte local (ombrage, apports de nappe) est assez rapide (en moyenne 1 km d'après l'étude InterAgences²) d'autant plus qu'un brassage de l'eau est assuré.
- Oxygène dissous** : la réoxygénation de l'eau restituée en aval de la retenue peut être très rapide (en moyenne une centaine de mètres) d'autant plus qu'un brassage de l'eau est assuré.
- Sédiments et morphologie du chenal** : en général les flux et concentrations des sédiments grossiers sortant de la retenue sont notablement réduits du fait de leur stockage dans la retenue. Si ce stockage concerne une part importante de la charge de fond du cours d'eau en aval, il se traduit par un déficit et donc par une incision progressive du chenal. Cette incision peut s'accompagner d'une rétraction du lit mineur, d'une perte des habitats piscicoles liée à la modification de la granulométrie du chenal et d'un assèchement de zones humides périfluviales du fait de l'abaissement du niveau moyen de la nappe d'accompagnement du cours d'eau. La réduction des flux et concentrations des sédiments les plus fins est moins nette, car ils sont moins stockés. Une augmentation de flux organiques biogènes peut même être observée, notamment si la retenue est eutrophisée.
Surtout le régime des flux sédimentaires, classiquement très réactifs en fonction des conditions hydrologiques, est fortement affecté : au cours des crues l'augmentation des flux et concentrations de matières en suspension arrivant en amont est tamponnée par leur stockage partiel dans la retenue. Mais les sédiments stockés (fractions fines) peuvent à nouveau être mobilisés lors des vidanges, des fortes crues ou plus rarement en période d'intense fermentation à l'interface eau-sédiments.
- Substances associées aux sédiments** : L'accumulation de sédiments dans la retenue s'accompagne d'un risque important d'accumulation de contaminants, notamment persistants comme les métaux lourds, qui peuvent être restitués à plus ou moins long terme à l'aval lors des vidanges ou des fortes crues. Par ailleurs un départ accru de ces substances, cette fois sous forme dissoute (plus biodisponible ou toxique), peut être observé à l'aval après leur désorption en conditions anoxiques dans le milieu interstitiel des sédiments ou dans la colonne d'eau, ce qui mérite une attention en terme de contamination trophique.
- Nutriments N et P** : N et P particuliers ne se retrouvent à l'aval que si les particules organiques ou minérales auxquelles ces éléments sont associés transitent elles-mêmes vers l'aval (particules organiques légères, particules minérales fines, mobilisation exceptionnelle des sédiments stockés). Par

comparaison avec l'amont les flux et concentrations de NO_3^- sont plus faibles à l'aval si la dénitrification se produit dans la retenue ou par consommation biologique. Des libérations brutales de PO_4^{3-} et NH_4^+ peuvent être évacuées vers l'aval après désorption de ces ions en conditions anoxiques dans le milieu interstitiel des sédiments ou dans la colonne d'eau. Ces éléments très réactifs sont rapidement soumis aux processus in-stream (sorption/désorption) en conditions lotiques.

- f. **Carbone Organique Particulaire et Dissous** : La restitution vers l'aval du COP et du COD va se faire comme pour les paramètres précédents lors de la restitution des sédiments stockés ou de la colonne d'eau. Les contaminants associés vont subir des dynamiques d'adsorption/désorption très complexes et très variables dans l'espace et le temps avec le retour aux conditions lotiques.

En conclusion, dans les cas (fréquents) où une partie de l'eau de la retenue est directement restituée au cours d'eau, l'effet à l'aval est très variable dépendant à la fois de l'évolution de la qualité physico-chimique dans la retenue - le temps de résidence, l'intensité des relations avec les zones benthiques et riveraines sont probablement les facteurs clés de celle-ci- et des modalités de restitution de l'eau. Les conditions hydrologiques dans lesquelles s'effectue cette restitution deviennent primordiales à considérer, la retenue tamponnant ou amplifiant le régime naturel des flux selon des processus de mélange-dilution ou de déstockage exceptionnel.

C.II.7 Facteurs de variation

Tous les processus et effets présentés ci-dessus pour une retenue ne s'expriment pas avec la même intensité ou ne posent pas tous les mêmes risques selon le contexte local ou régional et les différents types de retenues considérées.

7.a *Contexte régional : usage des sols, milieu physique, climat*

L'effet d'une retenue est d'abord lié à l'usage des sols et à l'anthropisation des milieux qui influencent la qualité physico-chimique de l'eau d'alimentation. L'excès de nutriments N et P, la présence de pesticides, de métaux lourds, d'agents pathogènes sont souvent attribués à des origines agricoles ; l'afflux de sédiments peut être lié à certaines pratiques parcellaires ou d'aménagement ou à des déstabilisations des berges et du lit de la rivière, suite par exemple à des abaissements de nappe. L'eau est aussi affectée par des pollutions ponctuelles d'origine industrielle ou domestique incluant d'autres contaminants (antibiotiques, hormones...). Si les origines agricoles diffuses de ces divers polluants sont souvent très dominantes en tête de bassin, peu de cours d'eau d'ordre supérieur à 2 ou 3 échappent à des rejets ponctuels de pollutions : égouts domestiques et industriels, assainissements divers, de fait plus ou moins maîtrisés, absence de traitement de dé-phosphatation, rejets non traités notamment en période d'orage....

L'expression de ces perturbations en termes de qualité de l'eau dépend du milieu physique (topographie, roche-mère, sol) qui influence le fonctionnement hydrologique du bassin versant et les nombreuses transformations biogéochimiques intervenant au cours des transferts.

Enfin certains impacts sont à moduler selon le contexte climatique et le seront en fonction de son changement à venir : accentuation du réchauffement estival de l'eau si les étés sont particulièrement chauds, atténuation de la stratification thermique et chimique de la colonne d'eau si les vents favorisent le brassage de l'eau, production de sédiments liée à la fréquence et l'intensité des pluies, déstockage dans la retenue si de fortes crues se produisent, etc.

7.b *Mode d'alimentation*

Dans un même contexte, la qualité physico-chimique de l'eau alimentant la retenue varie en fonction de son origine : eau de nappe, de ruissellement, ou de rivière (cf. B.II). Par exemple une eau de nappe présente une charge sédimentaire (et substances associées) nulle, une charge en PO_4 faible (P est peu mobile dans les sols), mais peut présenter une charge non négligeable en NO_3^- et en pesticides. Une eau de source s'apparente dans

certains cas à une eau de nappe (résurgence) mais sa composition chimique peut aussi être différente si son origine est plus superficielle (exfiltration). Une eau de ruissellement sera moins chargée en nitrate mais présentera une charge importante en suspension et phosphore particulaire. La probabilité pour qu'une eau de cours d'eau présente des concentrations en nutriments dépassant les seuils favorisant l'eutrophisation des retenues est forte sur tout le territoire national.

Les retenues construites « hors sol » et dont l'eau est pompée dans la nappe sont généralement déconnectées de leur environnement proche, donc non soumises à des apports directs de sédiments ou polluants divers.

Le mode d'alimentation joue aussi sur le temps de séjour de l'eau dans la retenue et sur son taux de renouvellement. Par exemple une retenue installée sur un cours d'eau (barrage) est constamment alimentée par l'eau de l'amont, même si le taux de renouvellement peut être faible. A l'inverse une retenue alimentée par la nappe et hors sol est remplie seulement en hiver et laissée de longs mois sans renouvellement.

7.c *Mode de restitution*

Le mode de restitution est important à considérer à l'aval des retenues situées sur un cours d'eau ou en dérivation. Si la retenue est suffisamment profonde pour que s'établisse une stratification de la colonne d'eau pour certains paramètres, une eau restituée à partir de la profondeur pourra être plus fraîche en été, mais appauvrie en oxygène dissous, dénitrifiée, plus turbide qu'une eau restituée à partir de la surface.

L'impact sur le cours d'eau en aval dépend aussi de la proportion relative entre les flux d'eau et de sédiments restitués et les flux d'eau et de sédiments du cours d'eau récepteur.

Certains réservoirs ne sont pas connectés à un cours d'eau à l'aval. La qualité de leurs eaux n'importe qu'en fonction des usages. C'est le cas en particulier des retenues de substitution où l'eau de nappe est restituée aux cultures. Les nutriments de l'eau restituée sont alors recyclés.

7.d *Usages*

Pour les retenues destinées à l'irrigation et construites hors cours d'eau, l'eau est collectée en hiver et son temps de séjour dans la retenue est de plusieurs mois avant la période d'utilisation. L'eau d'alimentation est généralement riche en intrants d'origine agricole.

Pour les retenues destinées aux loisirs (baignade, jeux et sports nautiques, pêche) ou multi-usages, et plus généralement pour toutes les retenues restituant de l'eau vers un cours d'eau, le risque d'eutrophisation est particulièrement à surveiller. Certaines Cyanobactéries se développant en conditions eutrophes émettent des toxines, en particulier des neurotoxines, qui peuvent affecter dangereusement la santé humaine (si ingestion, inhalation, absorption par la peau ou bioaccumulation dans la chaîne alimentaire jusqu'aux produits consommés). Certaines études suggèrent qu'un risque pourrait exister lorsque les eaux d'irrigation contiennent ces cyanotoxines et que les cultures irriguées sont consommées (maraîchage par exemple)¹⁵.

7.e *Gestion de la retenue*

La gestion de la retenue est souvent liée à son usage. Elle joue sur la qualité physico-chimique de l'eau à travers son temps de séjour dans la retenue et son taux de renouvellement (eau consommée ou pas), ou bien à travers l'existence et la fréquence de vidanges et curages pouvant remobiliser les sédiments stockés, etc.

¹⁵ AFSSA and AFSSET (2006). Rapport sur l'évaluation des risques liés à la présence de cyanobactéries et leurs toxines dans les eaux destinées à l'alimentation, à la baignade et autres activités récréatives.

7.f Taille et profondeur de la retenue, position dans le bassin versant et ordre de Strahler

La taille des retenues (superficie, profondeur) est extrêmement variable. Dans les retenues les plus profondes une stratification thermique, d'oxygène et de lumière peut apparaître associée à des transformations biogéochimiques multiples. Par ailleurs l'effet tampon d'une retenue sur cours d'eau sur les variabilités temporelles des paramètres physico-chimiques est d'autant plus important que le volume d'eau stockée est grand.

La taille de la retenue est en partie liée à sa position dans le bassin versant mais pas strictement. Les retenues de grande taille sont plutôt construites à l'aval de grands bassins versants (du fait des besoins de débit réservé¹⁶) même si les retenues de réalimentation peuvent être situées à l'amont, les petites retenues se rencontrent, quant à elle, aussi bien à l'amont qu'à l'aval. Leur effet sur la qualité physico-chimique du cours d'eau sera par contre relativement plus important dans les têtes de bassin ou les petits ordres de Strahler, plus sensibles aux altérations de l'eau restituée dès lors que les débits sont faibles.

C.II.8 Des effets aux impacts

A l'échelle d'une retenue, on observe donc une grande diversité d'effets sur les paramètres de qualité physico-chimique de l'eau. Ceci définit des niveaux de risques, des précautions ou des exclusions d'usage spécifiques à chaque polluant. Les effets peuvent être aussi être pris en compte plus globalement pour définir des services et dis-services écosystémiques :

- **« Epuraton » de l'eau** : la retenue permet de stocker certains composants responsables de la dégradation de la qualité des cours d'eau, en particulier les flux de sédiments et substances associées (N, P, pesticides, etc.), et d'en transformer d'autres, comme par exemple les flux de nitrate qui se transforment en azote gazeux au cours de la dénitrification, ou certains pesticides qui sont partiellement dégradés en des formes de toxicité différente. En cas de restitution au cours d'eau, les concentrations de ces substances diminuent à l'aval, ce qui conduit à une amélioration de la qualité du cours d'eau selon les critères d'évaluation environnementale.

Cependant, cette amélioration n'est parfois que temporaire. Dans certaines conditions hydrologiques ou biogéochimiques, le stock peut être remobilisé avec un risque d'augmentation brutale –(flush) à l'aval de certaines concentrations (MES, NH_4^+ , PO_4^{3-} , métaux lourds, pesticides, etc.). Par ailleurs la réduction de certains flux peut modifier les équilibres stœchiométriques avec des effets écologiques à l'aval à investiguer. Pour les sédiments, selon qu'on est dans un contexte global de surplus ou de déficit, le stockage aura un effet considéré comme bénéfique ou néfaste. Enfin si la retenue est installée en remplacement d'une zone humide naturelle, son effet positif de réduction des flux de nitrate doit être comparé avec l'efficacité en la matière de cette zone humide.

- **Production de substances préjudiciables** aux écosystèmes et à la santé humaine : les conditions favorables à l'eutrophisation dans les retenues créent un risque pour la santé humaine, comme évoqué plus haut, ou compliquent le pompage de l'eau. L'eutrophisation correspond à une modification du fonctionnement trophique des écosystèmes aquatiques entraînant une surproduction végétale associée à la prolifération de certains organismes aux dépens d'autres dont la mortalité massive entretient à son tour le phénomène, d'où l'effet perturbateur sur les communautés originelles. La production de COD, accentuée par l'eutrophisation, même en l'absence de toxines, gêne l'usage de l'eau comme eau potable. A l'aval des retenues les perturbations du régime des flux (pics de NH_4^+ , NH_3 , PO_4^{3-}), du transfert de sédiments et des contaminants associés, de l'hydromorphologie de la rivière, les modifications de température et de teneur en oxygène dissous ont aussi des conséquences sur de nombreux habitats biologiques.

¹⁶ Débit réservé entendu ici au sens de débit laissé au milieu sans préjuger de la façon dont il est défini (débit minimum biologique, débit égal au 1/10^{ème} du module ou autre).

- **Régulation du climat** : en retenant des sédiments organiques une retenue participe au stockage du carbone. Inversement, en conditions anoxiques, divers gaz à effet de serre peuvent être produits : N₂O, CH₄. A l'échelle d'une retenue, l'impact est sans doute peu significatif. A l'échelle du cumul cet impact sera peut-être à considérer.

C.III Ecologie

C.III.9 Zone d'emprise de la retenue

9.a Destruction d'écosystèmes préexistants

L'effet le plus direct de la mise en place d'une retenue résulte de son implantation même et de la destruction des milieux préexistants dans sa zone d'emprise qu'elle engendre. En la matière, il existe une très grande diversité de situations, liées à la fois au type de retenue mise en place et au contexte régional de son implantation, les zones détruites par l'emprise directe d'une retenue pouvant aller de terrains agricoles cultivés à des écosystèmes beaucoup plus naturels.

Dans une très grande majorité de cas cependant, l'implantation d'une retenue profite de contextes topographiques particuliers (dépression naturelle, vallon, vallée ...) qui conditionnent l'existence de milieux naturels humides ou aquatiques. Ainsi l'implantation de retenues est susceptible de s'accompagner très fréquemment de la destruction d'écosystèmes tels que : prairies humides, mares, tourbières, forêts alluviales, sources, portion de cours d'eau pérennes ou intermittents etc., de taille parfois réduite, mais qui constituent potentiellement des réservoirs importants de biodiversité et de services écologiques en abritant notamment de nombreuses espèces à fort enjeu patrimonial.

Si cette question des destructions des écosystèmes initiaux est au cœur des études préalables à l'implantation d'une retenue, elle est en revanche souvent absente ou minimisée (limitée alors aux cours d'eau proprement dits) dans les bilans portant sur l'impact global de retenues^{2,17}. Cette situation résulte du fait que ces bilans globaux sont réalisés a posteriori, l'état des milieux prévalant avant la construction des retenues étant souvent totalement ignoré.

La qualification du milieu pré-existant, lorsqu'elle est effectuée, l'est souvent de façon limitée, considérant des aspects très sommaires, comme par exemple la présence de zone humide, le choix d'une localisation éloignée du cours d'eau, l'impact sur les haies et non pas la qualité écologique du milieu d'origine. Collectivement, les zones humides et les étangs abritent et une très forte biodiversité, souvent plus grande que dans les cours d'eau et de nombreuses espèces rares¹⁸.

9.b La retenue : un nouvel écosystème

La retenue constitue un nouvel écosystème qui succède au(x) milieu(x) préexistant(s). Le présent rapport n'est pas le lieu pour présenter en détail l'écologie des retenues artificielles. Seuls quelques points saillants, utiles pour comprendre l'effet des retenues sont évoqués ici.

Globalement, les nouvelles conditions écologiques générées par la retenue vont être propices à l'implantation et au développement d'espèces adaptées aux eaux calmes. La richesse en espèces floristiques et faunistiques d'une retenue dépend de sa productivité primaire¹⁹ et de sa taille²⁰ mais dépend également de très nombreux

¹⁷ Souchon Y. & Nicolas V. (2011) Barrages et seuils : principaux impacts environnementaux. Onema-Cemagref. Partenariat 2011 – Dynamique physique– Action 23-24 Restauration. 28 p.

¹⁸ Williams, P., M. Whitfield, et al. (2004). "Comparative biodiversity of rivers, streams, ditches and ponds in an agricultural landscape in Southern England." *Biological Conservation* 115(2): 329-341.

¹⁹ Dodson S. I., Arnott S. E. & Cottingham K. L. (2000). The relationship in lake communities between primary productivity and species richness. *Ecology*, **81**: 2662-2679.

autres facteurs (diversité et pente des rives, diversité des conditions abiotiques, mode de gestion, possibilités de colonisation via des milieux adjacents...). Les retenues peuvent jouer un rôle crucial dans l'accueil et le maintien de certaines espèces rares et patrimoniales, en témoigne la richesse écologique de certaines zones d'étangs. Même des plans d'eau anthropiques, comme des bassins d'autoroute, peuvent abriter des espèces rares et contribuent à la biodiversité à l'échelle régionale^{21, 22, 23}. A titre d'exemple, le maintien de certaines populations d'oiseau comme la guifette moustac ou le grèbe à cou noir dépend actuellement étroitement (voire exclusivement) de l'existence d'étangs d'origine artificielle utilisés en substitution d'habitats naturels (marais). Des populations de certaines espèces de libellules patrimoniales comme la Leucorrhine à gros thorax peuvent également dépendre d'étangs anthropiques utilisés pour la pisciculture^{24, 25}. Ce rôle potentiel vis-à-vis de la biodiversité ne doit pas occulter le fait que la plupart des retenues utilisées pour l'irrigation, du fait de leur conception (habitat homogène) et de leur gestion (variation forte des hauteurs d'eau) présentent un attrait bien plus limité vis-à-vis de la faune et de la flore.

Les retenues constituent également des écosystèmes privilégiés pour le développement d'espèces exotiques et/ou invasives²⁶. Ainsi, en France, des espèces exotiques envahissantes comme la jussie (*Ludwigia* sp.) ou l'écrevisse de Louisiane (*Procambarus clarkii*), dont la régulation des populations pour limiter l'impact sur la faune et la flore autochtone pose de gros problèmes, bénéficient très largement du développement des retenues.

C.III.10 Cours d'eau adjacent (amont-aval)

Globalement, d'un point de vue biologique, l'effet induit par une retenue sur le milieu récepteur (en l'occurrence le cours d'eau) résulte de deux grandes familles de processus²⁷ : (i) des modifications des conditions environnementales, engendrées par la retenue, essentiellement vers l'aval, induisant en conséquence des ajustements des communautés biologiques en place et (ii) des modifications au niveau des processus de dispersion des organismes dont les effets peuvent se faire ressentir aussi bien à l'aval qu'à l'amont de la retenue.

D'une manière générale, on conçoit aisément que l'effet d'une retenue sur le milieu récepteur dépendra de sa connexion plus ou moins étroite au réseau hydrographique. Ainsi un plan d'eau de type « retenue alimentée par pompage », physiquement déconnecté du réseau hydrographique, devrait avoir un potentiel d'impact relativement faible sur les cours d'eau (si ce n'est par des modifications de l'hydrologie via des prélèvements en nappe, des restitutions via l'irrigation ou des transferts d'organismes vivants empruntant des routes terrestres). A l'inverse, les retenues implantées directement sur un réseau hydrographique présentent a priori le potentiel d'effet maximum pour l'écologie du cours d'eau.

10.a Modifications des conditions écologiques vers l'aval

Influence de l'évolution des débits L'une des conséquences marquantes de l'implantation d'une retenue est la transformation de l'hydrologie en aval de la restitution, transformation qui peut prendre des formes diverses

²⁰ Oertli, B., D. Auderset Joye, et al. (2002). "Does size matter? The relationship between pond area and biodiversity." *Biological Conservation* 104(1): 59-70

²¹ Le Viol, I., J. Mocq, et al. (2009). "The contribution of motorway stormwater retention ponds to the biodiversity of aquatic macroinvertebrates." *Biological Conservation* 142(12): 3163-3171.

²² Le Viol, I., F. Chiron, et al. (2012). "More amphibians than expected in highway stormwater ponds." *Ecological Engineering* 47: 146-154.

²³ Hassall, C. and S. Anderson (2015). "Stormwater ponds can contain comparable biodiversity to unmanaged wetlands in urban areas." *Hydrobiologia* 745(1): 137-149.

²⁴ Leclerc, D., S. Angélibert, et al. (2010). "Les libellules (Odonates) des étangs piscicoles de la Dombes." *Martinia* 26(3-4): 98-108.

²⁵ Angélibert, S., V. Rosset, et al. (2010). "The pond biodiversity index "IBEM": a new tool for the rapid assessment of biodiversity in ponds from Switzerland. Part 1. Index development." *Limnetica* 29(1): 93-104.

²⁶ Ebel J. D. & Lowe W. H. (2013) Constructed Ponds and Small Stream Habitats: Hypothesized Interactions and Methods to Minimize Impacts. *Journal of Water Resource and Protection*, 5: 723-731.

²⁷ Van Looy K., Tormos T., Souchon Y. (2014) Disentangling dam impacts in river networks. *Ecological Indicators* 37: 10–20

selon la retenue et son mode de gestion (cf. C.I.). Les manifestations extrêmes d'effet écologique liées à l'hydrologie s'observent sur les retenues de tête de bassin utilisées pour l'irrigation qui peuvent intercepter, en période estivale, la totalité des écoulements et donc induire en aval des assècs étendus et prolongés particulièrement délétères pour la faune et la flore du cours d'eau. Au-delà de ces situations extrêmes, la plupart des retenues, soit du fait des prélèvements pour l'irrigation, soit en exacerbant l'évaporation, sont susceptibles de conduire à une baisse des débits d'étiages estivaux qui s'accompagne d'une élévation de température et donc à une modification des conditions d'habitat, a priori particulièrement pénalisante pour les espèces rhéophiles, simultanément psychrophiles. Ces problématiques d'impact des débits peuvent être concrètement abordées et quantifiées à partir d'outils comme EVHA²⁸ ou Estimhab²⁹. Un paramètre clé est le rapport entre le débit d'alimentation et de restitution, quand il existe, par rapport au volume.

A l'inverse, certaines retenues peuvent contribuer à pérenniser les écoulements aval en période estivale. Paradoxalement, une telle situation peut constituer un impact écologique négatif pour des cours d'eau naturellement intermittents dont la faune et la flore étaient initialement adaptées aux périodes d'assec³⁰.

Les retenues gérées pour le soutien d'étiage sont généralement considérées comme bénéfiques pour le fonctionnement écologique des cours d'eau dans la mesure où elles atténuent la sévérité des étiages³¹ dans les zones où les prélèvements peuvent être importants à cette période. Cette vision mérite néanmoins d'être très sensiblement nuancée. En effet ce mode de gestion tend à inverser le cycle hydrologique naturel (avec un stockage dans la retenue en hiver et une restitution, effaçant l'étiage naturel en été) et à écrêter les événements extrêmes¹⁷ (cf. C.I.2). La réduction ou la disparition des crues et débordements qui en résultent se révèle préjudiciable au fonctionnement écologique du cours d'eau, par exemple pour sa forêt alluviale. Par ailleurs, ce mode de gestion conduit à un phénomène de « désynchronisation » entre l'hydrologie du cours d'eau et la phénologie des organismes, potentiellement néfaste à la plupart des espèces.

Influence de l'évolution des transferts solides. Les retenues, plus particulièrement celles implantées sur le réseau hydrographique modifient les flux sédimentaires. Pour les sédiments grossiers issus de l'amont, elles constituent en effet un piège conduisant à un déficit de fourniture sédimentaire en aval et potentiellement à un pavage des cours d'eau et à des phénomènes d'érosion en aval de retenues (cf. C.II6.b). Les sédiments constituent un compartiment essentiel pour les activités biologiques (habitat pour de nombreux invertébrés, lieu de ponte pour les poissons lithophiles, substrat pour l'enracinement des végétaux...), la perturbation des processus sédimentaires engendrée par une retenue est donc susceptible d'entraîner des conséquences très importantes pour les organismes vivants.

Les retenues, lorsqu'elles sont le siège de processus d'eutrophisation, peuvent en revanche constituer des sources de MES issues de l'activité biologique. En se déposant en aval de la retenue, ces sédiments fins colmatent les sédiments plus grossiers et se révèlent particulièrement pénalisants pour certains organismes comme les invertébrés de la zone benthique et de la zone hyporhéique³² ou les poissons pondant sur graviers,

²⁸ Ginot V., Souchon Y., Capra H., Breil P. & Valentin S. (1998). Logiciel EVHA. Evaluation de l'habitat physique des poissons en rivière (version 2.0.). Guide méthodologique. Cemagref Lyon BEA/LHQ, p.76

²⁹ Souchon Y., Lamouroux N., Capra H. & Chandèsris, A. (2003). La méthodologie Estimhab dans le paysage des méthodes de microhabitat. Note technique, Cemagref Lyon, Unité Bely, Laboratoire d'hydroécologie quantitative, p.9

³⁰ Pelte T., Navarro L., Stroffek S., Dupré la Tour J., Datry T., Langon M. Martinez P.-J., Delhaye H. (2014) Les cours d'eau intermittents. Elements de connaissance et premières préconisations. Note du Secrétariat Technique du Sdage. Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Irstea, Onema, Dréal Rhône-Alpes.

³¹ Boubé D. & Hétier A. (2012) Analyse des impacts sur le milieu aquatique de retenues de soutien des étiages dans le Sud-Ouest de la France. Retour d'expérience de la CACG. 16 p.

³² Descloux S., Datry T. & Usseglio-Polatera P. (2014) Trait based structure of invertebrates along a gradient of sediment colmation: benthos versus hyporheos responses. Science of the Total Environment, 466/467, 265-276.

en altérant la connectivité verticale³³, en réduisant la diversité des habitats³⁴ et en modifiant leurs conditions biogéochimiques³⁵ (e.g. accroissement du risque d'anoxie).

Influence de l'évolution de la température et de la qualité d'eau (cf. C.II6.b). L'impact thermique des retenues sur le cours d'eau aval est extrêmement variable selon leur taille, leur mode de restitution (eau de surface ou eau de fond) et leur débit d'alimentation. Globalement des restitutions d'eau du fond tendent à tamponner les variations thermiques naturelles du cours d'eau et à réduire sensiblement les températures estivales permettant potentiellement l'installation d'espèces d'eau froide³⁶. A l'inverse, les restitutions par la surface entraînent un réchauffement printanier et estival de cours d'eau qui peut atteindre des valeurs particulièrement élevées au regard des exigences thermiques des espèces (des réchauffements de 4 à 7 °C sont cités³⁷). De tels niveaux de réchauffement, même s'ils semblent s'atténuer vers l'aval relativement rapidement³⁸, sont susceptibles d'avoir des conséquences biologiques importantes : disparition locale d'espèces d'eau froide, implantation d'espèces thermophiles, perturbation des cycles biologiques en relation avec l'altération du régime des températures³⁹ ... Ainsi, quand les températures létales ne sont pas atteintes, ce sont souvent les altérations du régime thermique qui sont à l'origine de la disparition des espèces qui ont besoin d'une succession de séquences de températures bien déterminée pour pouvoir boucler leur cycle avec succès : e.g. pour des éphéméroptères d'eaux froides (i) une température de l'eau proche de 0°C pour lever la diapause embryonnaire ; (ii) une période de 10-13°C pour permettre le développement des œufs et (iii) une période de 2,5 à 4 mois à une température de 18-28°C pour permettre le développement larvaire jusqu'à maturité.

Par ailleurs, la température agit indirectement sur les organismes via son influence sur l'oxygénation de l'eau. Ainsi le réchauffement du cours d'eau lié à une retenue implique, de fait, une diminution d'oxygénation avec des conséquences potentielles sur les espèces animales.

Au-delà de l'aspect thermique, les retenues sont susceptibles d'impacter la physico-chimie du cours d'eau de manière extrêmement variée. A ce stade, et compte tenu des retours d'expériences disponibles, il reste difficile d'en tirer des enseignements généralisables du point de vue des conséquences biologiques.

La vidange de la retenue. Bien qu'il s'agisse d'un évènement rare, la vidange fait partie intégrante du cycle « normal » de fonctionnement de la plupart des retenues. Cette étape constitue un traumatisme potentiel pour le cours d'eau situé en aval. Vers l'aval, les vidanges de retenues se manifestent entre autre par un relargage des sédiments fins piégés dans la retenue sous forme de MES, une diminution temporaire parfois très conséquente de la teneur en oxygène et une augmentation concomitante de la teneur en ammonium⁴⁰. Ce flux polluant entraîne potentiellement un déplacement des organismes et des phénomènes de mortalité plus ou moins intenses selon les niveaux de désoxygénation atteints. Par ailleurs les MES en se déposant peuvent colmater le fond du cours d'eau sur des distances importantes et affecter durablement son fonctionnement écologique. Ces effets peuvent contribuer à une forte érosion de la diversité macrobenthique, par suite de la

³³ Boulton A.J. (2007) Hyporheic rehabilitation in rivers: restoring vertical connectivity. *Freshwater Biology*, 52, 632-650.

³⁴ Maridet L. & Philippe M. (1995) Influence of substrate characteristics on the vertical distribution of stream macroinvertebrates in the hyporheic zone, *Folia Faculty of Science Natural University of Masarykiana Brunensis*; 91, 101-105.

³⁵ Gayraud S., Statzner B., Bady P., Haybach A., Schöll F., Usseglio-Polatera P., Bacchi M. (2003) Invertebrate traits for the biomonitoring of European large rivers: an initial assessment of alternative metrics. *Freshwater Biology*, 48: 2045-2064.

³⁶ Un tel phénomène est observé de manière particulièrement marquée sur des grandes retenues et est susceptible de jouer, de manière plus atténuée, sur des retenues plus modestes. voir Descamps H., Capblanq J., Casanova H., Tourenq J.N. (1979). *Hydrobiology of some regulated rivers in the southwest of France*. In Ward J.V. and Stanford J.A., *The ecology of regulated streams*, 273-288, Plénum Press, New York.

³⁷ D'après Touchard (1999) in CACG (2001) *Etude de l'impact des petites retenues artificielles sur les milieux*. Rapport de phase 1. Etude Inter-Agences de l'Eau. 188 p.

³⁸ Ce qui n'est pas toujours le cas, par exemple, Lehmkuhl (1972)³⁹ note un impact encore sensible 70 miles à l'aval d'un réservoir sur la Saskatchewan River.

³⁹ Lehmkuhl D.M. (1972) Change in thermal regime as a cause of reduction of benthic fauna downstream of a reservoir. *Journal Fisheries Research Board of Canada*, 29, 1329-1332.

⁴⁰ Rambaud et al. (1988) et DIREN Limousin (1994) in CACG (2001) *Etude de l'impact des petites retenues artificielles sur les milieux*. Rapport de phase 1. Etude Inter-Agences de l'Eau. 188 p

banalisation du substrat et d'une redistribution simplifiée des niches écologiques⁴¹. Certaines pratiques permettent de limiter les impacts négatifs des vidanges sans pouvoir les éviter totalement.

10.b Impacts sur les processus de dispersion

10.b.i La retenue : un obstacle aux déplacements des organismes.

Une retenue, par la digue, le seuil ou le barrage qui la constitue, mais aussi par les modifications des conditions environnementales générées en amont et en aval de cet ouvrage, engendre une discontinuité au sein du réseau hydrographique plus ou moins difficilement franchissable par les organismes. Bien entendu, cette discontinuité sera « vécue » de manière différente selon les organismes, par exemple entre un crustacé, strictement inféodé au milieu aquatique, et un insecte aquatique, capable d'utiliser des routes de dispersion terrestres ou aériennes au stade adulte. En édifiaant un obstacle aux déplacements, la retenue peut générer des effets rapides et catastrophiques sur une population lorsqu'elle coupe l'accès à des habitats indispensables au cycle biologique de l'espèce. L'exemple des poissons grands migrateurs amphihalins et de l'inaccessibilité des frayères engendrée par l'édification de retenues est bien connu. Mais le problème peut se poser dans des termes tout à fait comparables, y compris dans le cas de petites retenues, pour des salmonidés ou d'autres espèces piscicoles dulcicoles qui effectuent des migrations entre leurs habitats quotidiens et leurs zones de ponte. Au-delà de ces effets drastiques et quasi immédiats, l'influence de la retenue en tant qu'obstacle aux déplacements peut se manifester de manière beaucoup plus subtile et lentement. Ainsi même si deux sous-populations (et les habitats qui leur sont nécessaires) persistent de part et d'autre d'une retenue, la réduction ou la suppression des échanges entre elles est susceptible d'entraîner des déclin, voire des extinctions locales sur le long terme, notamment pour les sous populations de tête de bassin⁴².

10.b.ii La retenue : une source de colonisation

Le fait qu'une retenue génère dans le plan d'eau des nouvelles conditions écologiques propices au développement d'espèces initialement absentes a été évoqué précédemment. A partir du plan d'eau, ces « nouvelles » espèces vont alors être en mesure de coloniser le réseau hydrographique en aval et/ou en amont de la retenue. Ce phénomène est d'autant plus visible qu'il existe un contraste fort entre les conditions écologiques du cours d'eau et celles du plan d'eau. Il a particulièrement été décrit pour les peuplements de poissons sur les petits cours d'eau de tête de bassin, l'effet des retenues se manifestant alors par un mélange entre des espèces salmonicoles typiques du cours d'eau et des espèces strictement limnophiles et thermophiles issues de la retenue (carpe, perche soleil par exemple).

Pour les espèces piscicoles, ce phénomène de colonisation à partir du plan d'eau peut prendre une ampleur considérable (les espèces issues du plan d'eau devenant prédominantes dans le peuplement du cours d'eau) et se manifester sur plusieurs kilomètres notamment vers l'aval. Il ne se limite pas aux retenues implantées sur cours d'eau, mais s'observe également pour des retenues en dérivation, y compris quand la connexion avec le réseau hydrographique n'est pas permanente⁴³.

Aujourd'hui, cette problématique prend une dimension nouvelle avec le développement de nouvelles espèces invasives évoquées précédemment et le rôle de facilitation que pourraient jouer les retenues dans leur diffusion à travers le réseau hydrographique.

La question de l'interaction entre ces espèces issues des retenues et les communautés des cours d'eau récepteurs reste encore largement ouverte : se surajoutent elles aux espèces déjà en place ou modifient elles

⁴¹ Usseglio-Polatera P. & Bournaud M. (1989) Trichoptera and Ephemeroptera as indicators of environmental changes of the Rhone River at Lyons over the last twenty-five years. *Regulated Rivers, Research & Management*, 4, 249-262.

⁴² Charles S., Bravo De La Parra R., Mallet J.-P., Persat H., Auger P. (2000) Document Annual spawning migrations in modelling brown trout population dynamics inside an arborescent river network. *Ecological Modelling* 133: 15-31.

⁴³ Le Pichon C., Tales E, Clément F., Leclerc N., Gorges G., Zahm A. (2013) Effet des discontinuités physiques sur la distribution spatiale des poissons en tête de bassin : cas de l'Orgeval. In L'observation long terme de l'environnement. Exemple du bassin de l'Orgeval. Loumagne C. Tallec G. (Coord.) Editions Quae, Versailles p199-212.

(par prédation compétition...) les communautés initiales ? Des observations concernant les écrevisses (écrevisses à pattes blanches, typiques des petits cours d'eau non altérés, vs. écrevisses exotiques généralement issues de plans d'eau) suggèrent que, au moins dans certains cas, des espèces issues des retenues peuvent exclure (via différentes interactions biotiques) des espèces présentes initialement dans le cours d'eau. Il a été observé que sur les plans d'eau à fort marnage annuel, les Jussies se développent beaucoup moins que sur ceux dont le niveau varie peu⁴⁴.

10.c Effets globaux - Interactions

Bien évidemment, les phénomènes détaillés ci-dessus (modifications des conditions abiotiques, obstacles aux dispersions, colonisations) agissent conjointement et il est difficile de faire la part de leurs effets respectifs sur les biocénoses, les conséquences étant observées de manière globale. Des approches large échelle, dépassant les études de cas, permettent de mieux apprécier l'ampleur de ces effets globaux liés aux retenues et témoignent de leur influence potentielle forte sur divers compartiments biologiques. Par exemple, sur le bassin de la Seine, des modèles développés pour expliquer la distribution des poissons dans le réseau hydrographique montrent que la surface des plans d'eau (très majoritairement des retenues) sur le bassin versant proche constitue un facteur important pour expliquer la présence de 9 espèces de poissons sur les 25 étudiées (soit 36%)⁴⁵. A l'échelle de la France entière, un travail récent montre que la présence de retenues impacte significativement les communautés de diatomées, de macrophytes, de macroinvertébrés et de poissons et affecte significativement les scores des bioindicateurs qui leur sont associés (respectivement IBD, IBMR, IBGN et IPR)⁴⁶ ; le compartiment poissons serait toutefois le plus fortement impacté.

⁴⁴ Communication personnelle du bureau d'études Hydro Concept (Vendée).

⁴⁵ Belliard J., Gorges G., Hette N., Le Pichon C., Tales E., Zahm A. (2011) La répartition des peuplements de poissons dans le bassin de la Seine: modèles à large échelle et focus sur les petits bassins versants franciliens. Programme PIREN-Seine Phase V: Peuplements de poissons dans le bassin de la Seine. 52p.

⁴⁶ Marzina A., Archambault V., Belliard J., Chauvin C., Delmas F., Pont D. (2012) Ecological assessment of running waters: Do macrophytes, macroinvertebrates, diatoms and fish show similar responses to human pressures? *Ecological Indicators* 23: 56–65.

Encadré 1 : Retenues d'altitude pour neige de culture.

Les retenues d'altitude sont des ouvrages hydrauliques implantés dans les stations de loisirs de montagne et destinés à créer une réserve d'eau, pour la production de neige, parfois pour un double usage AEP - production de neige. L'objectif économique est de garantir l'ouverture du domaine skiable lors des hivers où l'enneigement est insuffisant.

Ce sont des ouvrages (déblai-remblai) de petite taille (en général hauteur des retenues comprise entre 5 et 10 m), étanchéifiés, stockant des volumes d'eau limités (volume moyen actuel 40 000 m³, à comparer avec les 3 à 4 000 m³ nécessaires pour enneiger artificiellement un hectare de piste). 60% des dispositifs artificiels d'enneigement intègrent des retenues d'eau. L'eau est mise en réserve en général en automne ce qui permet d'étaler les prélèvements. Elle provient de torrents, de ruissellements, de trop pleins d'eau potable, de lacs naturels ou hydroélectriques... Cette réserve initiale peut être insuffisante et des prélèvements hivernaux dans la ressource naturelle sont alors nécessaires⁴⁷.

Il existe peu d'études et de publications scientifiques ou techniques traitant des effets environnementaux de ces retenues, ceci malgré un débat assez vif régionalement^{48, 49}. La dimension des ouvrages n'oblige pas à des études d'impact complètes et seules des notices d'incidence sont à fournir. Une étude Irstea BARALTISUR 2007 intègre les aspects effets risques environnementaux. Des risques pour la sécurité publique sont aussi évalués.

Spécificités de ces retenues

Contexte : altitude + pente = risques spécifiques

Elles se situent entre 1200 m et 3000 m d'altitude (gel, précipitation élevée... variabilité climatique) et toujours dans un contexte de pentes fortes à l'amont et à l'aval ; ces pentes sont rarement stabilisées (la géomorphogenèse est active, d'où glissements, éboulements, solifluxions, selon le substratum). En conséquence de ce binôme pente altitude :

- La dynamique de reconstitution du couvert végétal est très lente d'où des difficultés de cicatrisation des travaux et une **sensibilité particulière à l'érosion**, même pour des pentes faibles, («*toute dégradation va s'inscrire dans une durée plus longue qu'à de plus faibles altitudes et les dynamiques naturelles de reconstitution des sols et de recolonisation végétale peuvent s'étaler sur des décennies*»⁵⁰);
- Les ouvrages sont soumis aux avalanches et autres aléas ; du fait de leur position dominante et dans ce contexte de pentes, ils représentent pour l'aval un **risque pour la sécurité publique**.

Construction en milieux fragiles

Les retenues sont implantées sur des zones de replat, souvent au dépend de milieux à forte biodiversité, notamment de bas marais, d'où la destruction fréquente d'habitats classés.

Leur construction nécessite des travaux importants à l'aval comme la création de routes d'accès, ceci dans un contexte de sensibilité de sols à l'érosion.

Il existe aussi parfois des travaux à l'amont pour capter le ruissellement, ce qui induit le même type de problème vis-à-vis de l'érosion.

⁴⁷ Badré M., Prime J., Ribière G. (2009). Neige de culture : état des lieux et impacts environnementaux, note socioéconomique- Conseil général de l'environnement et du développement durable Rapport 152p <http://www.cgedd.developpement/>

⁴⁸ De Jong, C. (2007). "Artificial snow drains mountain resources" Environmental Research Web, Talking Point Article. (<http://environmentalresearchweb.org/cws/article/opinion/30703>)

⁴⁹ Canardages (2010). Neige de culture. La fausse neige nous prend pour des flacons « Canard enchainé »

⁵⁰ A Evette, L Peyras, H François et S Gaucherand, (2011) « Risques et impacts environnementaux des retenues d'altitude pour la production de neige de culture dans un contexte de changement climatique », Revue de Géographie Alpine | Journal of Alpine Research 99-4 <http://rga.revues.org/1471>

Fonctionnement

Il existe des difficultés liées au fonctionnement de ces aménagements :

- l'alimentation en eau peut être difficile, la réserve aquifère étant faible en montagne,
- les prélèvements d'eau hivernaux dans la ressource naturelle, quand ils sont nécessaires peuvent souvent avoir un impact élevé, car ils sont effectués à l'étiage, et pendant le pic de pollution,
- la qualité bactériologique des eaux stockées est souvent mauvaise en montagne en zone pastorale ou de restaurants d'altitude,
- la retenue se caractérise en outre par une très forte variabilité des niveaux et un régime particulier, avec un niveau de basses eaux hivernal et des phénomènes de gel. L'enneigement crée d'autres risques qui ne sont pas mentionnés ici,
- la diminution du débit peut induire un gel en aval de la retenue. Le maintien d'un débit minimum peut être nécessaire pour s'affranchir de ce risque.

Conséquences pour l'expertise :

Il est important que des simulations permettant de reconstituer le régime de prélèvement soient effectuées, en balayant différents scénarios climatiques, notamment vis-à-vis de l'enneigement et de la température. Il est essentiel de qu'un point de contrôle de la qualité de l'eau soit assuré avant l'aménagement de la retenue, puis en amont/aval (ou eau restituée) de la retenue.

Enfin, dans le cas des stations de ski, l'effet cumulé de ces retenues est à envisager en intégrant également les impacts des autres dispositifs et aménagements permettant l'enneigement artificiel.

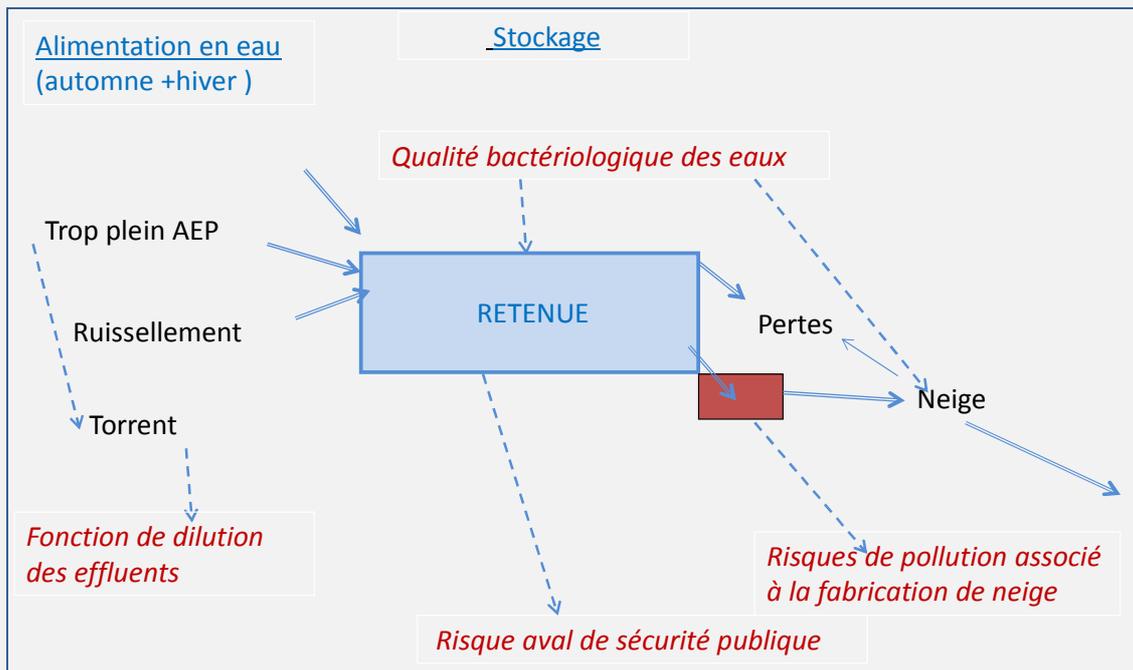


Figure 8 : Schéma récapitulatif du fonctionnement d'une retenue pour neige de culture

Partie D. EFFETS CUMULES

D.I Données, observations, études disponibles

Les observations et études spécifiques sur les effets cumulés des retenues sur un bassin versant sont rares. Les études qui semblent apporter le plus de connaissances sur cette question sont les études volumes prélevables, bien qu'elles ne soient pas spécifiques aux retenues, puisqu'elles intègrent tous les types de prélèvement au milieu aquatique. Toutefois, parce qu'elles abordent le fonctionnement du bassin versant considéré dans sa globalité, elles apportent des éléments intéressants.

D.I.1 Hydrologie-hydrogéologie

1.a Introduction

Le texte ci-dessous se fonde principalement sur la lecture et l'analyse d'études opérationnelles de gestion de l'eau, destinées à la quantification de l'effet cumulé hydrologique des retenues ou sur des études de volumes prélevables (EVP) à l'échelle d'un territoire ou d'un bassin versant de gestion. Force est de constater qu'il n'existe pas de démarche, de méthode et d'indicateur hydrologique d'impact commun à l'ensemble des études. L'effet cumulé est évalué sur des volumes ou des flux hydrologiques pouvant être différents d'une étude à l'autre. Il peut s'agir de l'effet sur le débit d'étiage et/ou le débit de point et/ou la durée des étiages, etc. Aussi pour chaque type d'effet (e.g. la date de reprise des écoulements), nous ne présentons pas réellement une synthèse des résultats présentés dans l'ensemble des études, mais les quelques éléments que nous avons pu identifier au sein des rapports d'étude consultés. Ces éléments visent à cadrer les ordres de grandeur des impacts. Il serait ardu d'en tirer des généralités, notamment en termes de relations entre les caractéristiques du réseau des retenues, le contexte agro-pédoclimatique, l'hydrologie du bassin versant et l'usage des retenues sur la base des résultats disponibles. La diversité des méthodes et outils utilisés dans les études appelle une analyse critique (cf. section méthodes existantes) avant toute tentative d'établir des règles générales.

1.b Effet sur le débit

1.b.i Débit ou volume annuel

Les retenues retenant une partie du ruissellement et des débits s'écoulant dans le réseau hydrographique, la modification du débit ou volume annuel est un des premiers impacts attendus d'un réseau de retenues. Cet effet n'est pas systématiquement estimé par les études que nous avons pu consulter ; les études s'attachent le plus souvent à des débits caractéristiques et des périodes clés de l'année hydrologique (période de remplissage à la reprise des écoulements, en crue ou pendant les étiages). En outre, la reconstitution *a posteriori* de l'effet sur le débit annuel avec les résultats présentés dans les études est rarement possible.

L'effet cumulé sur le débit annuel considéré dans les études d'impact de retenues correspond soit au volume (capacité) cumulé de l'ensemble des retenues, soit au volume prélevé cumulé dans l'ensemble des retenues sur le bassin versant considéré. En croisant l'étude de Guéguen (2013)⁶ et l'étude Inter-agences², il est possible d'avoir une estimation pour le bassin de l'Yvel (315 km²) à Loyat (56). Sur ce bassin, le volume prélevé annuel dans l'ensemble des retenues est estimé à 0,38 Mm³, correspondant à un débit de 0,01 m³/s; les retenues sont considérées réduire le débit moyen annuel de l'équivalent de ce débit (Etude Inter-agence), le module (1968-2001) du bassin étant de 2.20 m³/s, soit un volume de 69,4 M m³. L'impact cumulé des retenues dans le cas d'espèce sur le module inter-annuel est donc très faible (<1%). Se fondant sur un indicateur de taux de prélèvement (cf. section méthodes), l'étude Inter-Agence (2001) a estimé également des impacts assez faibles,

avec une réduction du volume écoulé annuel de 0,9 %, 4,7 %, 0,0 % et 0, % respectivement pour les bassins du Doux, de la Séoune, de Vaux et de l'Yvel. Cependant, des valeurs plus importantes, voire beaucoup plus importantes, sont estimées par Delbreilh (1991)⁸ sur le bassin versant de la Séoune, et d'un de ses affluents, la Gandaille, avec des valeurs allant de 6 % à près de 25 % (Figure 9). La différence de valeurs pour le bassin de la Séoune entre ces deux études tient à la prise en compte ou pas de l'usage des retenues et de leur dynamique de vidange, puisque Delbreilh considère que toutes les retenues sont entièrement vidangées chaque année, majorant fortement ainsi l'impact des retenues sur le volume d'eau écoulé en rivière. L'exemple du bassin versant de la Séoune illustre clairement la sensibilité des estimations aux hypothèses retenues quant à l'usage et au fonctionnement hydrologique des retenues.

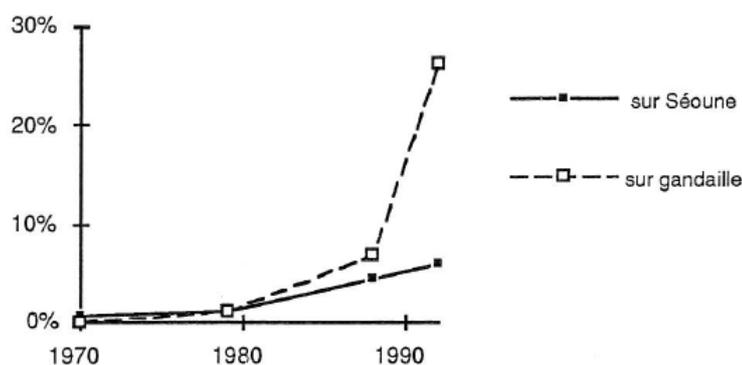


Figure 9 : taux de prélèvement (Volume total des retenues/Volume écoulé annuel) sur le bassin versant de la Séoune (463 km²) et sur un de ses sous bassins versants, la Gandaille (25 km²).

Dans les EVP, la différence entre débit influencé et débit dés-influencé apporte une estimation sur l'impact de l'ensemble des prélèvements et des rejets dans le milieu. Avec les éléments donnés dans les rapports correspondants, il n'est cependant pas possible pour la plupart de ces études de décomposer la part de chacun des prélèvements et des rejets dans l'effet global sur le débit de la rivière, et en particulier d'estimer le poids des retenues dans l'effet.

1.b.ii Régime hydrologique intra-annuel

◆ La reprise des écoulements (automne)

La présence d'un réseau de retenues au sein d'un bassin versant a pour conséquence i) de diminuer les débits à l'automne, une partie des eaux ruisselées sur les versants ou écoulées dans la rivière étant captée par les retenues du bassin versant et ii) d'allonger la période d'étiage dans la rivière.

Allongement des périodes d'étiage : Sur le bassin du Layon à Saint Lambert (49 ; climat « continental », RC=0,1 %), l'impact sur le débit moyen mensuel (1960-2006) estimé par modélisation est marqué essentiellement pour le premier mois de remplissage, quelles que soient la période et la durée de remplissage (Figure 10). Cet impact moyen dans le temps masque une variabilité selon que l'année est « humide » (impact plus faible) ou « sèche » (impact plus fort)⁵¹. Sur le bassin versant de l'Yvel à Loyat (56, 315 km², RC=2,5 % de la surface du BV, climat tempéré et humide) le remplissage des retenues retient le débit écoulé de septembre à décembre (4 mois) en année médiane, et de septembre à mars (6 mois) en année quinquennale sèche (Etude Inter-Agences²). Sur les bassins-versants équipés de nombreuses retenues, où celles qui sont connectées peuvent compenser l'évaporation pendant la période d'étiage, la méconnaissance des caractéristiques et des proportions de « retenues connectées / retenues déconnectées » peut induire une incertitude forte sur l'effet réel des retenues sur l'hydrologie du cours d'eau.

⁵¹ Philippe, E., F. Habets, E. Martin and C. David (2012). Impact des retenues collinaires sur les débits des Pays de la Loire - Rapport final, DREAL Pays de la Loire.

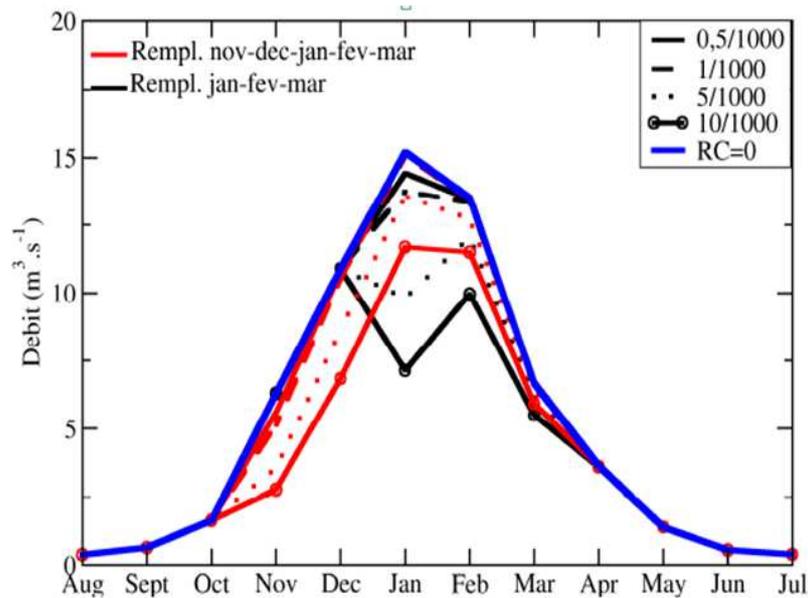
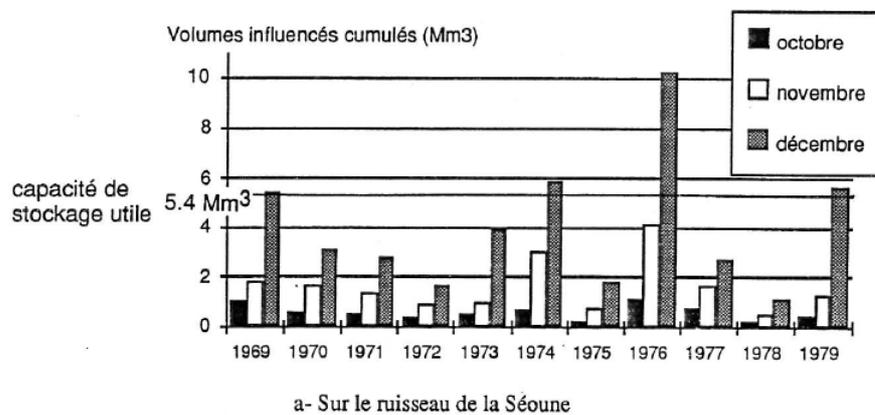


Figure 10 : Débits moyens mensuels du Layon à Saint Lambert du Latay sur la période 1960-2006, sans retenue collinaire (bleu), et avec retenues collinaires s'étendant sur des portions du bassin allant de 0.5/1000 à 10/1000 remplies sur 5 mois (rouge) et 3 mois (noir)

Enfin sur le bassin de la Séoune (498 km² à Agen), l'étude Inter-Agence² met en évidence une diminution du coefficient de ruissellement (rapport pluie/débit) en période de remplissage (octobre-décembre) concomitante à une augmentation du nombre de retenues et des volumes stockés (Figure 11). Sur le même bassin, Delbreilh⁸ estime que les retenues, au plus basses en septembre, auraient capté l'ensemble des écoulements d'octobre à décembre six années sur dix d'une période (1969-1979) marquée par la présence de peu de retenues.



a- Sur le ruisseau de la Séoune
Figure 11 : Volumes captés par les retenues sur le bassin de la Séoune (Delbreilh, 1991)⁸

A la différence du débit annuel, la réduction des débits en période de remplissage est généralement significative. Sur le bassin versant du Layon, elle a été estimée à entre 10 % et 40 % pour le premier mois de la période de remplissage des retenues selon la surface cumulée occupée par le réseau des retenues^{52, 53}.

⁵² SAFEGE Ingénieurs Conseils (2013). Etude sur la gestion quantitative de la ressource en eau sur le territoire du SAGE "Layon Aubance". Rapport de phase 1. Version 1.3, Syndicat Mixte du Bassin du Layon.

⁵³ SAFEGE Ingénieurs Conseils (2014). Etude sur la gestion quantitative de la ressource en eau sur les territoires des SAGE "Layon Aubance" et "Evre Thau Saint-Denis". Détermination des débits d'objectif et des volumes prélevables sur les bassins versants tests. Version 1, Syndicat Mixte du Bassin du Layon.

◆ Le débit de crue

Les retenues sont un facteur de laminage des crues de rivière, soit en stockant l'eau, soit en amortissant la propagation des débits. Quelques études quantifient le phénomène. Celle sur l'Yvel par Cudennec et al.⁵⁴ notamment se concentre sur l'impact de différents scénarios d'aménagement de retenues sur une crue estivale. Ce travail par une approche de modélisation montre une réduction de plus de 50 % du débit de pointe et également une réduction significative du débit en période de récession de crue (Figure 12).

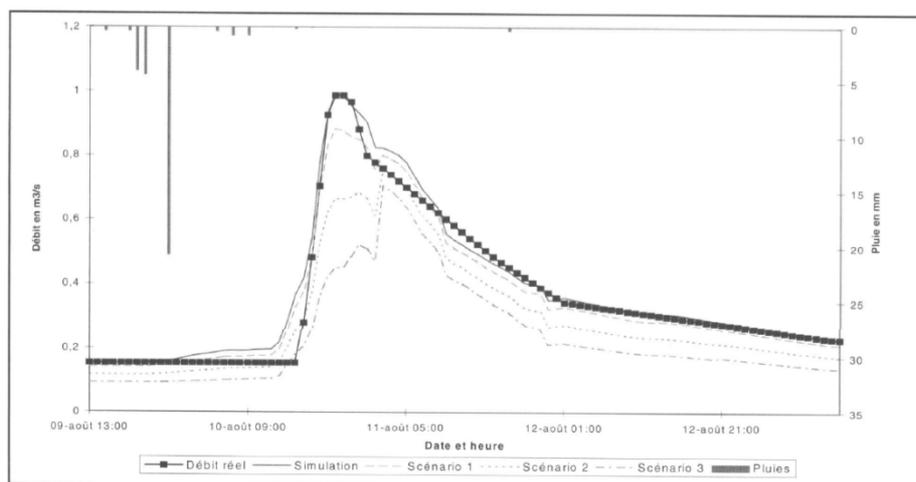


Figure 12 : Simulation de la crue du 10-08-1994 sur le bassin versant de l'Yvel en contexte actuel et selon 3 scénarios : 100, 300 et 500 retenues dans la partie aval du bassin versant

Dans le cas de réserves de substitution alimentées par cours d'eau, quand le débit de celui-ci connaît de fortes variations, une valeur moyenne mensuelle acceptable du débit de prélèvement peut cacher des jours où l'impact peut être fort, compensé par des jours où l'impact peut être faible (en crue).

1.b.iii Régime hydrologique inter-annuel

Sur cet impact, peu de résultats ont pu être identifiés dans les études de gestion sur l'impact à long terme des retenues sur le régime hydrologique des rivières. On note toutefois que certaines des études des volumes prélevables prennent en compte et tentent d'estimer l'évolution des besoins agricoles sur le territoire d'étude, des usages de l'eau relatifs à ces besoins et des prélèvements dans les retenues. Citons par exemple, l'étude sur le Layon⁵³. Cependant, comme souligné précédemment ce type d'étude n'apporte pas une estimation directe de l'impact cumulé des retenues.

1.b.iv Distribution des débits au sein du bassin-versant

Les études de gestion de l'eau de surface dans un territoire se concentrent le plus souvent sur des points de référence du réseau hydrographique. Ces points de référence correspondent aux points du réseau hydrographique délimitant les masses d'eau de surface (au sens de la DCE) et à l'emplacement de stations hydrométriques pour lesquels des mesures de débit sont disponibles. Ce faisant, ces études apportent une première analyse de l'impact sur les débits au sein de grands bassins versants. Pour autant, à une exception près, il n'y a pas à notre connaissance d'études ayant apporté une estimation réellement distribuée par bief du

⁵⁴ Cudennec, C., M. Sarraza and J. Duchesne "Quantification de l'impact de la multiplication des retenues collinaires sur la ressource en eau."

réseau hydrographique de l'impact cumulé des retenues sur le débit. L'exception est l'étude menée par Cereg (2014)⁵⁵ (Cf. Figure 15). Ce travail mené sur le bassin de la Diège dans l'Aveyron montre un impact fort sur les biefs drainant des bassins versants de faible ordre dès lors que ces bassins sont dotés de retenues ; cet impact se réduit progressivement vers l'aval à mesure que la surface drainée augmente et que la densité des retenues diminue.

1.c Impact sur la nappe

A l'exception du cas de réserves alimentées par les nappes et localisées sur le département de la Vendée et la région Poitou-Charentes, aucune étude sur l'effet cumulé des autres types de retenues n'a à notre connaissance été conduite sur les échanges entre l'eau de surface (rivière, retenue) et l'eau souterraine, et sur la dynamique des nappes.

S'agissant donc de l'effet cumulé des réserves alimentées par la nappe, ces études montrent généralement un faible impact des prélèvements hivernaux sur la nappe si ce n'est sur les hivers très secs comme 2002 (période de retour quinquennale) et 2005 (période de retour décennale). En été, du fait de l'utilisation des réserves pour irriguer et de l'abandon de nombreux forages, l'incidence sur les nappes est positive avec des remontées plus ou moins importantes selon les paramètres hydrodynamiques des aquifères. Sur les cours d'eau, le remplissage hivernal a peu d'impact sur les rivières du fait des forts débits au cours de cette période (impact négatif de quelques % par rapport au « débit naturel ») ; par contre comme pour les nappes, le débit en période estivale se trouve amélioré du fait de la substitution de nombreux forages. A noter que dans les cas étudiés, l'eau est généralement prélevée dans des aquifères à inertie très faible, si bien que l'impact des prélèvements sur les débits des cours d'eau est rapide. Dans le cas de nappe à plus forte inertie, les prélèvements hivernaux pourraient venir impacter le débit en période estivale⁵⁶.

Outre ces études qui sont spécifiquement liées à l'analyse de l'impact de projets de réserves alimentées par nappe, il existe de nombreuses études sur les volumes prélevables visant à évaluer l'incidence des prélèvements sur la nappe mais également sur les cours d'eau.

1.d Impact sur l'évaporation

L'eau captée par une retenue s'évapore en fonction des conditions climatiques et de l'environnement géomorphologique local de la retenue (cf. section Impact direct-local). L'effet cumulé des retenues du à ce phénomène peut être double. Le premier est la modification du bilan hydrologique du bassin versant en modifiant le flux évaporatoire global du bassin versant. Les volumes d'eau évaporée à partir des retenues sont en effet différents de ceux évapo-transpirés par un couvert végétal sur une surface équivalente. De surcroît l'eau évaporée ne retourne pas au milieu. Le second impact est lié à un phénomène de compensation de l'évaporation : l'évaporation de l'eau de la retenue tend à diminuer le volume d'eau stocké, perte compensée par un nouveau prélèvement dans le milieu quand le type d'alimentation le permet (5, 3, (4)).

La question de l'évaporation issue des retenues est ignorée dans une partie des études consultées^{6, 57, 58}. Quand la question est traitée, l'impact est supposé correspondre à la différence entre l'évaporation de l'ensemble des retenues et l'évapo-transpiration induite par un couvert végétal (souvent une prairie) d'une surface équivalente à celles des retenues. Parmi ces études, citons :

⁵⁵ Cereg Ingénierie (2014). Etude d'incidence hydrologique des retenues du bassin de la Diège.

⁵⁶ Bichot F., Lavie J., Dequidt D., Thinon-Larminach M. (2010) – Analyse des chroniques piézométriques et hydrologiques avec le logiciel TEMPO pour la gestion des prélèvements en nappe Phase 3 : Actualisation des modèles précédents – Traitement des bassins versants de la Vienne, du Thouet/Sèvre nantaise, du Sud des Charentes et des nappes profondes. BRGM/RP-56481-FR, 481 p., 413 ill., 1 planche hors texte.

⁵⁷ CESAME (2013). Etudes d'estimation des volumes prélevables globaux - Sous bassin versant Ay-Ozon. Rapport Phases 5 à 6 - Version définitive.

⁵⁸ Centre d'Etudes Techniques de Lyon (2011). Détermination des volumes (d'eau) prélevables pour l'irrigation dans le département de l'Allier. Affaire n° 03/09/20915, DREAL Auvergne.

- l'étude d'impact de la zone des Trois Rivières (Rhône-Alpes) : la perte nette annuelle par évaporation induite par les retenues (630 km²) est estimée à 200 000 m³, soit 0,3 mm par unité de surface ou 6L/s. En juillet, cette perte atteint 68 000 m³ soit l'équivalent d'une lame d'eau de 0,11 mm sur l'ensemble du bassin versant ou d'un débit de 26 l/s. Cette perte correspond à la différence entre l'évaporation de la retenue et celle d'une prairie⁵⁹.
- l'EVP Layon (Pays de Loire): la différence entre volumes évaporé et évapotranspiré est nulle en dehors des périodes sèches (novembre-avril). Pour la période estivale (Juin-Septembre), la différence est d'autant plus importante que les étés sont secs : en 2003 la différence a atteint 6,7 Mm³ sur l'année, dont 5,9 Mm³ pour la période estivale (en 2003, p59-60 rapport), soit l'équivalent d'une lame d'eau de 5,3 mm/an, ou de 4,7 mm sur la période estivale (territoire du Layon-Aubance 1259 km²).
- l'étude d'impact de la DREAL Pays de Loire (Nov 2012) sur le Layon : les pertes par évaporation sont estimées à 100 mm par surface unitaire de retenues, ce qui correspond à 3 % du volume d'eau capté par la retenue au moment de son remplissage.

1.e *Impact sur la morphologie des cours d'eau*

Comme indiqué précédemment, la multiplication des retenues au sein d'un bassin est susceptible de modifier les débits liquides et solides transitant au sein du réseau hydrographique. De fait, si cette modification concerne les débits morphogènes et le transfert des matériaux constitutifs de la charge de fond dans des proportions non négligeables, la morphologie des tronçons fluviaux en aval peut être significativement modifiée. En l'état, l'analyse de la littérature opérationnelle sur l'impact des retenues ne fait pas ressortir d'éléments concrets ni de prise de compte de cet aspect, ni d'éléments méthodologiques pour y parvenir.

La multiplication des obstacles au transit sédimentaire a pour conséquence de multiplier les sites potentiels d'érosion et d'incision du cours d'eau en aval des retenues lors des phases de vidange et donc d'augmenter les linéaires de cours d'eau dont les zones d'habitat peuvent être détruites ou perturbées. Mais il n'existe pas de méthode spécifique pour évaluer cet impact, ni à l'échelle individuelle des retenues, ni a fortiori pour l'effet cumulé

1.f *Altérations hydrologiques et biologiques*

Plusieurs études ont fait appel à la modélisation hydrologique de bassin pour mieux cibler l'impact cumulé des altérations hydrologiques sur les poissons ou les macroinvertébrés. Par exemple, (Carlisle et al. 2011⁶⁰) ont extrapolé statistiquement des débits naturalisés aux USA (forêts aléatoires) pour estimer des altérations hydrologiques observées près des sites d'échantillonnages biologiques. Ils suggèrent que des diminutions des débits extrêmes (étiages et crues) favorisent les organismes typiques des lacs ou courants faibles, préférant des substrats fins ou présentant des stades aériens. Bien que la qualité de l'eau puisse jouer sur ces résultats, ils indiquent un effet cumulé de l'altération des débits dans le sens où une altération à large échelle génère un impact écologique à large échelle.

D.I.2 **Qualité physico-chimique des eaux**

A notre connaissance, il existe très peu d'études ayant cherché à observer les effets cumulés d'un grand nombre de retenues sur la qualité physico-chimique des eaux. Parmi les rares tentatives, l'Etude InterAgences

⁵⁹Les surfaces connues des plans d'eau sur le territoire d'étude représentent un total de 7,8 ha environ. Cette surface est à l'origine d'une perte par évaporation de 645 500 m³ sur l'année (20 l/s en moyenne) dont 113 000 m³ au mois de juillet (42 l/s). La perte par évapotranspiration pour une surface équivalente de prairies est de 445 000 m³ annuels (14 l/s en moyenne) avec un volume en juillet de 45 000 m³ (18 l/s).

⁶⁰ Carlisle, D. M., D. M. Wolock and M. R. Meador (2011). "Alteration of streamflow magnitudes and potential ecological consequences: A multiregional assessment." *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(5): 264-270.

de l'Eau (2001) s'appuie sur l'évaluation globale de la qualité des cours d'eau dans le bassin versant du Doux (Rhône-Méditerranée, 0,87 plans d'eau/km²), jugée bonne selon les normes SEQ-Eau, pour considérer qu'il n'y a pas de problème de dégradation liée aux retenues. Localement les dégradations observées sont imputées à des rejets issus des agglomérations. Sur le bassin versant de la Séoune (Adour-Garonne, 0,52 plans d'eau/km²), les indicateurs SEQ-Eau révèlent une qualité très bonne à mauvaise selon les paramètres. Mais il est difficile d'imputer les fortes concentrations en nitrate, souvent supérieures à 25 mg/L, à la présence des retenues qui au contraire peuvent conduire à leur diminution par dénitrification ou consommation par la végétation aquatique. Delbreilh (1993)⁶¹ souligne la difficulté à démêler les effets directs des retenues des effets indirects via l'augmentation des cultures irriguées et des pratiques agricoles associées. Enfin sur le bassin versant de l'Yzeron (Rhône), Faure (2011)⁶¹ observe l'importance de la surface des plans d'eau sur le réchauffement estival des retenues et conclut qu'il vaut mieux, pour réduire ce phénomène, conserver ou construire un grand plan d'eau de préférence à plusieurs petits, à capacité de stockage similaire.

D.I.3 « Les zones humides, mares et étangs : des modèles pour évaluer l'impact cumulé des retenues ? »

Il est reconnu depuis longtemps que les patrons spatiaux jouent un rôle important sur l'hydrologie, la physico-chimie et l'écologie des milieux lenticques. A contrario, il existe à l'heure actuelle peu d'éléments concernant les impacts cumulés des retenues. Dans la mesure où les milieux lenticques sont « des objets hydroécologiques » présentant des analogies avec les retenues, le paragraphe qui suit présente un bref point bibliographique sur le thème de l'effet cumulé des zones humides sur la qualité des eaux, pour faire ressortir les mécanismes et les métriques envisagées pour les décrire, et permettre d'alimenter la réflexion.

3.a Définitions et éléments d'analogie avec les réservoirs des retenues

La plupart des retenues de petite taille incluses dans cette expertise (d'une profondeur inférieure à 8 m pour fixer les idées) correspondent à des mares ou étangs d'origine anthropique. Même s'il n'y a pas de consensus universel sur la définition des mares et étangs (ponds) dans le monde scientifique⁶², ils se définissent le plus souvent comme des étendues d'eau auxquelles il manque la zone aphotique (sans lumière) des lacs⁶³ ou de petites étendues d'eau d'origine naturelle ou humaine, d'une superficie comprise entre 1m² et quelques hectares, d'une profondeur comprise entre quelques centimètres et plusieurs mètres, avec une présence d'eau permanente ou temporaire⁶⁴. En France, ils sont estimés à un million de mares et étangs d'une surface de moins de 0.5 hectare⁶⁴.

Selon la convention de Ramsar, les zones humides sont définies comme « une portion du territoire, naturelle ou artificielle, caractérisée par la présence de l'eau ». Cette définition inclut également les cours d'eau et les eaux souterraines⁶⁵.

En France, on appelle ces zones humides au sens large « milieux humides » et on définit la zone humide comme des « terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année » (Art. L.211-1 du Code de l'Environnement). Cette définition exclut les cours d'eau, mais inclut les mares, étangs, tourbières.

⁶¹ Faure, J.-P. (2011). Impacts des retenues collinaires sur les cours d'eau. Présentation PowerPoint du 13 décembre 2006 (version actualisée le 9 novembre 2011).

⁶² Oertli, B. and P. A. Frossard (2013). Mares et étangs : écologie, gestion, aménagement et valorisation. . Lausanne, Presses Polytechniques Universitaires Romandes.

⁶³ Forel, F.-A. (1904). Le Léman. Monographie limnologique. Genève, Slatkine Reprints. Volume 3

⁶⁴ European Pond Conservation Network EPCN (2008). The Pond Manifesto, www.europeanponds.org

⁶⁵ Convention on Wetlands of International Importance especially as Waterfowl Habitat, 1971-02-02, (<http://sedac.ciesin.org/entri/texts/ramsar.wetlands.waterfowl.habitat.1971.html>)

Les zones humides sont donc des écosystèmes se développant sur des sols saturés en eau pendant des périodes prolongées et présentant en conséquence une végétation spécifique et adaptée. Elles se caractérisent par une accumulation d'eau au moins périodique, une accumulation de matières organiques et des conditions réductrices plus ou moins intenses dont il résulte des propriétés biogéochimiques spécifiques (transformation de spéciations, couplage de flux, émission de GES, etc...). Les processus sous-jacents sont bien spécifiques et documentés, le plus célèbre étant la dénitrification.

Les zones humides sont alimentées en eau par la pluie, par des écoulements de surface, par l'affleurement de la nappe, par le cours d'eau voisin, ou par un mélange de ces sources. Certaines zones humides, dites ripariennes, sont en continuité avec la rivière ou une autre masse d'eau (fleuve, lac, mer) et des échanges latéraux s'y produisent : selon les périodes, déversement dans la masse d'eau ou alimentation par celle-ci. D'autres sont « endoréiques ». Les zones humides constituent donc dans un bassin versant donné, un ensemble de milieux hydroécologiques, à fortes variabilité de rapports avec le réseau hydrographique (autant pour les entrées que pour les sorties). La variabilité s'exprime aussi pour leur géométrie (taille forme..) ou leur organisation dans le paysage. Elles sont parfois organisées en réseau, organisation spatiale hiérarchisée avec divers types de connexions... **L'analogie de la typologie hydrologique des zones humides en tête de bassin, esquissée ci-dessus, avec celle des réservoirs peut être relevée.**

3.b Rôle des zones humides, mares et étangs.

Ces éléments sont souvent présentés comme des régulateurs hydrologiques, des surfaces hydrologiques ayant un rôle « d'éponge » (on le dit ainsi, à tort ou à raison...), atténuant crues et étiages, et comme des zones tampons susceptibles d'atténuer les charges polluantes.

En ce qui concerne l'impact des zones humides sur le cycle des nutriments et la dynamique de certains polluants, de nombreuses études de cas individuels sont disponibles. Bien qu'une majorité d'études montrent le rôle de « filtre » vis-à-vis de la pollution des eaux^{66, 67, 68} et vis-à-vis des matières en suspension, les résultats sont dans le détail très variables, avec de grandes différences d'une zone humide à l'autre, dans les bilans (par exemple dénitrification), voire contradictoires (notamment pour P, qui est soit fixé soit libéré⁶⁹ et ce même au sein du même bassin versant⁷⁰). Les facteurs observés de forçage des bilans et donc de l'impact sur la qualité des eaux sont : l'hydrologie (temps de résidence, mode de restitution), les modalités de circulation de l'eau au sein de la zone humide, qui déterminent l'intensité du contact eau-végétation et eau-sols, les « aménagements⁷¹ », les concentrations des flux entrants et leurs effets sur les stocks⁷².

Les mêmes processus spécifiques de base existent dans les diverses zones humides d'un bassin, mais ils se développent avec une très forte variabilité d'intensité d'un milieu à un autre, selon les caractéristiques hydrologiques et la position dans le paysage. C'est cette variabilité plus ou moins hiérarchisée qui rend complexe l'évaluation des effets des zones humides sur les flux cumulés à l'échelle bassin versant. **On retrouve là une nouvelle analogie avec la question des réservoirs.** Comme pour les réservoirs la question des effets cumulatifs est largement ouverte posée, et peu documentée L'hypothèse d'effets non linéaires ou en cascade est évoquée⁷³.

⁶⁶ Dorioz J.M., Ferhi A. (1994). Pollution diffuse et gestion du milieu agricole : transferts comparés de phosphore et d'azote dans un petit bassin agricole. *Wat. Res.*, 28 (2), 395-410.

⁶⁷ Tilton, D.L., and R.H. Kadlec, 1979, The utilization of a fresh-water wetland for nutrient removal from secondary treated waste water effluent. *J. Environ. Qual.* 8: 328-334.

⁶⁸ Johengen, T.H., and Larock, P.A., 1993, Quantifying nutrient removal processes within a constructed wetland designed to treat urban runoff. *Ecol Engineering* 2(4): 347-366.

⁶⁹ Peverly, J.H., 1982, Stream transport of nutrients through a wetland. *J. Environ. Qual.* 11:38-43.

⁷⁰ Noirot JM. (1998) - Variabilité spatiale et temporelle des concentrations en nutriments et des teneurs en germes dans des bassins agricoles DEA Paris 6 1998.

⁷¹ Avec comme exemple **extrême le drainage, qui équivaut à sa mise en place à la vidange d'un stock pluriséculaire**

⁷² Paludan, C., 1995. Phosphorus dynamics in wetland sediments. (Fosfordynamik i sedimenter fra vadonrader). Ph.D. Thesis University of Aarhus, Biological Institute. National Environmental Research Institute, 106 pp.

⁷³ Wang D., Dorioz J.M., Trevisan D., Braun D.C., Windhausen L.J., Vansteelant J.Y., 2003 - Using a landscape approach to interpret diffuse phosphorus pollution and assist with water quality management in the basin of Lake Champlain (Vermont) and Lac Léman (France) *In T.O.*

Les mares et étangs, en particulier, sont des écosystèmes peu considérés par la DCE, mais qui abritent de nombreuses espèces patrimoniales sous protection de la Directive Habitats-Faune-Flore et ont une forte valeur écologique. A l'échelle du paysage, mares et étangs sont des habitats exceptionnels vis-à-vis de la biodiversité des eaux douces puisqu'ils contribuent autant que les fleuves ou les lacs au pool régional d'espèces⁷⁴. Ils jouent un rôle essentiel, d'ailleurs reconnu par l'article 10 de la Directive Habitats, dans l'amélioration de la connectivité entre les habitats d'eau douce en tant que « biotopes-relais » ou « stepping-stone »^{75, 76}. L'importance de biotopes relais a été démontrée pour de nombreuses espèces dont certaines rares et protégées par la réglementation, comme la libellule *Coenagrion mercuriale*⁷⁷.

3.c « Patron paysager » et impact des zones humides sur les flux

Si on prend comme exemple l'effet des marais sur les transferts de phosphore, leur effet global, en tant que catégorie de « land cover » est un « effet puits ». Cet effet est quantifié, dans le bassin du lac Champlain, à l'aide de modèles empiriques (régressions) reliant flux exportés dans des bassins versants et caractéristiques d'occupation des sols⁷⁸. L'effet semble cependant mieux corrélé pour les marais qui sont connectés aux ordres inférieurs du réseau hydrographique (en l'occurrence ordre 1 à 4 dans l'étude de Weller) que pour les ordres supérieurs. Le type et la position des marais, leur configuration spatiale, sont très souvent cités comme facteurs clés^{79, 80}. Le même type de résultats est obtenu dans des sous bassins du lac Léman^{81, 82}.

Certaines études prennent comme support la disparition progressive des marais dans un bassin et s'interrogent sur l'effet cumulé de celle-ci. L'étude de Johnston et al. (1990)⁸³ met en évidence, dans ce contexte, un seuil d'impact hydrologique : pour les bassins ayant moins de 10% de surface de marais il existe une perturbation hydrologique lors des crues. Ces auteurs montrent également qu'il existe une forte corrélation entre la proximité d'un marécage et les paramètres de la qualité des eaux (baisse des NO₃ en étiage, baisse de P total, des MES, de NH₄ en crue) sur un vaste bassin du Minnesota.

Quelques résultats, notamment ceux relevés par Grimaldi et Dorioz (2014)⁸⁴, montrent tout l'intérêt de lier patrons paysagers et effets des zones humides sur les flux hydrochimiques à l'échelle bassin versant.

Les travaux réalisés à l'INRA (UMR SAS Rennes) montrent que l'efficacité sur la réduction des flux de NO₃ de zones humides ripariennes, dépend de critères morphologiques comme la concavité ou la convexité du bas de

Manley and P.L. Manley (eds.) Lake Champlain in the New Millennium. Water Science and Application. Vol. 2. American Geophysical Union.

⁷⁴ Williams, P., M. Whitfield, et al. (2004). "Comparative biodiversity of rivers, streams, ditches and ponds in an agricultural landscape in Southern England." *Biological Conservation* 115(2): 329-341.

⁷⁵ Oertli, B., D. Auderset Joye, et al. (2002). "Does size matter? The relationship between pond area and biodiversity." *Biological Conservation* 104(1): 59-70.

⁷⁶ Declerck, S., J. Vandekerckhove, et al. (2005). "Multi-group biodiversity in shallow lakes along gradients of phosphorus and water plant cover." *Ecology* 86(7): 1905-1915.

⁷⁷ Keller, D., M. J. Van Strien, et al. (2012). "Do landscape barriers affect functional connectivity of populations of an endangered damselfly?" *Freshwater Biology* 57(7): 1373-1384.

⁷⁸ Weller, C.M., Watzin, M.C., Wang, D. (1996). Role of wetlands in reducing phosphorus loading to surface water in eight watersheds in the Lake Champlain Basin - Environmental Management – Springer 20, No. 5, pp. 731-739

⁷⁹ Johnston, C.A., 1991, Sediment and nutrient retention by freshwater wetlands: Effects on surface water quality. CRC Critical Reviews in *Environmental Control* 21: 491-56

⁸⁰ Preston, E.M., Bedford, B.L. (1988). Evaluating cumulative effects on wetland functions : A conceptual overview and generic framework. *Environmental Management*, Springer, vol. 12, issue 5, pp. 565-583.

⁸¹ Trévisan, D., Quétin, P., Barbet, D., Dorioz, J.M. (2012). POPEYE: a river-load oriented model to evaluate the efficiency of Environmental measures for reducing phosphorus losses, *J. Hydrology*, 450-451, 254-266.

⁸² Dorioz, J.M., Gascuel-Oudou, C., Merot, P., Trévisan, D. (2011). Landscape control on diffuse pollution: a critical review on some investigations on phosphorus – retaining landscape features. In *Issues and solutions to diffuse pollution. 14th International Conference of the IWA diffuse Pollution Specialist group, DIPCON 2010*, 141-156.

⁸³ Johnston, C.A., Detenbeck, N.E., and Niemi, G.J., 1990, The cumulative effect of wetlands on stream water quality and quantity. A landscape approach. *Biogeochemistry* 10:105-141.

⁸⁴ Grimaldi, C. and J.-M. Dorioz (2014). Mission de réflexion Cycles et flux dans les paysages hétérogènes. Rapport adressé aux départements EA et EFPA, INRA.

versant, sa pente, le type d'écoulement parallèle ou convergent⁸⁵ ; elle dépend aussi de l'ordre des cours d'eau⁸⁶. La dénitrification se développe particulièrement aux frontières, aux interfaces entre le versant et la zone humide⁸⁷. Tout ceci révèle l'importance des formes, des positions dans le paysage des différents compartiments hydrologiques du bassin, des zones humides en particulier.

Autre exemple assez documenté, le pouvoir tampon de zones humides vis-à-vis des transferts de subsurface de phosphore varie avec leur forme, leur taille, leur localisation⁷³. Leur effet cumulé à l'échelle du bassin versant dépend alors de caractéristiques globales, telles que la « continuité » des marécages ripariens ou la « sinuosité » du cours d'eau⁸⁸.

Les mares et étangs en particulier jouent également un rôle de puits de carbone, important dans le contexte des changements climatiques. Une étude récente a démontré que les mares et étangs pourraient absorber autant de carbone que les océans à l'échelle mondiale⁸⁹. Leur étude aux Etats-Unis a montré que les étangs et lacs artificiels absorbent plus rapidement le carbone que prévu, jusqu'à 20-50 fois plus rapidement que les arbres. De plus, les mares et étangs absorbent plus rapidement le carbone que les plus grands lacs.

Plusieurs auteurs cités précédemment plébiscitent et de longue date, **l'approche paysage (landscape approach) ou la « perspective paysage » comme cadre organisateur de l'étude des effets cumulés**^{73,90}. Dans cet objectif les outils de spatialisation type SIG ouvrent des perspectives intéressantes⁹¹.

3.d Liens entre les populations locales

Ecologiquement, chaque population locale n'est pas totalement déconnectée des populations spatialement proches. Les populations locales sont liées par la dispersion de différentes espèces potentiellement en interaction. La composition des espèces dans un site donné est liée aux interactions entre les conditions biotiques et abiotiques locales et les effets régionaux de la dispersion⁹². Cette théorie a été appliquée dans l'écologie des cours d'eau comme des petits plans d'eau^{93, 94} et pourrait permettre de définir un cadre conceptuel des impacts cumulés des retenues. La localisation et le type de retenue a donc vraisemblablement un fort effet sur les communautés. Prendre en compte les paysages et leur biodiversité associée à différentes échelles spatiales pourrait permettre de mieux comprendre les dynamiques et les patterns de population et ainsi l'impact cumulé des retenues.

⁸⁵ Beaujouan, V., Durand, P., Ruiz, L., Arousseau, P. and Cotteret, G., 2002. A hydrological model dedicated to topography-based simulation of nitrogen transfer and transformation: rationale and application to the geomorphology-denitrification relationship. *Hydrological Processes*, 16(2): 493-507.

⁸⁶ Montreuil, O., Merot, P., Marmonier, P. (2010). Estimation of nitrate removal by riparian wetlands and streams in agricultural catchments : effect of discharge and stream order. *Freshwater Biology*, Volume 55, Issue 11, pages 2305–2318, November 2010 - Wiley Online Library.

⁸⁷ Curie, F., Ducharne, A., Sebilo, M. and Bendjoudi, H. (2009), Denitrification in a hyporheic riparian zone controlled by river regulation in the Seine river basin (France). *Hydrol. Process.*, 23: 655–664. doi: 10.1002/hyp.7161.

⁸⁸ Reed, T., Carpenter S.R. (2002). Comparisons of P-Yield, Riparian buffer strips, and land cover in six agricultural watersheds - *Ecosystems*, 2002 -, Volume 5, Issue 6, pp 568-577.

⁸⁹ Downing, J. A., J. J. Cole, et al. (2008). "Sediment organic carbon burial in agriculturally eutrophic impoundments over the last century." *Global Biogeochemical Cycles* 22(1).

⁹⁰ Whigham D.F., Chitterling C., Palmer, B. (1988). Impacts of freshwater wetlands on water quality: landscape perspective. *Environ. Manage.*, 12 (1988), pp. 663–671.

⁹¹ Johnston, C.A., Detenbeck, N.E., and Niemi, G.J., 1990, The cumulative effect of wetlands on stream water quality and quantity. A landscape approach. *Biogeochemistry* 10:105-141.

⁹² Leibold, M. A., M. Holyoak, et al. (2004). "The metacommunity concept: a framework for multi-scale community ecology." *Ecology Letters* 7(7): 601-613.

⁹³ Cottenie, K., E. Michels, et al. (2003). "Zooplankton metacommunity structure: Regional vs. local processes in highly interconnected ponds." *Ecology* 84(4): 991-1000.

⁹⁴ Brown, B. L., C. M. Swan, et al. (2011). "Metacommunity theory as a multispecies, multiscale framework for studying the influence of river network structure on riverine communities and ecosystems." *Journal of the North American Benthological Society* 30(1): 310-327.

D.II Effets rétroactifs : Exemple de l'influence de la création de retenues d'irrigation sur les systèmes de culture

La création de retenues a clairement un impact sur les cultures du bassin versant (en amont et/ou aval de la retenue). En effet, la mise à disposition de l'agriculteur d'un volume d'eau supplémentaire et « assuré » permet à celui-ci de choisir d'implanter une diversité plus importante de cultures (introduction de cultures irriguées dans un assolement préalablement en sec), ou d'augmenter ses surfaces en cultures irriguées, ou encore d'accéder à des cultures sous contrat (impliquant souvent un accès sécurisé à une ressource en eau)⁹⁵.

La modification de l'assolement modifie les flux d'eau et de polluants. Chaque parcelle cultivée génère des flux de ruissellement et drainage différents selon la période de couverture du sol et l'intensité du couvert végétal et la conduite de la culture : la protection phytosanitaire et la fertilisation auront un impact sur la qualité de l'eau drainée et ruisselée, la conduite de l'irrigation aura un impact sur l'intensité d'utilisation de l'eau du sol (et donc sur la quantité de ruissellement et de drainage généré). Par ailleurs, l'arrangement spatial des cultures au sein du bassin versant peut favoriser ou au contraire limiter les flux de ruissellement (en jouant notamment sur la localisation et la période des zones en sol nu et en végétation).

Ces flux ruisselés et drainés peuvent alimenter la retenue qui a généré le changement d'assolement ou des retenues situées plus en aval. Selon le mode de fixation des éléments (nitrates, phosphore, phytosanitaires) aux sédiments et le mode de vidange de la retenue, celle-ci aura soit un rôle tampon positif qui améliorera la qualité de l'eau des cours d'eau en aval, soit un rôle négatif en transmettant les polluants en aval, voire en amplifiant cet impact négatif en cas d'eutrophisation, avec relargage de cyanobactéries et de matière organique.

Il faut noter également que les systèmes de culture ont un effet sur le niveau des retenues non seulement par le biais de leur contribution plus ou moins forte au remplissage de celles-ci par le biais des flux de ruissellement ou sub-surface du bassin versant amont, mais aussi par leur contribution à la vidange de la retenue par pompage pour l'irrigation. Cet effet sur la dynamique de remplissage/vidange des retenues sera différent selon la part de cultures irriguées (vs. pluviales), le type de conduite de l'irrigation (restrictive vs. excessive) et la variabilité du climat (qui va conditionner les dates de semis, les choix de culture et de précocité, choix de culture et donc la période d'utilisation de l'eau).

⁹⁵ A noter que ces effets rétroactifs peuvent être limités par un cadre réglementaire : sur le bassin Loire-Bretagne, les financements de l'Agence pour la création de réserves de substitution s'intègre dans un Contrat Territorial de Gestion Quantitative (CTGQ), qui implique une réduction des volumes d'eau utilisés pour l'irrigation sur le bassin du CTGQ. Le volume de stockage correspond à 80% du volume substitué (réduction de 20%). Malgré la sécurisation des prélèvements d'été pour l'irrigation, les assolements du bassin intègrent des cultures moins consommatrices d'eau. Le financement des réserves est conditionné à des économies d'eau effectives à l'échelle du CTGQ.

Partie E. METHODES EXISTANTES

E.I Méthodes et données pour la spatialisation

Aborder l'effet cumulé des retenues sur un bassin versant suppose de pouvoir disposer de données à cette échelle. Ce paragraphe présente tout d'abord les types de données et connaissances mobilisables à l'échelle nationale, et qui permettent de donner des éléments de contexte pour le bassin considéré, puis les bases de données et méthodes disponibles pour caractériser les retenues sur un bassin.

E.I.1 Données complémentaires, éléments de contexte disponibles à l'échelle nationale

L'étude des impacts cumulés nécessite de décrire le contexte écologique, environnemental à l'échelle de ces impacts cumulés. Ceci permet de préciser les enjeux de gestion et/ou de choisir des sites représentatifs du bassin. Plusieurs sources de données sont utiles pour cela, dont la plupart sont disponibles via le portail EauFrance <http://www.eaufrance.fr/>. Le cahier des charges type des études de détermination des volumes maximums prélevables concernant le bassin Rhône-Méditerranée et Corse⁹⁶ apporte également un canevas des données qui doivent être mobilisées dans ce type d'études. Les référentiels nationaux structurent tout d'abord l'information sur l'eau comme le référentiel BD carthage (eaux de surface), le référentiel BD Lisa (eaux souterraines,) et le référentiel masse d'eau surface et souterraine (unité de gestion). Les données disponibles sont notamment les suivantes :

- Les données des réseaux de surveillance : mesures de débit de la Banque Hydro, niveaux piézométriques bancarisés dans ADES, mesures climatiques de Météo-France, mesures aux stations du réseau de contrôle de surveillance des eaux superficielles (qualité d'eau, populations piscicoles, invertébrés, macrophytes, diatomées, et hydromorphologie pour certaines stations) et la banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE) ;
- Les données des indicateurs d'état des lieux DCE (indicateurs poissons, invertébrés, macrophytes, qualité de l'eau...) ;
- Les projets de SDAGE 2016-2021 et, plus généralement, les éléments ayant servi à caractériser les masses d'eau des districts et à déterminer les objectifs et les mesures. Ces éléments s'appuient sur des données objectives ou sur des données à dire d'experts selon les cas ;
- Les données issues d'initiatives locales (contrats de milieu, SAGE, Fédérations départementales de pêche et de protection du milieu aquatique, Syndicats de rivière) selon disponibilités ;
- Les données d'état des lieux Directive Habitats-Faune-Flore ;
- Les Listes Rouges nationales et locales, notamment pour la flore, les odonates, les amphibiens et les crustacés ;
- Le réseau ROE (Référentiel des Obstacles à l'Écoulement) qui ne doit prendre en compte qu'une petite partie des retenues, mais fournit une image complémentaire de l'état de fragmentation du milieu ;
- L'atlas géomorphologique SYRAH-CE (SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau) large échelle (disponible auprès du centre Irstea Lyon-Villeurbanne⁹⁷) constitue un outil d'évaluation des risques d'altérations hydromorphologiques des cours d'eau à partir de pressions recensées sous SIG. Il s'appuie sur des couches d'informations homogènes et objectives. Ces couches géographiques sont regroupées en fonction des ensembles d'altérations physiques : altération de flux

⁹⁶ Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse, DREAL de bassin Rhône-Méditerranée and Onema (2010). Cahier des charges "type" - Etude de détermination des volumes maximums prélevables.

⁹⁷ <https://hydroeco.cemagref.fr/>

solides, altération de flux liquides et altération de la morphologie. L'atlas mobilise des données disponibles à l'échelle du territoire national relatives à l'occupation du sol (Corine Land Cover), aux activités économiques (RGA, barrages et plans d'eau, infrastructures) ainsi qu'à certains phénomènes particuliers jugés déterminants (cartographie des risques d'érosion des sols) ;

- Le réseau RHT^{98, 99} (réseau hydrographique théorique) est un réseau théorique des cours d'eau français proche de la BD Carthage et remontant plutôt bien en tête de bassin. Il est diffusé avec des estimations d'un ensemble de variables environnementales, extrapolées sur tous les tronçons du réseau, utiles pour caractériser les bassins dont : des courbes de débits classés naturalisés, des largeurs mouillées, hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement, le substrat dominant, le risque d'intermittence, la probabilité de présence des espèces de poissons les plus courantes. On gardera évidemment en tête les incertitudes de ces extrapolations spatiales à l'échelle nationale (fournies en partie avec le RHT).

E.1.2 Données d'inventaire des plans d'eau : bases de données, méthodes d'acquisition

2.a Introduction

Analyser la question de l'impact cumulé des retenues nécessite de disposer d'une information fiable concernant l'existence de retenues préexistantes au sein d'un bassin. Cette information se décline en plusieurs niveaux de richesse : (1) seulement la localisation des plans d'eau dans l'espace, (2) la localisation accompagnée d'une description de leur géométrie (forme, surface, volume) ou (3) la caractérisation de leurs propriétés fonctionnelles (type d'usage, mode de vidange, mode de remplissage) ou physicochimiques (température, turbidité). Le choix des données à mobiliser est complexe car il dépend des besoins en matière de niveau d'information (plus ou moins riche), des données disponibles, de leur nature, de leur degré de précision et de fiabilité, de la taille du territoire concerné et des capacités techniques des acteurs qui utilisent ou traitent ces données. Il n'existe pas une base données unique spécifique aux retenues et les producteurs d'informations sont variés : chambres d'agriculture (volumes prélevés, stockés, débits autorisés, points de prélèvement), agences de l'eau (volumes prélevés), DDTs (volumes prélevés pour irrigation), DREALs (pour certains usages industriels)...

La plupart des études qui ont cherché à constituer une base de données sur les retenues à l'échelle locale mobilisent généralement plusieurs sources de données : déclarations réglementaires, enquêtes, télédétection... Elles mettent globalement en évidence (1) une qualité très variable des données (problème de localisation, données non renseignées, non prise en compte de nombreux plans d'eau...), (2) l'intérêt de la télédétection (notamment l'utilisation des photographies aériennes ou des images satellites à très haute résolution spatiale pour identifier les petites retenues, moins de 5.10⁶ l) pour une meilleure exhaustivité des recensements, (3) la difficulté d'identifier précisément et de manière exhaustive les caractéristiques des retenues autres que leur localisation et leur surface et (4) la nécessité d'une phase de calage de terrain afin de qualifier les retenues et la précision des données.

⁹⁸ Pella H., Lejot J., Lamouroux N., Snelder T. (2012) The theoretical hydrographical network (RHT) for France and its environmental attributes. *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 3, 317-336.

⁹⁹ <http://www.irstea.fr/dynam>

2.b Recensement et caractérisation des plans d'eau à partir de bases de données pré-existantes

L'examen des bases de données spatialisées disponibles de façon homogène à large échelle (région, grand bassin) en France (BD topo, BD carthage, Corine landcover...) fait ressortir globalement la mauvaise fiabilité de celles-ci quant au recensement des plans d'eau, la plupart étant très incomplètes (notamment pour les petits plans d'eau). Selon Bartout et Touchart (2013)¹⁰⁰, la source de données qui permet le recensement le plus exhaustif est la BD ortho de l'IGN, composée d'orthophotographies. Cependant, l'utilisation de cette base de données nécessite un travail de photointerprétation ou de traitement qui peut être assez long lorsque le bassin étudié est très grand (notons qu'il existe des méthodes de traitement semi-automatique mais qui nécessitent une certaine technicité, pas toujours présente dans les structures en charge des inventaires - bureau d'étude, syndicat de gestion...). Parmi les bases de données déjà constituées, Bartout et Touchart (2013)¹⁰⁰ proposent un recensement basé sur un traitement de la BD topo de l'IGN qu'ils considèrent comme la plus pertinente, même si tous les départements ne sont pas couverts pour les mêmes dates et qu'il existe des problèmes de remise à jour des données, qui n'est pas régulière. Cette base de données doit faire l'objet d'un post-traitement pour isoler les plans d'eau et permettre de les localiser. Elle permet également de caractériser la surface des plans d'eau avec une fiabilité d'environ 90 % par rapport à des mesures terrain. C'est d'ailleurs sur cette source de données que Chalabert (2013)¹⁰¹ base son analyse des retenues à usage d'irrigation au sein du bassin Adour-Garonne. Ainsi, à partir de la Bd Topo® « SURFACE_EAU », des données des DDTs et d'un MNT, elle propose une méthode géomatique de localisation et de caractérisation spatiale des retenues à large échelle. Une typologie a été élaborée. La caractérisation s'appuie sur cette typologie de types de plans d'eau (grande retenue, gravière, retenue en barrage, réserve de substitution, mare et étang, autre), sur le mode d'alimentation (sur cours d'eau, en dérivation, avec pompage sans restitution aval, ruissellement, nappe) et sur le volume des retenues. En revanche, le fonctionnement hydraulique et l'usage des retenues n'ont pas pu être obtenus avec cette approche géomatique.

En matière de recensement, cette étude identifie 36 % à 100% de retenues en plus que les données « agence de l'eau » qui ne prennent en compte que les retenues de propriétaires soumis à redevance. Le gain dépend de la méthode utilisée, il est notamment plus fort si un rapprochement *via* une requête de croisement entre la base de données « retenues » et la base de données de points de prélèvements agricoles est effectué.

En matière de caractérisation des plans d'eau, en première approche, le type de retenue et le type d'alimentation lui correspondant (grande retenue, gravière, retenue en barrage, réserve de substitution, mare et étang, autre) n'ont pu être déterminés que pour 48 % des plans d'eau (représentant 84 % des surfaces), ce qui signifie que l'identification automatique du type de plan d'eau est difficile, voire impossible pour les petits plans d'eau. Ensuite, cette étude met au point une démarche afin d'identifier, au sein de la base de données, les plans d'eau à usage d'irrigation. Sur la base de requêtes spatiales, les plans d'eau hors irrigation (masses d'eau salées, lacs naturels...) ont été écartés. Puis un rapprochement a été opéré avec les données de la DDT. Le mode d'alimentation (sur cours d'eau, en dérivation/pompage ou ruissellement/source) a été déterminé en fonction de la distance métrique des retenues au réseau hydrographique. Pour ce paramètre, une validation a été tentée sur un petit territoire avec des valeurs de bon classement respectives de 56, 69 et 76 % pour les retenues en dérivation, les retenues « ruissellement/source » et les retenues sur cours d'eau. Enfin, une caractérisation du volume des plans d'eau est proposée sur la base de mesures effectuées notamment en utilisant le MNT de la BD Alti de l'IGN à 25 m. Ces mesures ont été confrontées notamment à des données issues des bases de la DDT (caractérisation *in situ*). Malheureusement, il en ressort que la caractérisation des volumes retenus par les retenues à large échelle reste délicate. Par exemple, selon cette approche 68 % des

¹⁰⁰ Bartout, P. and L. Touchart (2013). L'inventaire des plans d'eau français : outil d'une meilleure gestion des eaux de surface Annales de géographie. 691: 266-289.

¹⁰¹ Chalabert, N. (2013). Identification et caractérisation des retenues à usage irrigation sur le bassin Adour-Garonne. Rapport de stage Master 2 Géomatique, Université de Toulouse.

plans d'eau ont un volume de 0. De même l'estimation des hauteurs de digue estimée *via* le MNT vs. la hauteur de digue renseignée par la DDT indique un R^2 de 0.47. Une caractérisation fine et exhaustive du volume peut être réalisée par des mesures de terrain mais au prix d'un travail souvent assez long et coûteux (cf. exemple du département des Landes).

2.c Le recours à la télédétection

Au-delà des bases de données existantes, il est possible de mobiliser de la télédétection active (ex. Radar) et/ou passive (ex. images satellites) afin de d'identifier et/ou caractériser l'état des plans d'eau¹⁰². En télédétection passive, soit les auteurs travaillent par photo-interprétation, ce qui peut être long et donc à réserver à des surfaces de territoire petites à moyennes, soit ils utilisent des indices (ex. NDWI Normalized Difference Water Index) pour détecter les plans d'eau. Une fois que les plans d'eau sont détectés, il est relativement aisé de décrire par des traitements géomatiques simples la géométrie en plan de ceux-ci (taille, forme), leur localisation au sein du BV, l'évolution de leur nombre/surface et les caractéristiques des bassins d'alimentation (occupation du sol...). Des paramètres de description complémentaires peuvent également être obtenus par télédétection (ex. température, turbidité).

Cependant, l'utilisation des images pour la caractérisation des plans d'eau doit prendre en compte la taille des plans d'eau concernés en lien avec la résolution spatiale des données télédétectées. En effet, de nombreuses méthodes existent pour caractériser les plans d'eau, mais peu d'études ont analysé le cas des retenues qui sont souvent de petite taille, ce qui a été longtemps un facteur limitant. Le développement de nouveaux capteurs ouvre des perspectives mais il ressort de cette synthèse peu d'éléments opérationnels par rapport à la question posée. En effet, la technicité requise pour le traitement des données (dans une optique opérationnelle), malgré leur potentiel, reste un frein à l'exploitation du potentiel des données issues de la télédétection.

2.d Conclusion

En conclusion, les territoires potentiellement concernés par l'enjeu du cumul des impacts des retenues ont tout intérêt à investir, en amont de toute étude, dans un travail de réflexion sur les données nécessaires et, ensuite, de constitution d'une base de données fiable et unique rassemblant les informations disponibles, informations vérifiées et complétées par des ajouts éventuels. Plus généralement, le nombre important de travaux de recensement et de caractérisation qui ont été menés à différentes échelles et au sein de différents territoires au cours des dernières années souligne un enjeu de bancarisation des données. En effet, il semble primordial d'assurer l'identification, la conservation dans le temps et l'accessibilité des bases de données constituées lors des études par les différents intervenants (gestionnaires, services de l'Etat, études académiques ; chambre d'agriculture...).

E.II Modélisation hydro(géo)logique

E.II.3 Démarche générale adoptée dans les études

La multiplication des retenues collinaires engendre des effets sur les flux d'eau traversant le bassin versant et sur les volumes associés à ces flux. L'analyse ou la quantification de ces impacts ont été l'objet d'études de gestion de la ressource en eau dans les bassins versants. Les études traitant *stricto sensu* de l'impact cumulé des retenues sont assez peu nombreuses (une ½ douzaine au plus dans la liste des « experts »). Plus nombreuses sont les études de volumes prélevables (EVP). Les EVP n'ont pas un objectif explicite de quantifier les impacts cumulés des retenues, mais de quantifier plus globalement l'effet sur les masses d'eau de

¹⁰² Leroux, L. (2011). Identification et caractérisation des retenues collinaires par télédétection : Application au Grand Ouest français, Université Rennes 2.

l'ensemble des prélèvements et des rejets, dont ceux associés aux retenues. Pour autant les démarches employées dans les EVP et les outils utilisés apparaissent intéressantes à analyser dans cet objectif.

Il existe assez peu d'études quantifiant l'effet cumulé de retenues par une analyse comparative de débits (ou de tout autre flux hydrologique) enregistrés ex-ante et ex-post aménagement de retenues. Au moins deux raisons peuvent expliquer l'absence d'analyse comparative. La première d'entre elles est que les jeux de données de qualité et d'une durée suffisante pour une telle analyse sur un bassin versant sont assez peu disponibles. La seconde raison est que l'analyse comparative suppose d'analyser l'effet d'une modification, en l'occurrence l'implantation de retenues, toute chose égale ou inchangée, par ailleurs. Ce qui à l'échelle d'un territoire ou d'un bassin versant est rarement le cas. L'étude du bassin de la Séoune (rapport Inter-Agence) constitue dans les études de gestion l'exception à cette règle. En calculant le coefficient de ruissellement moyen (rapport pluie-débit) en période de reprise des écoulements (octobre-décembre), une variation nette du coefficient apparaît de façon concomitante à l'augmentation du nombre de retenues sur le bassin versant.

A l'exception de cette analyse comparative, les études de gestion traitant des retenues s'appuient pour la plupart sur des méthodes de calcul de l'impact cumulé¹⁰³. Nous avons classé ces méthodes selon trois types : i) les indicateurs d'impact hydrologique, ii) le bilan hydrologique et iii) la modélisation hydrologique.

E.II.4 Les indicateurs d'impact hydrologique

4.a Principes généraux

L'étude inter-Agence² propose des indicateurs de pressions et d'impacts hydrologiques (appelés descripteurs d'impact hydrologique dans le rapport Inter-Agence) : i) taux d'interception, ii) capacité d'interception des écoulements, iii) taux de prélèvement et iv) potentiel d'interception de crue (Tableau 1).

¹⁰³ Cette analyse est notamment issue de la consultation des études disponibles aux adresses suivantes :

- Etudes volumes prélevables sur le bassin RMC : <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/gestion-quantitative/EEVPG/>
- [http://www.gesteau.eaufrance.fr/documentation/volumes%20pr%C3%A9levables?ff\[0\]=im_taxonomy_vid_5%3A216](http://www.gesteau.eaufrance.fr/documentation/volumes%20pr%C3%A9levables?ff[0]=im_taxonomy_vid_5%3A216)
- Détermination des volumes prélevables initiaux dans les cours d'eau et nappes d'accompagnement des unités de gestion en zone de répartition des eaux du bassin Adour-Garonne
- http://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/58886/GED_00000000.pdf
- http://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/58882/GED_00000000.pdf
- http://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/58885/GED_00000000.pdf
- Bassin de la Seudre : http://www.sageseudre.fr/en/c/document_library/get_file?uuid=01ffd7f1-f4bf-4835-aaa7-823efacf0590&groupId=10156
- Utilisation du Modèle Nord-Aquitain (MONA) pour appuyer la définition des volumes prélevables dans les aquifères profonds du Nord du Bassin aquitain : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57878-FR.pdf>
- Détermination des volumes (d'eau) prélevables pour l'irrigation dans le département de l'Allier : http://www.auvergne.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_etude_cle0fa1ba.pdf
- EVP sur le Sage Authion : <http://www.gesteau.eaufrance.fr/document/d%C3%A9termination-des-volumes-pr%C3%A9levables-sur-le-p%C3%A9rim%C3%A8tre-du-sage-authion>

Taux d'interception	$T_{int} = \frac{\sum \text{Surfaces BV contrôlés}}{S \text{ BV total}}$
Capacité d'interception des écoulements	$C_{ie} = \frac{\sum \text{Volume retenues}}{S \text{ BV total}} \text{ (mm)}$
Taux de prélèvement	$T_{pr} = \frac{\sum \text{Volume renouvelé annuel}}{\text{Volume total annuel écoulé du BV (naturel)}}$
Potentiel d'interception de crue	$P_{ic}(\text{crue de référence}) = \text{Min} \left(\frac{\sum \text{Vol. retenues}}{\text{Vol. crue de ref.}}; T_{int} \right)$

Tableau 1 : Les descripteurs d'impact hydrologique (tirés de l'étude Inter-Agences²)

Ces indicateurs sont assez peu utilisés comme indicateurs d'impact dans les études que nous avons consultées. On peut toutefois citer l'étude sur le bassin versant de l'Yvel⁶ ayant utilisé ces quatre indicateurs, et la disposition C20 du SDAGE Adour. Cette dernière reprend comme indicateur d'impact le taux de prélèvement, en considérant que le volume renouvelé des retenues et le volume annuel écoulé du bassin sont équivalents à respectivement la capacité des retenues et le volume de pluie efficace de l'année quinquennale sèche (cf **Encadré 2**). On peut également relever l'étude sur la Séoune⁸ qui s'appuie sur l'analyse du taux de prélèvement (appelé « taux de régularisation » par Delbreih).

4.b *Prise en compte des retenues*

Le fonctionnement hydrologique des retenues et leur impact sont pris en compte soit à travers les surfaces drainées par les retenues, soit par leur capacité, soit par le volume annuel d'eau prélevé dans les retenues. Souvent difficiles à estimer faute d'informations disponibles, les volumes prélevés dans les retenues sont estimés à la capacité totale du réservoir (exemple DDT40) ou à sa capacité pondéré par un taux d'utilisation (fixé empiriquement par exemple dans Gueguen, 2013)⁶.

4.c *Intérêts et limites*

Le principal intérêt est la simplicité de mise en œuvre et de calcul des indicateurs. Ce calcul repose sur des règles et opérateurs simples intégrant des caractéristiques hydrologiques ou morphologiques généralement disponibles ou à défaut relativement faciles à estimer.

Les indicateurs sont bien définis et la simplicité de leur mise en œuvre limite les choix méthodologiques à faire. Ce faisant, ils constituent théoriquement une approche intéressante pour la comparaison des impacts cumulés entre territoire ou bassins versants.

Au-delà de la question des données et informations disponibles et utilisées pour le calcul des indicateurs qui n'est finalement pas propre à cette approche, une limite à l'utilisation d'indicateur est de fixer des valeurs de référence : à partir de quelle valeur du taux de prélèvement peut-on par exemple considérer que la densité de retenues est trop forte? La réponse est d'autant moins évidente que le seuil dépendra du contexte hydro-climatique.

Une seconde limite des indicateurs proposés par l'étude Inter-Agence² (Tableau 1) est qu'ils impliquent une conception très statique et géométrique du bassin versant. En particulier, ils reposent sur des hypothèses, implicites, sur le fonctionnement de la retenue et du bassin versant en décalage avec la réalité : i) homogénéité spatiale des écoulements, ii) vidange annuelle complète des retenues. Il paraît ainsi difficile d'appliquer ces méthodes à de grands bassins versants tant les écoulements peuvent y être hétérogènes.

Une troisième limite est que ces indicateurs rendent compte d'impacts sur des volumes hydrologiques. En conséquence de quoi, ils ne permettent pas d'évaluer les impacts sur les régimes hydrologiques, notamment sur les débits d'étiage et les périodes d'étiage.

Encadré 2

La disposition C20 du SDAGE Adour demande à identifier les sous bassins versant concernés par une forte densité des petits plans d'eau, et sur lesquels il est nécessaire de réduire leur prolifération. Le glossaire du SDAGE définit la zone à densité excessive de plans d'eau comme un sous bassin où le volume cumulé des plans d'eau dans un bassin versant dépasse la moitié des pluies efficaces en année sèche quinquennale (estimé sur la base d'une profondeur moyenne des plans d'eau de un mètre et d'une cartographie élaborée par le préfet) ou si la densité de plan d'eau est supérieure à 3/km² (Note DDT Mont de Marsan).

Appliqué au bassin versant de la Midouze et à une partie de ses sous bassins versants (tableau ci-dessous), les résultats appellent les remarques suivantes:

- une partie des sous bassin (en rouge) sont en excédent de retenues collinaires ;
- plus la surface du bassin versant est importante, plus l'impact selon cet indicateur est faible
- sur le plan méthodologique, les valeurs de l'indicateur varient substantiellement selon la référence prise pour le volume d'eau de la retenue (glossaire SDAGE, formule empirique ou volume enregistré). Cette remarque renvoie au point développé dans cette expertise sur la disponibilité et la qualité des données et informations sur les retenues (caractéristiques, usages).

Bassin	Surface bassin versant	Pluie efficace 5ans sec	Moitié du volume équivalent	Surface des plans d'eau	Volume glossaire SDAGE	Volume estimé par (S * H /2)	Volume indiqué sur registre
Midou	327km ²	125mm	20Mm ³	2,85Mm ²	2,85Mm ³	6,5Mm ³	--
Frèche	32km ²	125mm	2Mm ³	392.000m ²	392.000m ³	1,056Mm ³	--
Blazion	3km ²	125mm	187.500m ³	51.140m ²	51.140m ²	182.070m ³	187.000m ³
40901712	29ha	125mm	18.125m ³	8.650m ²	8.650m ²	29.630m ³	17.000m ³
40901737	10ha	125mm	6.250m ³	6.120m ²	6.120m ³	28.120m ³	50.000m ³
40901743	22ha	125mm	13.750m ³	8.290m ²	8.290m ³	39.420m ³	40.000m ³
40901754	28ha	125mm	17.500m ³	7.820m ²	7.820m ³	29.600m ³	40.000m ³
40901780	37ha	125mm	23.125m ³	7.110m ²	7.110m ³	25.300m ³	10.000m ³
40901876	72ha	125mm	45.000m ³	21440m ²	21440m ³	69.420m ³	70.000m ³
cumul 40901743				13.150m ² + 8290m ²	13.150m ³ +8290m ³	30.000m ³ +39420m ³	30.000m ³ +40000m ³

E.II.5 Le bilan hydro(géo)logique du bassin versant

5.a Les différentes approches

L'approche par bilan hydrologique consiste à évaluer l'impact cumulé des retenues par comparaison des volumes prélevés par l'ensemble des retenues avec la ressource renouvelable en eau sur le territoire concerné. La ressource renouvelable est considérée soit comme le volume écoulé, quand il s'agit d'une ressource de surface, soit comme le volume d'eau infiltré et/ou ruisselé quand il s'agit d'une ressource souterraine.

Selon le type de retenues et les études, plusieurs méthodologies sont employées pour évaluer les volumes ruisselés, écoulés et/ou infiltrés.

Concernant les retenues captant les eaux de surface (ruissellement/cours d'eau), les approches examinées à travers les différents documents consistent en un calcul des volumes « naturels » ruisselés et écoulés, c'est à dire non influencés par les retenues estimés à partir de station de débits. Le bilan est établi généralement sur un pas de temps mensuel. Afin de réaliser ce bilan, diverses démarches sont employées :

1 - Estimation des volumes à partir de la mesure des débits au cours d'une période pluri-annuelle passée antérieure au développement des retenues (régime non influencé). Cette approche a par exemple été prise pour le bassin de la Séoune⁸ (463 km²) avec la période 1969-1979 considérée comme caractéristique d'un fonctionnement peu influencé. La Figure 9 présente l'impact des prélèvements sous la forme de pourcentage entre le volume capté par les retenues/volume écoulé annuellement.

2 - Estimation des volumes à partir du régime hydrologique qui est caractérisé par les débits caractéristiques (module annuel en année sèche ou humide, module mensuelle moyen) ou mesurés dés-influencés des prélèvements.

Quand il s'agit d'évaluer l'impact sur la ressource souterraine, l'approche par bilan hydrologique vise à estimer la recharge de la nappe sur la période hivernale (1^{er} Octobre – 31 Mars) et à la comparer au volume prélevé dans la nappe pour l'alimentation de la retenue. La recharge de la nappe est estimée par bilan hydrologique à partir de la pluie, de l'ETP, de la réserve facilement utilisable du sol et éventuellement d'un coefficient de ruissellement selon le contexte étudié (le bassin versant hydrologique ne correspondant pas toujours au bassin versant hydrogéologique, en particulier dans les zones de bassins sédimentaires où la somme des débits entrants sur un bassin versant hydrologique n'est pas toujours égale à la somme des débits sortants par le cours d'eau).

5.b *Prise en compte des retenues*

Les retenues selon cette approche sont prises en compte à travers le volume prélevé sur le milieu naturel, que ce soit directement ou indirectement sur le cours d'eau, par ruissellement ou par pompage dans la nappe.

5.c *Intérêts et limites*

En affectant le volume des retenues comme le volume impactant le volume écoulé à l'exutoire du bassin versant, les études font, explicitement ou implicitement, plusieurs hypothèses :

- le volume ruisselé/infiltré est homogène sur l'ensemble du bassin versant
- les retenues/point de prélèvements sont réparties de façon également homogène dans le bassin versant, et ne s'influencent pas l'une l'autre (pas d'imbrication) ; ce qui n'est pas le cas pour des retenues en barrage de cours d'eau le long du réseau hydrographique, ou les pompages en nappes qui peuvent être plus ou moins regroupés selon différents secteurs
- Ces calculs sont basés sur un hydrosystème non évolutif au cours du temps : pour les retenues non déconnectées sur cours d'eau ou collinaires, les possibles phases de réalimentation en période d'irrigation ne sont pas prises en compte et peuvent venir fausser le bilan. Sur les retenues alimentées par pompage, l'aquifère est vu comme un réservoir étanche sans phase de vidange naturelle de la nappe, avec un prélèvement qui va venir impacter la nappe pour remplir la retenue.

Les indicateurs décrits précédemment sont finalement un produit ultime du raisonnement basé sur ces différentes hypothèses.

E.II.6 La modélisation hydro(géo)logique numérique

Un modèle hydro(géo)logique est un outil numérique et informatique de calcul des volumes et flux de surface ou souterrains dans un bassin versant, outil basé le plus souvent sur une représentation mathématique de tout ou partie du cycle hydrologique. Un modèle hydro(géo)logique permet de calculer la relation entre la pluie d'une part et le débit et/ou la charge hydraulique en nappe d'autre part, et selon les approches de modélisation, de simuler également d'autres termes du cycle hydrologique (évaporation, infiltration, transpiration, recharge des nappes, flux au sein des nappes). Dans le cadre des études d'impact cumulé des retenues, les modèles sont appliqués afin d'estimer principalement l'impact cumulé sur les débits (module annuel, régime hydrologique intra et inter-annuel) à l'aide de modèle hydrologique, ou sur les charges hydrauliques en nappe à l'aide de modèle hydrogéologique (sur ce type de modèle, le couplage avec les cours d'eau peut permettre de calculer également les impacts sur les rivières), et secondairement sur d'autres flux du cycle hydrologiques (évaporation notamment).

La modélisation hydro(géo)logique amène le modélisateur à faire de très nombreux choix, notamment en matière de paramétrisation et de calage, et également dans le cas de leur application à des bassins versants dotés de retenues, des choix sur la représentation du fonctionnement hydrologique des retenues et de leurs interactions avec l'hydrosystème du bassin versant. Dans le cas de l'application des modèles hydrologiques pour évaluer l'impact sur le débit, les rapports d'études que nous avons consultés ne contiennent pas systématiquement une information exhaustive pour comprendre les choix retenus et les éléments ayant guidé les choix de modélisation.

Nous présentons ici les modèles ayant été utilisés pour étudier et quantifier l'impact des retenues selon une typologie assez classique en hydrologie basée sur la représentation spatiale du bassin versant. Nous ne reprendrons pas l'intérêt et les limites des types de modèle de façon générale, mais en focalisant sur les retenues.

1.a Modèle géo-morphologique

1.a.i Principes généraux

L'objectif des modèles géo-morphologiques est de calculer l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Ces modèles considèrent la pluie efficace comme connue et se concentrent sur la fonction de transfert pour simuler le routage du ruissellement et des débits à travers le réseau hydrographique. Les modèles géomorphologiques s'appuient sur un hydrogramme unitaire type (hydrogramme d'une pluie efficace d'1 mm) calculé à partir de la géomorphologie, ou géométrie, du réseau hydrographique et des vitesses de propagation de l'eau au sein du réseau hydrographique. En considérant la réaction hydrologique d'un bassin versant à la pluie efficace comme linéaire, chaque hydrogramme de crue est calculé par convolution (forme de multiplication) entre la pluie efficace de l'événement considéré et l'hydrogramme unitaire.

1.a.ii Représentation des retenues

A notre connaissance, la modélisation géomorphologique a été adaptée et appliquée par une unique étude sur un bassin versant dans le cadre d'une évaluation de l'impact de retenues collinaires : le bassin versant de l'Yvel (56, France) avec le modèle H2U¹⁰⁴. L'hydrogramme unitaire y a été calculé en supposant qu'une retenue déconnecte totalement son bassin d'alimentation du reste du réseau hydrographique. Le bassin versant d'alimentation de chaque retenue est alors considéré comme une zone active vis à vis du ruissellement -le ruissellement s'y produit-, mais non contributive au débit à l'exutoire.

Le modèle a été appliqué pour estimer l'effet cumulé des retenues collinaires pour une crue estivale. L'hypothèse faite sur la représentation des retenues semble appropriée pour la période estivale pendant

¹⁰⁴ Cudennec, C., M. Sarraza and S. Nasri (2004). "Modélisation robuste de l'impact agrégé de retenues collinaires sur l'hydrologie de surface. ." Revue des sciences de l'eau 17/2: 181-194.

laquelle les retenues sont en partie vides et susceptibles de collecter dans sa totalité le volume de crue drainé par le bassin versant d'alimentation de la retenue.

1.a.iii Intérêts et limites

De façon générale, l'intérêt de cette approche de modélisation est de simuler la variation des débits au cours d'une crue, et notamment de pouvoir estimer le débit de pointe. Dans l'objectif de l'évaluation de l'impact cumulé des retenues, les modèles géomorphologiques constituent une approche capable en théorie d'estimer l'effet de laminage sur le débit d'un réseau de retenues collinaires.

Cependant, nous pouvons identifier deux principales limites :

- Les modèles géomorphologiques sont « événementiels » c'est à dire restreints à la simulation de périodes de crues. Le débit de base, et de fait le débit en période d'étiage, ne sont pas simulés.
- La complexité du mode de gestion d'une retenue (débit réservé, vidange, prélèvements) et la variabilité temporelle de son état hydrologique (niveau de remplissage en fonction des usages et de processus hydrologiques -évaporation, infiltration-) ne peuvent pas être prises en compte. Or cette complexité conditionne en partie l'effet cumulé des retenues.

1.b Les modèles globaux pluie-débit

1.b.i Principes généraux

Les modèles globaux calculent la relation pluie-débit voire pluie-niveau en considérant le bassin versant comme une seule unité spatiale homogène. Dans les études consultées, les modèles globaux sont des modèles à réservoirs, c'est à dire représentant les compartiments hydrologiques (sol, nappe, atmosphère, rivière) sous la forme de réservoirs connectés selon une topologie définie (Figure 13). Les flux entrants et sortants de chacun des réservoirs sont calculés sur la base du niveau d'eau dans le réservoir selon des lois flux-niveaux différents d'un modèle à l'autre, et pour un modèle donné variable d'un réservoir à l'autre.

Les modèles GR4J (EVP Doux-références) et GR2M (EVP Département de l'Allier) développés par le CEMAGREF, le modèle NAM du Danish Hydraulic Institute (EVP Layon-Aubance), sont des modèles globaux employés dans des études de volumes prélevables où les retenues sont prises en compte.

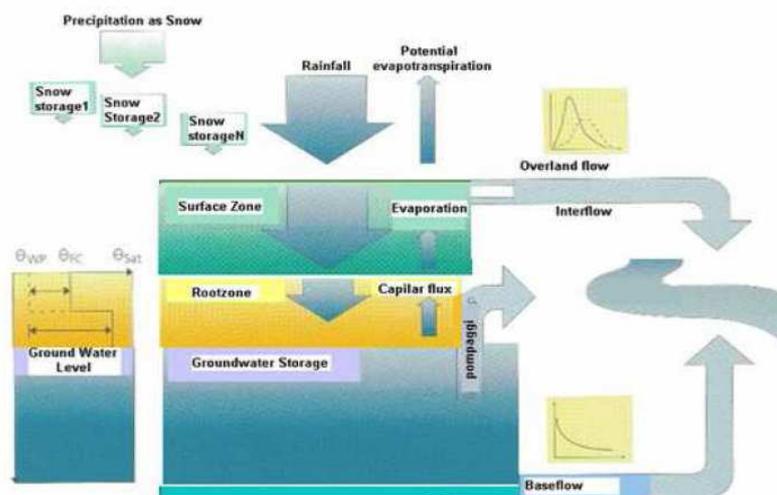


Figure 13 : Schéma du Modèle NAM

1.b.ii Représentation des retenues

L'information disponible dans les rapports d'étude ne permet le plus souvent pas de comprendre comment les retenues sont prises en compte dans le modèle utilisé. Il semble que la somme des prélèvements d'eau dans

l'ensemble des retenues est introduite dans le modèle sous la forme d'un flux négatif appliqué le plus souvent au débit simulé à l'exutoire du bassin versant. Cela implique d'avoir estimé au préalable l'intensité et la répartition dans le temps des prélèvements globaux des retenues (cf. section méthode d'évaluation des prélèvements dans les retenues).

1.b.iii Intérêts et limites

Simuler les débits à pas de temps fin et de façon continue constitue un des intérêts des modèles globaux. Généralement appliqués au pas de temps journaliers, ils permettent ainsi de simuler les débits de crue et également les débits d'étiage, ce qui apparaît nécessaire dans le cas de l'impact des retenues afin de s'assurer du respect des débits d'étiage visés ou des débits morphogènes. Un second intérêt de ces modèles est leur parcimonie en paramètres ce qui peut faciliter leur paramétrisation ou leur calage. Enfin un troisième intérêt est leur relative facilité d'utilisation.

Leur principale limite est intrinsèque à leur conceptualisation : la simulation est globale c'est à dire qu'ils simulent le débit à l'exutoire du bassin versant mais ne simulent pas le débit le long du réseau hydrographique du bassin.

1.c Les modèles distribués

Les modèles hydro(géo)logiques distribués représentent le bassin versant et/ou les aquifères comme un ensemble d'unités spatiales homogènes (discrétisation spatiale), sur lesquelles les variables d'intérêt (flux de ruissellement, d'infiltration, d'évaporation, de recharge de nappe, flux d'écoulement dans la nappe ...) et les volumes associés sont simulés selon une résolution temporelle donnée ou imposée par les méthodes numériques (discrétisation temporelle).

Sous les modèles hydrologiques, comme OpenFLUID, l'unité spatiale est généralement de forme hétérogène et permet notamment de représenter les transferts d'eau de surface, les échanges surface-souterrains simplifiés et les bilans hydrologiques à différentes échelles.

Concernant les modèles hydrogéologiques l'unité spatiale est généralement de forme fixe (carrée, pour les modèles à différences ou volumes finis : modèle SIM - CNRM-GAME et Centre de géosciences de Mines ParisTech -Figure 14 -, modèle MARTHE¹⁰⁵ -BRGM, Modflow -USGS-) ou hétérogène (triangulaire pour les modèles à élément finis - Feflow- etc.) Ces modèles permettent de prendre en compte un réseau superficiel plus ou moins simplifié et un ou plusieurs aquifères (modèle 3D).

¹⁰⁵ Thiéry D. (1990). Logiciel MARTHE, Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements. Notice BRGM R-32210.

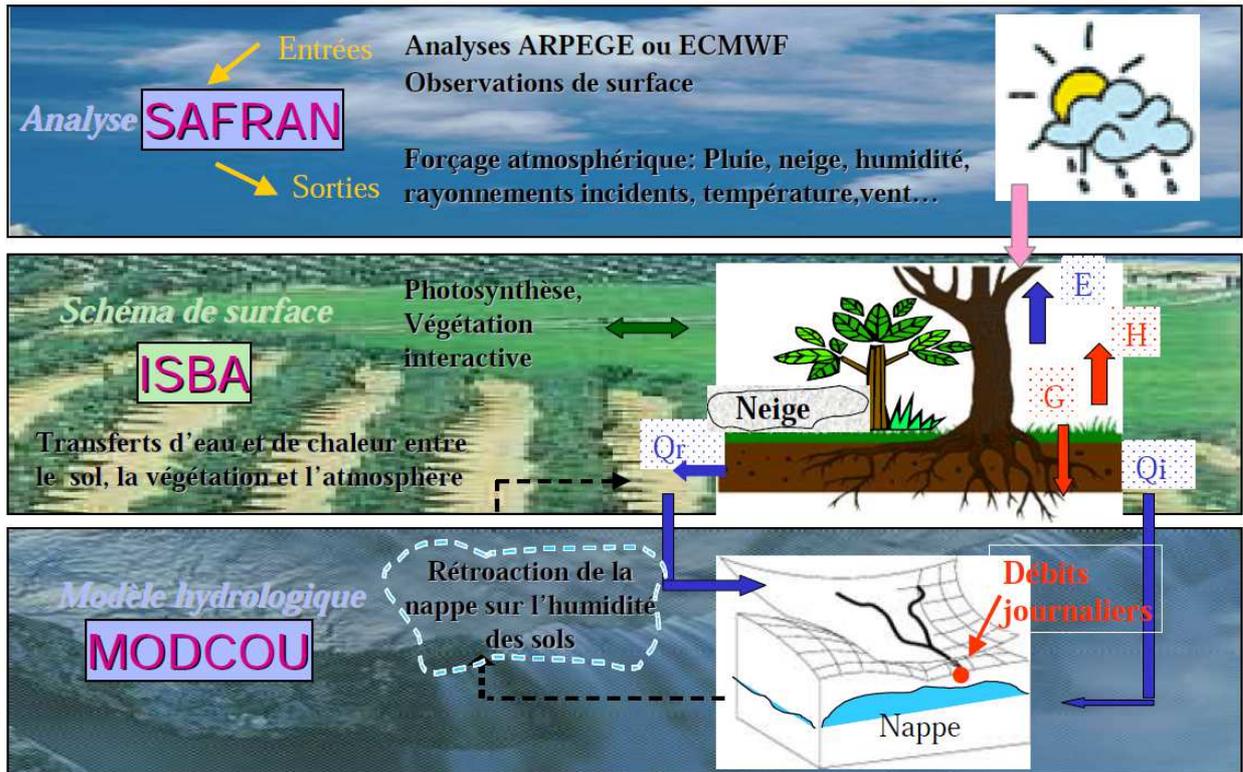


Figure 14 : Principe du modèle SIM utilisé dans l'étude DREAL Pays de Loire (Philippe et al., 2012)¹⁰⁶

La résolution temporelle s'étend généralement de la minute à la journée voire plus pour les modèles hydrogéologiques. Les discrétisations spatiale et temporelle sont conditionnées en partie par les méthodes numériques de résolution des équations, généralement aux dérivées partielles, qui représentent les différents processus hydrologiques. Dans le cas des études de gestion des retenues, cette approche de modélisation a été retenue pour le bassin versant du Layon (1000 km²) par la DREAL Pays de Loire¹⁰⁶, sur le bassin versant de la Diège (164 km² ; 229 retenues). Dans le cas d'étude d'impact de retenues alimentées par pompage, le modèle Jurassique du Poitou-Charentes et de la Vendée (~ 20000 Km²) a été utilisé sur les bassins du Lay¹⁰⁷, de la Vendée^{108, 109}, et de la Sèvre-Niortaise/Marais-Poitevin¹¹⁰.

¹⁰⁶ Philippe, E., F. Habets, E. Martin and C. David (2012). Impact des retenues collinaires sur les débits des Pays de la Loire - Rapport final, DREAL Pays de la Loire.

¹⁰⁷ Douez O. (2011a). Simulation de l'impact des projets de réserves de substitution du secteur du Lay avec le modèle hydrodynamique du Jurassique. Rapport BRGM/RP-60122-FR, 85 p., 47 fig., 2 ann.

¹⁰⁸ Douez O. (2011b). Simulation de l'impact des projets de retenues de substitution du secteur Vendée avec le modèle hydrodynamique du Jurassique. Rapport BRGM RP-60121-FR, 93 p., 53 ill., 2 ann.

¹⁰⁹ Douez O. (2012). Simulation de l'impact des projets de retenues de substitution du secteur Vendée avec le modèle hydrodynamique du Jurassique - simulations complémentaires. Rapport BRGM/RP-60956-FR, 139 p., 97 ill., 2 ann.

¹¹⁰ Bichot F., Douez O., 2014. Simulation de l'impact des projets de réserves de substitution du bassin de la Sèvre-Niortaise/Marais Poitevin avec le modèle hydrodynamique du Jurassique. Rapport BRGM/RP-63201-FR, 105 p., 67 ill., 2 ann.

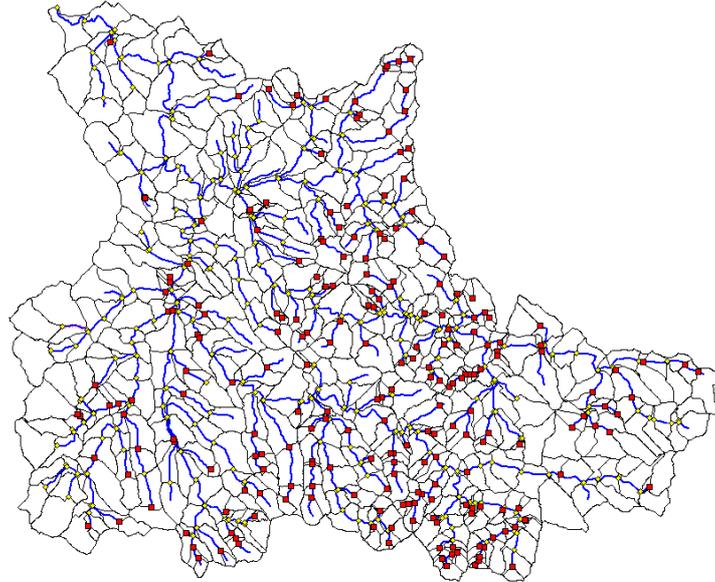


Figure 15 : Découpage du bassin versant de la Diège (615 sous bassins, 570 biefs, 229 retenues)

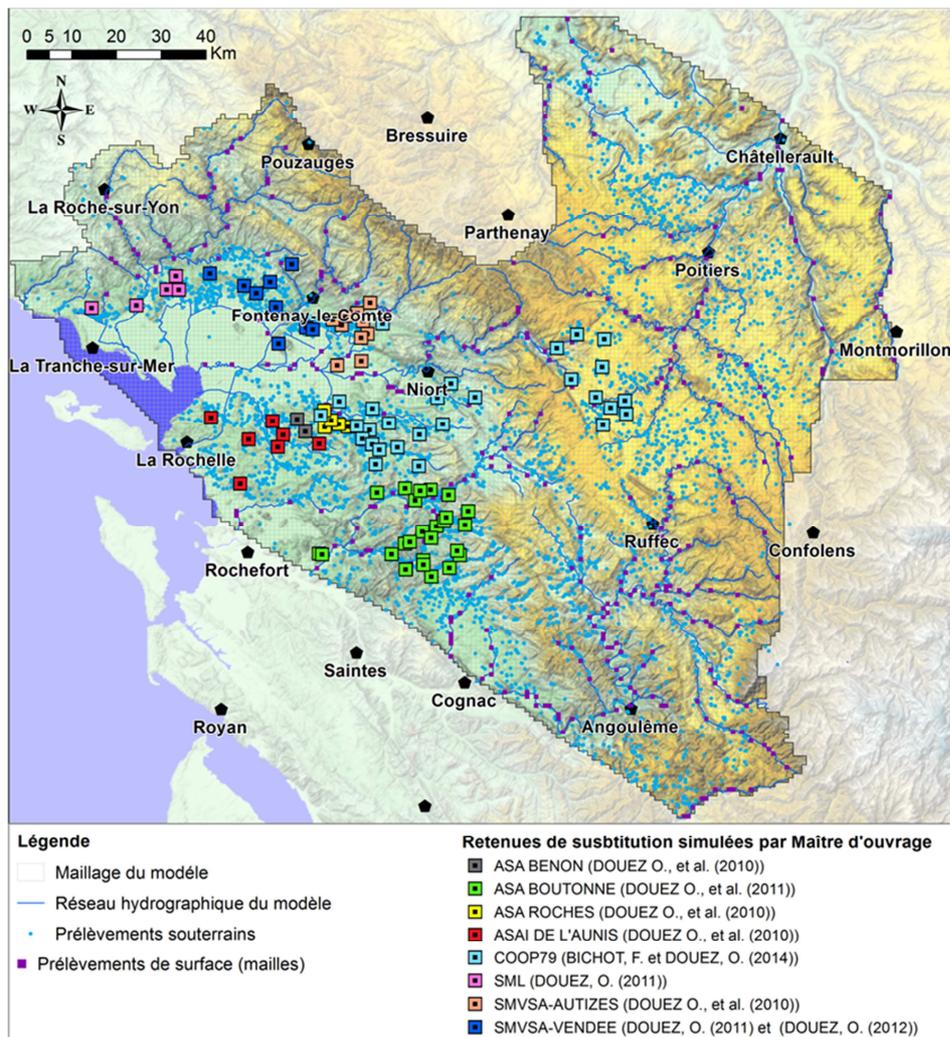


Figure 16 : Projets de retenues de substitution simulés à l'aide du modèle de Poitou-Charentes

6.a.i Représentation des retenues

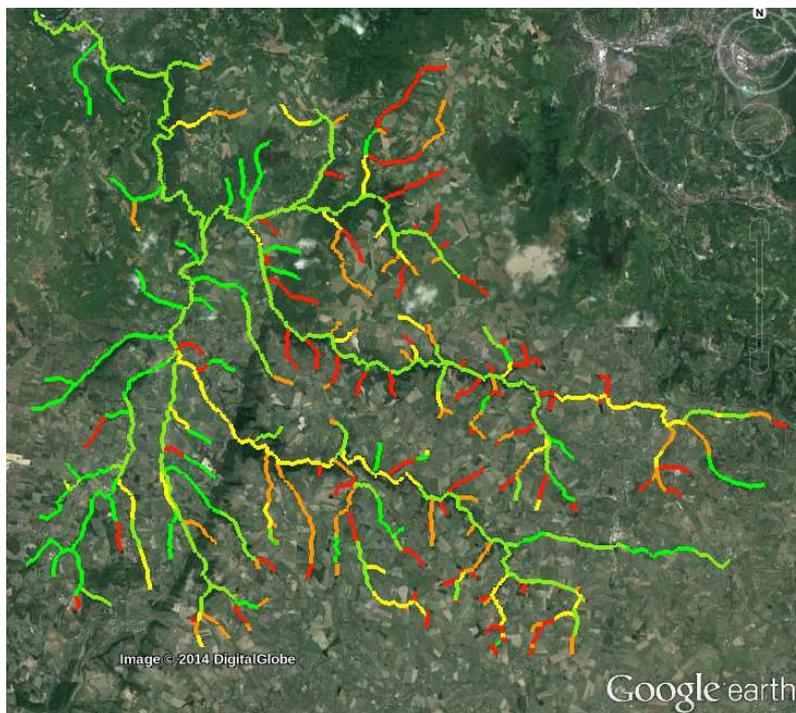
Deux modes de représentations sont retenues dans les approches de modélisation distribuée :

- une représentation spatialement explicite de la retenue ou du point de prélèvement dans le cours d'eau -ou la nappe- qui alimente la retenue : cela suppose un découpage spatiale suffisamment fin afin considérer l'unité spatiale (versant, bassin versant) alimentant chaque retenue. C'est l'approche choisie pour l'étude du bassin versant de la Diège⁵⁵ (Figure 15). C'est également l'approche choisie par le BRGM dans l'étude d'impact de projet de retenues en Poitou-Charentes
- une représentation statistique ou moyenne des retenues : l'ensemble des retenues présentes dans une maille de discrétisation spatiale du modèle est représenté sous la forme d'une unique retenue équivalente. Dans le modèle SIM (Figure 14), une retenue équivalente est simulée par chaque maille de 8 km de côté.

1.c.i Intérêts et limites

De par leur concept, les modèles hydro(géo)logiques distribués prennent en compte et simulent l'hétérogénéité des écoulements à différents niveaux d'organisation, de la maille élémentaire de calcul jusqu'au bassin versant, ou l'aquifère, de gestion. A la différence des indicateurs ou des modèles globaux, les modèles distribués, dans le cas d'une représentation spatialement explicite des retenues, peuvent rendre compte de situations plus locales (sur certains affluents notamment) où les impacts pourront être nettement plus sensibles. Cette représentation permet en théorie d'affecter des règles d'usage de l'eau mobilisée et de fonctionnement différentes d'une retenue à une autre, sous condition que ces règles soient connues. Un de leurs intérêts est donc de fournir une estimation fine dans l'espace des flux hydrologiques et/ou hydrogéologiques : des débits dans l'ensemble du réseau hydrographique, d'amont en aval, de bief d'ordre 1 jusqu'au bief d'ordre le plus élevé du bassin versant, et/ou des charges hydrauliques et flux d'écoulement sur l'ensemble de l'aquifère (Figure 17).

Plus que les autres approches, les modèles hydrologiques nécessitent de disposer de données en adéquation avec leur résolution spatiale et temporelle.



Légende : $0 < CI < 0.1$ Vert ; $0.1 < CI < 0.3$ Vert-Jaune ; $0.3 < CI < 0.5$ Jaune ; $0.5 < CI < 0.9$ Orange ; $0.9 < CI < 1.0$ Rouge

Figure 17 : Variation des débits mensuels entre une situation avec et sans retenue

E.II.7 Conclusion sur les méthodes existantes pour l'hydrologie

Cette revue montre une diversité d'approches utilisées dans les études de gestion afin de traiter de l'impact cumulé des retenues sur le débit des rivières et leur régime hydrologique. Sans prétendre à l'exhaustivité, les principaux intérêts et limites de ces approches ont été présentés. Pour autant, on constate qu'une des étapes clé est d'estimer les prélèvements dans les retenues collinaires : l'estimation des volumes prélevés au sein des retenues, et de leur répartition au cours de l'année hydrologique et dans l'espace est en effet un pré-requis commun à l'ensemble des approches analysées. Cette estimation peut se fonder sur de très fortes simplifications. C'est le cas par exemple quand le volume prélevé annuel est considéré équivalent à la capacité des retenues (minorée parfois d'un taux global de vidange, apparemment souvent fixé empiriquement). Ces simplifications, si elles peuvent être intéressantes en toute première analyse, nécessitent d'être revues dans un objectif d'une analyse et d'une quantification plus fine de l'impact des retenues. Cela a amené les études de gestion, notamment les EVP, à développer des démarches et méthodes indirectes d'estimation des volumes prélevés qu'il conviendrait d'examiner dans le cadre de cette expertise. Parmi les démarches suivies citons :

- les enquêtes auprès des agriculteurs ou des communes ; elles apparaissent peu efficaces vus les taux de réponse, et les interrogations ;
- l'estimation des prélèvements d'eau par l'agriculture par l'analyse des besoins en eau des cultures. Cette analyse s'appuie généralement sur des bases de données agricoles et des outils agronomiques, plus qu'hydrologiques, qui permettent de quantifier le besoin en eau sur un territoire au cours du temps selon les systèmes de culture et les conditions climatiques ; ce type de démarche est détaillé dans le paragraphe suivant

Sur le plan hydrologique, soulignons que les méthodes d'estimation des prélèvements s'appuient aussi, implicitement ou explicitement, sur des hypothèses sur le fonctionnement hydrologique de la retenue : connectivité de la retenue à la rivière ou au versant, poids de l'évaporation dans la vidange de la retenue, effet de l'infiltration sur l'état hydrologique de la retenue. L'infiltration de l'eau de la retenue est systématiquement négligée, sans qu'on puisse affirmer qu'elle soit négligeable. S'agissant de l'évaporation, elle est soit négligée (référence), soit assimilée à l'évapo-transpiration de référence (référence). Considérés sur une année hydrologique complète, les volumes évaporés d'une retenue collinaire peuvent être assez faibles dans le bilan (cf D.I1.d). Cependant les flux évaporés sont très importants au printemps et en été, période la plus critique en matière de disponibilité de l'eau et d'impact des retenues sur le débit des rivières (cf. D.I1.b.ii).

E.III Méthodes disponibles pour évaluer l'assolement et la dynamique des prélèvements sur un bassin

E.III.8 Comptabiliser et localiser les systèmes de culture

Les documents consultés¹¹¹ font une estimation des cultures et des surfaces irriguées (et de leur localisation) qui repose soit sur des documents comme le RGA, Corine Land Cover ou des rapports spécifiques (9) soit sur des enquêtes directes auprès des agriculteurs (22). Le Registre Parcellaire Graphique (RPG) n'est pas mentionné, probablement du fait de son existence relativement récente (depuis 2006) alors qu'il constitue une source d'information intéressante sur les assolements, voire sur les pratiques d'irrigation (entre 2006 et 2009). La télédétection n'est pas citée non plus, probablement du fait de son coût (financier et technique).

Le RPG recense depuis 2006 les occupations du sol chaque année. Il est issu de la déclaration PAC des agriculteurs qui doivent dessiner et mettre à jour, sur une orthophotographie au 1/5000, leurs îlots de

¹¹¹ Notamment, l'inventaire des besoins en eau "Doux Clair"(22) et l'étude volume prélevable du Doux(9).

culture, les cultures qui y sont pratiquées et les surfaces associées, et jusqu'en 2009, les surfaces irriguées. Le RPG, représente environ 6 millions d'îlots en France (27 millions d'hectares) et couvre de manière assez exhaustive le territoire agricole des régions à dominante de grandes cultures et de prairies. Des traitements de ces données permettent de reconstituer les séquences de culture¹¹².

La télédétection est également un moyen de cartographier les cultures et les successions de cultures¹¹³.

La connaissance des pratiques culturales associées aux cultures reste difficile. Si des expériences ont été conduites¹¹⁴ basées sur l'hybridation entre connaissances expertes locales et connaissances issues du RPG, le développement d'une méthode de spatialisation rapide et peu coûteuse des pratiques culturales, à l'échelle d'un bassin versant un peu étendu, reste du domaine de la recherche. Sur de petits bassins versants, l'enquête auprès des agriculteurs reste une méthode efficace.

Les outils énoncés permettent de décrire les systèmes de culture en place ou passés, mais ne permettent en aucun cas d'anticiper ce que l'avenir réserverait sous différents scénarios de changement de contexte climatique, économique ou réglementaire. Pour cela il est nécessaire de recourir à des outils de simulation.

E.III.9 Simuler les choix d'assolements

De nombreux modèles ont pour objectif de simuler les processus de choix d'assolement et/ou de conduite des systèmes de culture^{115, 116} ont réalisé une revue de ces modèles de comportement d'agriculteurs en distinguant les modèles normatifs (qui cherchent à identifier un optimal de fonctionnement considérant un (jeu d') objectif(s) et des contraintes de production) des modèles positifs (qui cherchent à représenter le comportement observé des agriculteurs), et d'autre part en distinguant les modèles d'optimisation et de simulation.

Beaucoup de ces modèles présentent des limites majeures : ils représentent l'agriculteur comme un homo economicus (raisonnant ses décisions sur le seul critère de maximisation de son revenu) pourvu d'une rationalité complète (connaissant a priori la variabilité climatique, les prix et les performances de ses choix et donc capable d'identifier la solution optimale dans l'espace des solutions qui s'offre à lui) qui prend ses décisions d'assolement selon un processus statique réalisé une fois l'an, sans prendre en compte le fait que l'organisation spatiale du parcellaire de l'exploitation agricole (e.g. distance entre les parcelles, morcellement du parcellaire et des surfaces irrigables) a une influence sur les modes d'utilisation agricole du sol. De plus l'agent agriculteur intervient souvent de manière simultanée sur toutes les parcelles concernées par une opération technique en même temps (e.g. semis, fertilisation, récolte d'une culture). Enfin, aucun processus ne permet de représenter le fait qu'un agriculteur acquiert des connaissances sur les performances de ses choix au fil des ans l'amenant à réviser ceux-ci.

Certains modèles (rares actuellement, mais en progression) dépassent une ou plusieurs de ces limites. Ainsi par exemple le modèle MAELIA¹¹⁷ a été conçu pour simuler l'assolement comme un processus de décision dynamique, prenant en compte l'incertitude des effets des choix sur l'environnement et de l'environnement sur les performances de ceux-ci, tenant compte de la dimension spatiale du parcellaire et, enfin, multicritère. Ainsi ce modèle est capable de simuler des modifications d'assolement sous l'effet d'une modification du

¹¹² Leenhardt D., Therond O., Mignolet C., 2012. Quelle représentation des systèmes de culture pour la gestion de l'eau sur un grand territoire ? *Agronomie, Environnement & Sociétés*, vol 2, n°2, décembre 2012.

¹¹³ Leroux, 2011. Identification et caractérisation des retenues collinaires par Télédétection : Application au Grand Ouest français.

¹¹⁴ Clément Murgue, Olivier Therond, Delphine Leenhardt. Hybridizing local and generic information to model cropping system spatial distribution in an agricultural landscape. Soumis à Land Use Policy.

¹¹⁵ Janssen S., Ittersum M. K. van. (2007). Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems*, Vol. 94, No. 3, pp. 622-636.

¹¹⁶ Dury J., Schaller N., Garcia F., Reynaud A., Bergez J. E. (2012). Models to support cropping plan and crop rotation decisions. a review. *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 32, pp. 567-580.

¹¹⁷ Taillandier P, Therond O, Gaudou B, Vavasseur M., 2012. Modélisation du comportement des agriculteurs : application d'une architecture BDI fondée sur la théorie des fonctions de croyance. DOI:10.3199/JESA.45.1-n © Lavoisier 2012 AR_DOI . Voir aussi : <http://maelia-platform.inra.fr/modeles/processus-agricoles/>

volume d'eau disponible sur l'exploitation en vue de satisfaire certains critères comme la maximisation du profit, la sécurisation du revenu, la minimisation du travail, ou la minimisation des changements d'habitudes.

9.a *Simuler les pratiques agricoles*

Pour anticiper la dynamique de vidange des retenues, ce sont les pratiques d'irrigation qu'il est important de simuler sous différents scénarios climatiques. Ces pratiques d'irrigation auront aussi un impact sur l'état hydrique du sol, notamment en fin de saison, et donc sur la période de reprise du ruissellement vers les retenues avalées.

Il est important de distinguer les besoins en eau des cultures, les demandes en eau des agriculteurs et les prélèvements d'eau réels des agriculteurs. Les besoins en eau des cultures mesurent les besoins des plantes pour atteindre un rendement potentiel. Or les pratiques des irrigants permettent rarement de satisfaire exactement ces besoins compte-tenu de différentes contraintes techniques et organisationnelles. L'irrigant vise un objectif de rendement qui peut être inférieur au rendement potentiel, en particulier si ses contraintes de matériel ou de temps disponible ne lui permettent pas d'arroser toutes ses parcelles au niveau optimal. On définit ainsi la demande en eau de l'irrigant qui intègre ces contraintes au sein de sa stratégie d'irrigation. Les surfaces des cultures d'été (maïs, cultures légumières) sont souvent dimensionnées aux capacités d'irrigation (matériel, volume disponible, durée du tour d'eau) afin de viser un objectif maximal de rendement pour ces cultures. A l'inverse, pour les cultures d'hiver (céréales, colza, protéagineux...), en cas de temps sec, les capacités d'irrigation ne sont souvent pas adaptées à ces surfaces plus importantes. Dans ce cas, l'irrigation permet de minimiser la perte de rendement.

Cette demande en eau est encore différente des prélèvements réels puisque des pannes ou des restrictions/interdictions administratives peuvent ensuite intervenir au cours de la saison.

Beaucoup de travaux mobilisent un modèle de bilan hydrique simple pour accéder aux besoins des cultures sur un bassin versant donné. Ce besoin moyen peut être réparti dans le temps et modulé pour être plus proche des prélèvements observés¹¹⁸.

Pour simuler des conditions climatiques différentes ou particulières, il est possible de recourir à des modèles décisionnels pour simuler l'occurrence des opérations culturales (notamment les apports d'eau par irrigation aux parcelles qui conditionnent les prélèvements d'eau, mais aussi les semis des cultures ou les choix de précocité variétales qui conditionne la position temporelle du cycle cultural et donc la temporalité des prélèvements d'eau). Ces modèles s'appuient sur la prise en compte des indicateurs utilisés par les agriculteurs pour déclencher leurs opérations techniques. Ils sont souvent à base de règles de décision du type « Si [indicateur][opérateur][seuil] alors [action] »¹¹⁹. Ce type de modélisation permet de simuler la demande en eau d'irrigation (plus proche de la réalité des prélèvements que les besoins en eau des cultures). Pour accéder à une simulation des prélèvements d'eau il est nécessaire de simuler les pannes (ce qui est rarement fait) et les restrictions/interdictions d'irrigation. Un modèle multi-agent comme MAELIA¹²⁰ simule un agent « gestionnaire » qui déclenche des restrictions de prélèvement d'eau en fonction de l'état des cours d'eau. Ces restrictions peuvent alors s'imposer à l'agent agriculteur qui cessera d'activer ses règles d'irrigation selon les modalités de restriction en vigueur.

¹¹⁸ Etude volume prélevable du Doux(9).

¹¹⁹ Bergez, J.-E., Debaeke, P., Deumier, J.-M., Lacroix, B., Leenhardt, D., Leroy, P., Wallach, D., 2001. MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecol. Model.* 137, 43–60.

¹²⁰ <http://maelia-platform.inra.fr/modeles/processus-normatifs/>

E.IV Méthodes utilisées pour évaluer les effets cumulés sur la qualité physico-chimique des eaux

Comme souligné précédemment (D.I.2) peu d'études se sont intéressées à l'effet cumulé des retenues sur les différents paramètres de qualité physico-chimique des eaux. A l'échelle d'une retenue, la comparaison de cette qualité entre l'amont et l'aval de la retenue peut a priori renseigner sur son rôle spécifique. A l'échelle du bassin versant, l'effet global des retenues doit pouvoir être observé à l'exutoire du bassin, en aval du réseau hydrographique affecté par les différentes retenues. Cependant une telle approche pose plusieurs problèmes : (1) la qualité physico-chimique de l'eau à l'exutoire étant la résultante du fonctionnement de tout le bassin versant, il est difficile d'y distinguer les effets de l'ensemble des retenues. La comparaison entre les parties amont du bassin versant ou des plans d'eau et l'exutoire, mise en œuvre par Delbreilh (1993)⁶ sur le BV de la Séoune, est ainsi difficile à interpréter à cause de probables évolutions non liées aux retenues dans la qualité de l'eau vers l'aval. (2) Comme déjà souligné à l'échelle d'une retenue, pour les effets cumulés, il faudrait tenir compte de la forte variabilité temporelle des paramètres physico-chimiques en fonction des conditions hydrologiques. Les suivis à l'exutoire du bassin versant devraient être multipliés au cours de l'année, en fonction des saisons et des événements hydrologiques.

Pour certains paramètres on peut supposer que les effets cumulés résultent de l'addition des effets individuels des retenues (par exemple le stockage des flux), d'autres sont plus complexes à évaluer, dépendant de la distance entre les retenues lorsqu'elles sont situées sur un même linéaire hydrographique ou de leur localisation plutôt à l'amont ou à l'aval dans le bassin versant. De façon générale, comme évoqué dans la partie D.I.2, par analogie avec les zones humides, mares et étangs, les patrons spatiaux de la distribution des retenues dans le bassin versant, et en particulier leur connectivité, ont vraisemblablement une importance majeure sur les effets cumulés qui doit être considérée.

E.V Méthodes disponibles pour aborder les effets biologiques sur un bassin versant

E.V.10 Apports et limites des méthodes hydrologiques / habitat hydraulique.

Lamouroux et al. (en prep.)¹²¹ décrivent deux types d'approches utilisées pour guider la définition des « débits écologiques » à l'aval des ouvrages, que ce soit à l'échelle des tronçons de cours d'eau (ex : à l'aval d'une retenue) ou à l'échelle de bassins versants (ex : impacts cumulé des ouvrages). Nous en donnons un aperçu ici mais se reporter à l'article sera nécessaire pour une vision plus complète/actualisée. Ces approches sont centrées sur les effets directs de changement de débits.

1. Les approches "hydrologiques" consistent à quantifier l'altération du régime hydrologique (étiages et crues ; intensité, fréquence, durée et saisonnalité des événements) et à rechercher empiriquement des relations entre altérations hydrologiques et altérations biologiques. L'identification de relations directe hydrologie-biologie est une étape délicate. Ces approches ne font pas l'objet de support logiciel en France, où la pratique est plutôt d'identifier par l'expertise les caractéristiques hydrologiques d'intérêt écologique les plus impactées par les ouvrages.
2. Les approches "hydraulique & habitats" (ex : Evha, Estimhab ; <http://www.irstea.fr/dynam>) utilisent des modèles d'habitat pour traduire les altérations hydrologiques en altérations hydrauliques (ex:

¹²¹ Lamouroux N. et al. (en prép.) Débits écologiques : la place des modèles d'habitat dans une démarche intégrée. Hydroécologie Appliquée

vitesse du courant, hauteurs d'eau) puis en altération de qualité de l'habitat hydraulique pour les organismes, essentiellement pour les poissons (bien que des solutions existent pour les macro-invertébrés). Elles concernent essentiellement les débits bas à moyens et demandent des mesures topographiques/hydrauliques sur site pour calage d'un modèle hydraulique, bien que des modèles d'habitat statistiques¹²² aient réduit l'effort de terrain. Elles sont couramment utilisées en France.

Une approche hydrologique est nécessaire pour identifier l'ensemble des altérations hydrologiques qui peuvent altérer les communautés biologiques. L'approche habitat est plus ciblée sur les débits bas à moyens, et permet de traduire certaines altérations hydrologiques en altération d'habitat, plus pertinentes car mieux reliées aux réponses biologiques par des validations de terrain¹²¹. Le besoin de combiner ces deux types d'approches est largement reconnu dans la littérature internationale. Par exemple, l'apport potentiel des modèles d'habitat hydrauliques statistiques est mentionné dans les approches hydrologiques les plus courantes^{123, 124}. En retour, les guides de modèles d'habitat rappellent l'importance d'intégrer la démarche dans une approche plus globale incluant une description des altérations hydrologiques et du contexte environnemental au sens large¹²⁵. La guidance Européenne récente sur les débits écologiques¹²⁶, la législation française sur les débits réservés¹²⁷ et les guides régionaux^{128, 129} convergent également dans le sens d'une combinaison des approches.

Les modèles d'habitat ne fournissent pas directement des valeurs de débits écologiques et ne font que quantifier les altérations d'habitat des espèces pour différents scénarios de gestion. Leur mise en œuvre devra donc être associée à une expertise : identification des aspects importants du régime, des groupes biologiques et espèces prises en compte, analyse multi-critères des impacts sur les milieux et les usages.

Dans ce cadre, la formation des experts et l'intégration des différentes parties dans la démarche sont fondamentaux. Lamouroux et al. (en prep.)¹²¹ proposent d'intégrer leur utilisation dans une démarche en quatre étapes: (1) la description du contexte hydrologique naturalisé et actuel, des usages actuels et envisagés (2) la description du contexte écologique au sens large, (3) l'identification des métriques pertinentes (dont des variables hydrologiques et/ou d'habitat) pour décrire les impacts et altérations (usages et milieux) et (4) la définition de scénarios et la comparaison des impacts. Cette démarche ne se passe pas d'expertise, et combine des approches hydrologiques et des modèles d'habitat pour guider les choix de débits réglementaires.

Ces méthodes peuvent s'appliquer à l'échelle des bassins et nécessitent alors avant tout une modélisation/extrapolation hydrologique de bassin (cf. ci-dessus). Plusieurs stratégies sont alors possibles. Une première consiste à identifier des sites représentatifs du problème posé et/ou à enjeu écologique fort (cf. paragraphe éléments de cadrage) sur lesquels la modélisation d'habitat sera poussée. C'est l'option choisie par les études « volumes prélevables » dans le bassin du Rhône¹²⁸. Une seconde solution est de faire des

¹²² Lamouroux N., Capra H. (2002) Simple predictions of instream habitat model outputs for target fish populations. *Freshwater Biology*, 47, 1543-1556.

¹²³ Poff N.L., Richter B.D., Arthington A.H., Bunn S.E., Naiman R.J., Kendy E. et al. (2010) The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 55, 147-170.

¹²⁴ Wilding T.K., Bledsoe B., Poff N.L., Sanderson, J. (2014) Predicting habitat response to flow using generalized habitat models for trout in Rocky Mountain streams. *River Research and Applications*, 7, 805-824.

¹²⁵ La méthodologie Estimhab dans le paysage des méthodes de microhabitat. Note technique, Cemagref Lyon, 9 p. (<http://www.irstea.fr/dynam>)

¹²⁶ European Commission (2015) Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive. CIS Guidance Document No. 31. Technical Report - 2015 – 086.

¹²⁷ Baran, P. (2011). Les méthodes d'aide à la détermination de valeur de débit minimum. Annexe 2 de la circulaire du 5 juillet 2011 relative à l'application de l'article L. 214-18 du code de l'environnement modifié par la loi n°2006-1772 du 30.12.2006 dite loi sur l'eau et les milieux aquatiques

¹²⁸ Flouy C., Navarro L., Stroffek S., Dupré la Tour J., Lamouroux N. (2013) Mieux gérer les prélèvements d'eau : l'évaluation préalable des débits biologiques dans les cours d'eau. Note du Secrétariat Technique du Sdage. Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Irstea, Onema.

¹²⁹ Baran P., Longuevergne L., Ombredane D., Dufour S., Dupont N. (en prép.) Débit Minimum Biologique (DMB) et gestion quantitative de la ressource en eau. Centre de Ressources et d'Expertise Scientifique sur l'Eau en Bretagne.

approximations sur le fonctionnement hydraulique du bassin pour modéliser les altérations d'habitat sur l'ensemble du bassin¹³⁰. C'est l'exemple de Miguel et al. (soumis)¹³¹ qui simulent l'impact possible des prélèvements souterrains sur les habitats dans les cours d'eau du bassin de la Seine, avec la plate-forme « estimkart ». De telles simulations de cadrage permettent d'identifier les zones potentiellement les plus impactées, mais ne sont pas aujourd'hui possibles en routine, faute de logiciel diffusé.

Dans le cas des retenues, il est fondamental de rappeler

1. que l'utilisation de ces méthodes éco-hydrologiques nécessite au préalable une bonne connaissance des altérations hydrologiques, particulièrement là où les altérations hydrologiques sont notables et/ou les enjeux biologiques sont forts. L'utilisation de telles méthodes est donc à freiner en cas de forte incertitude hydrologique.
2. que ces méthodes ne concernent que les effets d'altérations hydrologiques / hydrauliques à l'aval des ouvrages, et que ces altérations ne constituent qu'une partie des effets des retenues, parfois secondaires. En particulier, beaucoup de retenues de substitution de têtes de bassin vont modifier l'étendue spatiale et temporelle des assecs¹³² et impacter d'autres groupes que les poissons.

Les méthodes « hydrologiques » utilisent généralement des scénarios de débits journaliers altérés et naturalisés. A défaut, il est important avant de mettre en œuvre ces méthodes de quantifier les altérations écologiquement importantes (ex : débits d'étiage de type VCNs, débits pendant la reproduction des espèces considérées, fréquence de crues morphogènes ou utiles au décolmatage du substrat, et toute autre statistique que l'expert jugera importante).

E.V.11 Apports et limites des métriques basées sur les compartiments biologiques

Il existe actuellement différents outils de bioindication ou des métriques fonctionnelles basés sur les communautés vivantes, qui permettent de qualifier l'état des écosystèmes aquatiques, notamment dans le cadre de la DCE. Certains d'entre eux permettent d'appréhender l'impact d'une ou plusieurs retenues. Toutefois, du fait de leur sensibilité à une large gamme de pressions de natures très diverses, leur capacité diagnostic (capacité de rendre compte de l'impact d'une pression en particulier) reste souvent imprécise. Par ailleurs, prédire la manière dont ces bioindicateurs sont susceptibles de réagir à l'intensification de l'implantation de retenues sur un bassin versant reste très largement à explorer.

11.a A l'échelle de la retenue

Lorsque l'écologie d'une retenue est évaluée, ce qui est rare, son évaluation est faite avec les méthodes utilisées en cours d'eau, alors qu'il existe des méthodes pour les petits plans d'eau ou pour les lacs. En ce qui concerne les grandes retenues, les méthodes concernant les lacs (IOBL, IBML, IIL,...) pourraient être implémentées. En ce qui concerne les petites retenues, il existe des méthodes en Europe qui peuvent être utilisées bien qu'elles ne soient pas des indicateurs « officiels » DCE. En Suisse, plusieurs indices de biodiversité basés sur les macroinvertébrés : l'indice CIEPT¹³³ mais également sur les plantes, les amphibiens et les

¹³⁰ Snelder T.H., Booker D., Lamouroux N. (2011) A method to assess and define environmental flow rules for large jurisdictional regions. *Journal of the American Water Resources Association*, 47, 828-840.

¹³¹ Miguel C., Lamouroux N., Pella H., Labarthe B., Flipo N., Akopian M., Belliard J. (soumis) Altération d'habitat hydraulique à l'échelle des bassins versants: impacts des prélèvements en nappe du bassin Seine-Normandie. *La Houille Blanche*.

¹³² Pelte T., Navarro L., Stroffek S., Dupré la Tour J., Datry T., Langon M., Martinez P.-J., Delhay H. (2014) Les cours d'eau intermittents. *Elements de connaissance et premières préconisations*. Note du Secrétariat Technique du Sdage. Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Irstea, Onema, Dréal Rhône-Alpes.

¹³³ Menetrey, N., B. Oertli, et al. (2010). "The CIEPT: A macroinvertebrate-based multimetric index for assessing the ecological quality of Swiss lowland ponds." *Ecological Indicators* 11: 590-600.

odonates adultes ont été mis au point : la méthode PLOCH¹³⁴, la méthode IBEM plus accessible aux gestionnaires^{25,135}. Ces protocoles standardisés seraient directement utilisables dans d'autres zones : les classes de l'indice sont transférables dans les zones proches de la Suisse (Jura, Rhône-Alpes) moyennant précautions ; pour le reste de la France, les modèles permettant d'obtenir les classes devraient toutefois être réadaptés.

Les diatomées benthiques fournissent une bio-indication assez fine du niveau trophique (nutriments) du milieu aquatique et assez intégratrice de la variabilité temporelle des teneurs en nutriments (intégration évaluée expérimentalement à 1 à 2 mois)¹³⁶. Ces qualités sont largement utilisées dans le cadre d'indices normalisés applicables aux milieux lotiques¹³⁷ et lenticques¹³⁸. Le diagnostic classique repose sur des déterminations d'espèces, ce qui suppose l'intervention d'un expert. Des évolutions sont en cours pour affiner le diagnostic en prenant en compte des types biologiques¹³⁹ ou une taxonomie moléculaire (DNA barcoding). Quelle que soit la méthode d'interprétation utilisée, il faut pratiquer des prélèvements de biofilms sur des substrats rocheux, en évitant soigneusement les sites soumis à de trop fortes abrasions et turbulences (agitations de l'eau) ou à des périodes d'exondations (marnages) dans lesquels ne se développent que des « biofilms pionniers » (« hors d'équilibre »). Les diatomées, ou plus généralement les biofilms, peuvent en effet être sensibles aux modifications du régime hydrologique (richesse et diversité)¹⁴⁰. Dans ce contexte, on peut envisager un diagnostic intégré de l'état trophique des retenues, à partir des diatomées, à partir de prélèvements simples (des galets bien placés, vers 40-60 cm de profondeur, suffisent).

11.b Cours d'eau adjacent

Pour évaluer l'état du cours d'eau adjacent, un suivi BACI (Before After Control Impact), comme recommandé dans les suivis d'opérations de restauration, serait plus adéquat que des mesures uniquement amont-aval.

Les indicateurs biologiques DCE (IPR, IBGN) ne sont pas suffisants pour analyser l'impact local d'un aménagement ou d'un usage donné¹⁴¹. Il faudrait aller au-delà de ces indicateurs et au-delà des groupes biologiques poissons et macroinvertébrés : processus de décomposition des litières¹⁴², amphibiens, flore.

Les diatomées, ou plus largement les biofilms, pourraient être utilisés pour réaliser un diagnostic de l'état du milieu à l'aval des retenues, des éventuelles modifications dues à celles-ci, voire une étude des distances de récupération éventuelle. Ce point suppose toutefois que les modifications à l'aval soient suffisamment intenses pour rentrer dans la gamme de sensibilité de l'indicateur.

L'étude multi-compartiments biologiques présentée par Marzin *et al.* (2012)¹⁴³ révèle que 55 métriques biologiques ont capacité à détecter la présence d'un barrage, incluant respectivement 77%, 65%, 56% et 36%

¹³⁴ Oertli, B., D. A. Joye, et al. (2005). "PLOCH: a standardized method for sampling and assessing the biodiversity in ponds." *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems* 15(6): 665-679.

¹³⁵ Indermuehle, N., S. Angélibert, et al. (2010). "The pond biodiversity index "IBEM": a new tool for the rapid assessment of biodiversity in ponds from Switzerland. Part 2. Method description and examples of application." *Limnetica* 29(1): 105-119.

<http://campus.hesge.ch/ibem/>

¹³⁶ Paragraphe rédigé avec l'appui de Frédéric Rimet, Ingénieur de Recherche à l'INRA (UMR CARTEL)

¹³⁷ Afnor. 2007..NF T90-354. Qualité de l'eau - Détermination de l'Indice Biologique Diatomées (IBD). Afnor:1-79

¹³⁸ A. Marchetto. 2014 L'indice EPI-L pour l'évaluation de la trophie des lacs profonds par les diatomées benthiques. Book of Abstract, 32ème colloque de l'Association des Diatomistes de Langue Française & 7th Central European Diatom Meeting, Thonon-les-Bains, France, 16-20 sept 2013. ISSN 978-2-7466-6166-0.

¹³⁹ F. Rimet and A. Bouchez. Life-forms, cell-sizes and ecological guilds of diatoms in European rivers. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* 406:1-14, 2012.

¹⁴⁰ Ponsatí L., Acuña V., Arista I., Arroita M., García-Berthou E., von Schiller D., Eloegi A. & S. Sabater. (2014). Biofilm responses to flow regulation by dams in mediterranean rivers. *River Research and Applications* DOI 10.1002/rra

¹⁴¹ Souchon, Y. and V. Nicolas (2011). Barrages et seuils : principaux impacts environnementaux, ONEMA & Cemagref: 28.

¹⁴² Gessner, M. O. and E. Chauvet (2002). "A case for using litter breakdown to assess functional stream integrity." *Ecological Applications* 12(2): 498-510.

¹⁴³ Marzin, A., V. Archaimbault, J. Belliard, C. Chauvin, F. Delmas and D. Pont (2012). "Ecological assessment of running waters: Do macrophytes, macroinvertebrates, diatoms and fish show similar responses to human pressures?" *Ecological Indicators* 23(0): 56-65.

des métriques testées basées sur les poissons, les invertébrés benthiques, les macrophytes aquatiques et les diatomées. Les deux métriques ayant le meilleur pouvoir de discrimination (DE) sont des métriques fonctionnelles basées sur les poissons : « l'abondance relative des poissons intolérants à la désoxygénation » (DE = 85%) et « le nombre d'espèces lithophiles » (DE = 74%). Si la plupart des métriques basées sur les poissons ont une efficacité de discrimination relativement moyenne ($DE_{moyen} = 41\%$; 11-85%), elle est cependant nettement plus forte que celle des autres compartiments ; i.e. invertébrés benthiques (19% ; 7-59%); macrophytes (22% ; 7-37%) ; et diatomées (15% ; 11-33%). Un outil diagnostique basé sur un ensemble de modèles capables de calculer la probabilité d'impact d'un type de pression donné -incluant le risque de colmatage ou le risque d'instabilité hydrologique- sur un site déterminé a été récemment développé¹⁴⁴. Basé sur le principe de la construction d'une forêt d'arbres de classification (Conditional Tree Forest = CTF), chaque modèle utilise l'information apportée par une combinaison de 216 métriques prenant en compte la modification des caractéristiques biologiques et des préférences écologiques des assemblages d'invertébrés benthiques d'un cours d'eau sous contrainte anthropique. L'examen des métriques parmi les plus contributives à la construction de chacun de ces modèles (e.g. les fréquences relatives des organismes (i) « ovovivipares », (ii) à phase « adulte aquatique » ou (iii) à mode de dissémination « aquatique, passif » au sein du peuplement, pour le « risque de colmatage » ou les fréquences relatives des organismes (i) « nageurs », (ii) « filtreurs » ou (iii) caractéristiques du « chenal principal » pour le « risque d'altération hydrologique ») permettrait d'avoir une interprétation plus mécaniste de l'impact des retenues sur les communautés d'invertébrés autochtones. Une altération du débit est également à l'origine d'une modification de la fréquence d'apparition de certains traits fonctionnels liés à la reproduction chez les poissons ou à l'affinité pour le courant ou pour des substrats d'érosion vs de sédimentation chez les invertébrés⁶⁰.

¹⁴⁴ 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.

Partie F. VISITES DE BASSIN ET ANALYSE SCIENCE

POLITIQUE/SCIENCES SOCIALES

Une des particularités de cette expertise collective réside dans son déroulement en plusieurs phases, et notamment les visites de bassin pendant la première phase. Ces dernières ont permis aux experts, parallèlement à la lecture de la littérature opérationnelle, d’appréhender la diversité des contextes physiques dans lesquels sont implantées les retenues, mais également la densité, la taille et le mode de gestion de celles-ci, les différences de gouvernance rencontrées dans chacun de ces bassins, et la façon dont les acteurs impliqués perçoivent la problématique de l’« impact cumulé des retenues ». Les bassins visités ont été choisis au sein des 3 grands bassins hydrographiques gérés par les Agences de l’eau les plus concernées par la problématique de la gestion quantitative de la ressource en eau :

- le bassin Rhône-Méditerranée et Corse, où le bassin-versant du Doux équipé principalement de retenues collinaires a été choisi ;
- le bassin Loire-Bretagne, où il a été décidé de visiter les bassins-versants de la Vendée et des Autizes équipés de réserves de substitution alimentées essentiellement par pompage en nappe, et dans une moindre mesure par pompage en cours d’eau ;
- le bassin Adour-Garonne, où les bassins-versants du Midour et de la Midouze équipés de retenues collinaires et de réserves de réalimentation qui ont fait l’objet de la visite.

Ces bassins ont été sélectionnés principalement par les Agences de l’eau en lien avec les services déconcentrés de l’Etat et les partenaires locaux. Seul le bassin-versant du Doux a été identifié par nos soins via l’étude inter-Agences² de l’eau qui s’appuyait sur plusieurs cas types, dont celui du Doux. Les visites de terrain réalisées par les experts ont été complétées par des audits auprès des acteurs, dont la synthèse est présentée plus loin et permet de mettre en perspective les points communs et différences quant à la perception des questions relatives à l’impact cumulé des retenues entre les acteurs de ces trois bassins.

F.I Présentation des bassins visités

F.I.1 Bassin-versant du Doux

1.a *Caractéristiques physiques du bassin-versant*

Situé au nord du département de l’Ardèche, le Doux est un affluent rive droite du Rhône au niveau de Tournon-sur-Rhône. Le bassin-versant du Doux présente une superficie de 630 km² et comporte plus de 700 retenues, principalement collinaires et quelques-unes sur barrage, localisées principalement sur la moitié aval du bassin-versant. Ses deux principaux affluents sont :

- le Duzon : affluent rive droite (32 km) ;
- la Daronne : affluent rive gauche (25 km).

La topographie de ce bassin-versant est très marquée. Le Doux présente des pentes assez fortes en tête de bassin : ainsi, sur ses 10 premiers km, sa pente est de 5%. Puis elle s’adoucit pour redevenir abrupte ponctuellement au niveau des gorges. La pente moyenne du Doux étant de 1,5 %¹⁴⁵.

¹⁴⁵ ISL (2010). Etude de détermination des volumes prélevables - Bassin versant du Doux. Agence de l’eau Rhône Méditerranée et Corse.

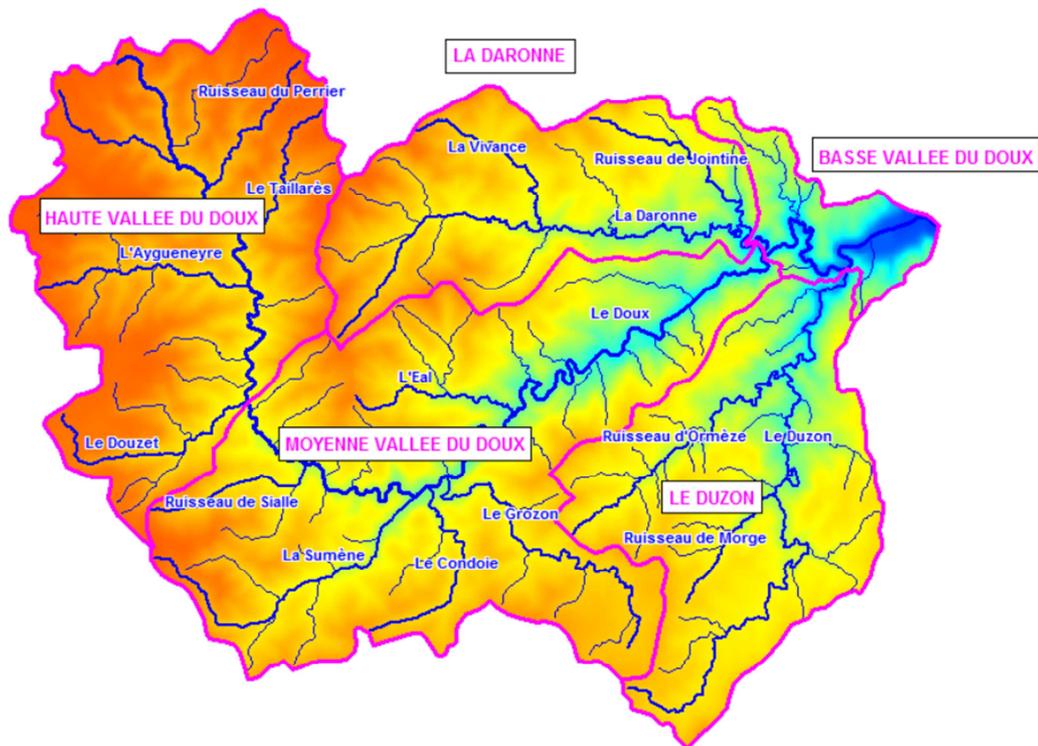


Figure 18 : Réseau hydrographique et sous-bassins versants du Doux¹⁴⁶

Le bassin versant du Doux fait partie du Vivarais et forme une unité morphologique dans la partie orientale du Massif Central, disséquée par l'érosion et qui se caractérise par un transport solide actif. L'amont des barrages situés sur le Doux et utilisés pour la production hydroélectrique constitue des zones importantes de stockage de matériaux¹⁴⁷.

Le Doux s'écoule sur des terrains cristallins (granites) et cristallophylliens (gneiss, schistes, micaschistes) aux comportements similaires. Du fait de la nature du sous-sol, la ressource en eau du bassin-versant du Doux est essentiellement superficielle ou sous-cutanée, directement associée à la pluviométrie¹⁴⁸. Soumis à un climat subméditerranéen, le bassin-versant du Doux présente une pluviométrie annuelle comprise entre 825 à 900 mm au nord-est du bassin, 930 à 1040 mm environ sur l'amont du bassin-versant au nord-ouest et 1150 mm sur les reliefs situés au sud et au sud-ouest du bassin. Les mois où la pluviométrie est la plus abondante sont les mois de septembre à novembre, suivis des mois d'avril et mai contrairement aux mois de (janvier)-février-mars, suivis des mois de juin et surtout juillet où la pluviométrie est la moins abondante. La variabilité interannuelle de la répartition mensuelle des précipitations est importante d'après les valeurs des quartiles^{149, 145}.

D'un point de vue hydrologique, le Doux est un cours d'eau cévenol de type pluvial méditerranéen avec par conséquent des débits très contrastés. Son débit suit les précipitations avec un maximum principal en octobre-novembre et un maximum secondaire au début du printemps. Les crues peuvent être rapides, violentes et importantes en débit. A l'opposé, les étiages sont très sévères de juin à septembre pouvant aller jusqu'à un assec total¹⁴⁷. La seule station hydrométrique sur le bassin versant du Doux est celle de Colombier le Vieux, située en amont des confluences de la Daronne et du Duzon. L'hydrologie du Doux à Colombier est caractérisée

¹⁴⁶ ISL (2012). Etude de détermination des volumes prélevables - Bassin versant du Doux. Rapport de phase 6 : Proposition de répartition des volumes entre les usages et proposition de périmètre d'organisme unique RSO-0211 Version 2.

¹⁴⁷ Communauté de communes du Haut-Vivarais, Communauté de communes du Pays de Lamastre, Communauté de communes du Pays de St Félicien and Communauté de communes du Tournonais (2011). Plan pluriannuel d'entretien du Doux 2013-2018, Conseil Général de l'Ardèche.

¹⁴⁸ Cesame (2014). Étude de faisabilité environnementale de la mise en oeuvre de substitutions aux pompes agricoles dans le Doux - Rapport de présentation Phase 1.

¹⁴⁹ En statistique descriptive, un quartile est chacune des 3 valeurs qui divisent les données triées en 4 parts égales, de sorte que chaque partie représente ¼ de l'échantillon de population. Le 1^{er} quartile sépare les 25% inférieurs et le 3^{ème} sépare les 75% supérieurs des données.

par un module interannuel d'environ 4,9 m³/s, un étiage de juin à septembre, marqué en juillet-août (et surtout août), et des hautes eaux d'octobre à février (et notamment au mois de novembre). Les débits caractéristiques d'étiage sont les suivants (source : Banque Hydro) :

- Débit mensuel moyen en août : 550 l/s
- Débit mensuel biennal (QMNA2) : 230 l/s
- Débit mensuel quinquennal (QMNA5) : 70 l/s
- VCN3 quinquennal : 8 l/s

1.b Occupation du sol

D'après la base Corine Land Cover (2006), le bassin versant du Doux comporte 57 % de forêts et milieux à végétation arbustive ou herbacée, et 42 % de territoires agricoles¹⁴⁵. Le recensement du Conservatoire Régional des Espaces Naturels de Rhône-Alpes (CREN) indique par ailleurs que 890 ha sont occupés par des zones humides, ce qui représente 1,5 % de la surface du bassin¹⁴⁵.

L'agriculture ressort comme étant la principale activité économique implantée sur le territoire malgré un contexte difficile. En 2000, la SAU sur le bassin versant du Doux s'élève à 22 000 ha soit 35% de la superficie du bassin.

Les sous-bassins identifiés comme les plus agricoles sont la basse vallée du Doux (arboriculture : cerises, abricots, pêches associée à de l'élevage), la Daronne (polyculture élevage avec une plus forte présence de grandes cultures que de vergers) et le Duzon (élevage et cultures fourragères). La haute vallée du Doux (polyculture élevage à dominante élevage), quant à elle, est caractérisée par une plus forte présence de forêt et une part de surfaces agricoles plus faible que la moyenne du bassin versant. Depuis toujours, l'irrigation joue un rôle important dans le bassin-versant du Doux, dans l'évolution des systèmes de production. La présence de béalières¹⁵⁰ en témoigne¹⁵¹. L'irrigation est principalement utilisée pour l'arboriculture et les cultures fourragères. Les ressources sollicitées sont majoritairement les retenues collinaires et dans une moindre mesure les prélèvements directs dans les cours d'eau sur la saison d'étiage¹⁴⁵.

1.c Particularités du bassin-versant du Doux en termes de caractéristiques et gestion des ouvrages

L'étude inter Agences² de l'eau sur l'impact des petites réserves artificielles sur les milieux précise que dans le bassin-versant du Doux, les ouvrages de stockage d'eau sont majoritairement caractérisés par leur faible taille, tant en terme de surfaces (surface médiane de 0.1 ha, et surface moyenne de 0.14 ha) que de capacité (capacité médiane de 3600 m³ pour une capacité moyenne légèrement inférieure à 7000 m³). Cette faible taille s'explique par la topographie accidentée du secteur et l'usage dominant de ces plans d'eau. La répartition de ces retenues sur le bassin-versant est hétérogène : l'amont du bassin est quasi dépourvu de plans d'eau contrairement à la moyenne vallée du Doux, au bassin du Duzon, et dans une moindre mesure au bassin de la Daronne².

Globalement, 83% du stockage total est assuré par des retenues individuelles et 17% par des retenues collectives gérées par des Associations Syndicales Agricoles (ASA) : retenue de la Jointine (0,3 Mm³), retenue de la Choisine (0,15 Mm³), retenue de l'Oasis (0,156 Mm³) et retenue de Germat (0,032 Mm³). L'étude SRAE¹⁵² de

¹⁵⁰ Les béalières sont des petits canaux d'irrigation destinés à récupérer les eaux des ruisseaux ou des rivières, celles-ci étant dérivées à l'aide de petits ouvrages temporaires. Les béalières acheminent les eaux ainsi collectées, qu'elles soient issues de l'écoulement habituel des cours d'eaux ou bien des surplus générées des pluies ou des orages, en suivant les courbes de niveau. La très faible pente des béalières permet une distribution optimale de l'eau par le canal au profit de cultures et de prairies. Grâce au système des béalières les agriculteurs ardéchois ont pu mettre en valeur des terrasses éloignées des fonds de vallée et soumises à une certaine sécheresse.

¹⁵¹ Chambre d'agriculture de l'Ardèche and SIVU "Doux Clair" (1999). Inventaire des besoins en eau d'irrigation satisfaits par pompage sur le BV du Doux.

¹⁵² Service Régional de l'Aménagement des Eaux Rhône-Alpes (1991). Etude de l'impact des retenues collinaires sur les étiages dans le bassin du Doux.

1991 indique que 60% des retenues sont considérées comme des retenues collinaires, et non comme implantées sur le réseau hydrographique.



Figure 19 : Retenue de la Jointine (Source : Irstea)

Pour ces retenues à usage d'irrigation, l'exploitation des volumes stockés se fait dans la totalité des cas par reprise directe dans la retenue. Selon les données recueillies par la Chambre d'agriculture de l'Ardèche¹⁵³, la période d'exploitation des retenues s'étend tout au plus de mi-juin à fin août et la période de remplissage démarre habituellement dès le début du mois d'août.

Les dispositifs de restitution diffèrent, quant à eux, selon les capacités de stockage de l'ouvrage :

- Les ouvrages collectifs sont munis de prises de fond vannées. La délivrance d'un débit réservé est effectuée par l'ouverture de cette vanne pour les retenues de la Jointine, de la Choisine et de l'Oasis, et par un dispositif particulier pour la retenue de Gerzat (la plus récente). En effet, cette retenue présente une originalité à double titre : la prise d'eau pour le débit réservé est située à l'amont de la retenue, l'eau ainsi restituée étant celle du cours d'eau entrant. Par ailleurs, cette retenue comporte un 2^{ème} débit réservé, plus conséquent, avec un système de dérivation des crues automnales qui ne fonctionne que du 1^{er} septembre au 31 décembre. Un tuyau transfère ainsi l'eau d'un des émissaires amont directement vers l'aval. Ce 2^{ème} débit réservé a été mis en place en 2008-2009 suite à une décision de justice, à la demande de l'AAPPMA de Tournon-sur-Rhône afin de favoriser notamment les frayères.
- Les autres ouvrages individuels ne sont équipés que d'un déversoir, susceptible de ne fonctionner qu'une fois la cote maximale atteinte. Il a été constaté la présence des écoulements en aval immédiat de retenues non pleines, attribués à des fuites et parfois considérés comme faisant office de débits réservés².

1.d Contexte réglementaire et études réalisées

Classé en Zone de Répartition des Eaux (ZRE) depuis 1995 par arrêté préfectoral¹⁵⁴, le bassin-versant du Doux fait fréquemment l'objet d'arrêtés préfectoraux de restriction de prélèvements en période d'étiage. Il a donné lieu à des nombreuses études, notamment l'étude inter-Agences² de l'eau en 2001, et une étude volumes

¹⁵³ Chambre d'agriculture de l'Ardèche and SIVU "Doux Clair" (1999). Inventaire des besoins en eau d'irrigation satisfaits par pompage sur le BV du Doux.

¹⁵⁴ Arrêté préfectoral 95-951 du 26 septembre classe le Doux et les nappes sous-jacentes en ZRE

prélevables réalisée en 2011. Cette dernière a conclu à un scénario de réduction des prélèvements d'eau à l'étiage sur la moyenne vallée du Doux et la vallée de la Daronne ainsi qu'à un scénario de gel des prélèvements à l'étiage sur la haute vallée du Doux, la basse vallée du Doux et le Duzon (Cf. Figure 18). C'est pourquoi, un programme de substitution aux pompages dans le Doux a été mis en place afin d'assurer au Doux un débit de 100 l/s en période d'étiage et de réduire les prélèvements directs en cours d'eau de 50 % d'ici 2017, puis de 100 %. En parallèle, un travail a été réalisé par les services de l'Etat pour réaliser les révisions des autorisations de prélèvements.

La Chambre d'Agriculture de l'Ardèche a ensuite effectué un recensement des exploitants agricoles utilisant un pompage en rivière et souhaitant participer au programme de substitution des pompages. Cet inventaire a permis d'identifier des sites potentiels pour les exploitants concernés situés dans les sous-bassins où doit s'opérer une réduction des prélèvements, à savoir 4 sites collectifs et 27 sites individuels avec en parallèle l'étude de la faisabilité de raccorder 3 exploitants à une retenue déjà existante. La démarche s'est basée sur une estimation de besoins de 2000 m³/ha irrigué. Dans la priorisation des projets étudiés, il a été convenu d'étudier prioritairement les retenues existantes à proximité et qui pourraient être mobilisées, puis de privilégier les projets collectifs et enfin d'étudier la création d'ouvrages individuels.

1.e Gouvernance

Ce sont les communautés de communes qui ont la compétence rivières et qui travaillent ensemble par le biais d'une convention partenariale. La gestion des cours d'eau sur le bassin du Doux est ainsi portée par l'Entente Doux et affluents, regroupant 5 Communautés de Communes du bassin : Communauté de Communes Rhône Crussol, Communauté de Communes du Pays de St Félicien, Communauté de Communes Val'Eyrieux, Communauté de Communes Hermitage Tournonais et la Communauté de Communes du Pays de Lamastre.

En définitive, le bassin-versant du Doux apparaît comme un bassin au relief très marqué avec une agriculture peu intensive mais qui tend à le devenir sur certains secteurs et une grande difficulté à implanter de nouvelles retenues sur un territoire déjà bien équipé d'ouvrages pour la plupart individuels.

F.I.2 Bassins-versants des Autizes et de la Vendée

2.a Caractéristiques physiques des bassins-versants

L'Autize et la Vendée sont tous deux des affluents rive droite de la Sèvre Niortaise, qui présentent respectivement un bassin-versant d'une superficie de 293 km² et 675 km²¹⁵⁵ (Cf. Figure 21). Dans sa partie amont, l'Autize traverse une région bocagère au relief accidenté et reçoit de nombreux affluents surtout développés en rive droite. Puis, elle traverse la plaine vendéenne, orientée vers une culture céréalière. Dès son entrée dans le marais, elle se sépare en deux bras : la Vieille Autize et la Jeune Autize¹⁵⁶. Quant au bassin de la Vendée, il est très influencé par un barrage à vocation de production d'eau potable, situé entre la partie amont au relief prononcé et la partie de plaine à l'aval, qui lisse les crues en période hivernale et effectue également un soutien d'étiage. Dans cette région au relief très atténué, le climat est de type océanique tempéré avec une hauteur pluviométrique annuelle de 880 mm et une répartition mensuelle montrant un maximum automnal et hivernal (plus de 80 mm de septembre à janvier), ainsi qu'un déficit dès la fin du printemps (moins de 50 mm de mai à août).

¹⁵⁵ Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (2013). Retenues de substitution secteur Vendée - Enquête publique - Volume 1 : Dossier de Déclaration d'intérêt général, Syndicat mixte Vendée Sèvre Autizes.

¹⁵⁶ SAFEGE (2004). Etude visant à élaborer le SAGE de la Sèvre Niortaise et du Marais Poitevin.

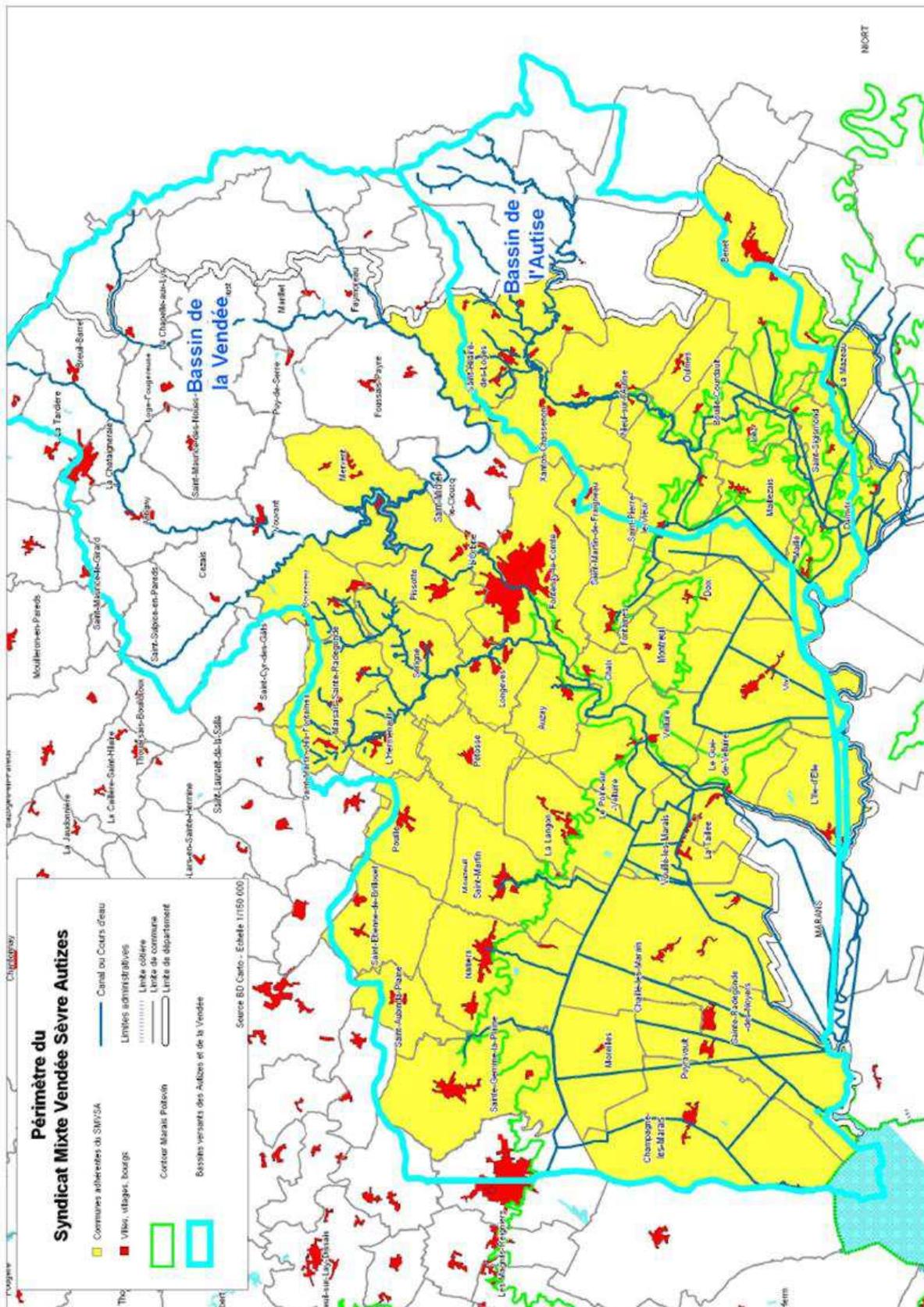


Figure 20 : Localisation des bassins-versants de la Vendée et des Autizes (Source : Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (2013))¹⁵⁷

¹⁵⁷ Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (2013). Retenues de substitution secteur Vendée - Enquête publique - Volume 1 : Dossier de Déclaration d'intérêt général, Syndicat mixte Vendée Sèvre Autizes.

Au niveau pédologique, trois grands types de sols sont rencontrés dans ces secteurs : les terres de groies, les terres de limons de plaine et les terres de marais¹⁵⁸. Le sud-est du département de la Vendée s'étend sur des formations sédimentaires datées du secondaire (Cf. Figure 212) : Jurassique inférieur (ou Lias) avec des formations calcaires, argileuses ou gréseuses, Jurassique moyen (Dogger) avec essentiellement des formations calcaires.

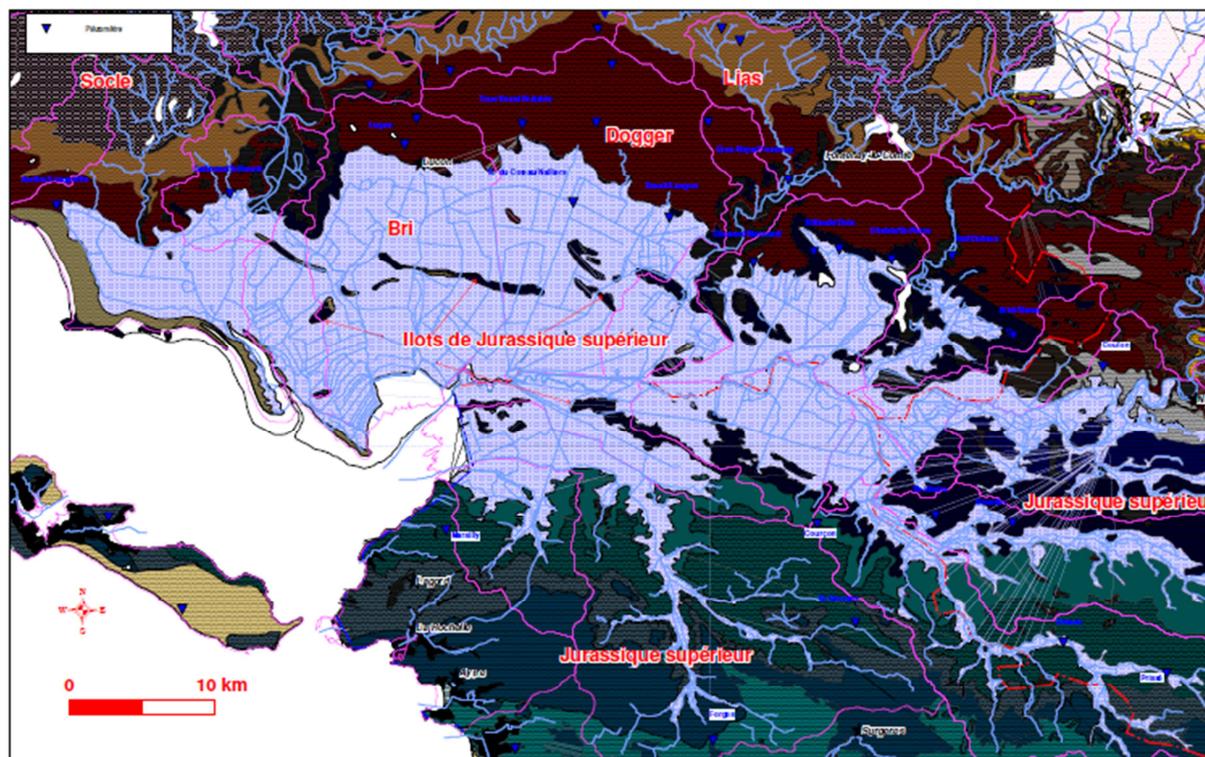


Figure 21 : Carte géologique du Marais Poitevin

La partie amont du bassin-versant de la Vendée correspond à du socle (granitoïdes, roches métamorphiques) ; On note la quasi-absence de circulation superficielle au niveau de la partie du bassin-versant où affleure la nappe superficielle dite du Dogger, ce qui traduit l'importance des circulations souterraines. Le bassin versant de l'Autize comporte également une partie amont triangulaire correspondant au socle, bien drainée par le réseau superficiel, et une partie aval correspondant aux terrains calcaires de la nappe sous-jacente du Lias et de la nappe du Dogger.

Des échanges d'eau entre les nappes sont possibles par drainage ou à la faveur de fracturations. La nappe du Sud Vendée est semi-captive, avec une nappe de bordure très réactive aux précipitations (peut monter d'un mètre en 24h). En période hivernale, la nappe alimente le marais, tandis qu'en période estivale, il n'y a plus d'apport de la nappe, ce qui engendre théoriquement en fin d'étiage un équilibre des niveaux entre la nappe et le marais. Cependant, en période de prélèvement intense, dans les années 1990, les forages pouvaient rabattre la nappe à un niveau inférieur à celui du marais, avec des effets d'inversions de flux, d'incidences sur la zone humide, d'assèchement précoce sur des zones à enjeux environnementaux et de conflits d'usage.

¹⁵⁸ Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (2013). Retenues de substitution secteur Vendée - Enquête publique - Volume 3 : Etude d'impacts Syndicat mixte Vendée Sèvre Autizes

Le régime hydrologique de la Vendée présente un module interannuel de 4 m³/s, contre 2,62 m³/s pour l'Autize. Les débits caractéristiques d'étiage sont les suivants (source : Banque Hydro) :

Vendée

- QMNA : 0,140 m³/s
- VCN3 quinquennal : 0,021 m³/s
- VCN10 quinquennal : 0,046 m³/s

Autize

- VCN3 quinquennal : 0,008 m³/s
- QMNA 5 : 0,014 m³/s

2.b Occupation du sol

Le territoire est fortement marqué par l'activité agricole. Il s'agit principalement de grandes cultures (48%), de polyculture-élevage (18%), d'élevage, particulièrement bovin viande (16%), des élevages hors sol (9%), et du maraîchage (8%). En 2010, les céréales occupaient 56% de la SAU (maïs en premier lieu, puis blé tendre et blé dur), les oléagineux 13%, avec principalement du tournesol puis du colza. Les fourrages représentaient quant à eux 21 % de la SAU. Les prairies permanentes occupaient 60% des surfaces fourragères, le reste étant constitué de fourrages cultivés (maïs fourrage, luzerne, prairies temporaires). Les filières agro-alimentaires, telles que Fleury Michon, La Boulangerie, sont également très présentes en Vendée. Il faut souligner que l'agriculture représente 35% de l'économie vendéenne¹⁵⁹.

2.c Contexte général et réglementaire

Le Marais Poitevin situé en aval des bassins-versants des Autizes et de la Vendée constitue la deuxième zone humide classée de France en termes de superficie (112 000 ha) avec un double enjeu, à la fois environnemental et agricole. En effet, le Marais Poitevin doit concilier une activité économique indispensable à la vie de ce territoire et la préservation de ses milieux remarquables (ZNIEFF, ZPS, DOCOB Natura 2000) très dépendants de l'activité humaine. La gestion de la ressource en eau est donc au cœur des préoccupations sur ce secteur : la régulation optimale des niveaux d'eau au sein du marais nécessite une coordination mais aussi une adaptation des prélèvements d'eau dans les nappes et les cours d'eau des bassins-versants.

La réflexion sur cette problématique de la gestion quantitative de l'eau a débuté dès les années 1990 afin de maintenir les niveaux d'eau dans le marais mouillé vendéen. Le développement des cultures céréalières et de l'irrigation avait en effet conduit à une surexploitation de la nappe et une baisse des niveaux d'eau en période estivale. C'est pourquoi, en 1992, un protocole de gestion de la nappe Sud Vendée a été adopté afin de fixer les conditions d'usage¹⁵⁸. Les bassins du Lay, de la Vendée et de la Sèvre Niortaise ont alors été classés en Zone de Répartition des Eaux.

En 2002, l'Etat a adopté un plan gouvernemental pour le Marais poitevin consacré à la préservation des milieux remarquables. Ce plan d'action prévoyait la maîtrise des prélèvements d'une part et la création de réserves de substitution d'autre part. L'objectif de substitution pour l'ensemble du Marais Poitevin s'élève à 30 Mm³, soit la moitié des prélèvements autorisés¹⁶⁰. Afin d'être acceptable socialement et économiquement, le plan fixe un objectif de substitution de 15 Mm³ sur une échéance de 10 ans. Son évaluation à mi-parcours en 2009 a mis en évidence la nécessité de renforcer les moyens déjà mis en œuvre et ceci par la création en 2011¹⁶¹ de l'établissement public du Marais Poitevin. Cet établissement coordonne la gestion de l'eau et de la biodiversité sur le Marais Poitevin et sur les bassins-versants qui l'alimentent. Il joue également le rôle d'organisme unique de gestion collective¹⁵⁹.

¹⁵⁹ Syndicat Mixte du Marais Poitevin Bassin de la Vendée de la Sèvre et des Autizes (2014). Réserves de substitution - bassin des Autizes : origine, gestion et bilan des réserves de substitution.

¹⁶⁰ Lepercq, D. and S. Laloux (2011). "Des réserves de substitution associées à une gestion collective de la ressource en eau pour protéger les milieux fragiles."

¹⁶¹ Par le décret n°2011-912 du 29 juillet 2011.

Par ailleurs, l'Agence de l'eau Loire-Bretagne a mis en œuvre une politique territoriale qui fédère les acteurs et les actions à mener sur un territoire hydrographique cohérent pour atteindre les objectifs environnementaux des masses d'eau définies par la Directive Cadre sur l'Eau. Ceci par le biais de plusieurs contrats territoriaux, outils multi-thématiques dont :

- Les Contrats Territoriaux des Milieux Aquatiques (CTMA) ;
- Le Contrat Territorial de Gestion Quantitative de la Vendée (CTGQ).

Enfin, d'un point de vue réglementaire, parallèlement au SDAGE Loire-Bretagne, les bassins-versants de la Vendée et des Autizes sont également encadrés par le SAGE Sèvre-Niortaise et Marais Poitevin ainsi que le SAGE Vendée qui définissent des objectifs de piézométrie parfois différents de ceux indiqués dans le SDAGE.

2.d Particularités des bassins-versants des Autizes et de la Vendée en termes de caractéristiques et gestion des ouvrages

Une volonté politique très forte couplée à une gestion volontariste des exploitants agricoles a fait émerger une démarche collective, qui a permis dans un premier temps la création de 10 réserves de substitution sur le secteur des Autizes puis dans un second temps, l'implantation de 9 réserves de substitution sur le secteur de la Vendée, ceci afin de maintenir le potentiel économique en limitant l'impact de l'activité agricole sur les milieux naturels. Sur le secteur de la Vendée, certaines réserves ont difficilement pu être implantées en dehors des zones d'intérêt écologique : les décaler aurait nécessité d'implanter de nombreuses canalisations et aurait rompu l'équilibre économique du projet. Le choix a donc été fait de s'inscrire dans des mesures d'accompagnement et dans une logique de territoire, avec la mise en place d'habitats d'espèces d'intérêt identifié(es) dans la ZPS et la mise en place ou le confortement de haies bocagères basses préconisées par le Docob du site Natura 2000.



Figure 22 : Réserve créée hors de tout thalweg par déblai / remblai (Source : <http://www.charentelibre.fr>)

Les bassins-versants des Autizes et de la Vendée sont équipés principalement de réserves de substitution alimentées majoritairement par pompage en nappe. En effet, les prélèvements utilisés pour l'irrigation sont à 94 % issus de nappes profondes (Dogger ou Lias)¹⁵⁹. Les réserves de substitution des Autizes présentent un volume qui varie entre 140 000 et 650 000 m³ avec une emprise totale moyenne d'environ 7 ha. Celles du secteur Vendée ont une capacité totale qui oscille entre 178 011 m³ et 888 899 m³ avec une emprise totale moyenne d'environ 10 ha. L'eau stockée n'est pas restituée dans le milieu mais distribuée sous pression par réseaux. Les conditions de remplissage sont imposées par le SDAGE Loire-Bretagne. Celui-ci s'échelonne du 1^{er} novembre jusqu'à début mars, avec un complément effectué fin mars ; il se déroule sur 80 jours consécutifs maximum, afin d'optimiser les coûts. Le remplissage hivernal s'effectue à partir de forages dans la nappe, voire de prélèvements dans les milieux superficiels sous condition de niveau et de débit suffisant¹⁶⁰. Le principe retenu est d'utiliser les forages préexistants sur les installations individuelles.

Le Syndicat Mixte Vendée Sèvre Autizes est à la fois le maître d'ouvrages et le propriétaire de ces réserves et la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) en assure la gestion, en tant que délégataire de

service public. La CACG se charge notamment de la surveillance continue des milieux par le biais d'indicateurs (piézomètre de référence, débit des rivières, cotes des biefs de marais, intensité des prélèvements). Les prélèvements dans les réserves sont basés sur des courbes types de consommation en fonction de l'assolement de chaque irrigant. En cas de franchissement des courbes prévisionnelles de consommation, des mesures de limitation des prélèvements sont déclenchées graduellement. Les réserves de substitution créées sur le bassin-versant des Autizes ont permis : la réduction de 50% des prélèvements printaniers et estivaux dans les milieux naturels, le respect d'une cote piézométrique minimale de 2,5 m, la remontée progressive des niveaux estivaux de nappe de 3,50 m par rapport à l'année la plus sèche, ainsi que la mise en place d'une gestion collective équitable des ressources superficielles, souterraines et stockées¹⁶⁰. Tous les irrigants de la zone, raccordés ou non aux réserves, ont les mêmes droits et devoirs et participent financièrement au fonctionnement du système. Les réserves de substitution présentent à la fois une efficacité sur le milieu, reconnue lors des aménagements réalisés sur le secteur des Autizes et une sécurisation de la ressource en eau pour la conduite de l'irrigation.

En définitive, il semble que ce système de gestion collective fonctionne relativement bien, grâce notamment à la réactivité de la nappe, et qu'il apporte aux irrigants une sécurisation de l'accès à l'eau. Il n'est toutefois pas évident qu'il soit transposable dans un contexte où la nappe serait moins réactive. Il est par ailleurs difficile d'évaluer l'effet sur le marais : en effet, le niveau de celui-ci est relativement stable, car fonction de la gestion des vannes et des portes à la mer. Si l'on envisage ce bassin comme un cas d'étude, sans tenir compte de sa position spécifique en amont du marais poitevin, il conviendrait, de façon plus générale, de prendre en compte notamment les milieux situés à l'aval et les échanges nappes-rivières.

F.I.3 Bassin-versant du Midour - Midouze

3.a Caractéristiques physiques du bassin-versant

Le bassin-versant du Midour, à cheval sur les départements du Gers et des Landes, présente une superficie de 800 km² (Cf. Figure 24). Le Midour (108 km) et la Douze prennent leur source sur les coteaux armagnacais et se réunissent à Mont de Marsan pour former la Midouze (151 km depuis sa source). La partie amont du bassin du Midour correspond au secteur gersois des coteaux molassiques, d'assez faible altitude, avec des sols argileux propices à un fort ruissellement et où le réseau hydrographique est très dense. En période hivernale, des périodes de hautes eaux et des crues brèves et soudaines, liées au fort ruissellement lors d'épisodes pluvieux importants ou violents, sont observées. En période estivale, les étiages sont accusés et généralement précoces, ceci en raison du climat plus sec et de la faiblesse des nappes libres. La partie aval du bassin-versant du Midour correspond au plateau des sables landais, qui comporte un réseau hydrographique plus lâche soumis à l'effet régulateur joué par les nappes libres du plio-quatenaire, tant sur les crues que sur les étiages, qui sont par conséquent moins marqués et moins rapides. Cependant, en cas de saturation des nappes, les crues peuvent être importantes lors des longs épisodes pluvieux hivernaux¹⁶².

Les ressources en eau sont donc essentiellement liées à la pluviométrie. Celle-ci est plus importante à l'aval du bassin qu'à l'amont. La pluviométrie moyenne annuelle sur la commune de Mont de Marsan, située au milieu de bassin, est d'environ 800 mm. Le Midour présente un module interannuel de 5,310 m³/s et les débits caractéristiques d'étiage mesurés à la station de Villeneuve de Marsan sont les suivants :

- VCN3 : 0,300 m³/s
- VCN10 : 0,320 m³/s
- QMNA5 : 0,330 m³/s

¹⁶² Institution Adour (2012). SAGE de la Midouze - Etat des lieux - Version 3.

D'un point de vue géologique, le substrat molassique peu perméable et à fortes pentes affleure dans la partie amont du bassin, et favorise le ruissellement ; il est rapidement recouvert par les sables fauves, atténuant le modelé et générant des sols plus profonds. Les ressources en nappes superficielles sont relativement faibles et discontinues sur les coteaux armagnacais. Elles sont par contre importantes et accessibles dans les sables landais qui sont par nature extrêmement filtrants. Sur l'ensemble du bassin de la Midouze, les ressources en nappes profondes sont importantes, mais sont souvent peu accessibles, en particulier sur la partie amont. Les différents aquifères connectés aux écoulements superficiels sont ainsi, du plus ancien au plus récent : l'aquifère du Crétacé supérieur, l'aquifère Oligocène, les aquifères du Miocène et les aquifères Plio-Quaternaires¹⁶². Le bassin de la Midouze se compose ainsi de quatre grands types de sols :

- des sols d'alluvions fluviales le long des cours d'eau ;
- des sols lessivés à l'amont du bassin en général profonds et à RFU¹⁶³ élevée ;
- des podzosols dans la partie landaise, acides, très perméables et à percolation rapide ; cette capacité de rétention réduite entraîne une faible RFU ;
- des sols de tourbières, particulièrement hydromorphes avec une hauteur d'eau comprise entre 40 et 50 cm.

La partie amont du bassin-versant de la Midouze est soumise dans sa presque totalité à un fort risque d'érosion, contrairement au plateau landais.

¹⁶³ Réserve d'eau Facilement Utilisable par les plantes. Exprimée en mm, elle dépend de la texture du sol.

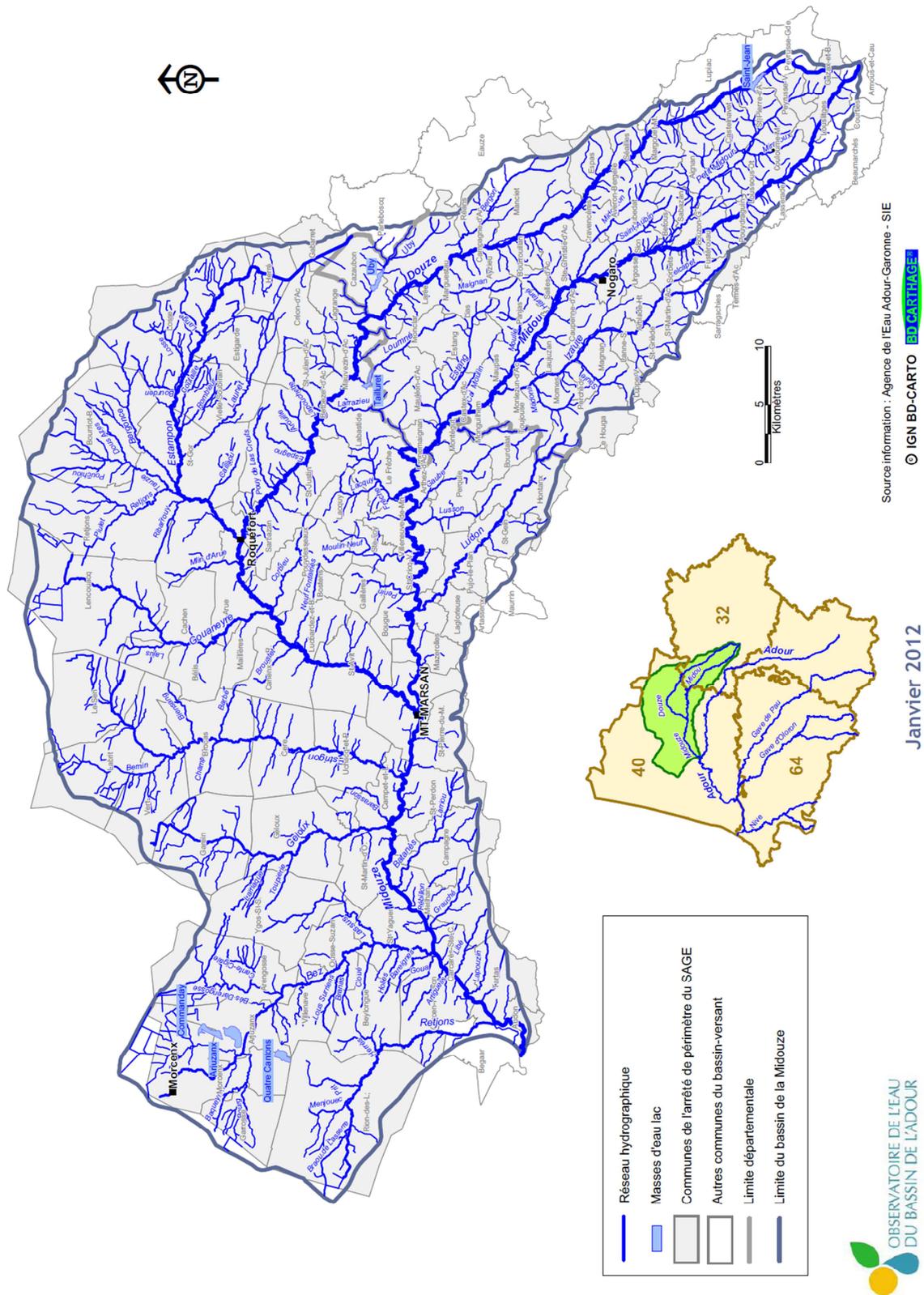


Figure 23 : Localisation du bassin-versant du Midouze (Source : Institution Adour 2012¹⁶⁴)

¹⁶⁴ Institution Adour (2012). SAGE de la Midouze. Plan d'Aménagement et de Gestion Durable. Annexes cartographiques.

3.b Occupation du sol

L'occupation du sol du bassin-versant de la Midouze est à dominante agricole et se compose de trois secteurs bien distincts :

- en amont, l'agriculture est très importante et basée sur l'élevage. Sur le sol de molasse et d'argiles à galets, les cultures fourragères et l'élevage bovin dominant. Dans cette zone, le maïs n'atteint que 23% de la SAU ;
- la zone centrale du bassin présente plutôt une polyculture à dominante maïs (presque 50% de la SAU) alors que les cultures fourragères ne représentent que 14% de la SAU. Les zones amont et centrale font également la part belle à la viticulture (armagnac) ;
- En aval, la forêt occupe 72% du territoire, laissant une large place à la sylviculture. L'agriculture est alors limitée aux zones de clairières dans lesquelles on trouve une quasi monoculture du maïs (plus de 63% de la SAU) ainsi que quelques élevages de volailles.

Dans l'ensemble du bassin de la Midouze, la culture irriguée est largement prédominante et les ressources utilisées sont essentiellement d'origine souterraine. Les aquifères les plus sollicités sont les nappes du plio-quaternaire (46% des prélèvements en nappe) et du Miocène (37% des prélèvements en nappe)¹⁶².

L'agriculture est l'activité économique prédominante, avec également la présence d'industries agro-alimentaires (distilleries / vinification) et de nombreuses piscicultures dont les effets sur le milieu sont fonction du type de production.

3.c Particularités des bassins-versants du Midour et de la Midouze en termes de caractéristiques et gestion des ouvrages

Il existe dans le bassin de la Midouze de nombreuses retenues collinaires et retenues de réalimentation, de tailles très diverses, vouées dans la plupart des cas à des usages locaux (réservoirs d'irrigation individuels et collectifs). Cependant, de nombreuses piscicultures sont également présentes sur le secteur et semblent avoir un effet sur le milieu en fonction du type de production (pisciculture intensive, aquaculture en étang). Sept retenues, avec un volume utile allant de 0,52 Mm³ à 2,50 Mm³, sont destinées à la réalimentation artificielle des cours d'eau pour la plupart implantées dans le département du Gers. Sous maîtrise d'ouvrage de l'institution Adour, la gestion de ces retenues a été confiée à la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, qui doit respecter des valeurs de débits à l'aval des retenues (arrêté inter-préfectoral du 06 Juillet 2004).

Afin de réglementer les plans d'eau et de vérifier les aspects liés à la sécurité des barrages et à la restitution du débit réservé, les DDTMs des Landes et du Gers ont entrepris un recensement de ces ouvrages de stockage et la mutualisation des connaissances sur les caractéristiques de ces retenues et sur leur mode de gestion au sein de bases de données. Dans le département des Landes, une télédétection à partir d'images satellites ainsi que l'exploitation d'archives, avec l'intervention d'un géomètre pendant 3 ans, ont permis de localiser environ 2600 plans d'eau. La partie landaise du bassin-versant du Midour comporte ainsi 203 retenues (superficie cumulée : 284 ha) pour un volume cumulé de 6,5 Mm³, dont 47% sont utilisées pour l'irrigation. 50% de ces retenues sont situées sur cours d'eau, 25% sont localisées sur fossé, et le restant est à déterminer. La partie gersoise du bassin-versant du Midour comporte 344 plans d'eau (superficie cumulée : 434 ha) pour un volume cumulé de 13,8 Mm³.

La problématique de la prolifération des petits plans d'eau en Adour-Garonne est au cœur des préoccupations. Le SDAGE Adour-Garonne 2010-2015 et plus précisément sa disposition C20 prévoit d'identifier les sous bassins versant concernés par une forte densité de petits plans d'eau, et sur lesquels il est nécessaire de réduire leur prolifération. Le glossaire du SDAGE définit la zone à densité excessive de plans d'eau comme un sous bassin où le volume cumulé des plans d'eau dans un bassin versant dépasse la moitié des pluies efficaces en année quinquennale sèche (estimé sur la base d'une profondeur moyenne des plans d'eau de un mètre et d'une

cartographie élaborée par le préfet) ou si la densité de plan d'eau est supérieure à 3/km². Cette disposition, soumise à interprétation, sera malgré tout reprise dans le prochain SDAGE Adour-Garonne à défaut d'indicateur plus pertinent de la notion d'interception de la pluie efficace. Le SDAGE Adour-Garonne 2016-2021 prévoit d'exclure l'implantation de plans d'eau dans les zones humides, les cours d'eau en très bon état et les réservoirs biologiques.



Figure 24 : Retenue collinaire sur le bassin-versant du Midour (Source : Irstea)

3.d Contexte réglementaire et études réalisées

Le bassin de la Midouze alimenté notamment par le Midour est déficitaire, et a été classé en Zone de Répartition des Eaux par décret¹⁶⁵ en conseil d'Etat. Les débits d'étiage ont connu une forte baisse constante de 1967 à 2006, liée non seulement à une augmentation des besoins en eau par les différents usages mais également à l'aggravation des déficits pluviométriques récurrents d'année en année¹⁶². L'augmentation des prélèvements agricoles dans les années 1980, notamment sur le bassin amont (Midour / Douze) a conduit à renforcer les débits naturels par une réalimentation artificielle à partir de réservoirs. C'est le schéma Midour - Douze mis en œuvre par l'Institution Adour qui a initié la mise en service de 7 réservoirs représentant un volume utile de 7,5 Mm³. Puis, le bilan Besoins-Ressources réalisé en 1994 dans le cadre du Schéma Directeur de gestion des étiages du bassin de l'Adour a notamment permis de quantifier le déficit à 14,6 Mm³ sur l'ensemble du bassin de la Midouze, dont 7 Mm³ sur le bassin du Midour, et d'identifier des perspectives de réalimentation et de gestion¹⁶⁶. Concernant les enjeux environnementaux, le bassin de la Midouze regorge de milieux humides au potentiel écologique important (lagunes, prairies humides, étangs...) classés en ZNIEFF, arrêtés de protection de biotope et sites Natura 2000.

La mise en place du SAGE sur le bassin versant de la Midouze est apparue par conséquent de plus en plus urgente au regard des problèmes rencontrés sur cet affluent de l'Adour, notamment en période estivale (étiages sévères de 2002, 2003 et 2005). C'est ainsi que dès 2002, l'Institution Adour a décidé de s'inscrire concrètement dans la démarche SAGE. Parallèlement, un plan de crise interdépartemental relatif à la gestion des étiages du bassin de l'Adour dans sa globalité a été validé par arrêté le 5 juillet 2004 afin de pallier les années critiques, dans l'attente de la mise en place opérationnelle du SAGE Midouze. Arrêté par les Préfets au niveau interdépartemental, ce plan fixe un dispositif progressif d'alerte et de restriction des usages destiné à favoriser le respect des valeurs de débits fixées par le SDAGE et à éviter que les DCR ne soient atteints. La coordination de ce plan est assurée par le Préfet des Landes, Préfet coordonnateur de bassin, et par la MISEN

¹⁶⁵ Décret du 29.04.1994

¹⁶⁶ Institution Adour (2008). SAGE de la Midouze - Diagnostic global.

des Landes. Quant à sa mise en œuvre, elle est assurée par les quatre MISEN¹⁶². Puis, le Préfet a installé la Commission Locale de l'Eau en mars 2005 pour 6 ans, durée du mandat, et la CLE a alors choisi l'Institution Adour comme structure porteuse pour le SAGE adopté en 2012. L'institution Adour déjà propriétaire de 22 réservoirs de soutien d'étiage, prévoit sur le bassin-versant du Midour, la création de 4 réservoirs supplémentaires dont 2 sur cours d'eau.

En définitive, le bassin-versant du Midour-Midouze apparaît comme un bassin déjà largement équipé de retenues collinaires et réserves de réalimentation pour la plupart individuelles où la culture irriguée prédomine.

F.II Synthèse science politique / sciences sociales

Nous présentons ici la synthèse du travail sociologique mené dans le cadre de l'expertise. Elle résulte d'une mise en perspective des audits réalisés auprès d'acteurs des trois territoires ciblés :

- bassin versant du Doux (bassin hydrographique Rhône-Méditerranée)
- bassins versants de la Vendée et des Autizes (bassin hydrographique Loire-Bretagne)
- bassin versant du Midou(r) (bassin hydrographique Adour-Garonne)

Pour chaque territoire, une étude a été menée, donnant lieu à la rédaction d'un rapport. Les audits ont été effectués via des entretiens approfondis auprès d'une douzaine d'acteurs par territoire. Cette synthèse rend compte des différents points de vue recueillis lors des entretiens, elle ne prétend pas restituer une vérité « absolue » et partagée.

Les trois rapports relatifs à chacun de ces territoires seront accessibles sur demande. Les citations anonymes des personnes auditées sur ces 3 territoires apparaissent en italique et entre guillemets dans le texte qui suit.

F.II.4 Introduction : des territoires variés qui partagent le point commun du risque de manque d'eau

La question à laquelle nous avons cherché à répondre dans le cadre de ce travail fut la suivante : quelles conditions respecter et quels moyens mettre en œuvre pour intégrer l'impact cumulé des retenues dans la gestion de l'eau d'un bassin versant ? C'est donc avec une approche stratégique (tournée vers l'action) que nous avons travaillé.

Les trois territoires étudiés présentent des situations hydrologiques, géographiques, climatiques, géologiques, pédologiques, mais aussi humaines et organisationnelles bien différentes. Les réponses apportées par les acteurs à la problématique de gestion (en particulier quantitative) de l'eau sont multiples.

Sur le bassin versant du Doux, la « problématique retenues » est tournée principalement vers l'irrigation, et, dans une moindre mesure, les loisirs (l'eau potable est pompée dans la nappe du Rhône), dans un contexte où les zones humides sont nombreuses, et avec une majorité de petites retenues individuelles alimentées par les cours d'eau. Sur les bassins versants de la Vendée et des Autizes, la gestion de l'eau est guidée par une double problématique d'irrigation et de préservation du Marais Poitevin, avec notamment l'existence de grandes réserves de substitution alimentées par un pompage hivernal dans la nappe, et la présence de grands barrages sur cours d'eau pour l'approvisionnement en eau potable. Sur le bassin versant du Midou(r) (prononcé « Midou » dans les Landes, et « Midour » dans le Gers), il s'agit d'une problématique d'irrigation et de soutien d'étiage « pour salubrité » et pour le maintien de la vie aquatique, avec l'existence d'ouvrages de « réalimentation ».

Malgré ces différences territoriales, naturelles et organisationnelles (dont, nous le verrons, il est important de tenir compte), les acteurs que nous avons rencontrés sont mus par une même nécessité : pallier au manque effectif ou potentiel d'eau en saison sèche. En conséquence, nous verrons qu'il existe des similitudes lorsque l'on parle des retenues et de leurs impacts.

Pour les trois territoires, s'intéresser à l'impact cumulé des retenues implique d'intégrer un niveau supérieur de complexité, et cela soulève, auprès des acteurs, de nouvelles questions, ou entraîne des conséquences qu'ils ne peuvent constater qu'*a posteriori*. Autrement dit, à côté des questionnements et problèmes scientifiques et techniques que pose la question de l'impact cumulé des retenues, se posent des questions politiques, stratégiques, organisationnelles et relationnelles.

F.II.5 Comment se pose la problématique de l'impact cumulé des retenues dans les territoires étudiés ?

5.a Les retenues ont des impacts à la fois négatifs et positifs

5.a.i Des impacts négatifs sur les milieux et les espèces

Les entretiens réalisés mettent en évidence les impacts négatifs que peuvent avoir les retenues sur l'environnement. Tout d'abord au moment de leur construction, qui peut entraîner la destruction d'habitats et d'espèces, faunistiques ou floristiques. Ensuite, par leur fonctionnement. Les acteurs citent ainsi la modification des fonctionnements hydrologiques des cours d'eau (par exemple sur le Midou(r), les grands ouvrages entraînent un inversement des cycles hydrologiques, avec peu d'eau dans les rivières au printemps et plus d'eau l'été que naturellement). Ils citent aussi « la modification de la température de l'eau, dans les cours d'eau et dans les retenues », ainsi que « la modification de l'oxygénation de l'eau » qui peuvent parfois advenir. L'hydromorphologie est aussi perturbée. Enfin, des espèces invasives apparaissent ; ce phénomène est cité dans les trois territoires. Des changements, dans les peuplements piscicoles par exemple, sont constatés par les acteurs. Des impacts positifs, sur les activités humaines, mais pas seulement

Aux côtés de ces impacts négatifs, les acteurs audités partagent le constat suivant : les retenues ont des impacts positifs.

Tout d'abord, **l'irrigation permise par le stockage de l'eau sécurise les productions agricoles** et les exploitations. Sur le bassin du Doux, l'irrigation permet une arboriculture active (cerise, abricots, pêches, petits fruits), ainsi que de l'élevage. Sur les bassins de la Vendée et des Autizes, l'irrigation permet aux agriculteurs de passer de nouveaux contrats, développant ainsi des cultures à forte valeur ajoutée (maïs semences, haricots verts). C'est aussi le cas sur le bassin du Midou(r) (principalement maïs semences, maïs doux et maraîchage). Ainsi, l'irrigation participe au maintien d'une agriculture locale, ce qui est positif à plusieurs titres : création d'activités économiques et d'emplois (particulièrement cité par les acteurs des bassins de la Vendée et des Autizes) ; entretien de l'espace, préservation de paysages et de milieux ouverts (particulièrement cité par les acteurs du bassin du Doux) ; occupation du sol contre l'urbanisation et l'imperméabilisation des terres (« *Les agriculteurs sont le dernier rempart à l'artificialisation des sols* ») ; développement d'une offre de productions locales.

En plus de la sécurisation des productions agricoles, les acteurs citent l'impact positif des réserves de substitution : sur les niveaux d'eau dans le Marais Poitevin pour le bassin des Autizes (en attente de confirmation sur le long terme pour certains acteurs), et bientôt sur celui de la Vendée (réserves en construction) ; impact positif attendu sur les débits dans le projet de substitution du bassin du Doux.

Certains acteurs citent aussi la création de nouvelles zones humides, qui attirent des espèces endémiques ou nouvelles, ainsi que la création de zones de pêche ou de loisirs (randonnées).

Cette explicitation des impacts positifs et négatifs laisse entrevoir la suite de ce qu'ont révélé les entretiens réalisés : la tension émergente entre problématiques agricoles et environnementales.

5.b Questionner l'impact cumulé des retenues, c'est questionner le rapport de l'agriculture au reste de la société

5.b.i La nécessaire rencontre agriculture / environnement

La construction de nouvelles retenues crée un espace de tensions entre les acteurs de l'environnement (associations de protection de la nature / associations environnementales) et les acteurs de l'agriculture. Cependant, il apparaît que **ce point de blocage entre acteurs ne se situe pas tant sur l'impact direct des ouvrages sur les milieux et les espèces que sur le renforcement d'un système agricole qui n'apparaît pas durable aux acteurs de l'environnement**. C'est un point important à souligner dans la mesure où cela ouvre effectivement ou potentiellement **des perspectives de rencontre et de négociation entre acteurs** : des retenues, pourquoi pas, si l'on en négocie les conditions de réalisation et de gestion, et cela dans le cadre plus global d'une réflexion sur l'agriculture.

Par ailleurs, certains acteurs de l'environnement estiment que trop peu d'efforts sont fournis en matière d'économies d'eau et de réduction des impacts de l'agriculture sur la qualité de l'eau (produits phytosanitaires, ruissellements érosifs). Des « efforts » sont effectivement faits (essais de micro-irrigation, usages parcimonieux de l'eau, agriculture de conservation, agriculture biologique), mais ils sont peu visibles ou jugés insuffisants.

Il semble donc qu'une rencontre soit nécessaire (et si elle existe, qu'elle soit renforcée) entre ces différents acteurs. Certaines personnes auditées insistent sur ce point et sur l'importance de **mettre en discussion les propositions et contre-propositions de chacun des acteurs**, dans un contexte où les événements de Sivens sont dans les esprits, notamment lors du montage de nouveaux projets.

5.b.ii Le point de tension n'est pas tant le maïs en lui-même que le système qu'il représente

Concernant en particulier la culture du maïs, le phénomène observé est comparable. Si cette culture est *a priori* conçue comme le symbole d'une irrigation déraisonnée, l'étude approfondie de la question démontre une autre réalité : **le maïs n'est pas en lui-même le problème pour les acteurs, c'est le système qu'il représente qui n'est plus largement accepté** (certains acteurs précisent d'ailleurs que le maraîchage biologique a aussi besoin d'être irrigué). Autrement dit, les acteurs de l'environnement ne se positionnent pas contre le maïs en lui-même, mais contre les façons de faire qui peuvent y être associées : intensivité des productions, monoculture, terres à nu l'hiver, retournement des prairies, élevages hors sols

5.b.iii Préserver l'agriculture tout en posant la question de l'agriculture de demain

La construction de retenues entraîne une évolution de l'agriculture. Aujourd'hui, cette évolution est constatée intuitivement par les acteurs, et ne donne pas lieu à une objectivation.

Si **les acteurs s'accordent sur la nécessité de préserver l'agriculture dans les territoires** (pour les impacts positifs présentés ci-dessus), il demeure la question : **sous quelle forme ?** Les acteurs audités expriment cela de la façon suivante : « *Quelle vision du milieu rural partage-t-on ?* », ou : « *Maintenir l'agriculture, oui, mais quelle agriculture ?* » Ainsi, le travail révèle qu'il y aurait **un nouvel accord à trouver entre les acteurs**, au niveau territorial en relation avec le niveau régional et national, sur le modèle agricole de demain.

5.c Un historique dont il est difficile de se détacher

Les situations dans lesquelles les personnes auditées se trouvent sont caractérisées, dans les trois territoires, par un héritage dont il leur faut tenir compte. Et cela n'est pas toujours chose aisée. Tout d'abord, les retenues existantes sont présentes sur les territoires avec leurs caractéristiques, qui représentent parfois des limites (absence de vannes de fonds, absence de débit réservé, présence de la retenue sur un cours d'eau ou sur une ancienne zone humide qui n'est plus). À cet héritage physique et technique s'ajoutent l'histoire du développement agricole, et l'histoire du développement des retenues individuelles.

5.c.i L'historique agricole

Les situations agricoles des trois territoires étudiés résultent d'une évolution technique et agronomique, mais aussi politique et réglementaire. En particulier pour le sujet qui nous occupe, le soutien à l'irrigation et aux cultures, associé au développement des filières (coopératives, ouverture aux marchés internationaux), ont conduit au retournement des prairies au profit du développement des céréales comme le maïs (présent sur les trois territoires, parfois en monoculture), au développement de l'arboriculture (bassin du Doux), et à la normalisation de l'usage des produits phytosanitaires (avec des conséquences sur la qualité de l'eau). Les remembrements ont par ailleurs conduit à l'arrachage de nombreuses haies dans des territoires comme le bassin du Midou(r), modifiant l'écoulement des eaux (accélération de l'eau dans les parcelles et apparition de phénomènes de ruissellements érosifs). L'écoulement des eaux dans les territoires a aussi pu être modifié par les drainages, tels qu'en témoignent des acteurs du bassin versant du Doux et des bassins versants de la Vendée et des Autizes.

5.c.ii L'historique réglementaire en matière de retenues

L'évolution de la réglementation en matière de retenues, associée à l'évolution des soutiens financiers de la part des institutions publiques (Agences de l'Eau, Régions, Départements, État, Union Européenne), sont aussi un point important de la problématique des retenues dans les territoires. Le contexte favorable qui s'est déployé des années 1970 aux années 1990 a conduit à un « boom » (pour reprendre l'expression des acteurs) de construction de retenues, aussi bien individuelles que collectives.

Or, l'inertie de ce contexte est longue, et aujourd'hui encore, des acteurs acceptent mal que « *ce qui était autorisé, et même soutenu, il y a quelques années, ne le soit plus aujourd'hui* ». Le changement de politique au niveau national, qui répond à une volonté d'intégration de composantes écologiques et environnementales nouvelles, tarde à s'incarner dans les territoires. Si les réglementations nationales en matière d'écologie sont jugées nécessaires, elles restent à corréliser avec les dynamiques ascendantes locales. Et cette inertie systémique peut placer des acteurs, notamment des acteurs de l'État, dans une situation délicate.

Dès lors, l'exigence qui s'impose aux acteurs consiste à se demander comment aller de l'avant ensemble, face à cette situation que certains estiment ne plus être en phase avec les problématiques actuelles (perte de biodiversité, pollutions diffuses, changement climatique).

5.d Des spécificités territoriales à prendre en compte

La difficulté du changement auxquels les acteurs doivent faire face ensemble réside dans l'articulation d'orientations nationales avec des contextes et spécificités locales. Le bassin versant du Doux présente une topographie et un contexte écologique tel que les projets de substitution des pompages en rivières sont très difficiles à mettre en œuvre (trouver un site de création de retenue hors cours d'eau et hors zone humide est exceptionnel) ; et la topographie empêche aussi les retenues collectives, au profit des retenues individuelles (relief trop vallonné pour tirer des tuyaux). Dans les bassins versants du Doux et du Midou(r), la ressource en eau est essentiellement issue de la pluviométrie (sols imperméables granitiques ou argileux, et absence ou quasi-absence de nappes phréatiques), tandis que les bassins versants de la Vendée et des Autizes reposent sur deux nappes phréatiques importantes, qui de plus ont la particularité d'être très réactives, point déterminant dans les projets de réserves de substitution entrepris.

Les spécificités territoriales sont aussi humaines : politiques, relationnelles, méthodologiques. L'état des connaissances, l'avancement des acteurs dans la prise en charge de la problématique des retenues, et la qualité des relations qu'ils entretiennent, constituent des conditions importantes de la réussite des projets.

Toutes ces spécificités rendent difficile l'élaboration de préconisations universelles, simples et applicables dans tous les territoires en matière de gestion (entretien, création, réaménagement, effacement) des retenues.

5.e C'est à la complexité que les acteurs sont aujourd'hui confrontés

Appréhender l'impact cumulé des retenues sur un bassin versant, et en piloter la gestion, s'avère éminemment complexe. Quelles interactions les retenues entretiennent-elles entre elles ? Le cumul des impacts est-il différent de la somme des impacts, et si non, comment le calculer ? Comment articuler les attentes et intérêts des différents acteurs, dans des contextes où le besoin en eau peut générer des tensions ?

Si cette complexité se présente aux acteurs quelles que soient les retenues concernées, il semble qu'elle soit d'autant plus prégnante que l'on s'intéresse aux « petites retenues individuelles ».

5.e.i Retenues collectives et retenues individuelles : des degrés différents de complexité

Dans les trois territoires étudiés, il apparaît que les retenues ou réserves collectives constituent des projets et des lieux de réponses à la problématique de gestion quantitative de l'eau. Cela est particulièrement visible, par exemple, dans les projets de substitution portés par le Syndicat Mixte Vendée Sèvre Autizes, dont les acteurs font, presque unanimement, une évaluation positive.

À l'inverse, les retenues individuelles, de moindres volumes mais beaucoup plus nombreuses, constituent des points de questionnements forts pour les acteurs. C'est sur ce sujet que la complexité de la problématique se fait le plus sentir. Les trois territoires sont concernés : le bassin du Doux (principalement dans sa moyenne et dans sa basse vallée), les bassins de la Vendée et des Autizes dans leur partie « bocage », le bassin du Midou(r) sur tout son linéaire.

Ces retenues sont très nombreuses, sont parfois méconnues (caractéristiques techniques, usages) voire inconnues, sont parfois anciennes donc potentiellement en mauvais état ou chargées de sédiments, et, point important, **elles se trouvent sur des propriétés privées**. Il n'est pas possible, comme pour les retenues collectives, de déléguer leur gestion à un acteur unique.

Ainsi, recenser et étudier ces retenues et leurs impacts, et chercher à minimiser ceux-ci, constitue un véritable challenge scientifique, relationnel et politique, dans des contextes où l'accès à l'eau est vital.

5.e.ii À côté de la quantité, la question de la qualité accroît cette complexité

L'impact des retenues peut être abordé sous l'angle de la quantité et sous l'angle de la qualité. Là aussi, les degrés de complexité auxquels les acteurs doivent faire face sont différents. **Si dans le domaine de la gestion quantitative de l'eau, des réflexions et des actions sont engagées, il en est autrement de la gestion qualitative.** Aujourd'hui, les acteurs se trouvent globalement démunis face :

- aux impacts des retenues sur les propriétés physico-chimiques des cours d'eau,
- à la prolifération des espèces invasives (écrevisses de Louisiane, poissons-chats, pseudorasbora ou jussie par exemple),
- aux évolutions potentielles de la faune et de la flore dans de nouvelles retenues et à leurs alentours,
- aux interactions entre les produits phytosanitaires et la qualité de l'eau dans les cours d'eau et dans les nappes,
- à la question de la compensation des zones humides,
- aux conséquences sur la biodiversité qu'aurait l'effacement de retenues non utilisées.

5.e.iii Au cœur de la gestion actuelle de l'eau, des couples d'acteurs leaders

Pour faire face à la question de la gestion de l'eau (en particulier quantitative) et des retenues, les acteurs s'organisent. Il est intéressant de constater que sur les trois territoires étudiés, ce n'est pas *un* acteur qui se place au cœur du système de gestion, mais *un couple* d'acteurs.

Sur le bassin versant du Doux, le couple d'acteurs leaders est composé de l'entente Doux-Mialan (les cinq communautés de communes du bassin versant) et de la Chambre d'Agriculture de l'Ardèche. Ils se placent au centre d'un système qui a pour volonté de prendre en charge la problématique des retenues individuelles.

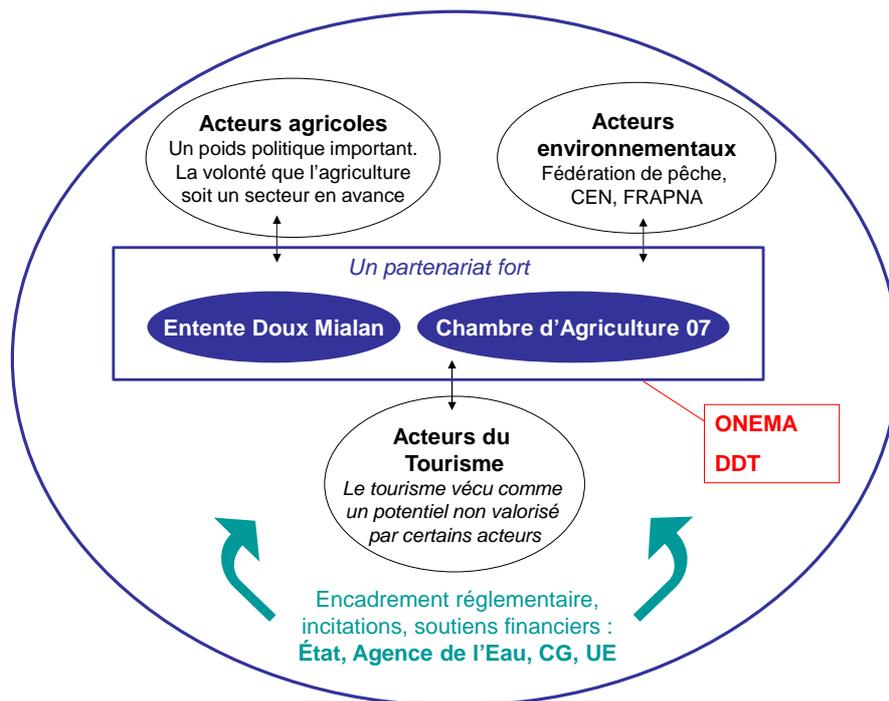


Figure 25 : Schéma du fonctionnement du système d'acteurs sur le bassin versant du Doux

Sur les bassins versants de la Vendée et des Autizes, le couple d'acteurs leaders est constitué du Syndicat Mixte Vendée Sèvre Autizes et de son délégataire de service public : la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG). Le système d'acteurs au centre duquel ils se placent donne la priorité aux projets collectifs (réalisation de réserves étanches hors cours d'eau pour substituer les pompages dans la nappe).

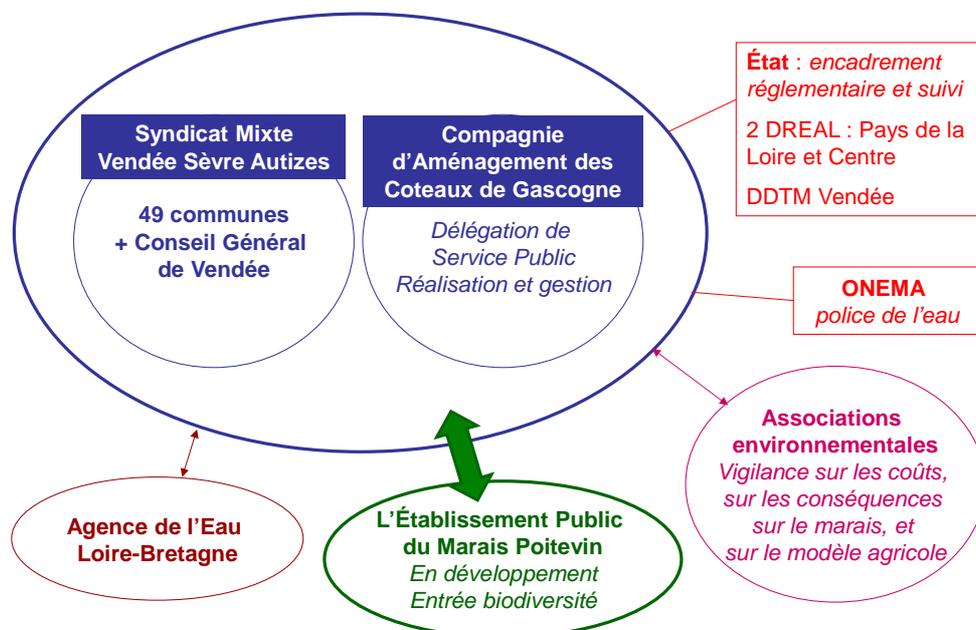


Figure 26 : Schéma du fonctionnement du système d'acteurs sur les bassins versants de la Vendée et des Autizes, pour les projets de réserves de substitution des pompages dans la nappe

Sur le bassin versant du Midou(r), le couple d'acteurs leaders est composé des quatre départements concernés (Landes, Gers, Pyrénées-Atlantiques, Hautes-Pyrénées, réunis dans l'Institution Adour) et des quatre Chambres d'Agriculture concernées. Ce couple d'acteurs est réuni dans Irrigadour, l'Organisme Unique de Gestion Collective (OUGC). Le système d'acteurs au centre duquel ils se trouvent aborde aussi bien les problématiques de l'individuel que du collectif.

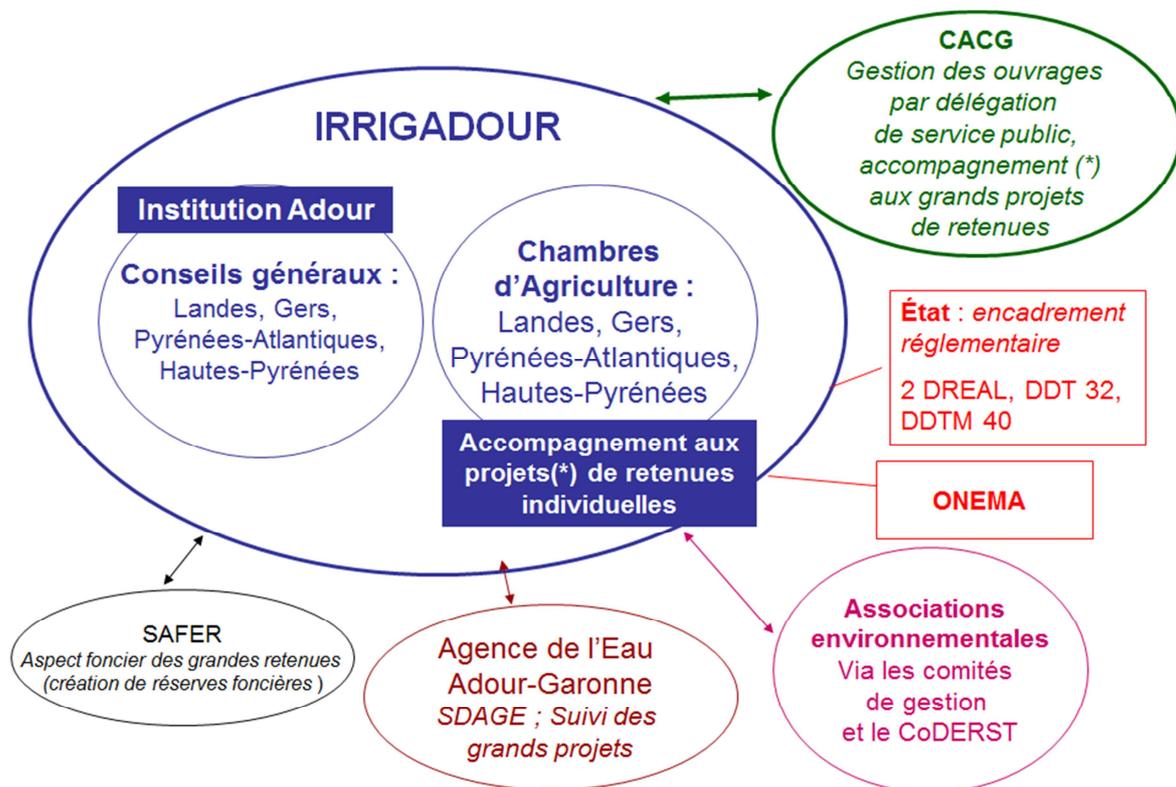


Figure 27 : Schéma du fonctionnement du système d'acteurs sur le bassin versant du Midou(r), pour la problématique irrigation

(*) *Accompagnement aux projets de retenues*: Ce terme correspond ici à l'aide apportée dans le cadre de l'élaboration de dossiers de création de retenues.

F.II.6 Conditions et moyens pour une intégration de l'impact cumulé des retenues : la question-clé de la gouvernance et de sa mise en place

Les entretiens ont permis de mettre en évidence des conditions à respecter et des moyens à mettre en œuvre pour tenir compte de l'impact cumulé des retenues dans les bassins versants, et même avant cela, pour s'atteler à la problématique des retenues individuelles.

6.a L'eau, facteur de rencontre du public et du privé

La gestion de l'eau via les retenues, et tout particulièrement les retenues individuelles, oblige les acteurs à trouver des moyens d'articulation du public et du privé.

Concrètement dans les territoires, ce point émerge via deux questions que se posent les acteurs :

- Que faire des retenues non utilisées ? La question reste en suspens dans les trois territoires, car la propriété privée des retenues individuelles rend les choses difficiles. Ajouté au fait que l'existence de

certaines retenues a conduit à la création de nouvelles zones humides hébergeant des espèces parfois endémiques (le triton crêté dans le bassin du Doux par exemple), le choix de l'effacement d'un ouvrage reste du ressort de son propriétaire, lequel n'a pas nécessairement intérêt à se passer de cette ressource potentielle.

- N'y a-t-il pas problème à ce que des études et des ouvrages qui bénéficieront à des acteurs privés (agriculteurs, sociétés d'aménagement, bureaux d'études) soient financés pour partie par des fonds publics ? Sur les bassins versants de la Vendée et des Autizes par exemple, les associations environnementales mettent en avant cet argument, dans un contexte où, par ailleurs, elles reconnaissent un impact des réserves jusqu'à présent positif sur le marais.

La gestion de l'eau, parce que celle-ci circule sur les territoires sans tenir compte des limites de propriétés, et parce qu'elle est un bien commun qui n'appartient à personne (nous y reviendrons), pose aux acteurs la question de l'articulation entre l'intérêt général et les intérêts privés, et ainsi entre ce qui relève des décisions et actions publiques, et des décisions et actions privées.

6.b Des choix politiques à poser

Il en résulte que la gestion de l'eau ne peut se cantonner à une prise en charge technique. Elle nécessite de poser des choix d'ordre politique et organisationnel. Les acteurs des territoires l'ont bien compris, tels qu'en témoignent les fonctionnements pluri-acteurs présentés.

Ceci étant dit, pour aller plus loin, et en particulier pour intégrer l'impact cumulé des retenues à ces modes de gestion, de nouvelles pistes semblent être à explorer, dans la co-construction.

6.b.i Co-construire les règles de la compensation

Le sujet de la compensation des zones humides ou des boisements, totalement ou partiellement détruits par la réalisation de nouvelles retenues, de l'atteinte aux espèces protégées, soulève des interrogations. Les règles de compensation sont perçues par les acteurs comme étant floues ou pas vraiment adaptées à la situation des retenues : « *Ce sont les mêmes règles, que l'on construise un parking ou une retenue, mais ce n'est pas la même chose !* » ; « *Acquérir un endroit en bon état, est-ce de la compensation ?* ».

La question est d'autant plus délicate qu'il existe **des inconnues techniques et écologiques sur les conséquences de la construction des retenues**, et que chaque territoire présente des spécificités en termes d'espèces et de milieux. Dans quelle mesure (et comment) faut-il compenser si la retenue créée (qui a détruit une zone humide) donne lieu à la création d'une nouvelle zone humide ? La nouvelle zone humide ne constituera pas un biotope identique, mais sur quels critères les comparer ? Si le SDAGE précise le pourcentage de compensation à respecter, il est aujourd'hui difficile pour les acteurs d'accepter que tous les hectares de zones humides soient équivalents.

Par ailleurs, derrière ces questionnements d'ordre écologique se cachent **des questionnements sur le foncier**. Sur quelles terres compenser, dans des territoires où ce qui n'est pas déjà en zone humide représente un potentiel de production non négligeable pour les exploitations agricoles ? (dans le bassin du Doux par exemple)

Dans ces circonstances, **il semble qu'une négociation soit à engager et à faciliter dans les territoires**, au cas par cas et avec une vision d'ensemble à l'échelle des bassins versants, avec l'intervention de compétences spécifiques (génie écologique). Aujourd'hui, cette négociation se passe parfois. Des mesures de compensation sont alors adjointes à un projet de stockage d'eau. C'est le cas par exemple dans les projets de réserves du bassin versant de la Vendée, qui intègrent des hectares de prairies sèches autour des réserves (pour l'outarde canepetière notamment).

6.b.ii Travailler ensemble la question de l'échelle à laquelle travailler

Se placer à une échelle très fine (une à quelques retenues ; un tronçon de rivière), à une échelle moyenne (sous bassin versant) ou se placer à une échelle plus large (bassin versant, grand bassin hydrographique) n'entraînera

pas les mêmes résultats en matière d'impact cumulé. Les impacts des retenues ne sont en effet pas répartis de façon homogène sur un territoire.

Ainsi se pose, dans l'expertise, la question suivante : à quelle échelle est-il pertinent de se placer pour considérer l'impact cumulé des retenues ?

À cette question, les personnes auditées n'ont pas de réponse.

Néanmoins, les entretiens menés permettent de distinguer deux niveaux d'approche du problème. Tout d'abord, il y a la question pratique de la mesure (en termes de débits) : la localisation des stations de mesure contraint les résultats que l'on peut obtenir. « *La bonne échelle, c'est celle des bassins versants où on peut faire des mesures parce qu'il y a des stations hydrométriques.* » Ensuite, il y a le degré d'exigence que l'on souhaite se donner, et c'est ce point qui **ouvre la négociation**. Plus l'échelle choisie est fine, plus la contrainte sera forte sur la création de nouvelles retenues. **Encore une fois, c'est d'un choix politique dont il s'agit.**

6.b.iii Plutôt que de rechercher un état de référence passé, rechercher un objectif partagé

Enfin, un dernier point appelle des choix politiques à négocier entre acteurs, du niveau local au niveau global : l'objectif commun à atteindre. Les personnes auditées parlent davantage de « l'état de référence (passé) auquel se rapporter », mais parler en termes d'objectif à atteindre semble plus mobilisateur.

Cette question émerge parce qu'évaluer un impact en soi n'a pas de sens. On évalue un impact par rapport à un état étalon. Mais quel est cet état étalon ? Par rapport à quoi évaluer un impact, sachant qu'il n'existe pas d'état zéro ? Dans le bassin du Doux, un acteur précise : « *On n'a pas d'état zéro* », parce qu'aucune mesure n'a été prise avant la construction des nombreuses retenues qui existent actuellement. Quand bien même, cet état « sans retenue » constitue-t-il forcément l'objectif à viser ? Dans les bassins versants de la Vendée et des Autizes, la situation est encore plus complexe, puisque le marais a connu de tous temps des activités humaines, changeantes dans le temps, lesquelles ont, en interaction avec la nature, constitué sa richesse.

Se fixer ensemble des objectifs paraît donc plus pertinent que de rechercher en vain un état passé qui servirait de référence. Cela dit, établir des objectifs en matière de nombre, de caractéristiques et de gestion des retenues n'a rien d'évident, car lorsque l'on cherche à fixer des priorités, le jugement moral n'est pas loin. Quelles comparaisons établir (et donc quelles valeurs attribuer) entre des éléments aussi différents que l'azuré des mouillères, le prix d'un m³ d'eau (pour irriguer, pour le loisir, pour l'eau potable...), la fermeture d'un paysage ou l'existence d'une activité agricole sur un territoire ? Là encore, il semble que **seule la mise en discussion entre les acteurs**, avec une écoute et un croisement des points de vue et des propositions, **permettra l'émergence d'éléments de réponse adaptés.**

6.c Le besoin de confiance, pour une transparence partagée et pragmatique

Pour poser et avancer dans ces choix politiques, établir un climat de confiance entre les acteurs apparaît comme indispensable. Non pas pour des questions éthiques, mais opérationnelles et pratiques.

6.c.i Une connaissance fine des retenues et de leurs usages est nécessaire

Pour tenir compte de l'impact cumulé des retenues, les acteurs ont besoin de connaître finement leur existence (localisation) et leurs caractéristiques. Dans quel état sont-elles ? Quel est leur volume de stockage ? Disposent-elles d'un déversoir, d'une vanne de fond, d'un débit réservé ? Sont-elles encore utilisées ? De quelle manière ? Se remplissent-elles une ou plusieurs fois par an ? Autant de critères qui vont venir influencer leur effet sur le milieu dans lequel elles s'insèrent.

6.c.ii Une transparence qui n'a rien d'évident stratégiquement parlant

Toutefois, l'acquisition et le partage de cette connaissance posent des questions stratégiques aux acteurs. C'est bien pour cela que, pour ne donner qu'un exemple, les volumes déclarés pour obtenir des aides PAC à

l'irrigation ne sont pas les mêmes que les volumes déclarés auprès de l'Agence de l'Eau (exemple cité dans le bassin du Midou(r)).

Pour que les propriétaires participent au partage de la connaissance sur les retenues, il est nécessaire qu'ils n'aient pas sentiment de risquer de « se faire prendre la main dans le sac », mais plutôt qu'ils aient le sentiment de prendre part, par leur participation, à un projet positif pour eux autant que pour les autres acteurs. Ce n'est pas dans une ambiance de coercition que les propriétaires des retenues seront amenés à donner les caractéristiques réelles de leurs ouvrages, mais dans un climat de confiance et de recherche d'objectifs satisfaisants aussi pour eux.

Ainsi, la confiance entre acteurs est un point-clé de la construction de la connaissance au sujet des retenues, car elle permet la transparence nécessaire au partage de l'information. Précisons que la transparence se joue aussi au niveau de la lisibilité de l'information, c'est-à-dire de la capacité de tous à comprendre des données et des analyses de données parfois très techniques.

6.c.iii La crainte de la « boîte noire »

Lorsqu'on les interroge sur la faisabilité de la prise en compte de l'impact cumulé des retenues, certains acteurs expriment la crainte que les outils et les méthodes créés et préconisés par l'expertise soient si techniques et si complexes qu'ils en deviennent des « boîtes noires ». Or, un processus de décision et de gestion peu lisible empêcherait le dialogue entre acteurs, et occulterait le besoin de concertation pourtant nécessaire.

F.II.7 Conclusion: aux côtés de l'individuel et du collectif, la nécessité de développer le « commun », pour mieux gérer cette « res communis » qu'est l'eau

7.a.i L'eau, une « res communis », dont les frontières ne sont pas celles de l'Homme

Depuis toujours en France, l'eau est un bien commun, une « res communis ». Elle est inappropriable. La loi sur l'eau du 3 janvier 1992 officialise cette notion et consacre l'eau en tant que « patrimoine commun de la Nation ». Or, la gestion quantitative de l'eau, résultat d'une histoire agricole et réglementaire qui a conduit à un développement de retenues privées depuis les années 1970, établit une ambiguïté : de l'eau « commune » est stockée dans des réserves privées où les droits de propriétés doivent être respectés. La question se pose aussi pour les réserves publiques, dans la répartition de l'eau parmi les différents usagers.

Par ailleurs, la prise en compte de la circulation physique de l'eau a conduit à l'émergence d'entités nouvelles de gestion : les bassins versants. Ceux-ci viennent s'ajouter aux entités de gestion délimitées par ailleurs par l'Homme (limites des institutions). Or, comment travailler sur un bassin versant quand ses frontières dépassent les frontières administratives ?

À la rencontre du public et du privé s'ajoute la rencontre des contraintes physiques de la nature et des contraintes administratives de l'Homme.

7.a.ii Faire se rencontrer les différentes visions

Et les rencontres suscitées par la gestion de l'eau et des retenues ne s'arrêtent pas là.

L'enjeu principal consiste à faire se rencontrer la vision des acteurs de l'agriculture et la vision des acteurs de l'environnement (naturalistes, pêcheurs, écologistes). Cette rencontre peut s'établir par le biais des SAGE quand ils existent. La question qui s'est ouverte aux acteurs concernés par la gestion des retenues est celle de l'équilibre à trouver entre les activités humaines et les besoins de la nature, sachant que les deux sont étroitement liés. Tellement liés que des effets inverses pourraient survenir suite à une série d'actions : par exemple, la difficulté à trouver des sites et à créer des retenues, du fait des impacts potentiels sur l'environnement, et en particulier sur les zones humides et certaines espèces, représente un risque de

diminution de l'activité agricole. Or, l'arrêt d'activités agricoles sur des territoires comme le bassin versant du Doux pourrait conduire à une fermeture des milieux (reforestation) et à une disparition de certaines zones humides (prairies humides) et espèces de milieux ouverts. Aucune solution simple ne peut être trouvée face à cette situation de complexité, et les acteurs l'ont bien compris. C'est dans la rencontre des différentes visions, et dans la recherche de solutions adaptées, innovantes et mobilisatrices que la gestion des retenues pourra répondre aux exigences du développement durable (sociales, économiques et écologiques). « *Il faut que chaque acteur se mette à la place des autres pour comprendre leur problématique* », « *Il faut se mettre à la place des autres, ne pas se réfugier derrière la réglementation* », disent les personnes auditées.

Et c'est aussi la nécessité d'une rencontre du local et du global qui émerge. Avec une question : concrètement, comment assurer cette rencontre des « nécessités globales » (nationales, régionales, des grands bassins hydrographiques...) et des « nécessités locales » (des communes, exploitations agricoles, associations...).

Les acteurs entament aujourd'hui cette rencontre, tels qu'en témoignent les systèmes de décisions et d'action présentés dans cette synthèse. Ils se développent au fur et à mesure des problématiques rencontrées. Peut-être, dans certains cas, cette rencontre mériterait d'être renforcée, afin d'intégrer le niveau supérieur de complexité engendré par la question de l'impact cumulé des retenues.

7.a.iii Intégrer le citoyen ?

Il apparaît, à l'analyse des systèmes d'acteurs qui se forment autour de la question de la gestion de l'eau et des retenues, que **le citoyen en tant que tel en est absent**. Peut-être est-ce simplement un manquement méthodologique du travail réalisé (calibrage du nombre d'entretiens, montage de la liste des personnes à auditer). Peut-être est-ce parce que la question de l'impact cumulé s'est orientée sur le volet agricole, et moins sur des problématiques d'eau potable, d'assainissement, de loisirs et de tourisme, du fait des territoires sélectionnés pour l'étude.

Cependant, l'une des personnes auditées précise que « *les citoyens ne sont pas mis dans le jeu* » de la gestion de l'eau. C'est donc aussi que cette gestion, aujourd'hui dans les territoires, intègre peu cette catégorie d'acteurs. Bien entendu, une partie des citoyens est représentée par les associations de protection de la nature, mais une partie seulement (pêcheurs, personnes engagées sur des problématiques environnementales, chasseurs éventuellement).

La question se pose donc aujourd'hui, alors que la tendance, en termes de gouvernance, est à la « participation », à la « concertation », à la « délibération », de savoir comment intégrer les citoyens à la décision, mais aussi à la gestion, de l'eau dans les territoires.

7.a.iv Une nouvelle réglementation ? Développer le commun aux côtés de l'individuel et du collectif

La complexité émanant de la problématique des retenues, accrue lorsque l'on s'attèle à leur impact cumulé, est importante : complexité des phénomènes vivants (circulations des eaux dans un bassin versant, fonctionnement des écosystèmes, réaction des milieux aux changements d'origine anthropique) ; complexité des organisations et des relations entre acteurs. De plus, chaque territoire, et chaque cas, sont particuliers. Dès lors, comment établir une même règle pour tous ?

À l'inverse, une décentralisation totale de la gestion de l'eau semble périlleuse. Le travail effectué ici montre que la profession agricole est parfois très puissante dans les territoires, ce qui suscite la crainte de certains acteurs que les systèmes locaux orientent les décisions et la gestion de l'eau « en faveur » du monde agricole, alors que montent les problématiques environnementales et la tendance de la « participation » du public citoyen.

Il est donc besoin d'articuler les initiatives locales avec des orientations nationales.

Dans ce contexte, faut-il une nouvelle réglementation sur l'impact cumulé des retenues ? S'il est décidé que oui, les acteurs insistent sur la nécessité de la voir accompagnée de solutions pratiques et opérationnelles de

mise en œuvre (c'est l'objectif de l'expertise) : « *Si on nous dit 'il ne faut pas faire ça', que l'on nous dise aussi comment faire pour y arriver.* »

De plus, nous pensons qu'une réglementation ne peut suffire seule à une gestion efficace des retenues dans les territoires, dans une situation où, nous l'avons vu, des visions différentes et parfois contradictoires sont amenées à se rencontrer. **Aux côtés de l'individuel et du collectif, il est nécessaire de développer du « commun »**, au croisement du descendant et de l'ascendant, pour que cette rencontre n'aboutisse pas à un rapport de forces dangereux.

Sans commun, c'est-à-dire sans espaces de dialogue et de rencontre autour desquels les acteurs construisent ensemble les réponses nécessaires à la problématique de gestion des retenues, dans une démarche de participation volontaire, positive et ouverte à l'altérité, le risque encouru est celui du repli sur un fonctionnement coercitif (normes et contrôles), à défaut de savoir comment prendre en charge cette complexité. Et cela pourrait conduire à des effets inverses. Par exemple, les acteurs, déjà soumis à de nombreuses réglementations (directive nitrates, DCE, études d'impact, etc.) pourraient se retirer du jeu face à une réglementation supplémentaire. Les procédures administratives de création de retenues seraient en effet jugées si longues, coûteuses, compliquées et sans garantie, que des retenues illégales ou des pompes illégalement, impossibles à contrôler, apparaîtraient. La gestion et les contrôles seraient alors encore plus difficiles. L'effet inverse peut aussi être direct, tel qu'en témoigne l'exemple des béalières, cité par certains acteurs du bassin du Doux. L'interdiction de creuser ces canaux chaque année a entraîné la disparition de presque toutes les béalières, pourtant reconnues comme des modes de gestion de l'eau permettant de concilier agriculture et biodiversité, et de maintenir des paysages typiques. Mais « *refaire sa béalière, c'est 1 PV par an.* »

Aborder la question de l'impact cumulé des retenues fait donc apparaître **des questions fondamentales de gouvernance**, pour que les acteurs puissent avancer sereinement et en confiance dans la rencontre des différents points de vues et attentes, dans une démarche de développement durable. S'atteler à la gestion de l'eau, avec les enjeux forts qu'elle représente (eau potable, activités économiques, productions agricoles, préservation des espèces et des milieux, etc.) place les acteurs, du local au global, face à une complexité qui nécessite de développer, aux côtés de nos modes traditionnels de gestion individuelle (chacun sur sa propriété) et de gestion collective (délégation de la décision et de la gestion à des élus), une gestion en « commun », basée sur la confiance. Cette gestion en commun nécessite l'organisation de la négociation et de la rencontre des acteurs et de leurs points de vue et intérêts, dans une communication partagée.

Partie G. DISCUSSION ET ANALYSE DU BESOIN D'EXPERTISE

Cette partie reprend tout d'abord, de façon très synthétique, l'analyse de l'existant réalisée dans ce rapport, afin de mettre en évidence les acquis et les limites identifiées dans les connaissances et méthodes mises en œuvre pour aborder la question de l'impact cumulé des retenues. Viennent ensuite les domaines et questions qu'il semble intéressant d'aborder dans la phase 2 de l'expertise, c.-à-d. l'Expertise Scientifique Collective (ESCo), qui permettra d'interroger la littérature scientifique internationale sur les verrous que cette première phase a permis d'identifier.

G.I Acquis et limites de l'existant

Les lectures et analyses effectuées ont confirmé que les méthodes et outils manquent actuellement pour aborder l'évaluation de l'impact cumulé des retenues. Ce constat résulte à la fois d'une insuffisance des données, connaissances et situations de référence disponibles, et du manque d'un cadre conceptuel pour à la fois : **1** - organiser les réflexions et connaissances et **2** - permettre d'identifier les méthodes existantes ou qu'il serait nécessaire de développer afin d'appréhender la question de façon à la fois suffisamment complète et réaliste du point de vue opérationnel. Le corpus de connaissances et les méthodes mobilisables varient avec la thématique concernée, toutefois, certaines considérations sont transversales aux différentes disciplines.

G.I.1 Nécessité d'une bancarisation des données et d'une capitalisation des études déjà menées

Un point essentiel, et qui revient de façon récurrente à la lecture des documents consultés, est la **difficulté de disposer de données complètes et suffisamment précises sur les retenues existantes et leurs effets**. On a vu que l'effet individuel d'une retenue est extrêmement variable et dépend de multiples facteurs : sa position dans le bassin versant, son mode d'alimentation, la qualité de l'eau qui l'alimente, ses dimensions, le mode de restitution de l'eau, l'existence ou non d'un débit réservé, son mode de gestion, et notamment la dynamique des prélèvements (ou restitution vers le cours d'eau aval) qu'elle subit. Des données complémentaires sur le milieu sont par ailleurs encore nécessaires pour caractériser l'effet sur le compartiment biologique.

Dans l'idéal, une étude d'impact sur l'effet cumulé des retenues devrait pouvoir s'appuyer sur des données relatives :

- Aux retenues et leurs caractéristiques : position, mode d'alimentation et position par rapport au cours d'eau, surface, profondeur, volume, mode de restitution, existence ou non d'un débit réservé
- Au mode de gestion des retenues : dynamique des prélèvements et des restitutions éventuelles au milieu
- A la caractérisation du bassin versant du point de vue des contextes géologique, hydrogéologique, morphologique, pédologique
- A la caractérisation du bassin versant du point de vue des principaux aménagements, de l'occupation des sols (successions de cultures et itinéraires techniques)
- Au fonctionnement du milieu, tant au niveau hydro(géo)logique que physico-chimique ou biologique (chroniques de débit ou de piézométrie en différents points, suivis des paramètres physico-chimiques et relevés biologiques en différents points et à une fréquence suffisante).

Or l'ensemble de ces données n'est que rarement disponible sur un bassin versant, en particulier pour les deux premiers points: un effort d'**acquisition**, et plus encore de **bancarisation** et de **mise à disposition** des données reste donc à faire dans beaucoup de zones, à une échelle et selon des modalités qui restent à préciser.

Une difficulté est liée au fait que ces données, quand elles existent, ont été acquises dans des projets ou contextes différents, par des acteurs divers qui ne tiennent pas forcément à partager leurs méthodes et leurs données. Pourtant, et notamment dans le cadre d'un projet de territoire, qui suppose de s'appuyer sur une vision partagée du bassin concerné, une certaine mise en commun des données paraît incontournable pour aboutir à des solutions pertinentes et une gestion optimisée de la ressource en eau.

Malgré l'effort d'acquisition et de bancarisation qui pourrait être réalisé, l'ensemble de ces données ne sera probablement pas mobilisable avec une précision suffisante pour chaque étude d'impact ou notice d'incidence à réaliser. En conséquence, il paraîtrait intéressant de **capitaliser les analyses effectuées dans les études d'impact réalisées**, notamment si celles-ci permettent de mieux comprendre les déterminants du fonctionnement du système considéré, en fonction du contexte propre du bassin versant. Une telle démarche permettrait alors de valoriser les études passées, et de juger de la possibilité de **transposer les méthodes/démarches adoptées/résultats dans un contexte similaire**, sans avoir à mener une étude aussi complète que l'étude qui servirait de référence. Cette démarche prendrait tout son sens si une **typologie des systèmes « bassins versants équipés de retenues »** était réalisée, ce dont on verra plus loin qu'il s'agit d'un point que l'on envisage d'aborder dans la suite de l'expertise. Elle serait d'autant plus utile que les études d'impact s'accompagnent normalement de suivis ultérieurs à la réalisation du projet, et dont les données sont rarement exploitées : elle permettrait ainsi d'abonder les observations sur l'impact cumulé des retenues.

Au total, cette première phase a mis en évidence la nécessité, pour les acteurs en charge de l'évaluation de l'impact cumulé des retenues, de **disposer de données, sous une forme facilement interrogeable et mobilisable**. Cela paraît un préalable indispensable à la mise en œuvre de méthodes adaptées à la problématique, qui, à défaut d'être déjà toutes identifiées/élaborées, s'appuieront nécessairement pour conduire à des résultats pertinents sur un ensemble de données cohérent et de précision suffisante.

G.I.2 Intérêt d'une démarche à deux échelles emboîtées

Lors d'une étude d'impact pour un projet de retenue, et a fortiori lors d'une étude d'incidence pour un projet de taille réduite, il ne paraîtrait pas réaliste d'exiger du pétitionnaire qu'il réalise son étude sur l'ensemble du territoire concerné, l'étude devenant alors très lourde au vu du projet concerné. Pourtant, et notamment dans le cas d'un bassin équipé d'un grand nombre de retenues de taille modeste, il est nécessaire de pouvoir resituer le projet dans le contexte global du bassin qui le soutient, afin notamment de pouvoir juger du risque de changement de classe d'état écologique (au sens DCE) que ce nouvel aménagement pourrait induire. Cette nécessité d'appréhender dans un premier temps la question à une échelle plus large s'accroît encore avec l'émergence des projets de territoire.

Dans ce contexte, il paraîtrait utile qu'une **étude relative à un projet donné** puisse s'appuyer sur une **étude préalable, réalisée à l'échelle du grand bassin englobant** (échelle du SAGE par exemple), et qui permettrait de caractériser globalement son fonctionnement hydrologique, d'identifier les zones où les enjeux biologiques, de qualité de l'eau, d'usages, ou autres, sont importants, ainsi que celles où les pressions qui s'exercent (prélèvements en eau, occupation du sol, autre type de pression anthropique) sont fortes. Sur ces zones, des études plus poussées pourraient être menées, en mettant en œuvre des outils, de modélisation hydrologique notamment, plus complets, s'appuyant le cas échéant sur l'acquisition de données complémentaires. Une telle démarche générale a été proposée par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, qui en fournit le canevas avec le cahier des charges des Etudes Volumes Prélevables, et nous semble pouvoir être reprise dans d'autres contextes. Il est toutefois centré sur l'étiage et mérite d'être complété pour les aspects concernant les réserves de substitution et les effets des remplissages hivernaux.

L'étude relative à un nouveau projet pourrait alors s'appuyer sur ces éléments de contexte et permettrait au pétitionnaire de mieux cerner les méthodes à mettre en œuvre pour évaluer l'impact de la (ou des) retenue(s)

en projet au sein du bassin, et au service chargé de l'évaluation du dossier de mieux évaluer le degré de vigilance à adopter.

Par ailleurs l'effet cumulé n'est pas toujours l'addition des effets individuels. En changeant d'échelle on aborde un système plus complexe dans lequel interviennent des interactions éventuelles entre retenues, influencées par leurs positions relatives. D'autres méthodes pour appréhender ce niveau de complexité supérieur sont encore à définir.

G.I.3 Connaissances et méthodes mobilisables

3.a A l'échelle d'une retenue

Pour ce qui concerne les effets induits par une retenue isolée, la Partie C de ce rapport a montré que de nombreuses données et connaissances étaient dès à présent disponibles pour aborder l'effet des retenues de taille importante. Compte tenu de leur taille, ces retenues sont de surcroît le plus souvent construites en barrage de cours d'eau : une certaine analogie peut être faite, au niveau des processus en jeu et grandeurs d'intérêt, avec les petits lacs ou certaines retenues pour hydroélectricité, déjà assez largement étudiés. Toutefois, les données et connaissances citées dans la littérature consultée sont souvent de nature qualitative, ou le contexte d'étude et les facteurs déterminant le fonctionnement du système ne sont pas suffisamment explicités pour qu'il soit possible de remobiliser et transposer ces résultats dans un autre contexte. Un effort devra donc être fait sur ce point dans la phase suivante.

A contrario, le constat est que les connaissances sont actuellement beaucoup moins nombreuses pour les petites retenues, notamment les retenues collinaires. Les méthodes citées, issues d'études sur de grandes retenues, sont alors le plus souvent en limite de validité : la suite de l'expertise devra donc certainement investiguer les corpus de connaissance développés sur des systèmes légèrement différents pour permettre de progresser : têtes de bassin, cours d'eau intermittents, mares et étangs, barrages de castor pour des retenues en barrage de cours d'eau

Notons qu'il est possible aussi de s'appuyer sur toute une documentation existante (cahiers techniques, ouvrages et publications) au sujet de la création, la gestion et la restauration des mares et étangs. De nombreuses recommandations y sont données pour maximiser une biodiversité lenticule indigène sans pour autant pénaliser le cours d'eau voisin^{162, 167, 168, 169, 170}, comme par exemple :

- Des rives aux pentes faibles (0 à 20°)
- Un pourtour du plan d'eau varié et découpé, avec des rives ondulantes et de nombreux diverticules
- Une taille pas nécessairement très importante pour ce qui concerne la biodiversité, qui peut profiter d'un grand nombre de petits étangs²⁰.

3.b Effets cumulés

Les aspects quantitatifs, notamment l'hydrologie et l'hydrogéologie, sont les domaines où les méthodes disponibles paraissent les plus à mêmes d'aborder dès maintenant la question de l'impact cumulé des retenues. Actuellement, le passage par la modélisation paraît incontournable, le référentiel de connaissances et situations types de référence ne permettant pas encore d'identifier et d'utiliser des indicateurs. La modélisation semble en effet un préalable pour comprendre les processus et leurs déterminants, donner des clés d'extrapolation et généralisation, et in fine pouvoir choisir des indicateurs pertinents et interprétables.

¹⁶⁷ Gee, J. H. R., B. D. Smith, et al. (1997). "The ecological basis of freshwater pond management for biodiversity." *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems* 7(2): 91-104.

¹⁶⁸ Arnaboldi, F. and N. Alban (2008). La gestion des mares forestières en plaine, Office national des forêts: 215.

¹⁶⁹ Oertli, B., R. Cereghino, et al. (2009). "Pond conservation: from science to practice." *Hydrobiologia* 634: 1-9.

¹⁷⁰ Grossi, J.-L. (2010). Les mares prairiales à triton crêté. Cahiers techniques, Conservatoire Rhône-Alpes des Espaces Naturels: 19.

Toutefois, les outils de modélisation disponibles peuvent s'avérer complexes à mettre en œuvre et gourmands en données : le choix du ou des modèles à utiliser dépend donc de ce qui est attendu de la phase de modélisation. Or, dans la mesure où l'hydrologie du cours d'eau ou du bassin versant est le driver principal des autres composantes, on ne sait pas encore à ce stade de l'expertise quel est le cahier des charges que devrait respecter l'exercice de modélisation. Plusieurs points peuvent toutefois être évoqués dès maintenant :

- Le **degré de distribution du modèle** : il dépendra en grande partie de la répartition des retenues sur le bassin versant considéré, et notamment de l'hétérogénéité à la fois des caractéristiques propres du bassin (notamment la diversité des couverts, leur répartition spatiale et leur dynamique temporelle) et de l'organisation spatiale des retenues.
- Le **degré de conceptualisation du modèle** : selon les exigences de connaissances notamment pour les composantes physico-chimique et de mobilisation et de transport sédimentaire, une modélisation plus ou moins mécaniste sera nécessaire. Selon le fonctionnement hydrologique du bassin versant, une approche explicite du rôle des aquifères, des échanges nappe-rivière, mais aussi du rôle des agrosystèmes sur le remplissage et la vidange des retenues, peut aussi s'avérer nécessaire.
- La période et le pas de temps de la modélisation : les études d'impact et études volumes prélevables ont souvent mis l'accent sur les étiages, en considérant que les tensions les plus fortes sur le milieu aquatique s'exercent à cette période. Considérer l'ensemble du cycle biologique des organismes, en particulier dans le cas de retenues de substitution, dont la pression de prélèvement dans le milieu est par définition décalée par rapport à l'étiage, suppose d'envisager une modélisation qui aborde une(ou des) période(s) plus large(s) que le seul étiage. **Les périodes et variables** (dynamiques des débits, hauteurs d'eau, vitesses...) **du régime hydrologique à considérer dépendent des cycles biologiques et du comportement des organismes d'intérêt. Les crues morphogènes** peuvent également être d'intérêt, ainsi que les événements susceptibles de mobiliser les éléments (nutriments, sédiments, matière organique, polluants) stockés dans les retenues.
- Les données disponibles, ou susceptibles d'être collectées conditionnent également le choix du modèle : celui-ci doit être en cohérence avec les données sous peine de conduire à des incertitudes telles que les résultats seraient inexploitable.

Certaines méthodes permettant de faire le lien entre les altérations du régime hydrologique et les altérations d'habitat sont également mobilisables dès maintenant, et permettent de faire le lien entre un cumul d'effet hydrologique et un effet biologique attendu. Elles sont toutefois axées essentiellement sur les étiages : elles gagnent à être utilisées en parallèle de méthodes hydrologiques, plus à même de prendre en compte d'autres périodes du cycle hydrologique. L'application de modèles d'altération d'habitats distribués à l'échelle du bassin ne fait pas l'objet de support logiciel utilisable en routine à ce jour. Par ailleurs, ces méthodes n'abordent les effets cumulés que comme la somme d'effets individuels, et ne peuvent pour l'instant rendre compte des interactions entre les processus, et des effets de seuil qui s'expriment certainement pour les compartiments biologiques.

Pour ce qui concerne l'effet cumulé des retenues sur la **physico-chimie**, ou sur la biologie, les données et connaissances sont beaucoup moins nombreuses, et les méthodes a priori inexistantes. Pour la physico-chimie (incluant le transport sédimentaire), une façon d'aborder la question serait de s'appuyer sur la modélisation pour pouvoir prendre en compte la multiplicité des processus actifs (de transfert et les transformations biogéochimiques) et de leurs déterminants. Le degré de complexité attendu serait toutefois encore supérieur à celui nécessaire pour la seule composante hydrique, et les données nécessaires plus nombreuses. Déjà à l'échelle d'une retenue, des progrès dans les méthodes de suivi devraient être réalisées pour tenir compte de la **variabilité du régime hydrologique**, dans la mesure où les phénomènes de **remobilisation des éléments** sont induits par des événements hydrologiques (fortes crues). Par ailleurs seules les concentrations en ces éléments sont considérées, jamais les flux qui devraient être utilisés pour établir le bilan entre l'amont et l'aval de la retenue et de calculer les quantités stockées. Lorsqu'on s'intéresse à l'effet cumulé ce sont **les flux** et non les concentrations qui peuvent s'additionner. Ces aspects seront également à aborder dans la phase 2.

Certaines métriques biologiques, combinant des indicateurs spécifiques à plusieurs groupes d'espèces, sont sensibles à la présence de retenues, et peuvent permettre de réaliser un diagnostic de l'état initial avant implantation d'une retenue, voire de discuter de l'acceptabilité de certaines retenues. Ces outils n'autorisent pas encore une démarche prédictive, qui permettraient d'anticiper l'impact attendu d'une ou de nouvelle(s) retenue(s) sur certains compartiments biologiques.

A ce stade de l'expertise, le besoin d'un **cadre conceptuel permettant d'organiser les connaissances et éléments de méthodes existants**, ainsi que ceux qui seront assimilés dans la phase 2 s'impose. Sans remettre aucunement en question l'intérêt de la simulation numérique, qui permet d'organiser de façon quantitative la compréhension que l'on a du fonctionnement d'un bassin versant, le recours à une modélisation exhaustive et détaillée sur tous les bassins concernés par un projet de retenue paraît peu réaliste ; il ne permettrait de toute façon pas d'aborder de façon complètement satisfaisante l'effet cumulé des retenues sur les compartiments biologiques. Une autre approche est donc nécessaire, qui reste à définir. L'analogie faite dans la partie D entre les retenues et les patrons paysagers des marais, mares et étangs laisse supposer que les méthodes utilisées pour aborder **l'organisation spatiale de ces éléments dans le paysage** et ses conséquences sur les flux physico-chimiques ou sur l'évolution des métapopulations (voire des métacommautés) pourraient constituer des éléments utiles pour la thématique des retenues, et que ce champ de recherche est susceptible de proposer des méthodes d'intérêt pour la problématique des retenues.

G.II Domaines de connaissances et questions à aborder dans la phase d'expertise scientifique collective

Cette partie reprend les questions dont cette première phase de l'expertise a montré qu'il semblait nécessaire de les aborder pour progresser sur la thématique de l'impact cumulé des retenues. Compte tenu des délais impartis à cette expertise, on privilégiera dans la mesure du possible la **recherche de méthodes et/ou d'outils susceptibles d'être assez directement adaptés à la problématique et au contexte français**. On s'attachera alors à caractériser leur **domaine de validité, leurs avantages et limites**, en gardant en tête le caractère opérationnel qui est in fine demandé à cette expertise dans sa phase finale. Toutefois, pour certaines de ces questions, il n'existera pas de tel outil ou méthode à mobiliser de façon immédiate, et la recherche bibliographique devra alors passer par une **phase de recherche de connaissances ou d'exploration d'un domaine de recherche connexe**, qu'il faudra organiser et/ou adapter pour pouvoir apporter des éléments de réponse à la question d'origine.

G.II.4 Caractérisation des retenues, de leur mode de gestion, de leur organisation spatiale

Le constat d'un manque de données pour aborder la question de l'effet cumulé des retenues a été récurrent au cours de la première phase. Dans cette deuxième phase, on pourra investiguer **les méthodes permettant d'acquérir des données sur les retenues existantes sur un bassin versant ou un territoire donné** :

- Les méthodes issues des données d'observation spatiale, permettant l'accès à un certain nombre de caractéristiques physiques des retenues, mais aussi
- Les méthodes permettant l'accès à des données complémentaires ou de conforter ces données, comme le volume et les dimensions de la retenue, le type d'équipement assurant la restitution de l'eau au milieu, les systèmes de culture, la dynamique temporelle et localisation spatiale de leur couvert qui vont influencer sur le remplissage des retenues, la dynamique de prélèvement de l'eau ou de restitution au milieu. La possibilité de passer par des observations donnant indirectement accès à certaines de ces données (« proxy ») sera étudiée.

Les éléments de typologie qui ont pour l'instant été proposés ne concernent que des retenues individuelles. Aborder leur impact cumulé suppose de savoir décrire et caractériser leur organisation dans l'espace, en fonction des caractéristiques du milieu d'origine. On recherchera si une **typologie de ces modes d'organisation** est possible, articulant à la fois les caractéristiques propres des retenues (alimentation, usage, restitution) et celles du milieu. Cette recherche sera à rapprocher du point précédent sur les données. Une telle typologie aurait également l'avantage de permettre d'explicitier le contexte les connaissances acquises sur des retenues individuelles, et ainsi de permettre leur transposition dans des situations comparables.

En parallèle à cette recherche d'une typologie, les notions de **patron paysager et d'organisation en réseau, de connectivité**, déjà utilisées dans l'étude des marais et zones humides et mentionnées dans la partie D.I3.c seront interrogées. De façon plus générale, certaines métriques issues de **l'écologie du paysage** semblent en première approche pouvoir être mobilisées pour notre problématique. En effet, aborder l'effet cumulé des retenues, en dépassant une approche purement additive des effets individuels, suppose de trouver un cadre conceptuel qui permette d'organiser les réflexions et connaissances et de dépasser une approche purement disciplinaire. Une telle approche doit pouvoir fournir des pistes également pour aborder le **fonctionnement trophique de l'ensemble du système de retenues** (et du bassin versant qui les alimente) et les **conséquences pour les espèces en place, aux différentes échelles d'intérêt évoquées** (retenues et leur aval immédiat, échelles d'influence sur les processus de dispersion des espèces, évolution des métapopulations).

G.II.5 Connaissances disciplinaires à approfondir

Malgré le besoin essentiel d'une démarche qui facilite les ponts entre les disciplines, certaines questions relatives à certaines disciplines ont émergé pendant cette première phase :

5.a Hydrologie-hydrogéologie

Pour ce qui concerne l'hydrologie et l'hydrogéologie, les principaux types d'incertitudes qui ont été relevés concernent l'imprécision des données (par exemple sur les retenues, ou sur les débits quand ils ne sont pas mesurés mais extrapolés via des méthodes induisant nécessairement des incertitudes), ainsi que la quantification de l'évaporation et de l'infiltration depuis les retenues. Si ces composantes n'influencent que modérément le bilan hydrologique d'un bassin pour une retenue individuelle, il n'en va pas nécessairement de même pour un ensemble de retenues, et ce point mérite d'être approfondi en phase 2.

L'effet des retenues sur les échanges nappe-rivière et le fonctionnement de la zone hyporhéique, avec les conséquences possibles sur le fonctionnement écologique du cours d'eau n'a pas été non plus abordé jusqu'ici, bien que l'on pressente que cet aspect puisse être important. De façon plus générale, les contextes hydrogéologiques abordés dans la phase 1 sont relativement peu variés, ou pas explicités, et leur gamme devra être étoffée dans la phase 2 pour élargir le champ des types de fonctionnement de bassin couverts.

L'évolution du régime hydrologique induite par un ensemble de retenues devra être investiguée, en insistant sur les composantes du régime identifiées comme pertinentes pour les autres compartiments : physico-chimie, transport solide, biologie, selon les caractéristiques du bassin considéré¹⁷¹. Là encore, la notion de typologie sera utile.

L'étude InterAgence² avait proposé des indicateurs pour évaluer les impacts cumulés des retenues, par exemple le pourcentage de surface de bassin captée par les retenues, leur densité ... : on recherchera si d'autres indicateurs ont été proposés et testés dans des contextes différents.

Enfin, l'existence de données ou de méthodes abordant l'influence de la sécurisation de l'accès à l'eau que permettent des retenues sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin (à la fois par l'évolution des cultures

¹⁷¹ Par exemple, les périodes ou indicateurs clés à considérer varieront en effet en fonction des espèces sensibles sur le bassin.

et pratiques culturelles qu'elle autorise, et par l'évolution du système sol-plante-atmosphère qu'elle induit) mériterait d'être investiguée.

5.b Physico-chimie. Transport sédimentaire

Un point essentiel qui ressort de la phase 1 est que les connaissances relatives à ce domaine, qu'il s'agisse de la retenue ou du contraste amont-aval, sont acquises par des campagnes ponctuelles et en conditions hydrologiques plutôt hors crue. Les processus de remobilisation et de relargage des différents éléments, qui peuvent être induits par des variations de débit ne sont donc pas pris en compte : les variations brutales de concentrations qui peuvent advenir dans ou à l'aval de la retenue ne sont donc pas considérées, et une approche en flux/variation de stock, qui semble pourtant nécessaire pour aborder l'effet d'un cumul de retenues, pas possible à ce stade. La deuxième phase de l'expertise devra donc aborder cette question.

Des indicateurs permettant de prédire l'influence d'une (de) retenue(s) sur les différents paramètres physico-chimiques, à la fois au sein de la retenue et à l'aval : flux d'azote, de phosphore, de carbone, température ... seront également recherchés.

L'eutrophisation semble un phénomène fréquent dans les retenues du fait de l'abondance des nutriments dans la plupart des masses d'eau. Les processus et conditions qui le déclenchent ont déjà été étudiés. On recherchera là encore si des indicateurs simples permettent de le caractériser, d'anticiper la production de cyanobactéries et de toxines associées. On tentera également de mieux cerner les risques associés à ce phénomène, selon les usages associés aux retenues.

De même que l'on cherchera à identifier si l'augmentation de retenues pour l'irrigation en favorisant le développement des cultures irriguées a un rôle en retour sur le fonctionnement hydrologique du bassin, on explorera également la question de l'évolution des apports de polluants liés à ces nouvelles cultures irriguées.

La production de gaz à effet de serre au niveau d'une retenue individuelle est certainement limitée ; il n'en va peut-être pas de même à l'échelle d'un bassin équipé de nombreuses retenues : les connaissances mobilisables sur le sujet seront recherchées.

Du point de vue du transport sédimentaire, la phase 1 a montré que quand il est cité, c'est le plus souvent de façon globale, les fractions fines et grossières n'étant en général pas distinguées alors que leur devenir en présence d'une retenue est très différent. De plus, de même que pour la physico-chimie, les données en crue sont rares, sinon inexistantes. Le transport sédimentaire est pourtant lié à l'ensemble des autres thématiques : l'hydrologie pour la capacité de transport par l'eau et pour leur influence conjointe sur l'hydromorphologie et l'évolution des habitats du cours d'eau et des berges, la physico-chimie pour la capacité de la fraction fine à stocker et transporter des contaminants, l'écologie pour l'effet « physique » que peuvent avoir les particules sur les organismes, ou le colmatage que peut induire leur dépôt. Ces aspects seront donc creusés en phase 2, à la fois pour la production en versant, le dépôt et la remobilisation (des particules et des éléments associés) en retenue, et l'influence sur le cours d'eau aval : évolution du lit du cours d'eau à moyen-long terme, influence sur les organismes. Des outils et méthodes sont disponibles pour aborder ces questions, notamment à l'étranger, et il conviendra d'évaluer leur pertinence pour notre contexte.

5.c Ecologie

Pour cette thématique, une difficulté essentielle, déjà citée dans le paragraphe G.II.4 sera de trouver un cadre conceptuel pour organiser les connaissances existantes et réussir à concilier les différentes échelles qu'il est nécessaire d'aborder.

Les connaissances sur l'influence cumulée des petites retenues, et notamment des retenues collinaires, sur l'écologie de la zone avoisinant la retenue et de son aval sont assez limitées : on vérifiera de façon plus poussée si la situation est similaire dans la littérature internationale. Si c'est bien le cas, on abordera des systèmes potentiellement proches en terme de fonctionnement : mares et étangs, marais, tête de bassin versant, cours

d'eau intermittents, en tentant de dégager les déterminants de leur fonctionnement et dysfonctionnements éventuels.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFSSA and AFSSET (2006). Rapport sur l'évaluation des risques liés à la présence de cyanobactéries et leurs toxines dans les eaux destinées à l'alimentation, à la baignade et autres activités récréatives.
- Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse, DREAL de bassin Rhône-Méditerranée and Onema (2010). Cahier des charges "type" - Etude de détermination des volumes maximum prélevables
- Angelibert, S., V. Rosset, et al. (2010). "The pond biodiversity index "IBEM": a new tool for the rapid assessment of biodiversity in ponds from Switzerland. Part 1. Index development." *Limnetica* 29(1): 93-104.
- Arnaboldi, F. and N. Alban (2008). La gestion des mares forestières en plaine, Office national des forêts: 215.
- Badré M., Prime J., Ribière G. (2009). Neige de culture : état des lieux et impacts environnementaux, note socioéconomique- Conseil général de l'environnement et du développement durable Rapport 152p <http://www.cgedd.developpement/>
- Baran, P. (2011). Les méthodes d'aide à la détermination de valeur de débit minimum. Annexe 2 de la circulaire du 5 juillet 2011 relative à l'application de l'article L. 214-18 du code de l'environnement modifié par la loi n°2006-1772 du 30.12.2006 dite loi sur l'eau et les milieux aquatiques
- Baran P., Longuevergne L., Ombredane D., Dufour S., Dupont N. (en prép.) Débit Minimum Biologique (DMB) et gestion quantitative de la ressource en eau. Centre de Ressources et d'Expertise Scientifique sur l'Eau en Bretagne.
- Bartout, P. and L. Touchart (2013). L'inventaire des plans d'eau français : outil d'une meilleure gestion des eaux de surface *Annales de géographie*. 691: 266-289.
- Beaujouan, V., Durand, P., Ruiz, L., 2001. Modelling the effect of the spatial distribution of agricultural practices on nitrogen fluxes in rural catchments. *Ecological Modelling*, 137: 93-105.
- Beaujouan, V., Durand, P., Ruiz, L., Arousseau, P. and Cotteret, G., 2002. A hydrological model dedicated to topography-based simulation of nitrogen transfer and transformation: rationale and application to the geomorphology-denitrification relationship. *Hydrological Processes*, 16(2): 493-507.
- Belliard J., Gorges G., Hette N., Le Pichon C., Tales E., Zahm A. (2011) La répartition des peuplements de poissons dans le bassin de la Seine: modèles à large échelle et focus sur les petits bassins versants franciliens. Programme PIREN-Seine Phase V: Peuplements de poissons dans le bassin de la Seine. 52p.
- Bergez, J.-E., Debaeke, P., Deumier, J.-M., Lacroix, B., Leenhardt, D., Leroy, P., Wallach, D., 2001. MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecol. Model.* 137, 43–60.
- Bichot F., Lavie J., Dequidt D., Thinon-Larminach M. (2010) – Analyse des chroniques piézométriques et hydrologiques avec le logiciel TEMPO pour la gestion des prélèvements en nappe Phase 3 : Actualisation des modèles précédents – Traitement des bassins versants de la Vienne, du Thouet/Sèvre nantaise, du Sud des Charentes et des nappes profondes. BRGM/RP-56481-FR, 481 p., 413 ill., 1 planche hors texte.
- Bichot F., Douez O., 2014. Simulation de l'impact des projets de réserves de substitution du bassin de la Sèvre-Niortaise/Marais Poitevin avec le modèle hydrodynamique du Jurassique. Rapport BRGM/RP-63201-FR, 105 p., 67 ill., 2 ann.
- Boubé D. & Hétier A. (2012) Analyse des impacts sur le milieu aquatique de retenues de soutien des étiages dans le Sud-Ouest de la France. Retour d'expérience de la CACG. 16 p.
- Boulton A.J. (2007) Hyporheic rehabilitation in rivers: restoring vertical connectivity. *Freshwater Biology*, 52, 632-650.
- Brown, B. L., C. M. Swan, et al. (2011). "Metacommunity theory as a multispecies, multiscale framework for studying the influence of river network structure on riverine communities and ecosystems." *Journal of the North American Benthological Society* 30(1): 310-327.

- Canardages (2010). Neige de culture. La fausse neige nous prend pour des flacons « Canard enchaîné »
- Carlisle, D. M., D. M. Wolock and M. R. Meador (2011). "Alteration of streamflow magnitudes and potential ecological consequences: A multiregional assessment." *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(5): 264-270.
- Cereg Ingénierie (2014). Etude d'incidence hydrologique des retenues du bassin de la Diège.
- CESAME (2013). Etudes d'estimation des volumes prélevables globaux - Sous bassin versant Ay-Ozon. Rapport Phases 5 à 6 - Version définitive.
- Chalabert, N. (2013). Identification et caractérisation des retenues à usage irrigation sur le bassin Adour-Garonne. Rapport de stage Master 2 Géomatique, Université de Toulouse.
- Chambre d'agriculture de l'Ardèche and SIVU "Doux Clair" (1999). Inventaire des besoins en eau d'irrigation satisfaits par pompage sur le BV du Doux.
- Charles S., Bravo De La Parra R., Mallet J.-P., Persat H., Auger P. (2000) Document Annual spawning migrations in modelling brown trout population dynamics inside an arborescent river network. *Ecological Modelling* 133: 15-31.
- Cipriani, T. and E. Sauquet (2014). Altération des étiages et du régime hydrologique des cours d'eau français par des ouvrages hydrauliques. Rapport final, Irstea Onema.
- Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne and Cemagref (1996). Suivi de la qualité des eaux des rivières et retenues gasconnes - Programme PIREN - Note de synthèse.
- Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, Hydrosphère and Géosys (2001). Etude de l'impact des petites réserves artificielles sur les milieux.
- Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (2013). Retenues de substitution secteur Vendée - Enquête publique - Volume 1 : Dossier de Déclaration d'intérêt général, Syndicat mixte Vendée Sèvre Autizes.
- Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (2013). Retenues de substitution secteur Vendée - Enquête publique - Volume 3 : Etude d'impacts Syndicat mixte Vendée Sèvre Autizes
- Cottenie, K., E. Michels, et al. (2003). "Zooplankton metacommunity structure: Regional vs. local processes in highly interconnected ponds." *Ecology* 84(4): 991-1000.
- Cudennec, C., M. Sarraza and J. Duchesne (2000). "Quantification de l'impact de la multiplication des retenues collinaires sur la ressource en eau." British Hydrological Society Publication
- Cudennec, C. and M. Sarraza (2000) "Impact de retenues collinaires agricoles sur l'hydrologie de surface. Exemple du bassin versant de l'Yvel, France. Relations terre-eau dans les bassins versants ruraux. Atelier électronique Relations terre-eau dans les bassins versants ruraux ".
- Cudennec, C., M. Sarraza and S. Nasri (2004). "Modélisation robuste de l'impact agrégé de retenues collinaires sur l'hydrologie de surface. ." *Revue des sciences de l'eau* 17/2: 181-194.
- Curie, F., Ducharne, A., Sebilo, M. and Bendjoudi, H. (2009), Denitrification in a hyporheic riparian zone controlled by river regulation in the Seine river basin (France). *Hydrol. Process.*, 23: 655-664. doi: 10.1002/hyp.7161.
- Declerck, S., J. Vandekerkhove, et al. (2005). "Multi-group biodiversity in shallow lakes along gradients of phosphorus and water plant cover." *Ecology* 86(7): 1905-1915.
- De Jong, C.(2007). "Artificial snow drains mountain resources" Environmental Research Web, Talking Point Article. <http://environmentalresearchweb.org/cws/article/opinion/30703>
- Delbreilh, N. (1993). Approche de l'impact sur l'environnement d'un ensemble de retenues collinaires - Cas du bassin de la Séoune. DEA d'Ecologie des Systèmes Aquatiques Continentaux de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.
- De Meester, L., S. Declerck, et al. (2005). "Ponds and pools as model systems in conservation biology, ecology and evolutionary biology." *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems* 15(6): 715-725.

- Descamps H., Capblancq J., Casanova H., Tourenq J.N. (1979). Hydrobiology of some regulated rivers in the southwest of France. In Ward J.V. and Stanford J.A., *The ecology of regulated streams*, 273-288, Plénum Press, New York.
- Descloux S., Detry T. & Usseglio-Polatera P. (2014). Trait based structure of invertebrates along a gradient of sediment colmation: benthos versus hyporheos responses. *Science of the Total Environment*, 466/467, 265-276.
- Dodson S. I., Arnott S. E. & Cottingham K. L. (2000). The relationship in lake communities between primary productivity and species richness. *Ecology*, 81: 2662-2679.
- Dorioz J.M., Ferhi A. (1994). Pollution diffuse et gestion du milieu agricole : transferts comparés de phosphore et d'azote dans un petit bassin agricole. *Wat. Res.*, 28 (2), 395-410.
- Dorioz, J.M., Gascuel-Odoux, C., Merot, P., Trévisan, D. (2011). Landscape control on diffuse pollution: a critical review on some investigations on phosphorus – retaining landscape features. In *Issues and solutions to diffuse pollution*. 14th International Conference of the IWA diffuse Pollution Specialist group, DIPCON 2010, 141-156.
- Douez O., Bichot F., Dequidt D., Dugrillon D., Putot E., Petit, L., 2010. Contribution à la gestion des prélèvements à la périphérie du Marais Poitevin par modélisation hydrodynamique BRGM/RP-58297-FR. 239 p., 212 ill., 5 ann., 12 pl.
- Douez O., 2011a. Simulation de l'impact des projets de réserves de substitution du secteur du Lay avec le modèle hydrodynamique du Jurassique. Rapport BRGM/RP-60122-FR, 85 p., 47 fig., 2 ann.
- Douez O., 2011b. Simulation de l'impact des projets de retenues de substitution du secteur Vendée avec le modèle hydrodynamique du Jurassique. Rapport BRGM RP-60121-FR, 93 p., 53 ill., 2 ann.
- Douez, O. and F. Bichot (2012). Appui à la DDT de la Vienne pour la gestion des prélèvements en eau souterraine à l'aide du modèle des nappes du Jurassique. Rapport du BRGM/RP-61773-FR.
- Downing, J. A., J. J. Cole, et al. (2008). "Sediment organic carbon burial in agriculturally eutrophic impoundments over the last century." *Global Biogeochemical Cycles* 22(1).
- Dugleux, E. (2002). "Impact de la production de neige de culture sur la ressource en eau."
- Dury J., Schaller N., Garcia F., Reynaud A., Bergez J. E. (2012). Models to support cropping plan and crop rotation decisions. a review. *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 32, pp. 567-580.
- Ebel J. D. & Lowe W. H. (2013) Constructed Ponds and Small Stream Habitats: Hypothesized Interactions and Methods to Minimize Impacts. *Journal of Water Resource and Protection*, 5: 723-731.
- Evette A., Peyras L., François H. et Gaucherand S., (2011) « Risques et impacts environnementaux des retenues d'altitude pour la production de neige de culture dans un contexte de changement climatique », *Revue de Géographie Alpine | Journal of Alpine Research* 99-4 <http://rga.revues.org/1471>.
- European Commission (2015) Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive. CIS Guidance Document No. 31. Technical Report - 2015 – 086.
- Faure, J.-P. (2011). Impacts des retenues collinaires sur les cours d'eau. Flourey C., Navarro L., Stroffek S., Dupré la Tour J., Lamouroux N. (2013) Mieux gérer les prélèvements d'eau : l'évaluation préalable des débits biologiques dans les cours d'eau. Note du Secrétariat Technique du Sdage. Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Irstea, Onema.
- Forel, F.-A. (1904). *Le Léman*. Monographie limnologique. Genève, Slatkine Reprints. Volume 3
- Gayraud S., Statzner B., Bady P., Haybach A., Schöll F., Usseglio-Polatera P., Bacchi M. (2003) Invertebrate traits for the biomonitoring of European large rivers: an initial assessment of alternative metrics. *Freshwater Biology*, 48: 2045-2064.
- Gee, J. H. R., B. D. Smith, et al. (1997). "The ecological basis of freshwater pond management for biodiversity." *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems* 7(2): 91-104.
- Gessner, M. O. and E. Chauvet (2002). "A case for using litter breakdown to assess functional stream integrity." *Ecological Applications* 12(2): 498-510.

- Ginot V., Souchon Y., Capra H., Breil P. & Valentin S. (1998). Logiciel EVHA. Evaluation de l'habitat physique des poissons en rivière (version 2.0.). Guide méthodologique. Cemagref Lyon BEA/LHQ, p.76
- Grimaldi, C. and J.-M. Dorioz (2014). Mission de réflexion Cycles et flux dans les paysages hétérogènes. Rapport adressé aux départements EA et EFPA, INRA.
- Grossi, J.-L. (2010). Les MARES PRAIRIALES à triton crêté. Cahiers techniques, Conservatoire Rhône-Alpes des Espaces Naturels: 19.
- Gueguen, M. (2013). Contribution à l'évaluation des impacts des retenues collinaires et des plans d'eau d'irrigation sur les ressources en eau et les milieux aquatiques du Morbihan. Rapport d'étude, Observatoire Départemental de l'Environnement du Morbihan.
- Hassall, C. and S. Anderson (2015). "Stormwater ponds can contain comparable biodiversity to unmanaged wetlands in urban areas." *Hydrobiologia* 745(1): 137-149.
- Indermuehle, N., S. Angélibert, et al. (2010). "The pond biodiversity index "IBEM": a new tool for the rapid assessment of biodiversity in ponds from Switzerland. Part 2. Method description and examples of application." *Limnetica* 29(1): 105-119.
- Institution Adour (2012). SAGE de la Midouze - Etat des lieux - Version 3.
- Institution Adour (2012). SAGE de la Midouze. Plan d'Aménagement et de Gestion Durable. Annexes cartographiques.
- ISL (2010). Etude de détermination des volumes prélevables - Bassin versant du Doux. Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse.
- ISL (2012). Etude de détermination des volumes prélevables - Bassin versant du Doux. Rapport de phase 6 : Proposition de répartition des volumes entre les usages et proposition de périmètre d'organisme unique RSO-0211 Version 2.
- Janssen S., Ittersum M. K. van. (2007). Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems*, Vol. 94, No. 3, pp. 622-636.
- Johengen, T.H., and Larock, P.A., 1993, Quantifying nutrient removal processes within a constructed wetland designed to treat urban runoff. *Ecol Engineering* 2(4): 347-366.
- Johnston, C.A., Detenbeck, N.E., and Niemi, G.J., 1990, The cumulative effect of wetlands on stream water quality and quantity. A landscape approach. *Biogeochemistry* 10:105-141.
- Johnston, C.A., 1991, Sediment and nutrient retention by freshwater wetlands: Effects on surface water quality. *CRC Critical Reviews in Environmental Control* 21: 491-56
- Keller, D., M. J. Van Strien, et al. (2012). "Do landscape barriers affect functional connectivity of populations of an endangered damselfly?" *Freshwater Biology* 57(7): 1373-1384.
- Lamouroux N., Capra H. (2002) Simple predictions of instream habitat model outputs for target fish populations. *Freshwater Biology*, 47, 1543-1556.
- Lamouroux N. et al. (en prép.) Débits écologiques : la place des modèles d'habitat dans une démarche intégrée. Hydroécologie Appliquée
- Leenhardt D., Therond O., Mignolet C., 2012. Quelle représentation des systèmes de culture pour la gestion de l'eau sur un grand territoire ? *Agronomie, Environnement & Sociétés*, vol 2, n°2, décembre 2012. En ligne : <http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/revue-aes-vol2-n2-decembre-2012-assolement-et-gestion-quantitative-de-leau/revue-aes-vol2-n2-6/>
- Lehmkuhl D.M. (1972) Change in thermal regime as a cause of reduction of benthic fauna downstream of a reservoir. *Journal Fisheries Research Board of Canada*, 29, 1329-1332.
- Leibold, M. A., M. Holyoak, et al. (2004). "The metacommunity concept: a framework for multi-scale community ecology." *Ecology Letters* 7(7): 601-613.
- Lepercq, D. and S. Laloux (2011). "Des réserves de substitution associées à une gestion collective de la ressource en eau pour protéger les milieux fragiles."

- Le Pichon C., Tales E, Clément F., Leclerc N., Gorges G., Zahm A. (2013) Effet des discontinuités physiques sur la distribution spatiale des poissons en tête de bassin : cas de l'Orgeval. In L'observation long terme de l'environnement. Exemple du bassin de l'Orgeval. Loumagne C. Tallec G. (Coord.) Editions Quae, Versailles p199-212.
- Leroux, L. (2011). Identification et caractérisation des retenues collinaires par télédétection : Application au Grand Ouest français, Université Rennes 2.
- Le Viol, I., F. Chiron, et al. (2012). "More amphibians than expected in highway stormwater ponds." *Ecological Engineering* 47: 146-154.
- Le Viol, I., J. Mocq, et al. (2009). "The contribution of motorway stormwater retention ponds to the biodiversity of aquatic macroinvertebrates." *Biological Conservation* 142(12): 3163-3171.
- Leclerc, D., S. Angélibert, et al. (2010). "Les libellules (Odonates) des étangs piscicoles de la Dombes." *Martinia* 26(3-4): 98-108.
- Magnier, E. (2013). Neige artificielle et ressource en eau en moyenne montagne : impacts sur l'hydrosystème. Les exemples d'Avoriaz (France) et de Champéry (Suisse) Thèse, Université Paris Sorbonne Université de Lausanne.
- Marchetto, A. (2014) L'indice EPI-L pour l'évaluation de la trophie des lacs profonds par les diatomées benthiques. Book of Abstract, 32ème colloque de l'Association des Diatomistes de Langue Française & 7th Central European Diatom Meeting, Thonon-les-Bains, France, 16-20 sept 2013. ISSN 978-2-7466-6166-0.
- Maridet L. & Philippe M. (1995) Influence of substrate characteristics on the vertical distribution of stream macroinvertebrates in the hyporheic zone, *Folia Faculty of Science Natural University of Masarykianae Brunensis*; 91, 101-105.
- Martin, A. (2013). Etude de l'impact cumulé des petites retenues artificielles sur la ressource en eau de surface : préambule d'une gestion équilibrée. Approche quantitative à l'échelle du bassin versant de la Sérène. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, VetAgro Sup.
- Marzin, A., V. Archaimbault, J. Belliard, C. Chauvin, F. Delmas and D. Pont (2012). "Ecological assessment of running waters: Do macrophytes, macroinvertebrates, diatoms and fish show similar responses to human pressures?" *Ecological Indicators* 23(0): 56-65.
- Menetrey, N., B. Oertli, et al. (2010). "The CIEPT: A macroinvertebrate-based multimetric index for assessing the ecological quality of Swiss lowland ponds." *Ecological Indicators* 11: 590-600.
- Miguel C., Lamouroux N., Pella H., Labarthe B., Flipo N., Akopian M., Belliard J. (soumis) Altération d'habitat hydraulique à l'échelle des bassins versants: impacts des prélèvements en nappe du bassin Seine-Normandie. La Houille Blanche.
- 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.
- [Montreuil](#), O., Merot, P., Marmonier, P. (2010). Estimation of nitrate removal by riparian wetlands and streams in agricultural catchments : effect of discharge and stream order. *Freshwater Biology*, [Volume 55, Issue 11](#), pages 2305–2318, November 2010 - Wiley Online Library.
- Murgue C., Therond O., Leenhardt D. Hybridizing local and generic information to model cropping system spatial distribution in an agricultural landscape. Soumis à Land Use Policy.
- Noirot JM. (1998) - Variabilité spatiale et temporelle des concentrations en nutriments et des teneurs en germes dans des bassins agricoles DEA Paris 6 1998.
- Oertli, B., D. Auderset Joye, et al. (2002). "Does size matter? The relationship between pond area and biodiversity." *Biological Conservation* 104(1): 59-70.
- Oertli, B., R. Cereghino, et al. (2009). "Pond conservation: from science to practice." *Hydrobiologia* 634: 1-9.
- Oertli, B. and P. A. Frossard (2013). Mares et étangs : écologie, gestion, aménagement et valorisation. . Lausanne, Presses Polytechniques Universitaires Romandes.

- Oertli, B., D. A. Joye, et al. (2005). "PLOCH: a standardized method for sampling and assessing the biodiversity in ponds." *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems* 15(6): 665-679.
- Paludan, C. (1995). Phosphorus dynamics in wetland sediments. (Fosfordynamik i sedimenter fra vadonrader). Ph.D. Thesis University of Aarhus, Biological Institute. National Environmental Research Institute, 106 pp.
- Pella H., Lejot J., Lamouroux N., Snelder T. (2012) The theoretical hydrographical network (RHT) for France and its environmental attributes. *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 3, 317-336.
- Pelte T., Navarro L., Stroffek S., Dupré la Tour J., Detry T., Langon M. Martinez P.-J., Delhay H. (2014) Les cours d'eau intermittents. Elements de connaissance et premières préconisations. Note du Secrétariat Technique du Sdage. Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Irstea, Onema, Dréal Rhône-Alpes.
- Peverly, J.H., 1982, Stream transport of nutrients through a wetland. *J. Environ. Qual.* 11:38-43.
- Philippe, E., F. Habets, E. Martin and C. David (2012). Impact des retenues collinaires sur les débits des Pays de la Loire - Rapport final, DREAL Pays de la Loire.
- Poff N.L., Richter B.D., Arthington A.H., Bunn S.E., Naiman R.J., Kendy E. et al. (2010) The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 55, 147–170.
- Ponsatí L., Acuña V., Aristi I., Arroita M., García-Berthou E., von Schiller D., Eloegi A. & S. Sabater. (2014). Biofilm responses to flow regulation by dams in mediterranean rivers. *River Research and Applications* DOI 10.1002/rra
- Preston, E.M., Bedford, B.L. (1988). Evaluating cumulative effects on wetland functions : A conceptual overview and generic framework. *Environmental Management*, Springer, vol. 12, issue 5, pp. 565-583.
- Rambaud et al. (1988) et DIREN Limousin (1994) in CACG (2001) Etude de l'impact des petites retenues artificielles sur les milieux. Rapport de phase 1. Etude Inter-Agences de l'Eau. 188 p
- Reed, T., [Carpenter](#) S.R. (2002). Comparisons of P-Yield, Riparian buffer strips, and land cover in six agricultural watersheds - *Ecosystems*, 2002 - , Volume 5, [Issue 6](#), pp 568-577.
- Regazzoni, C., S. Payraudeau and C. Grégoire (2010). Evaluation du potentiel de rétention et de remédiation des flux de produits phytosanitaires dans les eaux de surface par des Ouvrages de Rétention et de Remédiation (OR2) - Les Ouvrages de Rétention et de Remédiation (OR2), Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg.
- Rimet, F. and Bouchez A. (2012) Life-forms, cell-sizes and ecological guilds of diatoms in European rivers. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* 406:1-14.
- SAFEGE (2004). Etude visant à élaborer le SAGE de la Sèvre Niortaise et du Marais Poitevin.
- SAFEGE Ingénieurs Conseils (2013). Etude sur la gestion quantitative de la ressource en eau sur le territoire du SAGE "Layon Aubance". Rapport de phase 1. Version 1.3, Syndicat Mixte du Bassin du Layon.
- SAFEGE Ingénieurs Conseils (2014). Etude sur la gestion quantitative de la ressource en eau sur les territoires des SAGE "Layon Aubance" et "Eure Thau Saint-Denis". Détermination des débits d'objectif et des volumes prélevables sur les bassins versants tests. Version 1, Syndicat Mixte du Bassin du Layon.
- Saraeva K. & Hardy T.B. (2009). Prediction of fisheries physical habitat values based on hydraulic geometry and frequency distributions of depth and velocity. *International Journal of River Basin Management*, 7, 31–41.
- SMARL, Bureau d'études Sinbio and Agence de l'eau Rhin-Meuse (2011). Etude préalable pour une gestion raisonnée des étangs du bassin-versant de la Largue - Fiche B : installation d'un moine.
- Snajdr J 2007 The production of artificial snow ecological, social and economical aspects
- Snelder T.H., Booker D., Lamouroux N. (2011) A method to assess and define environmental flow rules for large jurisdictional regions. *Journal of the American Water Resources Association*, 47, 828-840.
- Snelder TH, Lamouroux N, Pella H. (2011). Empirical modelling of large scale patterns in river bed surface grain size. *Geomorphology* 127: 189–197.

Souchon, Y., Lamouroux, N., Capra, H. and Chandesris, A. (2003). La méthodologie Estimhab dans le paysage des méthodes de microhabitat. Note technique, Cemagref Lyon, 9 p. (<http://www.irstea.fr/dynam>)

Souchon, Y. and V. Nicolas (2011). Barrages et seuils : principaux impacts environnementaux, ONEMA & Cemagref: 28.

Syndicat Mixte du Marais Poitevin Bassin de la Vendée de la Sèvre et des Autizes (2014). Réserves de substitution - bassin des Autizes : origine, gestion et bilan des réserves de substitution.

Taillandier P, Therond O, Gaudou B, Vavasseur M. (2012). Modélisation du comportement des agriculteurs : application d'une architecture BDI fondée sur la théorie des fonctions de croyance. DOI:10.3199/JESA.45.1-n © Lavoisier 2012 AR_DOI

Thiéry D. (1990). Logiciel MARTHE, Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements. Notice BRGM R-32210.

Tilton, D.L., and R.H. Kadlec (1979). The utilization of a fresh-water wetland for nutrient removal from secondary treated waste water effluent. *J. Environ.Qual.* 8: 328-334.

Trévisan, D., Quétin, P., Barbet, D., Dorioz, J.M. (2012). POPEYE: a river-load oriented model to evaluate the efficiency of Environmental measures for reducing phosphorus losses, *J. Hydrology*, 450-451, 254-266.

Usseglio-Polatera P. & Bournaud M. (1989) Trichoptera and Ephemeroptera as indicators of environmental changes of the Rhone River at Lyons over the last twenty-five years. *Regulated Rivers, Research & Management*, 4, 249-262.

Van Looy K., Tormos T., Souchon Y. (2014) Disentangling dam impacts in river networks. *Ecological Indicators* 37: 10– 20

Wang D., Dorioz J.M., Trevisan D., Braun D.C., Windhausen L.J., Vansteelant J.Y. (2003) - Using a landscape approach to interpret diffuse phosphorus pollution and assist with water quality management in the basin of Lake Champlain (Vermont) and Lac Léman (France) *In* T.O. Manley and P.L. Manley (eds.) *Lake Champlain in the New Millennium . Water Science and Application*. Vol. 2. American Geophysical Union.

Weller, C.M., Watzin, M.C., Wang, D. (1996). Role of wetlands in reducing phosphorus loading to surface water in eight watersheds in the Lake Champlain Basin - *Environmental Management*, 1996 – Springer 20, No. 5, pp. 731-739.

Whigham D.F., Chitterling C., Palmer, B. (1988). Impacts of freshwater wetlands on water quality: landscape perspective. *Environ. Manage.*, 12 (1988), pp. 663–671.

Wilding T.K., Bledsoe B., Poff N.L., Sanderson, J. (2014) Predicting habitat response to flow using generalized habitat models for trout in Rocky Mountain streams. *River Research and Applications*, 7, 805–824.

Williams, P., M. Whitfield, et al. (2004). "Comparative biodiversity of rivers, streams, ditches and ponds in an agricultural landscape in Southern England." *Biological Conservation* 115(2): 329-341.

Winter, T.C., Harvey. J.W., Franke, O.L. and Alley, W.M. (1998), *Ground water and surface water—A single resource*: U.S. Geological Survey Circular 1139, 79 p.

<http://www.alpconv.org/en/publications/otherinfo/thesis/Documents/SNAJDR-Artificial%20snow.pdf>

http://www.savoie.gouv.fr/content/download/11037/75215/file/NC_2013_Impression.pdf

<http://maelia-platform.inra.fr/modeles/processus-normatifs/>

[http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/gestion-quantitative/EEVPG/http://www.gesteau.eaufrance.fr/documentation/volumes%20pr%C3%A9levables?f\[0\]=im_taxonomy_vid_5%3A216](http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/gestion-quantitative/EEVPG/http://www.gesteau.eaufrance.fr/documentation/volumes%20pr%C3%A9levables?f[0]=im_taxonomy_vid_5%3A216)

http://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/58886/GED_00000000.pdfhttp://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/58882/GED_00000000.pdf

http://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/58885/GED_00000000.pdf

http://www.sageseudre.fr/en/c/document_library/get_file?uuid=01ffd7f1-f4bf-4835-aaa7-823efacf0590&groupId=10156

<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57878-FR.pdf>

http://www.auvergne.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_etude_cle0fa1ba.pdf

<http://www.gesteau.eaufrance.fr/document/d%C3%A9termination-des-volumes-pr%C3%A9levables-sur-le-p%C3%A9rim%C3%A8tre-du-sage-authion>

Annexe I : Note de projet de l'expertise collective sur l'impact cumulé des retenues

Contexte

En 2008, une réforme visant à résorber les déficits quantitatifs dus aux prélèvements d'eau a été introduite. Dans tous les bassins en déficit quantitatif, il a été demandé aux préfets de déterminer **le volume prélevable**, tous usages confondus, garantissant le bon fonctionnement des milieux aquatiques correspondants et donc le respect **huit années sur dix des débits objectifs d'étiage (DOE)**, et de réviser les autorisations de prélèvement pour que le volume total autorisé soit au plus égal au volume prélevable d'ici fin 2014, 2017 ou 2021 selon les bassins.

Une circulaire du 3 août 2010 relative à la résorption des déséquilibres quantitatifs en matière de prélèvements d'eau a précisé que le retour à l'équilibre quantitatif dans les bassins à écart important (écart entre le volume prélevé en année quinquennale sèche et volume prélevable supérieur à un seuil de l'ordre de 30%) reposerait sur un ensemble de mesures visant à **encourager les économies d'eau et à créer, sous certaines conditions, de nouvelles ressources (c'est-à-dire des retenues)**.

Dans certains bassins (en particulier Adour Garonne, Loire Bretagne et Rhône Méditerranée et Corse), l'aboutissement de la réforme de la gestion quantitative de l'eau est conditionné à la mise en place de nouvelles **réserves de substitution**. Celles-ci sont envisagées dans des bassins versants qui sont en général déjà pourvus d'une grande variété d'ouvrages installés directement sur les cours d'eau ou à proximité : retenues collinaires alimentées par le ruissellement des eaux et déconnectées des cours d'eau, retenues construites sur les cours d'eau, réserves situées hors cours d'eau et alimentées par pompage en rivière ou dérivation ou nappe, etc. Seuls les ouvrages déconnectés des cours d'eau et remplis en dehors de la période de tension par pompage en rivière ou nappe sont considérés comme des réserves de substitution.

A la demande des services déconcentrés de l'Etat et des acteurs directement concernés, la direction de l'eau et de la biodiversité a publié en novembre 2011 un guide dont l'objectif est d'apporter un appui juridique propre à éviter les erreurs de procédure portant sur la légalité externe (forme et procédure) dans les dossiers de construction de retenues. Ce guide rappelle que la notice d'incidence à fournir par le pétitionnaire dans son dossier de **déclaration ou d'autorisation doit prendre en compte l'impact cumulé des ouvrages en projet**. Cette obligation est également précisée à l'article R122-5 du code de l'environnement (modifié par le décret n°2011-2019 du 29 décembre 2011 relatif aux études d'impact). Le guide précise également que certains **SDAGE ont pris des dispositions demandant aux services de l'Etat de s'assurer que l'impact cumulé de l'ensemble des retenues présentes sur un bassin est bien pris en compte lors de l'instruction du projet**. La compatibilité du projet avec le SDAGE pourra donc nécessiter une évaluation de l'impact cumulé du ou des projets de retenues avec les retenues déjà existantes dans le bassin concerné.

A l'heure actuelle, la question de l'impact cumulé d'ouvrages de stockage successifs sur un même bassin versant est mal appréhendée tant par les services chargés de l'instruction des projets d'ouvrages que par les pétitionnaires eux-mêmes. **Aucune méthodologie n'a jusqu'à présent été mise en place au niveau national mais le sujet prend de l'ampleur dans le cadre de la réforme des volumes prélevables**. La question devient d'autant plus cruciale que les dernières études disponibles sur l'évaluation des impacts du changement climatique montrent que celui-ci aura des impacts significatifs sur les régimes hydrologiques des cours d'eau et par conséquent sur le remplissage des ouvrages. Le changement climatique et le recul prévu de la limite d'enneigement risquent également de conduire à un accroissement du nombre des retenues pour neige de culture, dont l'impact sur le milieu pourrait devenir significatif dans les zones de montagne.

Objectif de l'expertise

L'expertise a pour objectif de mettre à disposition des éléments méthodologiques opérationnels permettant d'améliorer la qualité des procédures d'instruction :

- Améliorer les notices d'incidence et études d'impact élaborées par les pétitionnaires en vue d'évaluer l'impact cumulé généré par leur projet de retenue, compte-tenu des ouvrages similaires déjà existants dans le bassin versant concerné. Il s'agit de définir des éléments méthodologiques permettant d'améliorer ces documents en tenant compte, si c'est pertinent, des contextes hydrogéographiques qui seront à organiser selon une typologie.
- Améliorer et faciliter l'évaluation par les services de police de l'eau de la qualité et de la pertinence des notices d'incidence et des études d'impact produites par le pétitionnaire, dans le cadre de son dossier de déclaration ou d'autorisation, en définissant notamment des critères d'analyse à prendre en compte.

L'un des enjeux essentiels de l'instruction des dossiers de création de retenues d'eau est de garantir la non-dégradation de la qualité des masses d'eau, obligation instaurée par la directive cadre sur l'eau. Le commanditaire de l'expertise, la Direction de l'Eau et de la Biodiversité souligne qu'il ne s'agit pas de définir des potentiels d'équipement par bassin versant ni de donner des recommandations sur la gestion de la ressource.

Dans ce cadre, l'expertise sera centrée sur les connaissances, les moyens et méthodes de caractérisation et de quantification de l'impact supplémentaire engendré par la création d'une nouvelle retenue sur des bassins versants pouvant déjà être équipés de nombreuses retenues. Il s'agira donc de définir de quelle manière il est possible d'appréhender l'impact cumulé engendré par une nouvelle retenue, en tenant compte des impacts cumulés des retenues déjà existantes à l'échelle d'un bassin versant (aire de gestion cohérente des processus), sans limitation a priori sur la taille des bassins pouvant être considérés. L'expertise donnera donc également des éléments pour appréhender l'impact des retenues déjà présentes sur un bassin versant.

L'expertise n'a pas comme objectif d'aller jusqu'à l'élaboration de modèles de cahiers des charges ou d'outils directement opérationnels d'évaluation de l'impact cumulé (modèles). L'expertise permettra par contre de définir les champs de recherche et de développement nécessaire à développer pour élaborer ce type d'outil. De plus, elle rassemblera et mettra en perspective les éléments méthodologiques déjà mobilisables, probablement en s'appuyant sur une typologie des principaux milieux et situations rencontrés.

L'expertise devra permettre également d'apporter des éléments de préconisations nécessaires à l'élaboration des SAGE et autres documents de planification concernant les politiques à mener sur la création de nouvelles retenues.

Les impacts à prendre en compte concernent la totalité du cycle de vie de la retenue : construction, fonctionnement et entretien. Le champ de l'expertise doit couvrir les différents types d'impact en lien avec les différentes composantes du fonctionnement de l'état des masses d'eau prises en compte dans l'évaluation de l'état des eaux dans le cadre de la DCE :

- la physico-chimie (notamment nutriments, polluants et température)
- l'hydromorphologie (régime hydrologique, continuité sédimentaire et biologique, morphologie)
- la biologie (poissons, macro-invertébrés, flore, phytoplancton).

Les méthodes permettant d'évaluer les aspects relatifs à la sécurité des ouvrages existent déjà, et ce champ ne sera pas considéré dans l'expertise.

Tous les types de retenues déjà construites ou dont la construction est envisagée sont à considérer : notamment, les retenues directement sur le cours d'eau ou en dérivation, les retenues collinaires alimentées par ruissellement, les réserves de substitution alimentées par des pompes durant l'hiver en cours d'eau ou en nappe et probablement les retenues pour neige de culture (l'intégration de ces dernières sera soumise à réflexion).

Pilotage de l'expertise

La mise en œuvre de l'expertise est confiée à Irstea qui l'organise en partenariat étroit avec l'Inra et en lien avec l'Onema. Dans ce cadre, le pilotage de l'expertise est confié à une chercheuse d'Irstea : Nadia Carluer.

L'Irstea et l'Inra mettent en commun leurs compétences et mettent à disposition des moyens humains nécessaires au bon déroulement de l'expertise afin notamment de constituer une équipe projet mixte permettant de faciliter le travail des experts (travail bibliographique, mise à disposition et archivage des documents, soutien logistique des réunions visite et échange, animation du groupe d'expert) et de garantir le suivi des règles de l'expertise.

Un calage entre les deux établissements est nécessaire afin de garantir une homogénéisation des procédures.

Les coûts de l'expertise sont pris en charge par Irstea sur la base d'un bilan financier provisionnel (frais de logistique des différents groupes et mobilisation des agents de l'équipe projet) dans le cadre de la convention Irstea-Onema.

Organisation de l'expertise

L'expertise est organisée autour de 4 comités selon un schéma classique d'expertise collective.

1 - Un comité de pilotage dont le rôle est:

- de garantir le bon déroulement de l'expertise conformément à la commande et à ses objectifs ;
- de s'assurer de l'adéquation des compétences réunies dans le groupe d'experts avec les objectifs de l'expertise ;
- de faciliter le travail des experts au sein de leur institution ;
- de définir les modalités de diffusion et de communication des résultats de l'expertise.

Ce comité est constitué de représentants des institutions en charge de l'expertise (Irstea, Inra et ONEMA) et du commanditaire (DEB du Ministère en charge de l'environnement). Ce groupe de pilotage se réunit au moment des étapes clefs de l'expertise et à la demande du pilote de l'expertise.

2 - Une équipe projet regroupe les personnes qui accompagnent le pilote du projet ; son rôle est :

- d'animer le groupe d'expertise en lien avec le pilote du groupe d'experts ;
- de procéder aux travaux bibliographiques nécessaires à l'expertise ;
- d'organiser les réunions et échanges du groupe d'experts et suivre leurs travaux ;
- de fournir la documentation assurant l'adéquation des compétences réunies dans le groupe d'experts avec les objectifs de l'expertise ;
- d'organiser et de mettre en œuvre la diffusion et la communication des résultats de l'expertise.

L'équipe projet est constituée d'un ingénieur d'études, d'un ou plusieurs documentalistes, et d'un ingénieur de recherche. Irstea a en charge le recrutement de l'ingénieur d'études qui est placé au près du pilote de l'expertise.

3 - Un comité d'experts (Cf. annexe) dont le rôle est d'élaborer les différents rapports d'expertise.

Ce comité d'experts est constitué d'un ensemble de spécialistes de différentes disciplines, présentant une forte composante en recherche appliquée. Afin de traiter de l'ensemble de la problématique, le comité d'experts réunira l'ensemble des compétences nécessaires (Cf. annexe).

Chaque expert sera mandaté et recevra pour ce faire une lettre de mission.

4 - Un comité de suivi dont les objectifs sont :

- de veiller à la prise en compte de l'ensemble des enjeux opérationnels au démarrage de l'expertise ;

- de veiller à la complétude du rapport final du point de vue opérationnel ;
- de veiller à la lisibilité et l'opérationnalité du rapport final.

Ce comité de suivi sera constitué de personnes qualifiées issues des services de l'Etat et des établissements publics concernés par la problématique de la création des retenues, notamment en lien avec l'instruction des dossiers de demande de déclaration et/ou d'autorisation, l'élaboration des SDAGE et des SAGE :

- représentants du ministère en charge de l'écologie, direction de l'eau et de la biodiversité, commanditaire de cette expertise ;
- représentants des services déconcentrés du ministère en charge de l'écologie (DDT, DREAL), représentants des Agences de l'Eau, particulièrement concernées par cette problématique notamment les Agences Adour-Garonne, Loire Bretagne et Rhône Méditerranée et Corse ;
- représentants de l'Onema (DG, DiR et SD).

Déroulement et calendrier de l'expertise

Sans préjuger des réflexions qui seront conduites par le comité d'experts, plusieurs éléments méthodologiques paraissent indispensables à mettre en œuvre afin d'obtenir des résultats les plus opérationnels possible :

- exploiter au maximum des exemples de bassins équipés présentant suffisamment de données permettant le retour d'expérience ;
- partir de cas représentatifs, afin d'obtenir des résultats facilement généralisables. A cette fin, une typologie des cas les plus souvent rencontrés pourra être constituée en fonction des différents types d'ouvrage existant (associé à des modes de gestion notamment) et des différents contextes biogéographiques dans lesquels sont rencontrés la plus grande majorité des cas (bassin Adour-Garonne, bassin Rhône-Méditerranée-Corse et une partie du bassin Loire-Bretagne) ;
- procéder à des interviews des parties prenantes et d'acteurs de la gestion. Ces interviews permettront d'intégrer dans la réflexion les parties prenantes et notamment les pétitionnaires et les bureaux d'étude mandatés pour élaborer les dossiers.

Afin d'avoir une vision exhaustive à la fois des aspects scientifiques et des aspects opérationnels, l'expertise se déroulera en 3 phases qui feront chacune l'objet d'un ou plusieurs documents. Ces phases s'alimenteront successivement :

Période préalable (février à août 2014) : *acclimation du pilote à la problématique, premiers contacts avec des opérationnels. Identification des experts.*

Phase 1 (septembre 2014 – avril 2015) : cette phase correspond à une phase exploratoire des questions opérationnelles. Elle a comme objectif de circonscrire l'ensemble des interrogations en se basant notamment sur des échanges avec les gestionnaires / acteurs opérationnels et l'analyse des pratiques déjà mise en œuvre et de la littérature opérationnelle disponible. Au final le rendu doit expliciter, au regard de la problématique et des pratiques déjà existantes, les éléments méthodologiques que l'on peut considérer comme acquis, les incertitudes et les points qui font divergence. Ce rendu doit permettre également de mettre en avant les bonnes pratiques. Cette phase doit enfin permettre de définir les champs scientifiques à investir pour progresser dans l'élaboration d'éléments méthodologiques dans les domaines où les acquis ne sont pas suffisants et ainsi de préparer la deuxième phase (élaboration des requêtes bibliographiques). Ce rendu présentera donc des premiers éléments opérationnels, mais sans analyse complète de la bibliographie internationale existante.

Phase 2 (avril 2015 – décembre 2015) : cette deuxième phase correspond à la mise en œuvre d'une expertise collective scientifique classique. Elle consiste à définir les acquis scientifiques et les champs de recherche nécessaires à développer sur la base de l'analyse de la bibliographie scientifique internationale. Cette phase est organisée sur la base des résultats de la première phase et permettra d'alimenter la dernière phase. Le rendu de cette phase correspond à un état de l'art de la recherche sur les différents points d'incertitude et de controverse identifiés lors de la première phase.

Phase 3 (décembre 2015 – juillet 2016) : cette troisième et dernière phase correspond à la constitution du document final. Il s'agit de compléter le premier document sur la base des résultats de la deuxième phase afin d'obtenir un document le plus opérationnel possible, supporté par une analyse scientifique. Ce document devra au final faire le point sur :

- les bonnes pratiques déjà existantes ;
- les outils déjà existants pouvant être adaptés simplement pour répondre aux besoins ;
- les éléments de méthode pouvant améliorer les études d'impacts et leurs instructions ;
- les champs du savoir encore incertains ;
- des pistes de recherche et développement à développer permettant d'améliorer les pratiques à différentes échelles de temps.

Les rendus de l'expertise et leur diffusion

La première phase de l'expertise fera l'objet d'un seul rapport qui aura pour objectifs de faire le point, du point de vue opérationnel, sur les acquis, les méthodes mobilisables et les méthodes mises en œuvre pour aborder l'impact cumulé des retenues dans les études d'impact ou notices d'incidence. Il visera aussi à identifier les connaissances qu'il sera nécessaire d'approfondir en deuxième phase ainsi que les domaines qu'il sera utile d'investir pour pouvoir ensuite élaborer des éléments méthodologiques qui permettront d'avancer sur cette problématique. La deuxième phase fera, quant à elle, l'objet de deux rendus différents, le premier correspondant au rapport complet de l'ESCo, compilant les résultats des lectures menées par les experts dans chaque discipline et le second correspondant à un rapport de synthèse reprenant les points essentiels ressortant de ces lectures. Enfin, la troisième et dernière phase impliquera la rédaction d'un rapport complétant le rapport de la première phase à la lueur des résultats de la deuxième phase, et proposant des éléments méthodologiques.

Les modalités de diffusion de ces documents (ampleur, support, forme et accompagnement) ou d'extraits de documents devront être définies à l'issue de chaque phase. Une attention particulière sera portée à la diffusion des rendus de la phase 1 qui, par construction, pourront intégrer des résultats encore préliminaires.

Le rendu final fera l'objet de colloques de restitution dont le premier, ouvert à la société civile, avec une mise en débat des résultats, pourra se dérouler à la fin de la deuxième phase. Trois autres séminaires de restitution régionaux à destination des opérationnels et bureaux d'étude pourront être organisés à la fin de la troisième phase dans chacun des grands bassins des trois Agences de l'eau les plus concernées (Loire-Bretagne, Adour-Garonne, Rhône-Méditerranée et Corse).

Annexe : Constitution du comité d'experts

Le comité d'experts est composé de spécialistes de différentes disciplines, présentant une forte composante en recherche appliquée. Afin de traiter de l'ensemble de la problématique, le comité d'experts réunira des compétences en :

Hydrologie des cours d'eau : le ou les experts doivent pouvoir appréhender dans quelle mesure les régimes hydrologiques sont altérés à l'échelle des bassins versants, par la gestion des différents types de retenues (phase de remplissage et phase de vidange notamment). Cette altération doit être évaluée en regard du fonctionnement physico-chimique, biologique et de la dynamique hydromorphologique des cours d'eau d'un bassin versant, avec les spécialistes correspondants. Le ou les experts doivent être capables de comprendre et prendre en compte les différents enjeux relatifs au fonctionnement des cours d'eau. Une attention particulière est à porter sur le lien entre hydrologie et morphologie, ainsi qu'entre hydrologie et habitat aquatique.

Mot clefs : hydrologie, bassin versant, régime des débits, ruissellement, variabilité, modélisation, étiage, crue, bassins versants ruraux, impact milieu, hydraulique, habitat.

Hydrogéologie : le ou les experts doivent être capable de faire le lien, à l'échelle d'un bassin versant, entre l'évolution à court et moyen termes de l'état des nappes, et les différents impacts entraînés directement et indirectement par le fonctionnement des retenues (pompage direct dans la nappe, interception d'une partie du ruissellement, écrêtage de crue notamment).

Mot clefs : hydrogéologie, bassin versant, ruissellement, variabilité naturelle des nappes, remplissage des nappes, modélisation, bassin versant ruraux, étiage, crue.

Physico-chimie des cours d'eau et des plans d'eau : le ou les experts doivent être capables d'analyser les différents processus physico-chimiques se déroulant au sein des retenues après leur remplissage. Il doit pouvoir aussi caractériser les différents impacts sur la physico-chimie, et notamment la température, les concentrations en nutriments, en MES et différents polluants (phytosanitaires) des cours d'eau entraînés par une évolution des régimes des débits des cours d'eau. Il doit aussi pouvoir évaluer la contribution de ces retenues à l'émission de gaz à effet de serre.

Mots clefs : chimie, cycles biogéochimiques, température, nutriments, matière organique, phytosanitaire, GES, hydrologie, retenue, plan d'eau

Ecotoxicologie : le ou les experts doivent être capables de faire le lien entre l'évolution de la biodisponibilité des contaminants dans le milieu aquatique induite par les retenues (phase liquide, sédiment, dans les retenues et à leur aval, en fonctionnement courant et en phase de vidange) et leur effet écotoxicologique sur les organismes aquatiques.

Mots clefs : écotoxicologie, contaminant, sédiment, biodisponibilité, hydrologie, retenue.

Hydromorphologie et transport solide en cours d'eau : le ou les experts doivent être capables de définir de quelle manière la dynamique hydromorphologique (transport sédimentaire, érosion, sédimentation) peut être impactée par le fonctionnement de retenue sur un bassin versant. Le lien devra être fait entre l'évolution des régimes des débits entraînés par le fonctionnement des retenues, l'hydraulique des cours d'eau et l'état de la morphologie de ces derniers. L'évolution à moyen et long termes des habitats entraînée par l'évolution des régimes hydrologiques (du ruissellement au régime des débits) et des équilibres hydro-sédimentaires (érosion/sédimentation) devra pouvoir être prise en compte à l'échelle d'un bassin versant.

Mots clefs : hydromorphologie, transport sédimentaire, habitat, crue, crue morphogène, ruissellement et érosion

Ecologie : le ou les experts doivent pouvoir appréhender les réponses des compartiments biologiques à l'évolution des régimes hydrologiques, du fonctionnement hydromorphologique et des caractéristiques physico-chimiques des cours d'eau, à court et moyen termes, entraînés par la gestion des retenues. Les

compartiments biologiques à prendre en compte sont en premier lieu les poissons, les macro-invertébrés et la flore (macrophytes). Les impacts sur les espèces protégées et leur habitat devront être également pris en compte, notamment pour les zones ennoyées par la mise en place de la retenue. Il est essentiel de pouvoir appréhender le lien hydrologie/hydraulique/habitat/compartiment biologique. Au-delà de l'impact local sur l'habitat, la notion de continuité écologique en cours d'eau devra également être considérée, qu'il s'agisse des espèces locales, migratrices ou invasives.

Mots clefs : habitat poisson, macro-invertébrés, flore, température, hydraulique, modélisation, cycle biochimique, continuité écologique, espèces invasives, espèces migratrices

Agronomie : le ou les experts doivent être en mesure de comprendre les déterminants de l'usage et de la gestion des retenues pour l'agriculture. Il est également nécessaire d'être en capacité d'appréhender le ruissellement des eaux sur les bassins versants et notamment sur des champs cultivés.

Mots clefs : ruissellement, gestion des retenues, irrigation, assolement, cultivars, stress hydrique, nutriments, phytosanitaires.

Sociologie : le ou les experts doivent être en mesure d'appréhender les enjeux sociologiques liés aux développements des retenues dans les bassins et d'éclairer la façon dont des groupes d'acteurs réagissent face aux projets d'aménagement.. Cet aspect peut se révéler indispensable, lorsque les autorisations sont soumises à enquête publique ou lors de la consultation des communes et des commissions locales de l'eau.

Mots clefs : sociologie des mobilisations, agriculture,.

Pour la plupart des disciplines, il est souhaitable d'être en mesure d'appréhender les différents processus à la fois à l'échelle des aménagements et celle d'un bassin versant dans sa totalité. Les principaux liens et interactions entre les différents processus doivent pouvoir être prises en compte, il est donc nécessaire que les experts soient en capacité d'interagir avec des champs disciplinaires autres que les leurs. Une bonne connaissance du fonctionnement des petits et moyens bassins versant à dominante rurale devra pouvoir être mobilisée, l'impact des retenues se faisant expressément sentir sur ces types de bassin. Il est essentiel que les experts puissent porter un regard opérationnel sur ces questions, l'objectif étant de produire des éléments de méthode directement utilisables par les acteurs impliqués dans l'élaboration et l'instruction des autorisations.

Annexe II : Liste des experts

Nom Prénom	Affiliation	Statut	Thématique
ALLAIN Sophie	INRA-AgroParisTech - UMR SADAPT	HDR	Sociologie
BABUT Marc	Irstea Lyon-Villeurbanne - UR MAEP - Laboratoire d'écotoxicologie	ICPEF	Ecotoxicologie (micropolluants, composés émergents, bioaccumulation...)
BELLIARD Jérôme	Irstea Antony / UR Hydrosystèmes et bioprocédés.	Directeur de recherche	Ecologie des systèmes aquatiques, écologie des communautés, bioindication
BERNEZ Ivan	UMR ESE0985 Inra-Agrocampus Ouest	Ingénieur de recherche	Ecologie de la restauration / Ecologie des communautés
BOUR Olivier	Université de Rennes 1 - UMR 6118	Professeur des universités	Hydrogéologie des milieux hétérogènes, hydrogéophysique
BURGER-LEENHARDT Delphine	INRA - UMR 1248 Agir - Département SAD	Directrice de recherche	Agronomie du territoire, agronomie des systèmes de culture
DEVIN Simon	Université de Lorraine - UMR 7360 - LIEC	Maître de conférences	Ecologie des populations et des communautés (Invertébrés aquatiques)
DORIOZ Jean-Marcel	INRA Thonon / UMR CARTELE	Directeur de recherche	Physico-chimie (Pollution diffuse, eutrophisation, phosphore) ; Ecologie, agropédologie, bassin versant
DOUEZ Olivier	BRGM	Ingénieur	Hydrogéologie
DUFOUR Simon	Université Rennes 2 - LETG Rennes COSTEL - CNRS UMR 6554 / Dépt. de Géographie	Maître de conférences	Géographie, géomatique appliquée aux hydrosystèmes (télédétection et SIG), paysages alluviaux
GRIMALDI Catherine	UMR INRA-Agrocampus Ouest 1069 SAS	Directrice de recherche	Physico-chimie des cours d'eau et plans d'eau
HABETS Florence	CNRS Paris / UMR Metis / Université Pierre & Marie-Curie	Directrice de recherche	Hydrologie
LAMOUREUX Nicolas	Irstea Lyon-Villeurbanne - UR MAEP - Laboratoire Dynam	Directeur de recherche	Eco-hydrologie

Nom Prénom	Affiliation	Statut	Thématique
LE BISSONNAIS Yves	INRA Montpellier / UMR LISAH	Directeur de recherche	Transport solide
LEVINSON Elise	Sol et Civilisation	Ingénieur de recherche	Sociologie (Facilitation stratégique, Gestion du vivant, Développement durable)
MOLENAT Jérôme	INRA Montpellier / UMR LISAH	Directeur de recherche	Hydrologie des bassins-versants, hydrologie des retenues collinaires, échange d'eau entre la surface et le souterrain, modélisation hydrologique
ROSSET Véronique	Irstea Lyon-Villeurbanne - UR MAEP - Laboratoire Dynam	Ingénieur de recherche	Ecologie des étangs et plans d'eau (Macroinvertébrés, Odonates adultes)
SANCHEZ PEREZ José-Miguel	Ecolab Toulouse / UMR 5245 CNRS-UPS-INPT ENSAT	Directeur de recherche	Hydrologie, Modélisation hydrologique
SAUVAGE Sabine	Ecolab Toulouse / UMR 5245 CNRS-UPS-INPT ENSAT	Ingénieur de recherche	Modélisation, hydrodynamique, transfert des contaminants
USSEGLIO-POLATERA Philippe	Université de Lorraine - UMR 7360 - LIEC	Professeur des universités	Ecologie des communautés (Invertébrés benthiques)