



Vulnérabilité des milieux aquatiques et de leurs écosystèmes

Etude de la répartition des poissons d'eau douce

Octobre 2012

SOMMAIRE

1.	CONTEXTE GENERAL ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	5
2.	IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES PEUPEMENTS PISCICOLES A L'ECHELLE NATIONALE	8
2.1.	PRINCIPE GENERAL	8
2.2.	METHODOLOGIE RETENUE	8
2.2.1.	VARIABLES BIOLOGIQUES : LES DONNEES PISCICOLES	8
2.2.1.1.	<i>Source des données</i>	8
2.2.1.2.	<i>Sélection des espèces</i>	9
2.2.2.	VARIABLES GEOGRAPHIQUES	11
2.2.3.	VARIABLES BIOCLIMATIQUES	12
2.2.3.1.	<i>Climat actuel</i>	12
2.2.3.2.	<i>Climat futur</i>	12
2.2.3.3.	<i>Prise en compte de la température de l'eau</i>	14
2.2.4.	MODELISATION DES DISTRIBUTIONS ACTUELLES DES ESPECES	15
2.2.4.1.	<i>Jeux de calibration et de validation</i>	15
2.2.4.2.	<i>Méthodes statistiques</i>	15
2.2.4.1.	<i>Projection de présence-absence : choix du seuil</i>	15
2.2.4.2.	<i>Performances prédictives</i>	16
2.2.4.3.	<i>Modèle moyen pondéré</i>	16
2.2.5.	PROJECTIONS DES HABITATS FAVORABLES AUX ESPECES	16
2.2.6.	PRISE EN COMPTE DE LA CONTINUITÉ ECOLOGIQUE	17
2.2.6.1.	<i>Post-traitement des projections d'habitat favorable selon différentes hypothèses de dispersion</i>	17
2.2.6.2.	<i>Biais méthodologique dans les résultats obtenus</i>	19
2.2.6.3.	<i>Evaluation de la probabilité de dispersion des espèces à dire d'experts</i>	20
2.2.7.	EVALUATION DES IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	21
2.2.7.1.	<i>analyse par espece</i>	21
2.2.7.2.	<i>analyse par assemblage de poissons</i>	22
2.2.8.	SYNTHESE DE LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE	22
2.3.	RESULTATS	23
2.3.1.	PERTINENCE DES RESULTATS	23

2.3.1.1.	<i>Qualité prédictive des modèles</i>	23
2.3.1.1.	<i>Indice de confiance</i>	24
2.3.2.	ANALYSE PAR ESPECE.....	25
2.3.2.1.	<i>Espèces à faible probabilité de colonisation</i>	27
2.3.2.1.	<i>Espèces à probabilité de colonisation moyenne</i>	29
2.3.2.2.	<i>Espèces à probabilité de colonisation élevée</i>	30
2.3.2.3.	<i>Synthèse</i>	33
2.3.3.	ANALYSE DES ASSEMBLAGES DE POISSONS.....	35
2.3.3.1.	<i>Renouvellement des communautés</i>	35
2.3.3.2.	<i>Richesse spécifique</i>	36
2.3.1.	PRISE EN COMPTE DE LA TEMPERATURE DE L'EAU.....	37
2.4.	LIMITES ET INCERTITUDES DE L'ETUDE	40
2.4.1.	HYPOTHESES DE DISPERSION.....	40
2.4.2.	HYPOTHESE DE NON-ADAPTATION.....	40
2.4.3.	DONNEES D'ECHANTILLONNAGES.....	40
2.4.1.	INTERACTIONS BIOTIQUES.....	41
2.4.2.	CHOIX DES VARIABLES.....	41
3.	IMPACT DES CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DES PRESSIONS ANTHROPIQUES SUR LES PEUPELEMENTS PISCICOLES ET LES ORGANISMES STYGOBIES AU SEIN DU BASSIN VERSANT DE L'HERAULT	42
3.1.	PRESENTATION GENERALE	42
3.1.1.	OCCUPATION DU TERRITOIRE AU SEIN DU BASSIN VERSANT DE L'HERAULT.....	44
3.1.1.1.	<i>Les milieux naturels au sein du bassin versant de l'Hérault et leur statut de protection</i>	44
3.1.1.2.	<i>Bilan hydrologique du bassin versant</i>	45
3.1.1.3.	<i>Fonctionnement hydrologique</i>	48
3.1.1.4.	<i>Les prélèvements en eau sur le bassin versant de l'Hérault</i>	49
3.1.1.5.	<i>Qualité des eaux de surface et souterraines</i>	51
3.1.1.6.	<i>Habitats et espèces aquatiques présents au sein du bassin versant de l'Hérault</i>	52
3.2.	SYNTHESE DES PROJECTIONS CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT A L'HORIZON 2070	57
3.2.1.	PROJECTIONS CLIMATIQUES.....	57
3.2.2.	EVOLUTION DU TRAIT DE COTE ET DU BISEAU SALE.....	57
3.2.3.	PROJECTIONS HYDROLOGIQUES.....	58
3.2.4.	EVOLUTION DU CONTEXTE SOCIODEMOGRAPHIQUE AU SEIN DU BASSIN VERSANT DE	

L'HERAULT	58
3.2.4.1. <i>Evolution de la demande en eau potable</i>	58
3.2.4.2. <i>Evolution des besoins d'irrigation dans le bassin versant de l'Hérault</i>	59
3.2.4.3. <i>Evolution des besoins en eau dans le secteur industriel</i>	59
3.2.4.4. <i>Synthèse</i>	60
3.2.5. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DES PRESSIONS ANTHROPIQUES SUR LES MILIEUX AQUATIQUES AU SEIN DU BASSIN VERSANT DE L'HERAULT.....	62
3.2.5.1. <i>Impact sur les populations de poisson</i>	62
3.2.5.2. <i>Impact sur la faune stygobie</i>	64
4. MESURES D'ADAPTATION _____	65
4.1. MAINTIEN ET RESTAURATION DES CONTINUITES ECOLOGIQUES ET DE LA QUALITE DES HABITATS AQUATIQUES	66
4.2. MAITRISE DU RECHAUFFEMENT ANTHROPIQUE DES EAUX	67
4.3. MAITRISE DE LA DISPERSION DES ESPECES D'ORIGINE ANTHROPIQUE.....	68
4.4. SYNTHESE.....	69
5. CONCLUSIONS - PERSPECTIVES _____	69
BIBLIOGRAPHIE _____	72
6. ANNEXES _____	79

1. CONTEXTE GENERAL ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les écosystèmes aquatiques continentaux sont particulièrement sensibles au changement climatique, et plus particulièrement à l'augmentation de la température de l'air et aux modifications du cycle hydrologique (IPCC, 2007). A l'échelle mondiale, une des conséquences directes du réchauffement de l'air sera une augmentation de la température de l'eau. En outre, les rivières situées dans les basses latitudes devraient voir leurs débits diminuer, alors que les cours d'eau, prenant leurs sources dans les hautes latitudes, devaient enregistrer une augmentation de leur débit du fait de la fonte des glaces (Dai *et al.*, 2009). Ces effets auront à long terme des conséquences sur le niveau piézométrique des nappes. La saisonnalité des débits augmentera avec des valeurs plus élevées pendant la saison de débits de pointe, et plus basses pendant la saison de basses eaux ou durant les périodes de sécheresse prolongée. Les régions les plus exposées à un risque de sécheresse accru sont celles situées sur le pourtour Méditerranéen, régions qui devraient assister à une forte augmentation de la demande en eau (irrigation, eau potable).

Au regard de ces différents éléments, il est aujourd'hui évident que le changement climatique, à travers une diminution des débits ou l'augmentation de la température affecteront la biodiversité aquatique. Différentes études relatent d'ores et déjà une modification de la structuration des communautés piscicoles et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Une contraction du cycle biologique des saumons en mer a par exemple été mis en évidence dans les rivières de Bretagne et de Basse-Normandie ou en Angleterre entraînant un taux de renouvellement plus rapide des populations (Baglinière *et al.*, 2004 ; Aprahamian *et al.*, 2008). Des changements de répartition de la truite fario ont été observés dans les cours d'eau Suisse dans le sens d'une remontée du gradient amont-aval. Les barrières physiques limitant leur progression, cette modification des habitats favorables a entraîné la réduction des populations (Hari *et al.*, 2006). Un fort développement des populations de certains poissons (barbeau, hotu, chevesne, vandoise) est observé dans la Seine en aval de Paris quand d'autres espèces comme la brème ou le gardon régressent (voir Basilico *et al.*, 2009). Au niveau du Rhône, la structure des peuplements poissons a évolué au profit d'espèces plus thermophiles et au détriment d'espèces d'eau froide. Daufresne (2003) et Daufresne et Boët (2005) ont ainsi montré que le chevesne et le barbeau remplaçaient progressivement la vandoise.

A ces menaces s'ajoutent l'accroissement des pressions anthropiques - multiplication des barrages et autres obstacles, dégradation de la qualité de l'eau et de l'habitat - augmentant de fait la vulnérabilité des organismes inféodés à ces milieux.

Afin d'évaluer les changements possibles de composition et de structuration des communautés piscicoles, quelques études ont récemment proposé une approche statistique visant à projeter dans le futur les aires de répartition des espèces de poissons (voir par

exemple Buisson *et al.*, 2008 ; Buisson et Grenouillet, 2009 ; Daufresne et Boët, 2007 ; Lassalle *et al.*, 2008 ; Pont *et al.*, 2006).

Le projet EXPLORE 2070 s'est inscrit dans le prolongement de cette dynamique dans l'objectif d'éclairer les politiques publiques et gestionnaires en matière d'impact sur les peuplements piscicoles. Plus précisément, il s'agissait de :

- Evaluer l'impact du changement climatique (scénario A1b du GIEC) sur la distribution de 38 espèces de poissons d'eau douce en France métropolitaine à l'horizon 2070 ;
- Evaluer conjointement les effets des pressions anthropiques et des menaces climatiques sur les peuplements piscicoles et les organismes stygobies présents au sein du bassin versant de l'Hérault situé dans le sud de la France ;
- Proposer des mesures d'adaptation en vue de réduire la vulnérabilité des espèces de poissons à l'horizon 2070.

Le champ d'étude concerne donc :

- Les cours d'eau situés en France métropolitaine et au sein du bassin versant de l'Hérault (dans le cadre d'un zoom particulier sur ce bassin). Les lacs, étangs et estuaires n'ont pas été pris en compte ;
- La biodiversité aquatique à l'échelle de l'espèce et des communautés ;
- Les impacts directs du changement climatique incluant l'évolution des conditions thermiques, des régimes de précipitation et des ressources en eau de surface (scénario A1b du GIEC). Le manque de données et/ou de connaissances n'a pas permis d'aborder l'impact indirect du changement climatique (effet sur l'introduction d'espèces envahissantes ou encore sur la qualité des eaux). Ces points sont cependant abordés dans la discussion générale.

Les livrables de ce travail sont :

- Un rapport final présentant les résultats obtenus ;
- Des fiches synthétiques par espèce de poisson résumant les principaux résultats ;
- La mise en ligne des résultats obtenus sur le site du projet.

Ce document est structuré en trois parties :

- La première partie présente les résultats obtenus à l'échelle nationale dont l'objectif était d'évaluer l'impact du changement climatique sur la répartition des habitats favorables de 38 espèces de poissons en France métropolitaine à l'horizon 2070 ;
- La seconde partie porte sur le bassin versant de l'Hérault. Il s'agissait d'évaluer l'impact du changement climatique et des pressions anthropiques sur les communautés piscicoles et les organismes stygobies.
- Ce travail se conclut par une discussion générale des résultats obtenus et la proposition de mesures d'adaptation.

Des fiches synthétiques par espèce sont fournies en annexes et également mises à disposition sur le site internet du projet Explore 2070 à l'adresse suivante :

<http://explore2070.oieau.fr/explore/index.php>

Les résultats de cette étude ne doivent en aucun cas être considérés comme des prévisions locales de répartition des espèces. Comme toute approche statistique, ils ne prennent leur sens qu'à une échelle très large et sont entachés d'un très haut niveau d'incertitude à l'échelle locale.

Les auteurs

Gwenaëlle FAHRNER, BIOTOPE

Florence BAPTIST, BIOTOPE

Bastien GAMBOA, Laboratoire Evolution et Diversité Biologique/BIOTOPE

Frédéric MELKI, BIOTOPE

Les relecteurs

Benjamin ADAM, BIOTOPE

Xavier DELACAZE, MEDDTL

Gaël GRENOUILLET, Laboratoire Evolution et Diversité Biologique – UPS Toulouse

Nicolas POULET, ONEMA

Nirmala SEON-MASSIN, ONEMA

Vassilis SPYRATOS, MEDDTL

Remerciements

Ce rapport a été réalisé dans le cadre du projet EXPLORE 2070 (2010-2012) commandité par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL). Nous souhaitons remercier toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de cette étude et notamment Vassilis SPYRATOS (chargé de mission DCE-Zones humides au MEDDTL), Nirmala SEON-MASSIN (Office Nationale de l'Eau et des Milieux Aquatiques, ONEMA), Nicolas POULET (ONEMA), Laurent BEAULATON (ONEMA), Yorick REYJOL (ONEMA), Laurence TISSOT (EDF R&D), Gaël GRENOUILLET (maître de conférence au sein du laboratoire Evolution et Diversité Biologique de l'Université Paul Sabatier), Laëtitia BUISSON (maître de conférence au sein du laboratoire ECOLAB de l'Université Paul Sabatier).

2. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES PEUPEMENTS PISCICOLES A L'ECHELLE NATIONALE

2.1. PRINCIPE GENERAL

Cette étude s'inscrit dans le prolongement des travaux de thèse de Laëticia Buisson (Buisson, 2009) : la répartition des espèces est déterminée à partir de modèles statistiques de distribution d'espèces, sur la base du concept de niche écologique (ensemble des habitats qui répondent aux exigences écologiques d'une espèce donnée). Un modèle de répartition d'habitat favorable est ainsi construit pour chaque espèce étudiée, et repose sur deux postulats importants. D'une part, chaque population est considérée en équilibre avec son milieu ; et d'autre part, il est fait l'hypothèse que la distribution observée correspond à la niche réalisée de l'espèce.

2.2. METHODOLOGIE RETENUE

2.2.1. VARIABLES BIOLOGIQUES : LES DONNEES PISCICOLES

2.2.1.1. SOURCE DES DONNEES

Les données de distribution des poissons utilisées dans cette étude sont issues de la base de données BDMAP (Banque de Données Milieux Aquatiques et Poissons) de l'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques). Cette base de données recense les résultats d'inventaires piscicoles réalisés sur un important réseau de stations de pêche couvrant l'ensemble du territoire français. Chaque station de la base de données a été échantillonnée une fois au minimum, mais la plupart des stations ont été échantillonnées plusieurs fois (annuellement ou plusieurs fois au cours d'une même année). La méthode d'échantillonnage utilisée est la pêche électrique.

Pour la présente étude, nous avons utilisé les inventaires piscicoles couvrant la période 2000-2008 en France métropolitaine, hors Corse. Les inventaires dont la richesse spécifique est supérieure ou égale à 1 (au minimum un individu d'une espèce) sont extraits de cette base de données : cela représente un échantillon de 4381 stations (Fig. 2.2.1). Pour chacune de ces stations, un inventaire unique a été retenu de façon aléatoire, afin de caractériser sa composition ichtyologique. Les données finalement utilisées se présentent sous la forme de données de présence-absence pour chaque espèce (72 espèces au total) et pour chacune des 4381 stations.

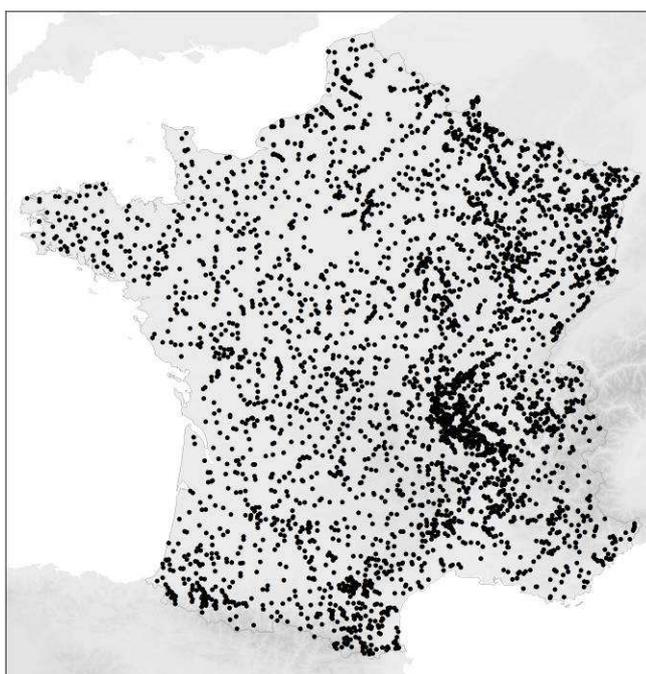


Fig. 2.2.1 Répartition spatiale des 4381 stations d'échantillonnage (ONEMA – 2000 à 2008).

2.2.1.2. SELECTION DES ESPECES

Les modèles statistiques peuvent fournir une représentation correcte des phénomènes biologiques réels à condition de répondre à un certain nombre d'exigences quant à leur applicabilité. Parmi ces contraintes, le nombre d'observations permettant la construction d'un modèle statistique doit être suffisamment élevé afin qu'il y ait une bonne représentativité de la gamme de variation des données. Ceci permet de réduire les erreurs associées à de trop petits échantillons (Stockwell et Peterson 2002 ; Barry et Elith 2006). Ainsi, les analyses ont été limitées aux espèces apparaissant un nombre suffisant de fois dans le jeu de données, c'est-à-dire pour les espèces ayant au minimum 100 occurrences. Par ailleurs, les différentes espèces de carassins (*Carassius* sp.) ont été regroupées afin d'éviter tout biais lié à de possibles erreurs de détermination ; les espèces trouvées en France sont en effet morphologiquement très semblables, et partagent des niches écologiques proches. D'autres espèces, dont le statut taxonomique est récent ou en cours de discussion, ont également été regroupées ; cela concerne les chabots (*Cottus* sp.), les goujons (*Gobio* sp.), les vairons (*Phoxinus* sp.) et les vandoises (*Leuciscus* sp.). Enfin, la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) a été exclue des analyses : cette espèce a en effet été introduite en France à des fins halieutiques et sa répartition actuelle ne correspond pas à sa niche écologique réelle (N. Poulet et G. Grenouillet, com. pers.).

Au total, 38 espèces ont finalement été sélectionnées (Tableau 2.2.1). La répartition de l'habitat favorable de chaque espèce a ensuite été modélisée séparément.

Code	Nom latin	Nom commun	Prévalence observée
ABL	<i>Alburnus alburnus</i>	Ablette	886
ANG	<i>Anguilla anguilla</i>	Anguille	1222
BAF	<i>Barbus barbus</i>	Barbeau fluviatile	926
BAM	<i>Barbus meridionalis</i>	Barbeau méridional	199
BLN	<i>Telestes souffia</i>	Blageon	335
BOU	<i>Rhodeus amarus</i>	Bouvière	453
BRB	<i>Blicca bjoerkna</i>	Brème bordelière	388
BRE	<i>Abramis brama</i>	Brème	398
BRO	<i>Esox lucius</i>	Brochet	787
CAS	<i>Carassius</i> sp.	Carassins	281
CCO	<i>Cyprinus carpio</i>	Carpe commune	336
CHA	<i>Cottus</i> sp.	Chabots	1795
CHE	<i>Squalius cephalus</i>	Chevaine	2219
EPI	<i>Gasterosteus gymnurus</i>	Epinoche	411
EPT	<i>Pungitius laevis</i>	Epinochette	326
GAR	<i>Rutilus rutilus</i>	Gardon	1757
GOU	<i>Gobio</i> sp.	Goujon	2240
GRE	<i>Gymnocephalus cernuus</i>	Grémille	334
HOT	<i>Chondrostoma nasus</i>	Hotu	391
LOF	<i>Barbatula barbatula</i>	Loche franche	2416
LOR	<i>Cobitis</i> sp.	Loche épineuse et loche transalpine	104
LOT	<i>Lota lota</i>	Lote de rivière	103
LPP	<i>Lampetra planeri</i>	Lamproie de planer	849
OBR	<i>Thymallus thymallus</i>	Ombre commun	117
PCH	<i>Ameiurus melas</i>	Poisson chat	322
PER	<i>Perca fluviatilis</i>	Perche	1282
PES	<i>Lepomis gibbosus</i>	Perche soleil	889
PSR	<i>Pseudorasbora parva</i>	Pseudorasbora	214
ROT	<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Rotengle	583
SAN	<i>Sander lucioperca</i>	Sandre	186
SAT	<i>Salmo salar</i>	Saumon atlantique	184
SIL	<i>Silurus glanis</i>	Silure glane	222
SPI	<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Spirin	607
TAN	<i>Tinca tinca</i>	Tanche	555
TOX	<i>Parachondrostoma toxostoma</i>	Toxostome	161
TRF	<i>Salmo trutta</i>	Truite de rivière	2703
VAI	<i>Phoxinus</i> sp.	Vairons	2321
VAN	<i>Leuciscus</i> sp.	Vandoises	918

Tableau 2.2.1 Liste des espèces retenues dans l'étude.

2.2.2. VARIABLES GEOGRAPHIQUES

Trois variables géographiques ont été retenues pour caractériser la niche écologique des différentes espèces : d'une part l'altitude (notée ALT), d'autre part la surface du bassin versant (notée SBV) et la longueur cumulée de linéaire de cours d'eau en amont de la station d'inventaire piscicole (notée CUM_LEN), deux variables permettant de positionner les stations au sein du réseau hydrographique.

Ces variables ont été extraites sous SIG (Système d'Information Géographique, logiciel ArcGIS) en superposant la position des 4381 stations sélectionnées à différentes couches d'information spatialisée. Les deux variables SBV et CUM_LEN proviennent d'une couche représentant le réseau hydrographique français sous la forme de 108 873 tronçons de cours d'eau (CCM River and Catchment database for Europe (CCM2), Vogt *et al.*, 2007 ; Fig. 2.2.2). L'altitude est obtenue à partir d'une image (raster : image géoréférencée) de résolution 30 secondes d'arc (soit environ 1km x 1km à l'équateur) ; cette couche est basée sur les données de SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, Farr *et al.*, 2007) et a été obtenue sur le site WorldClim (base de données collaborative en ligne, regroupant des données climatiques mondiales géoréférencées ; www.worldclim.org ; Hijmans *et al.*, 2005).

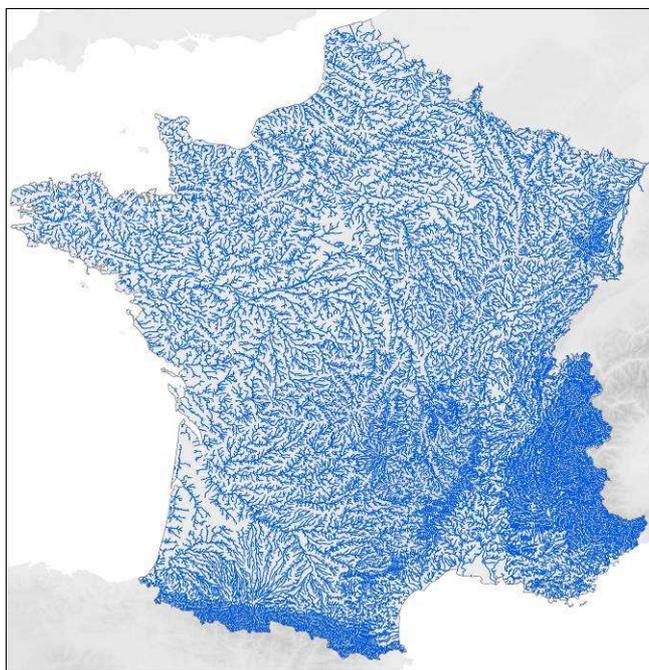


Fig. 2.2.2 Réseau hydrographique français (d'après Vogt *et al.*, 2007)

Les variables SBV et CUM_LEN sont corrélées positivement. Une analyse en composante principale (ACP, analyse statistique multivariée) a donc été réalisée sur ces variables après les avoir log-transformées. La première composante principale (expliquant 98.6% de la variance) est extraite et sera utilisée comme variable synthétique (notée GrAM)

illustrant le gradient amont-aval.

De plus, afin de décorréler la variable GrAM des 8 variables bioclimatiques présentées ci-après, un GAM (Generalized Additive Model) est réalisé, et les résidus de ce GAM sont utilisés comme nouvelle variable synthétique GrAM. De la même manière, cette opération est réalisée pour l'altitude. Cette transformation permet d'éviter le biais selon lequel « deux variables corrélées qui auraient un coefficient de corrélation significativement différent de 0 en l'absence d'autres variables, aient chacune un coefficient insignifiant, l'une en présence de l'autre dans le modèle » (Besse, 2009). L'intérêt de cette décorrélation se base sur l'hypothèse que les relations entretenues entre les variables bioclimatiques et physiques ne changent pas avec le futur, et donc que les variables GrAM et Alt qui ne changent pas pour 2070, soient toujours décorrélées avec les 8 variables bioclimatiques, en 2070.

2.2.3. VARIABLES BIOCLIMATIQUES

2.2.3.1. CLIMAT ACTUEL

Huit variables bioclimatiques ont également été téléchargées depuis le site WorldClim avec le même format et la même résolution que l'altitude (Tableau 2.2.2).

Notation	Description	Unité
Tam	Température annuelle moyenne	°C
Tcv	Saisonnalité des températures	-
Tmax	Température moyenne du trimestre le plus chaud	°C
Tmin	Température moyenne du trimestre le plus froid	°C
Pam	Précipitations annuelles	mm
Pcv	Saisonnalité des précipitations	-
Pmax	Précipitations du trimestre le plus humide	mm
Pmin	Précipitations du trimestre le plus sec	mm

Tableau 2.2.2 Variables bioclimatiques utilisées dans les modèles

Ces variables se présentent sous la forme de rasters qui sont superposés aux 4381 stations et au réseau hydrographique afin de pouvoir extraire les valeurs de ces huit variables bioclimatiques pour les stations d'inventaire piscicole et pour l'ensemble des tronçons du réseau hydrographique.

2.2.3.2. CLIMAT FUTUR

Les données bioclimatiques futures sont téléchargées depuis le site Internet http://gisweb.ciat.cgiar.org/GCMPPage/download_sres.html (Ramirez, 2010). Elles correspondent à l'IPCC4 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). Sept GCM (Global Circulation Model – modèle de circulation générale) ont été utilisés pour le scénario

futur A1b :

- CCCMA_CGCM31 (Canada)
- CSIRO_MK30 (Australie)
- IPSL_CM4 (France)
- MPI_ECHAM5 (Allemagne)
- NCAR_CCSM30 (USA)
- UKMO_HADCM3 (Royaume-Uni)
- UKMO_HADGEM1 (Royaume-Uni)

La période future correspond aux années 2070 pour laquelle les valeurs des huit variables bioclimatiques ont été calculées à partir de séries temporelles s'étendant de 2060 à 2089 (Ramirez, 2010). Une quantification du changement climatique pris en compte dans l'étude est donnée ci-après (Fig. 2.2.3). La représentation spatiale de ce changement est présentée en annexe.

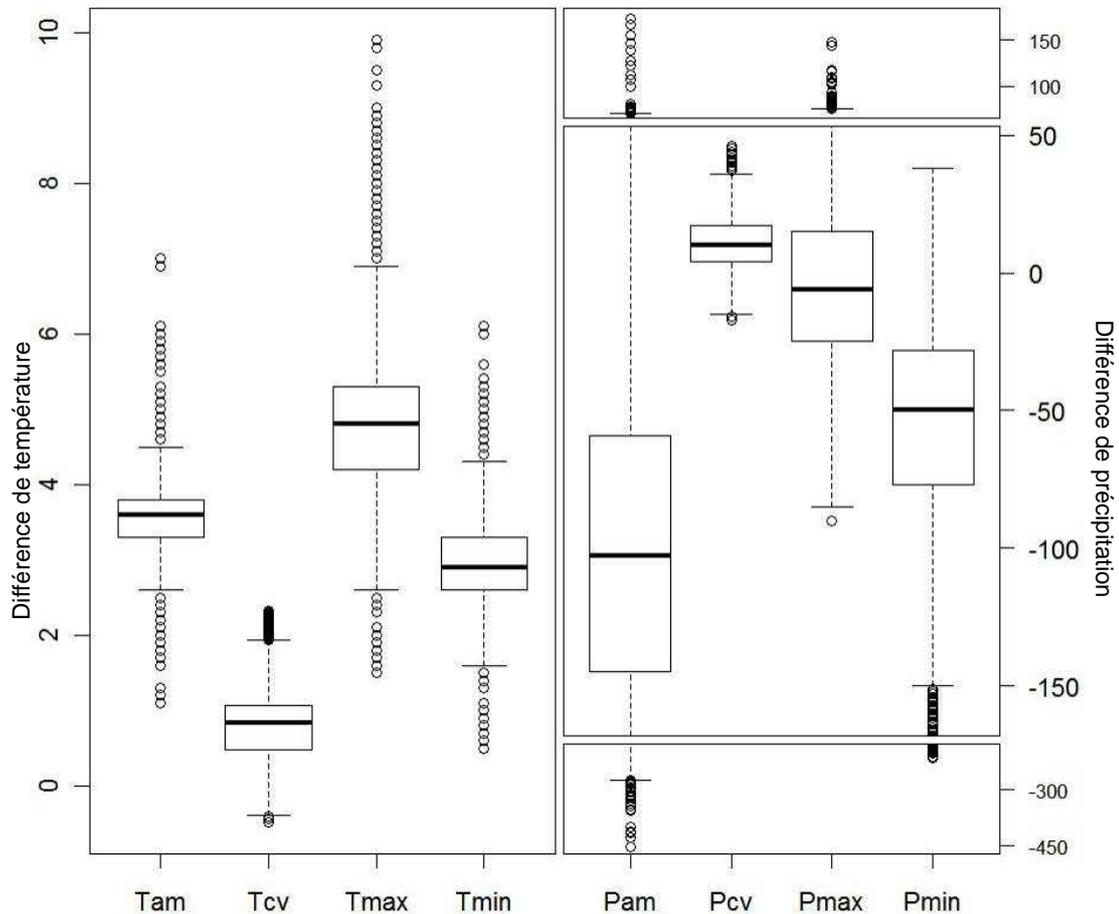


Fig. 2.2.3 Différences entre conditions futures et conditions actuelles, pour les 8 variables climatiques retenues. Les différences sont calculées pour l'ensemble des nœuds du réseau hydrographique (n = 87 968) et pour chacun des 7 GCM

2.2.3.3. PRISE EN COMPTE DE LA TEMPERATURE DE L'EAU

Des données de température de l'eau ont été fournies par les partenaires du projet Explore 2070 sur 31 stations de mesure (Fig. 2.2.4) ; les données pour la période actuelle proviennent de données mesurées par divers organismes (DREAL, ONEMA, DDTM Seine-Maritime, ville de Paris). Les données futures ont été modélisées à partir de données climatologiques (températures de l'air et débits), sur la base de modèles établis à partir des données actuelles.

Il n'est pas possible de prendre en compte directement ce paramètre dans le modèle de répartition des espèces de poisson, du fait du nombre trop faible de stations (n=31). En revanche une approche plus qualitative est possible en comparant la température de l'eau prédite avec les *preferenda* thermiques des espèces potentiellement présentes sur ces 31 points. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur les résultats issus de la synthèse de Tissot et Souchon (2011), qui recensent les tolérances thermiques pour 19 des 38 espèces que nous étudions. Pour chacune de ces 19 espèces, nous avons déterminé sa présence sur les 31 stations en considérant que l'espèce sera présente en 2070 lorsque plus de 2/3 des modèles projettent un habitat favorable.

Par ailleurs, les résultats obtenus dans le cadre de la modélisation de la température de l'eau seront un élément de discussion sur notre choix de retenir la température de l'air comme proxy de la température de l'eau dans le modèle de répartition des espèces.

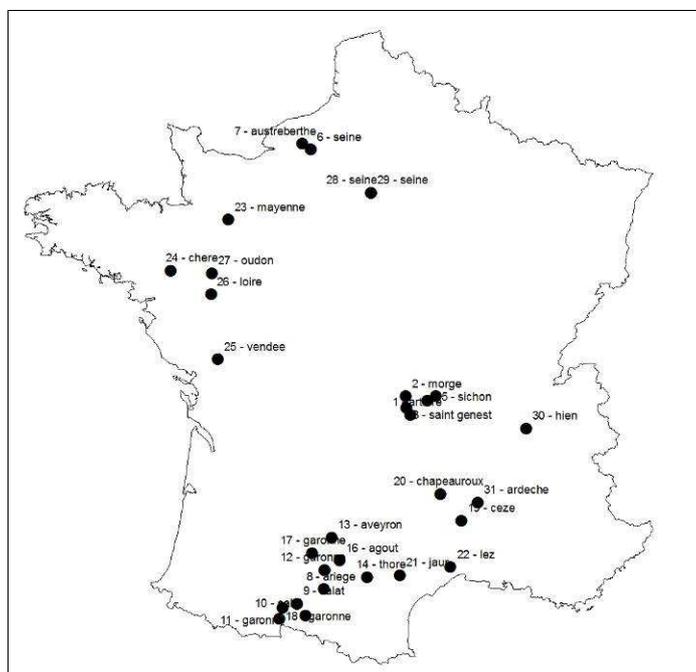


Fig. 2.2.4 Localisation des stations de mesure de la température de l'eau retenues par BRLi et le CEMAGREF dans le cadre du projet Explore 2070

2.2.4. MODELISATION DES DISTRIBUTIONS ACTUELLES DES ESPECES

L'ensemble des opérations de construction des modèles puis de modélisation de la répartition des espèces a été réalisé avec le logiciel R (version 2.14.1) et le logiciel Rstudio (version 0.94.110).

2.2.4.1. JEUX DE CALIBRATION ET DE VALIDATION

Pour la modélisation, les 4381 stations ont été partitionnées en deux jeux de données : un jeu de calibration comprenant 3064 stations (soit 70% des 4381 stations), et un jeu de validation contenant les 1317 stations non-présentes dans le jeu de calibration. Le choix des 3064 stations a été réalisé en prenant aléatoirement 70% des stations de chaque bassin hydrographique (parmi 6 bassins hydrographiques couvrant l'ensemble de la France métropolitaine, information incluse dans BDMAP) afin d'obtenir une répartition spatiale relativement homogène sur la France pour ces deux jeux de données.

Dix réplicats par espèce ont été réalisées pour la modélisation afin de réduire l'aléa des méthodes statistiques. Il a donc été nécessaire de créer 10 jeux de calibration et 10 jeux de validations, indépendants deux à deux.

2.2.4.2. METHODES STATISTIQUES

Sept modèles statistiques de type SDM (Species Distribution Model) ont été utilisés pour modéliser la distribution des 38 espèces de poissons (présence-absence) :

- ABT (Aggregated Boosted Trees)
- CART (Classification And Regression Trees)
- FDA (Factorial Discriminant Analysis)
- GAM (Generalized Additive Models)
- GLM (Generalized Linear Models)
- MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines)
- RF (Random Forest)

2.2.4.1. PROJECTION DE PRESENCE-ABSENCE : CHOIX DU SEUIL

Les modèles statistiques utilisés produisent des probabilités de présence¹. Afin de les transformer en présence-absence, un seuil doit leur être appliqué en-dessous duquel le modèle prédit une absence et au-dessus duquel le modèle prédit une présence.

Le choix arbitraire d'un seuil de 0,5 - anciennement utilisé - a montré son

¹ Les termes présence et absence ont été conservés pour faciliter la lecture. Cependant le terme présence se rapporte à une station ou un tronçon de cours d'eau considéré comme suffisamment favorable à l'espèce, le terme absence se rapporte à une station ou un tronçon non-suffisamment favorable à l'espèce. Le seuil entre les deux est celui qui maximise la qualité prédictive estimée via le TSS.

inadéquation aux modélisations de distribution d'espèce. La maximisation d'un indice de performance tels que le Kappa de Cohen (Landis et Koch, 1977), l'AUC (Area Under the Curve, Hanley et McNeil, 1982), ou le TSS (True Skill Statistic ; Allouche, 2006) doit être privilégié (Liu *et al.*, 2005).

Le choix du seuil a été réalisé selon la méthode itérative suivante : chaque niveau des projections d'un SDM (sur ses données de validation) a été utilisé comme seuil temporaire et la qualité prédictive (TSS) a été calculée ; le seuil qui maximise le TSS est ensuite sélectionné. La valeur de seuil utilisée pour transformer les probabilités actuelles en présence-absence actuelles est conservée pour transformer les probabilités futures en présence-absence futures.

2.2.4.2. PERFORMANCES PREDICTIVES

Les données de validation, en plus de permettre de définir les seuils de présence/absence, permettent d'évaluer la qualité prédictive des 70 modèles construits par espèce. Deux estimateurs de la performance prédictive des modèles ont été calculés : AUC (Area Under the Curve) et TSS (True Skill Statistic ; Allouche, 2006).

De plus, la sensibilité (proportion de présences correctement projetées) et la spécificité (proportion d'absence correctement projetées) ont également été calculées.

2.2.4.3. MODELE MOYEN PONDERE

Le modèle moyen pondéré (MMP) est obtenu en calculant la moyenne pondérée des 70 projections obtenues pour chaque espèce (7 modèles statistiques et 10 itérations par modèle) : les coefficients de pondération utilisés sont les valeurs prédictives TSS de chaque modèle. Le MMP n'est pas à proprement parler un modèle statistique, cependant il est utilisé comme tel puisque ce seront les « projections » de MMP qui seront étudiées.

Cependant, les résultats obtenus via le MMP dans cette étude ne se sont pas avérés satisfaisants en termes de projection de la répartition actuelle des espèces. Cette approche a donc été abandonnée et ses résultats ne sont pas présentés dans ce rapport. L'analyse ultérieure s'est basée sur l'ensemble des projections ($n = 70$).

2.2.5. PROJECTIONS DES HABITATS FAVORABLES AUX ESPECES

Les 70 SDM par espèce ont été utilisés afin de projeter 70 répartitions actuelles d'habitats favorables en présence-absence sur le réseau hydrographique décrit plus haut. Les projections futures ont été réalisées selon la même méthodologie, la seule différence est le nombre de projections qui s'élève à 7 SDM x 10 itérations x 7 GCM, soit 490 projections futures pour chaque espèce.

Une carte par espèce est produite sous ArcGIS représentant pour chaque tronçon le

nombre de modèle prédisant une présence, soit une note de 0-70 pour les répartitions actuelles et de 0-490 pour les répartitions futures (Grenouillet *et al.*, 2010). Les projections des SDM sur les noeuds ont été rattachées dans un deuxième temps aux tronçons (via un identifiant unique), dans le but de produire des représentations cartographiques composées de segments de tronçons de cours d'eau et non de points. Ainsi toutes les représentations cartographiques ont pour support le réseau hydrographique français composé de tronçons de cours d'eau.

Les simulations sont ensuite réalisées sur l'ensemble du réseau hydrographique, pour 87 968 points représentant toutes les confluences du réseau. Les projections ainsi obtenues pour chaque nœud sont affectées au tronçon de cours d'eau en aval afin d'avoir une représentation des projections sur l'intégralité du réseau hydrographique français.

2.2.6. PRISE EN COMPTE DE LA CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE

L'hypothèse de dispersion implicite à notre méthode de modélisation est la dispersion illimitée. Elle suppose que les espèces seront capables d'atteindre tous les tronçons projetés comme favorables. De ce fait chaque tronçon peut être colonisé dans le futur par une espèce sans aucune limitation, ce qui n'a pas de réalité écologique (Buisson et Grenouillet, 2009). En effet, des barrières naturelles et anthropiques bloquent la dispersion des poissons (non-continuité écologique entre bassin versant, barrages humains ; Gosset *et al.*, 2006 ; Fukushima *et al.*, 2007).

Dans le cadre d'une première approche, d'autres hypothèses de dispersion ont ainsi été prises en compte, selon la méthodologie décrite dans le paragraphe ci-après. Cependant, cette méthode n'a pas pu être retenue. Une seconde approche s'est basée sur dire d'experts (voir ci-après).

2.2.6.1. POST-TRAITEMENT DES PROJECTIONS D'HABITAT FAVORABLE SELON DIFFÉRENTES HYPOTHÈSES DE DISPERSION

Les différentes hypothèses de dispersion nécessitent la connaissance de la composition ichtyologique actuelle de chaque tronçon dans le but de savoir si une présence future d'une espèce correspond à une conservation de tronçon (cette espèce est projetée comme occupant actuellement ce tronçon) ou à une colonisation. Les seules données disponibles à cette résolution sont les projections en présence-absence des SDM. Une répartition actuelle prédite par un SDM servira de référence aux sept répartitions futures de ce SDM (avec la prise en compte de sept GCM).

Dispersion nulle :

Dans cette hypothèse, la colonisation de nouveaux tronçons est impossible. Seuls les tronçons projetés comme actuellement favorables peuvent être conservés en 2070. Cette hypothèse de dispersion est critiquable selon les espèces, néanmoins, elle permet avec

l'hypothèse de la dispersion illimitée d'avoir les extrêmes de la gamme d'habitats favorables projetés. De plus, elle contient implicitement les freins à la dispersion tels que les barrages chimiques, thermiques et physiques, et n'est pas irréaliste pour certaines espèces telles que le chabot dont les capacités de dispersions sont *a priori* très faibles. Ainsi, sous cette hypothèse, aucune colonisation de nouveaux habitats n'est possible.

Dispersion limitée par les bassins versants naturels :

L'hypothèse de dispersion limitée par 59 bassins hydrographiques (Fig. 2.2.5) permet une colonisation future seulement si le bassin hydrographique pour lequel la colonisation future est prédite, comporte au moins un tronçon actuellement favorable en termes d'habitat (résultat issu de la projection des modèles).

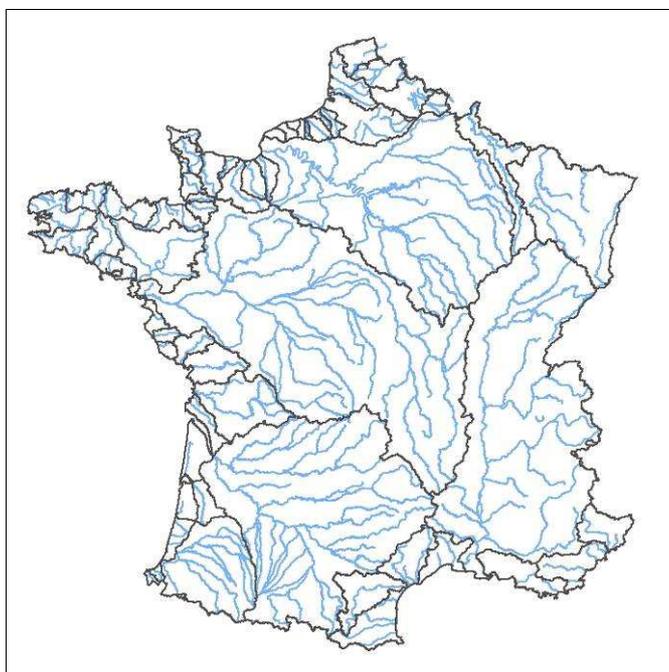


Fig. 2.2.5 Délimitation des 59 bassins versants hydrographiques indépendants utilisés pour l'hypothèse de dispersion limitée par les bassins versants naturels. Ces bassins versants sont construits par regroupement des « secteurs » de la BD Carthage®.

Dispersion limitée par les bassins versants naturels et les barrages

Cette hypothèse de dispersion est définie par les bassins hydrographiques naturels et les grands barrages humains empêchant la dispersion (les données de localisation des obstacles et de leur typologie viennent du ROE : Référentiel des Obstacles à l'Écoulement – ONEMA – mars 2011 - Fig. 2.2.6), délimitant 2884 « sous-bassins hydrographiques ». De la même manière que pour l'hypothèse de dispersion précédente, un tronçon d'un sous-bassin ne peut être colonisé dans le futur que si au moins un tronçon de ce sous-bassin est actuellement

projeté comme favorable en termes d'habitat.

Le type « barrage » du ROE correspond aux plus grands obstacles à l'écoulement d'origine anthropique : ce sont les obstacles barrant le lit mineur sur toute sa largeur. Seule cette catégorie a été sélectionnée du fait de la non-exhaustivité des données de hauteur des obstacles (base ROE non finalisée).

Le choix du type « barrage » est le plus optimiste puisqu'il signifie que les obstacles à l'écoulement autres qu'appartenant à ce type sont considérés comme franchissables par les 38 espèces de poissons étudiées. De plus, il n'a été fait aucune différence dans la capacité de franchissement des espèces, ce qui n'est pas le cas (le saumon atlantique a une très forte capacité de franchissement alors que le chabot a une capacité de franchissement quasi-nulle ; Keith et Allardi, 2001). Enfin la non-franchissabilité utilisée dans ce scénario de dispersion est symétrique (dévalaison et montaison impossible), alors que la dévalaison est souvent plus facile. Néanmoins la prise en compte de données d'obstacles anthropiques limitant la dispersion n'a, à notre connaissance, jamais été étudiée alors qu'ils freinent évidemment la dispersion des poissons d'eau douce. En outre, la modulation du nombre et de la localisation des obstacles est un levier important comme possible mesure d'adaptation à un changement global. Ces données ont donc été prises en compte afin d'initier la réflexion.



Fig. 2.2.6 Position de l'ensemble des obstacles à l'écoulement de type barrage ou seuil recensés par la base de données ROE (ONEMA - mars 2011)

2.2.6.2. BIAIS METHODOLOGIQUE DANS LES RESULTATS OBTENUS

Les hypothèses de dispersion limitée (par bassins hydrographiques et barrages) se sont révélées trop peu restrictives. Ceci s'explique par le fait que la plus grande majorité des

modèles n'exclue pas entièrement un bassin hydrographique, car au moins un tronçon de chaque bassin versant est projeté comme favorable actuellement pour au moins une des 70 projections. De ce fait, ces hypothèses ne « simulent » une dispersion rendue impossible par les barrières naturelles ou anthropiques que pour un nombre limité de bassins versants (ceux de très petite taille où aucune projection d'habitat favorable n'est simulée). Finalement la projection globale obtenue se rapproche fortement de la projection d'habitat favorable en scénario de dispersion illimitée (Fig. 2.2.7).

Il serait nettement préférable que la répartition actuelle de référence se base sur les échantillonnages, dans la mesure où ils sont en nombre suffisant pour une caractérisation assez fiable de la composition ichthyologique de chaque bassin. La prise en compte de freins à la dispersion, qu'ils soient naturels ou anthropiques, devraient cependant être pris en compte du fait de leur limitation évidente à la dispersion des poissons (Gosset *et al.*, 2006 ; Fukushima *et al.*, 2007).

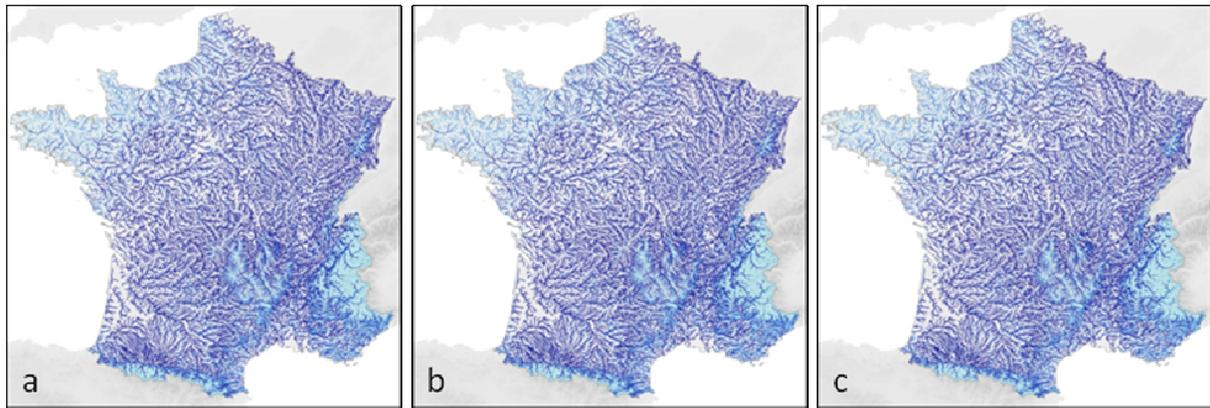


Fig. 2.2.7 Projection d'habitat favorable futur pour le barbeau fluviatile selon le scénario de dispersion illimitée (a), limitée par les bassins versants (b) et limitée par les bassins versants et les barrages (c)

En conséquence, les résultats pour ces deux scénarios de dispersion limitée n'ont pas été retenus dans la suite de l'étude. Seuls les scénarios de dispersion nulle et illimitée ont été interprétés ; ils donnent la gamme de répartition d'habitat favorable futur possible.

2.2.6.3. EVALUATION DE LA PROBABILITE DE DISPERSION DES ESPECES A DIRE D'EXPERTS

Afin de prendre en compte la problématique de continuité écologique de façon qualitative dans l'interprétation des résultats obtenus, la probabilité de chacune des 38 espèces étudiées de coloniser un nouvel habitat favorable a été évaluée à dire d'experts sur la base de 3 critères :

- Capacité intrinsèque de l'espèce à se disperser (par exemple stratégies biodémographiques) lorsque les conditions lui sont favorables, car celle-ci varie fortement d'une espèce à une autre (Keith et Allardi, 2001 ; dispersion en relation avec

la taille : Jenkins *et al.*, 2007).

- Capacité de l'espèce à franchir des obstacles à l'écoulement, qu'ils soient naturels ou anthropiques
- Degré de manipulation de l'espèce par l'homme, volontaire (repeuplement, alevinage,...) ou involontaire (introduction accidentelle).

L'indice résultant est évalué sur une échelle de 3 valeurs : la probabilité de coloniser un nouvel habitat est faible, moyenne ou forte.

2.2.7. EVALUATION DES IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

2.2.7.1. ANALYSE PAR ESPECE

Plusieurs descripteurs ont été retenus afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur la répartition des 38 espèces de poissons étudiées :

- **Nombre moyen (et écart-type) de km de cours d'eau gagnés ou perdus à l'horizon 2070** pour chaque espèce. Ce descripteur est calculé à partir des différences entre le nombre de km projetés comme favorables en 2070 et actuellement, pour les 490 projections futures. Un test de Wilcoxon apparié est réalisé afin de tester si la différence est significative.
- **Species Range Change (SRC)** : le changement de répartition de chaque espèce a été évalué par le SRC (Thuiller *et al.*, 2009), calculé selon la formule qui suit :

$$SRC = \frac{\text{gains tronçons} - \text{perte tronçons}}{\text{tronçons actuellement favorables}}$$

De la même manière que pour le descripteur précédent, le SRC moyen et son écart-type sont déterminés pour chaque espèce à partir des 490 valeurs obtenues pour les 490 projections futures.

Ces descripteurs sont calculés pour les deux scénarios de dispersion retenus (dispersion nulle et illimitée). Accompagnés des cartes de projections d'habitat favorable future pour chaque espèce, ils permettent la quantification globale d'un intervalle d'évolution de l'aire d'habitat favorable de chaque espèce sous hypothèse de changement climatique.

A partir de ces éléments, il est finalement possible d'évaluer la vulnérabilité de chaque espèce. Cette évaluation s'est faite à dire d'experts, à la lumière de la probabilité de colonisation d'un nouvel habitat favorable par l'espèce. Par exemple, pour une espèce dont la probabilité de colonisation est faible, il est supposé que son aire d'habitat favorable futur se rapprochera de l'aire projetée selon le scénario de dispersion nulle ; si ce scénario projette une réduction importante de l'habitat favorable, la vulnérabilité de l'espèce est considérée comme élevée. *A contrario*, une espèce dont la probabilité de colonisation est élevée, et dont l'aire d'habitat favorable augmente considérablement sous hypothèse de dispersion illimitée, sera

évaluée comme peu vulnérable au changement climatique retenu.

Cependant cette interprétation est fortement dépendante des résultats obtenus par modélisation. En conséquence, afin d'évaluer la pertinence écologique des projections d'habitat favorable modélisées, un indice de confiance a été évalué à dire d'experts, sur une échelle de 1 à 3 (1 : confiance faible, 2 : confiance moyenne, 3 : confiance élevée). Cet indice évalue la confiance portée aux projections actuelles par rapport à la distribution observée de l'espèce. Il évalue dans le même temps la confiance portée aux projections futures, sur la base de l'évolution attendue de l'espèce par les experts sous hypothèse de changement climatique d'après le scénario A1b. Cet indice permet ainsi de relativiser la vulnérabilité évaluée pour chaque espèce, en prenant en compte l'incertitude associée aux résultats.

2.2.7.2. ANALYSE PAR ASSEMBLAGE DE POISSONS

- **Distance de Jaccard** : la distance de Jaccard (Gower et Legendre, 1986) est calculée pour chaque tronçon selon la formule suivante :

$$1 - \frac{C}{A + B - C}$$

Avec C le nombre d'espèces en commun entre les projections actuelles et futures, A le nombre d'espèces occupant actuellement le tronçon, et B le nombre d'espèces occupant ce tronçon en 2070.

Le **renouvellement** est calculé pour 490 paires de répartitions projetées, selon l'association suivante : un assemblage actuel (correspondant à une association SDM-itération) est comparé à sept assemblages futurs (correspondant à la même association SDM-itération) aboutissant à sept valeurs de renouvellement par tronçon. Ceci est réalisé pour les 70 associations SDM-itération, soit 490 valeurs de renouvellement par tronçons.

De ce fait la représentation cartographique du renouvellement moyen est associée à une représentation cartographique de sa variabilité.

- **Richesse spécifique** (actuelle, future et différence entre les deux) : la richesse spécifique actuelle moyenne, la richesse spécifique future moyenne et la différence moyenne de richesse spécifique (future - actuelle) sont produites sous forme de représentation cartographique avec une carte de variabilité associée pour chacune.

2.2.8. SYNTHESE DE LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE

La figure Fig. 2.2.8 présente de façon synthétique les différentes étapes de la démarche méthodologique retenue.

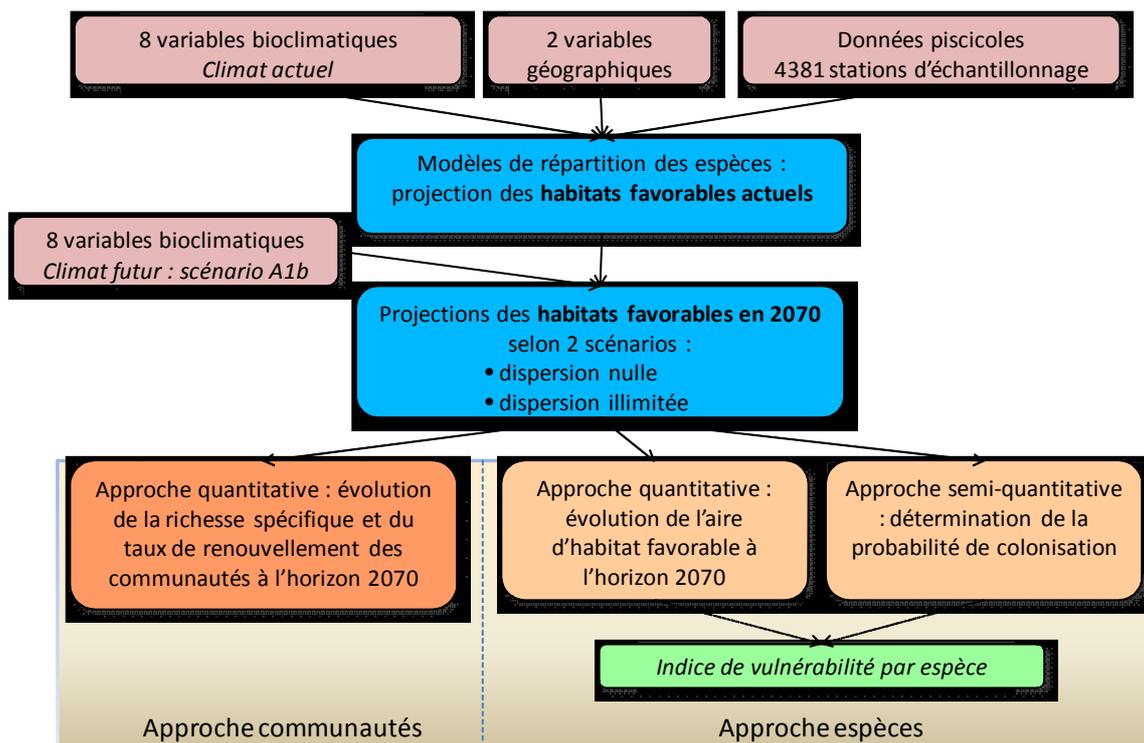


Fig. 2.2.8 Schéma de synthèse de la démarche méthodologique retenue

2.3. RESULTATS

2.3.1. PERTINENCE DES RESULTATS

2.3.1.1. QUALITE PREDICTIVE DES MODELES

Les performances prédictives sont globalement élevées (surtout au regard de l'AUC - Tableau 2.3.1) avec aucun modèle classé comme invalide. Selon l'AUC, 20% des modèles sont classés comme excellents, 49% comme bons, 29% comme passables et seulement 4% comme mauvais.

TSS		AUC	
Excellent : (0,8 – 1)	89	Excellent : (0,9 – 1)	467
Bon : (0,6 – 0,8)	833	Bon : (0,8 – 0,9)	1 298
Passable : (0,4 – 0,6)	1 385	Passable : (0,7 – 0,8)	775
Mauvais : (0,2 – 0,4)	353	Mauvais : (0,6 – 0,7)	120
Invalide : (0 – 0,2)	0	Invalide : (0,5 – 0,6)	0

Tableau 2.3.1 Classement des 2 660 SDM (70 SDM x 38 espèces) selon leur performance prédictive en fonction de deux indices : TSS et AUC.

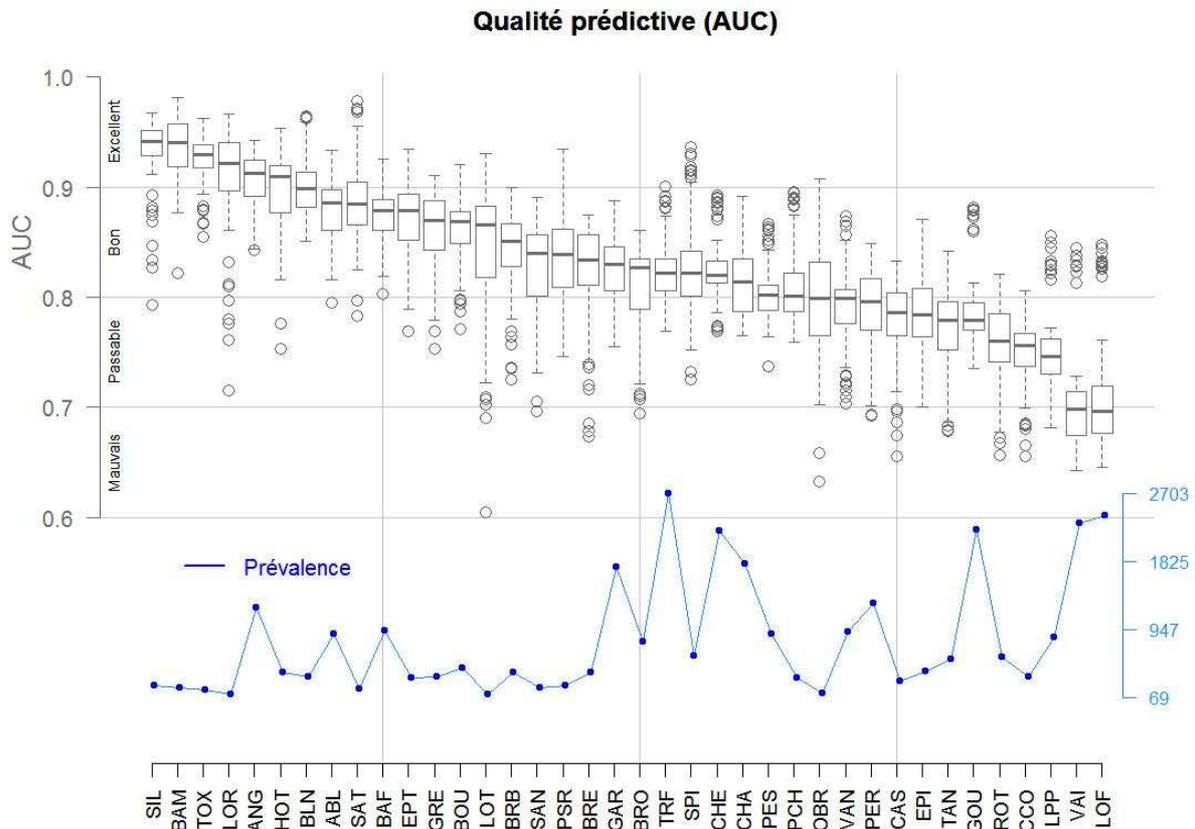


Fig. 2.3.1 Qualité prédictive des 70 SDM par espèce, estimé par l’AUC (Area Under the Curve). La partie basse du graphe indique le nombre d’observations pour chaque espèce (prévalence)

Au regard de la Fig. 2.3.1, tous les SDM arrivent globalement à bien modéliser la répartition des habitats favorables des espèces étudiées. Les valeurs de sensibilité et de spécificité sont conformes à ce résultat. Pour l’ensemble des espèces, la sensibilité moyenne est comprise entre 70% et 92% ; la spécificité moyenne est comprise entre 59% et 89%.

La loche franche et les vairons sont les espèces pour lesquelles la qualité prédictive des modèles est la plus mauvaise, tout en restant acceptable. Dans les deux cas, cette mauvaise performance des modèles est liée à une mauvaise projection des zones d’habitat non favorable (spécificité moyenne, respectivement 59% et 63%) ; les modèles donnent en effet des projections d’habitat non favorable dans des zones où ces espèces sont pourtant présentes, essentiellement les zones montagneuses. Pour ces espèces, une ou des variables supplémentaires semblent être nécessaires pour mieux décrire leur niche écologique.

2.3.1.1. INDICE DE CONFIANCE

Le Tableau 2.3.2 donne la distribution des valeurs d’indice de confiance évaluées à dire d’experts. Pour près de la moitié des espèces, la confiance dans les résultats issus de la modélisation est faible. La confiance est élevée pour seulement 20% des espèces.

Indice de confiance	Occurrence	Fréquence
Faible	16	42%
Moyenne	14	37%
Elevée	8	21%

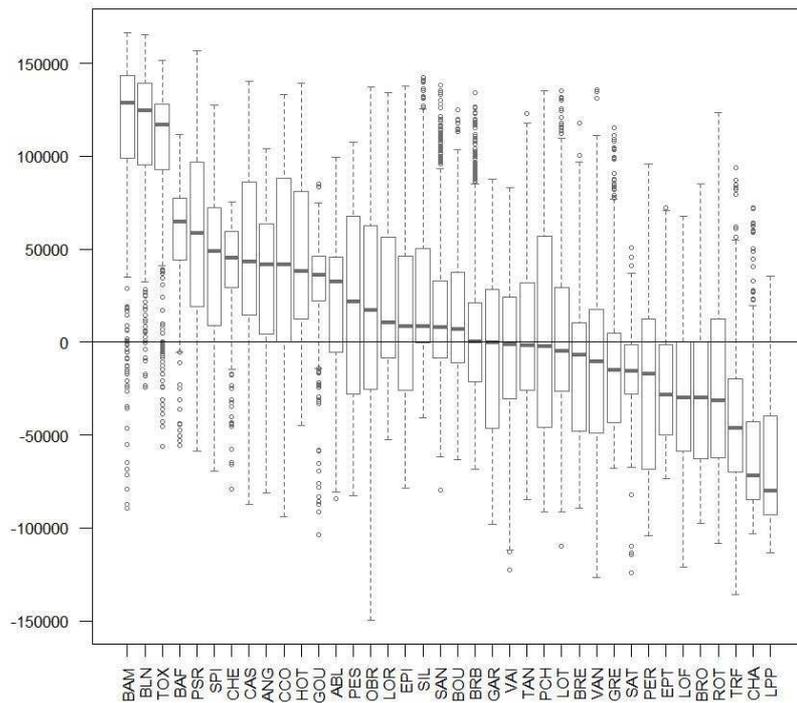
Tableau 2.3.2 Fréquence des 3 classes d'indice de confiance parmi les 38 espèces étudiées

En conclusion, malgré une bonne performance prédictive des modèles, la pertinence écologique des résultats obtenus doit largement être nuancée selon les espèces. La vulnérabilité qui a été évaluée à partir de ces résultats doit donc également être utilisée avec précaution.

2.3.2. ANALYSE PAR ESPECE

Les résultats détaillés pour chaque espèce sont présentés sous forme de fiches en annexe.

Concernant l'évolution de la taille de l'aire de répartition, trois espèces se détachent nettement des autres : il s'agit du barbeau méridional, du blageon et du toxostome, dont l'aire de répartition augmente considérablement sous l'impact du scénario de changement climatique retenu (augmentation médiane de plus de 100 000km - Fig. 2.3.2). Les autres espèces se répartissent plus graduellement entre une augmentation de 50 000km et une réduction de 100 000 km.



(longueur totale du reseau hydrographique : 186234 Km)

Fig. 2.3.2 Boîtes à moustache représentant la distribution du nombre de km gagnés ou perdus par chaque espèce pour le scénario de dispersion illimitée

Le SRC (Species Range Change) permet une meilleure comparaison, entre espèces, de la modification de l'aire de répartition, puisqu'il évalue sa variation relative. Les résultats obtenus sont présentés en Fig. 2.3.3. Comme pour le précédent descripteur, le toxostome, le blageon et le barbeau méridional se distinguent des autres espèces par une forte augmentation de leur aire de répartition.

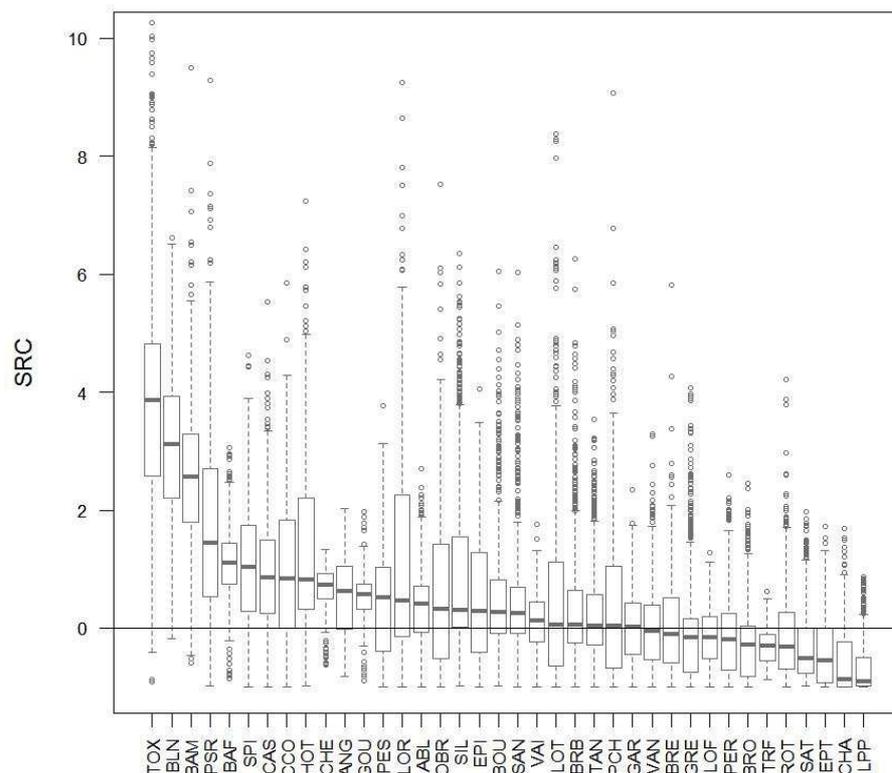


Fig. 2.3.3 Boîtes à moustache représentant la distribution du SRC pour chaque espèce pour le scénario de dispersion illimitée

Une analyse plus fine des résultats par espèce est proposée ci-après, en fonction de la probabilité de colonisation des différentes espèces (Tableau 2.3.3). En effet, pour les espèces dont cette probabilité est élevée, on peut considérer que le scénario de dispersion illimitée donne les résultats les plus pertinents. *A contrario*, pour les espèces dont la probabilité de colonisation est faible, le scénario de dispersion nulle donne les résultats les plus probants.

Probabilité de colonisation d'un nouvel habitat favorable	Espèces	Total
Faible	BAM, BLN, CHA, EPI, EPT, LOR, LOT, LPP, TOX, VAN	10
Moyenne	BOU, BRB, BRE, CAS, GRE, HOT, LOF, PCH, PES, SPI, TAN	11
Forte	ABL, ANG, BAF, BRO, CCO, CHE, GAR, GOU, OBR, PER, PSR, ROT, SAN, SAT, SIL, TRF, VAI	17

Tableau 2.3.3 Fréquence des 3 classes de probabilité de colonisation parmi les 38 espèces étudiées

2.3.2.1. ESPECES A FAIBLE PROBABILITE DE COLONISATION

Dix espèces sont considérées comme ayant une probabilité faible de coloniser un

nouvel habitat favorable. Parmi elles, le barbeau méridional : cette espèce, très sédentaire, n'est pas manipulée par l'Homme, et franchit difficilement les obstacles à l'écoulement. Les résultats de projections d'habitat favorable actuelles et futures pour cette espèce sont données en Fig. 2.3.4, ainsi que sa distribution actuelle. La qualité prédictive des modèles est élevée (sensibilité 92%, spécificité 86%). Visuellement, les modèles donnent une projection d'habitat favorable en adéquation avec la distribution observée, à l'exception du bassin de l'Adour et dans une moindre mesure du bassin de la Garonne : les modèles projettent la présence d'habitat favorable dans ces bassins, alors que l'espèce y est absente (ou rare pour la Garonne). Cependant, ceci s'explique par le fait que les zones projetées comme favorables sont effectivement des zones qui satisferaient les exigences écologiques de l'espèce ; elle y est simplement historiquement absente.

Pour le futur, dans le cas du scénario de dispersion illimitée, on observe une extension massive de l'habitat favorable à l'espèce (augmentation de plus de 250%). La modélisation de la niche écologique de cette espèce semble cependant surestimer le rôle de la température, du fait de sa localisation méditerranéenne. Ceci explique cette extension élevée de l'habitat favorable.

Cependant, du fait de la faible probabilité de colonisation de l'espèce, la répartition future de son habitat favorable serait sans doute plus proche de celle projetée par le scénario de dispersion nulle. Cela correspond à une globale stabilité de son aire d'habitat favorable (perte moyenne de 8% de linéaire). En l'absence d'autres pressions, on peut donc considérer que la vulnérabilité du barbeau méridional au changement climatique est faible.

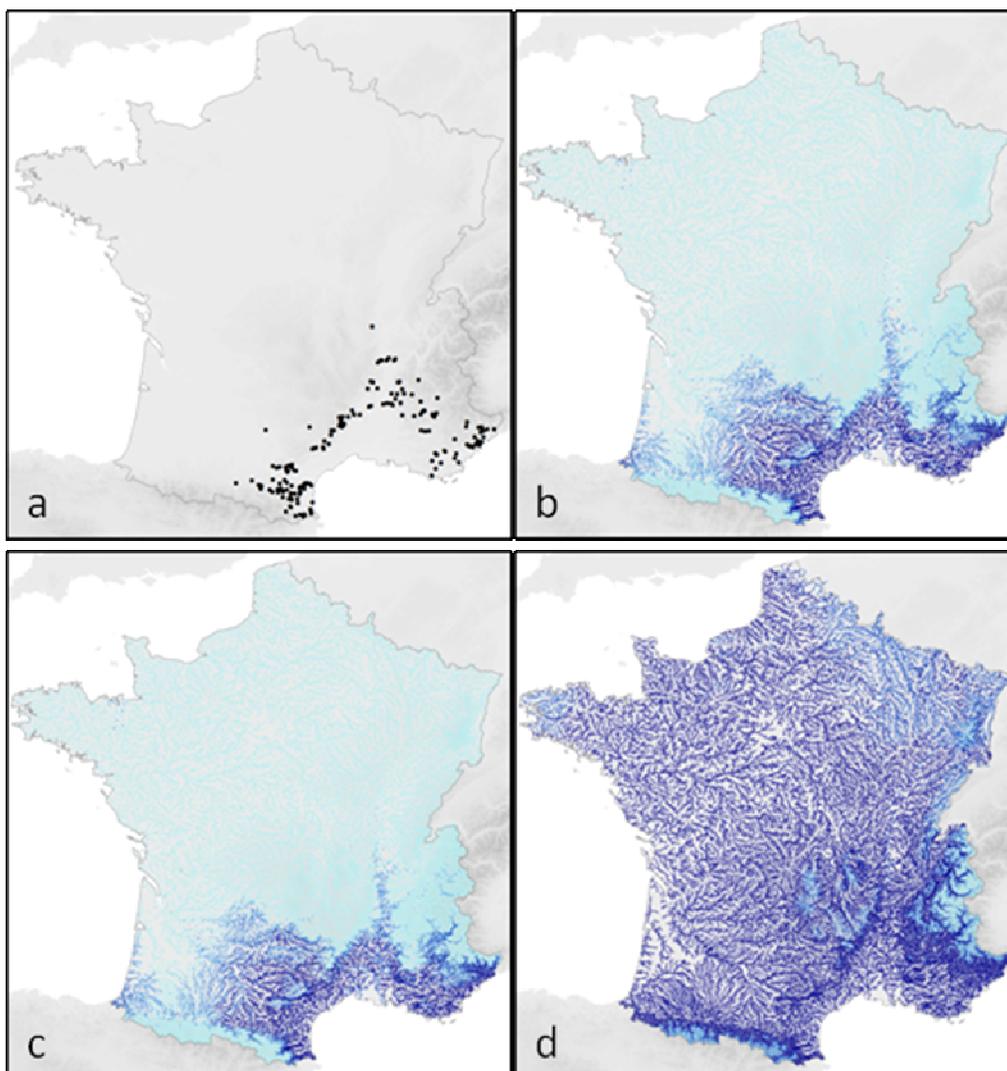


Fig. 2.3.4 Présence observée du barbeau méridional (a), habitats favorables projetés actuels (b), futurs selon le scénario de dispersion nulle (c) et futurs selon le scénario de dispersion illimitée (d)

2.3.2.1. ESPECES A PROBABILITE DE COLONISATION MOYENNE

La loche franche fait partie des 11 espèces dont la probabilité de coloniser un habitat favorable est moyenne. Elle est en effet très peu manipulée par l'Homme et a une capacité de dispersion faible à moyenne. Elle est en revanche rarement capable de franchir les obstacles qui se présente à elle.

L'aire d'habitat favorable actuel projeté par les modèles correspond à la répartition observée de l'espèce excepté pour quelques zones, notamment le Massif Central, la Durance et les Pyrénées Orientales, où la projection indique un habitat peu favorable à l'espèce alors qu'elle y est présente (Fig. 2.3.5). Pour le futur, les deux scénarios de dispersion donnent une forte réduction de l'aire d'habitat favorable de l'espèce qui ne se cantonnerait plus qu'à un large quart nord-est de la France (entre 45 et 28% de perte de linéaire) : les secteurs les plus aval de son aire de répartition ne satisferaient en effet plus à ses exigences écologiques en

termes de température de l'eau. Cette réduction est moins importante dans le cas du scénario de dispersion illimitée, car des habitats deviennent favorables plus en amont suite à l'augmentation de température. Cette espèce, qui pourra potentiellement coloniser une partie de ces zones, reste cependant très vulnérable au changement climatique au vu de la perte d'habitat évaluée par les résultats obtenus.

Cette forte vulnérabilité doit cependant être nuancée : la loche franche devrait trouver refuge dans la zone à truite de façon plus marquée que ne le laissent envisager les résultats, et ce dans d'autres régions que seulement le nord-est de la France. Pour cette raison, et parce que les projections actuelles ne sont pas totalement pertinentes, l'indice de confiance accordé aux résultats obtenus ici n'est donc que de 1 (faible).

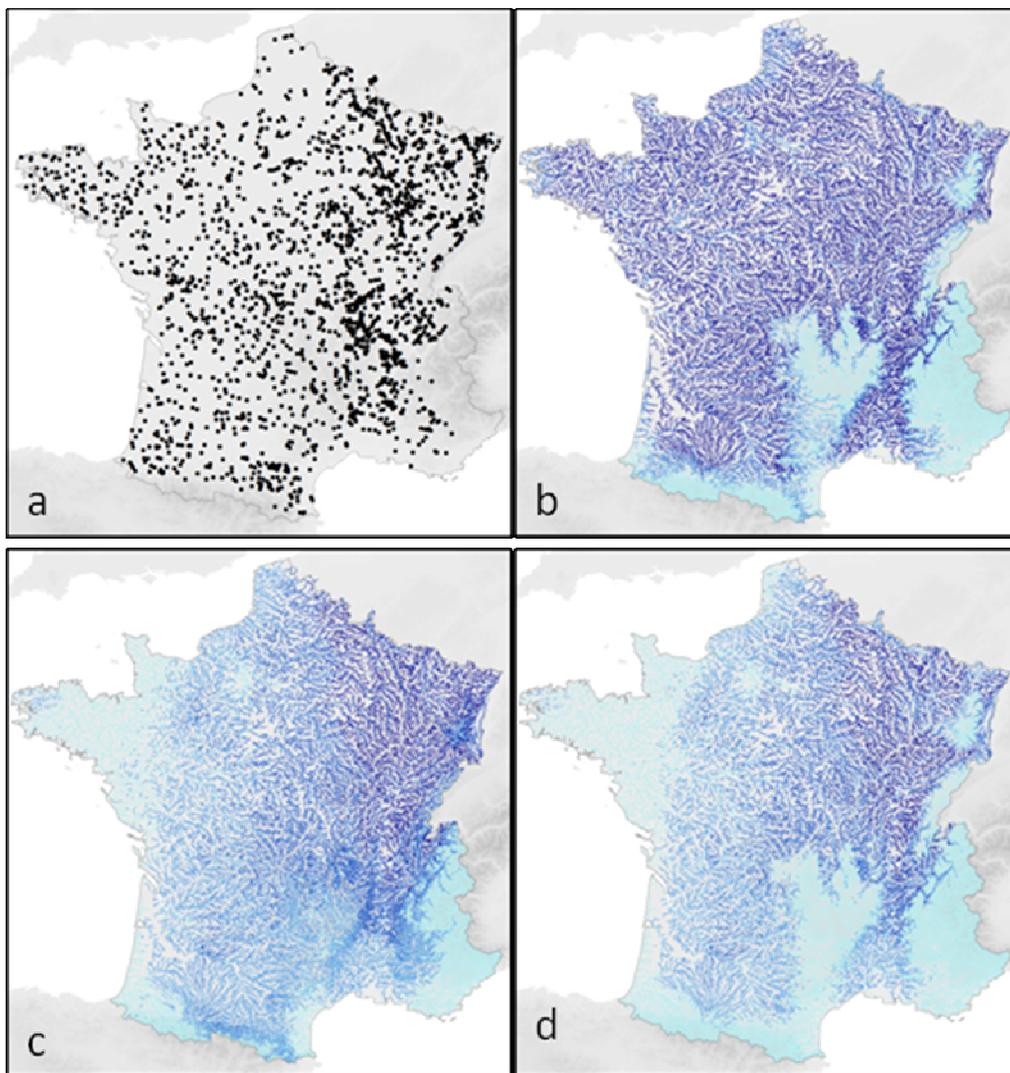


Fig. 2.3.5 Présence observée de la loche franche (a), habitats favorables projetés actuels (b), futurs selon le scénario de dispersion nulle (c) et futurs selon le scénario de dispersion illimitée (d)

2.3.2.2. ESPECES A PROBABILITE DE COLONISATION ELEVEE

La truite commune possède des capacités de colonisation très importantes. Outre le

fait que c'est une espèce qui montre une bonne aptitude au franchissement d'obstacles, elle est largement manipulée par l'Homme dans le cadre de la pêche sportive (repeuplement, alevinage). Sa capacité de dispersion vers de nouveaux habitats est également très grande.

La projection de la répartition actuelle des habitats favorables de la truite reproduit globalement correctement la distribution observée de l'espèce en France (Fig. 2.3.6). A l'horizon 2070, on observe une diminution de près d'un tiers de l'aire de l'habitat favorable à la truite commune (-38% pour le scénario de dispersion illimitée). Son habitat se réduit, en effet, à des zones refuge en tête de bassin. Il est toutefois surprenant que la Bretagne devienne quasi-totalement défavorable à l'espèce. Le réchauffement attendu d'après le scénario climatique A1b rend donc la truite commune très vulnérable au changement climatique.

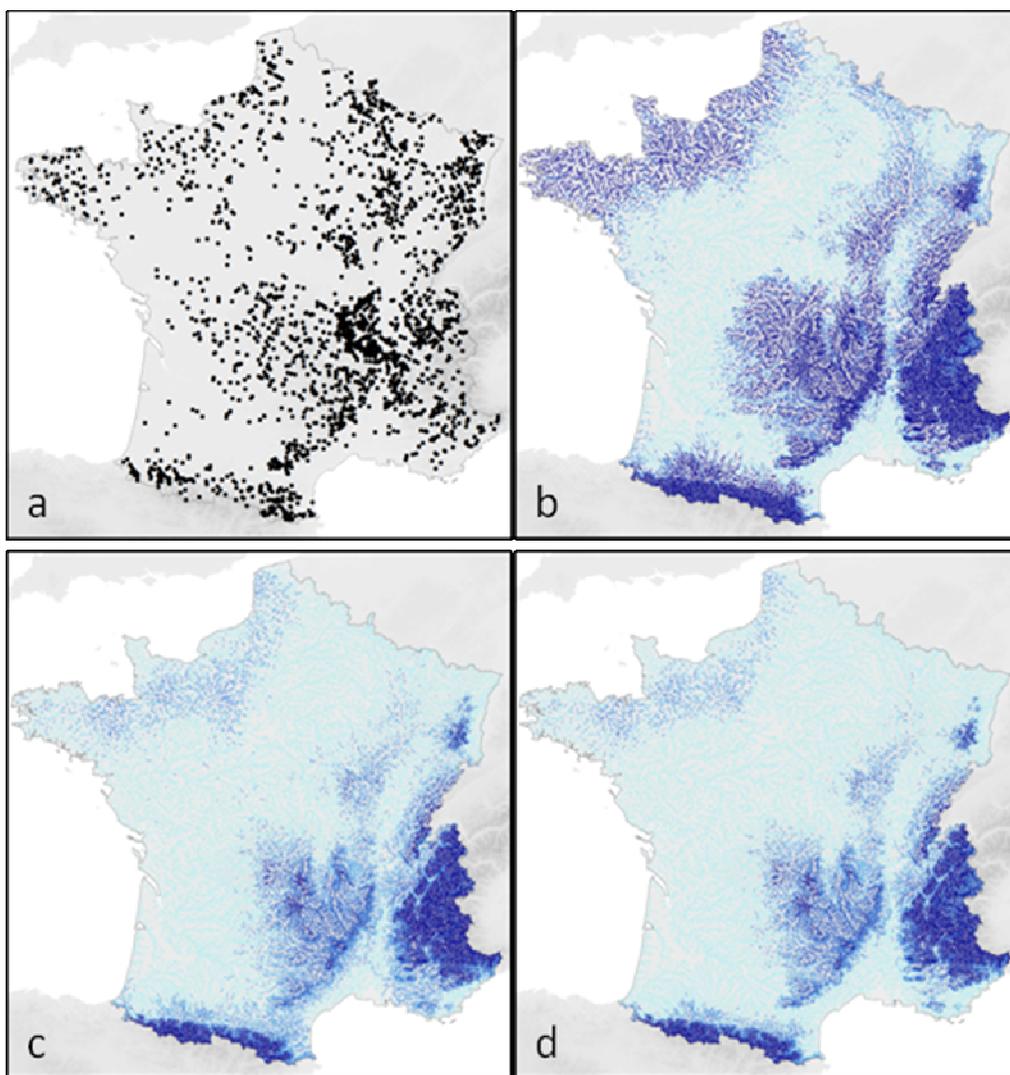


Fig. 2.3.6 Présence observée de la truite commune (a), habitats favorables projetés actuels (b), futurs selon le scénario de dispersion nulle (c) et futurs selon le scénario de dispersion illimitée (d)

La probabilité de colonisation d'un nouvel habitat favorable par l'anguille est élevée. Cette espèce, du fait de son fort intérêt halieutique, est largement manipulée par l'Homme (repeuplement en civelles). En outre, cette espèce possède des capacités de reptation qui lui

permettent de franchir de nombreux types d'obstacles.

La projection de la répartition actuelle des habitats favorables de l'anguille reproduit correctement la distribution observée de l'espèce (Fig. 2.3.7). En revanche, la projection sous-estime la surface des habitats favorables, lesquels devraient s'étendre plus en amont des bassins. Ceci s'explique par les nombreuses pressions qui ont engendrée une réduction de l'aire de distribution de l'espèce. Pour le futur, on observe une extension globale de l'habitat favorable pour le scénario de dispersion illimitée. Cela correspond en fait probablement à l'aire de distribution de l'anguille avant les pressions anthropiques. Sans pression, l'anguille devrait pouvoir coloniser tous ces habitats favorables. Dans le cadre strict de nos hypothèses de changement climatique, cette espèce peut être considérée comme peu vulnérable. Dans la réalité, l'anguille est une espèce extrêmement vulnérable (classée en risque critique d'extinction sur les listes rouges Monde et France selon l'UICN). En effet, elle connaît une forte régression de ses stocks (liée notamment à la surpêche, la rupture de continuité écologique et la mortalité dans les turbines hydroélectriques, pollution des eaux...), et elle est aujourd'hui considérée comme menacée d'extinction. Son évolution future est donc avant tout dépendante de l'efficacité des mesures de protection et de restauration actuellement mises en place (Règlement Européen Anguille de 2007).

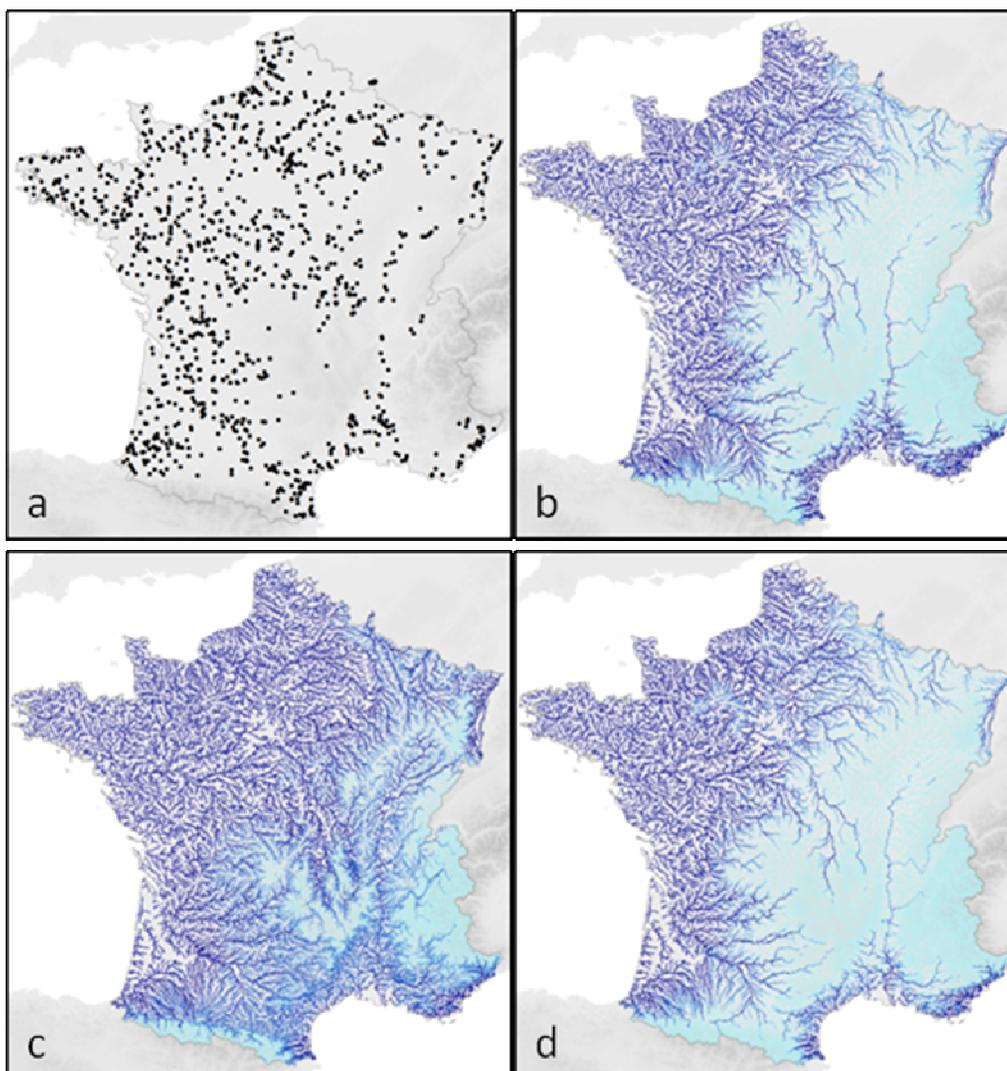


Fig. 2.3.7 Présence observée de l’anguille (a), habitats favorables projetés actuels (b), futurs selon le scénario de dispersion nulle (c) et futurs selon le scénario de dispersion illimitée (d)

2.3.2.3. SYNTHESE

D’après les résultats obtenus, la majorité des espèces sélectionnées dans l’étude seraient peu vulnérables au scénario de changement climatique retenu comme hypothèse (n=20 ; Tableau 2.3.4). Il s’agit principalement des espèces de la zone à brème, qui bénéficieraient d’une extension de leur habitat favorable vers l’amont. Les espèces de vairons ont également été évaluées comme peu vulnérables. Ils sont en effet largement répandus.

Les espèces les plus vulnérables sont les espèces inféodées aux secteurs d’eau fraîche, comme la truite commune, les chabots, le saumon atlantique ou encore la lamproie de Planer. Le brochet est aussi considéré comme très vulnérable au changement climatique. Cependant, les projections d’habitat favorable pour cette espèce sont peu pertinentes (indice de confiance : 1). Une hypothèse possible pour expliquer cela est que le choix de variables retenues pour caractériser la niche écologique des espèces ne prend pas en compte le mode de

reproduction particulier de l'espèce (zones inondables).

Vulnérabilité	Espèces	Total
Faible	ABL, ANG, BAF, BAM, BOU, BRB, BRE, CAS, CCO, CHE, GOU, HOT, OBR, PES, PSR, SAN, SIL, SPI, TAN, VAI	20
Moyenne	BLN, EPI, GAR, GRE, PCH, PER, ROT, TOX	8
Elevée	BRO, CHA, EPT, LOF, LOR, LOT, LPP, SAT, TRF, VAN	10

Tableau 2.3.4 Fréquence des 3 classes de vulnérabilité au changement climatique étudié parmi les 38 espèces étudiées

Pour conclure, la vulnérabilité des espèces au changement climatique dépend fortement de l'évolution de la quantité d'habitat favorable (extension ou régression) et de leur capacité à coloniser ces secteurs de cours d'eau (Fig. 2.3.8). Cela est vrai si l'on ne prend en compte que les pressions exercées par le changement climatique. Dans la réalité, beaucoup d'autres facteurs interviennent (voir paragraphe 2.4).

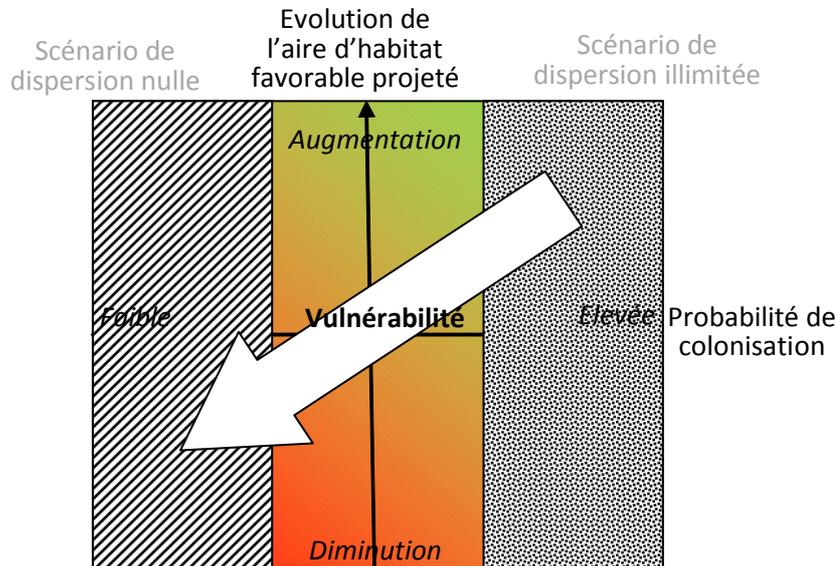


Fig. 2.3.8 Schéma synthétique d'évaluation de la vulnérabilité des espèces au changement climatique

2.3.3. ANALYSE DES ASSEMBLAGES DE POISSONS

2.3.3.1. RENOUVELLEMENT DES COMMUNAUTES

Pour le scénario de dispersion illimitée, le renouvellement (Fig. 2.3.9) montre de plus grandes valeurs dans les parties montagneuses, donc des ordres de Strahler faibles caractérisant des cours d'eau de tête de bassin. Les cours d'eau d'ordre de Strahler élevé ressortent comme relativement peu affectés par le changement climatique étudié. Le Nord-Ouest comporte également de fortes valeurs de renouvellement. Pour le scénario de dispersion nulle, la tendance est moins marquée (Fig. 2.3.10).

La valeur moyenne du renouvellement pour la France métropolitaine est de 0,63, ce qui traduit un fort impact du changement climatique sur les assemblages des cours d'eau français.

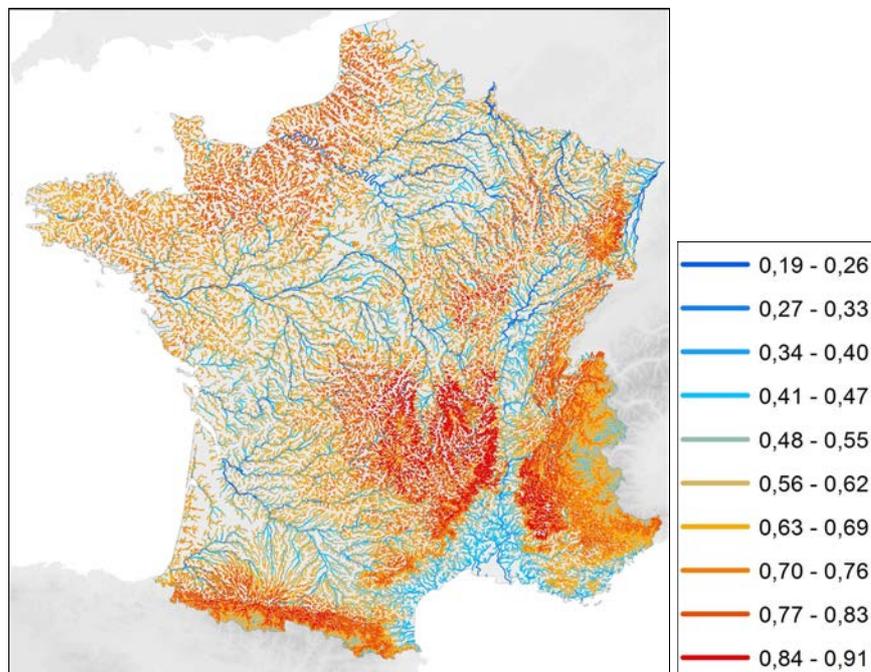


Fig. 2.3.9 Représentation cartographique du renouvellement moyen pour le scénario de dispersion illimitée

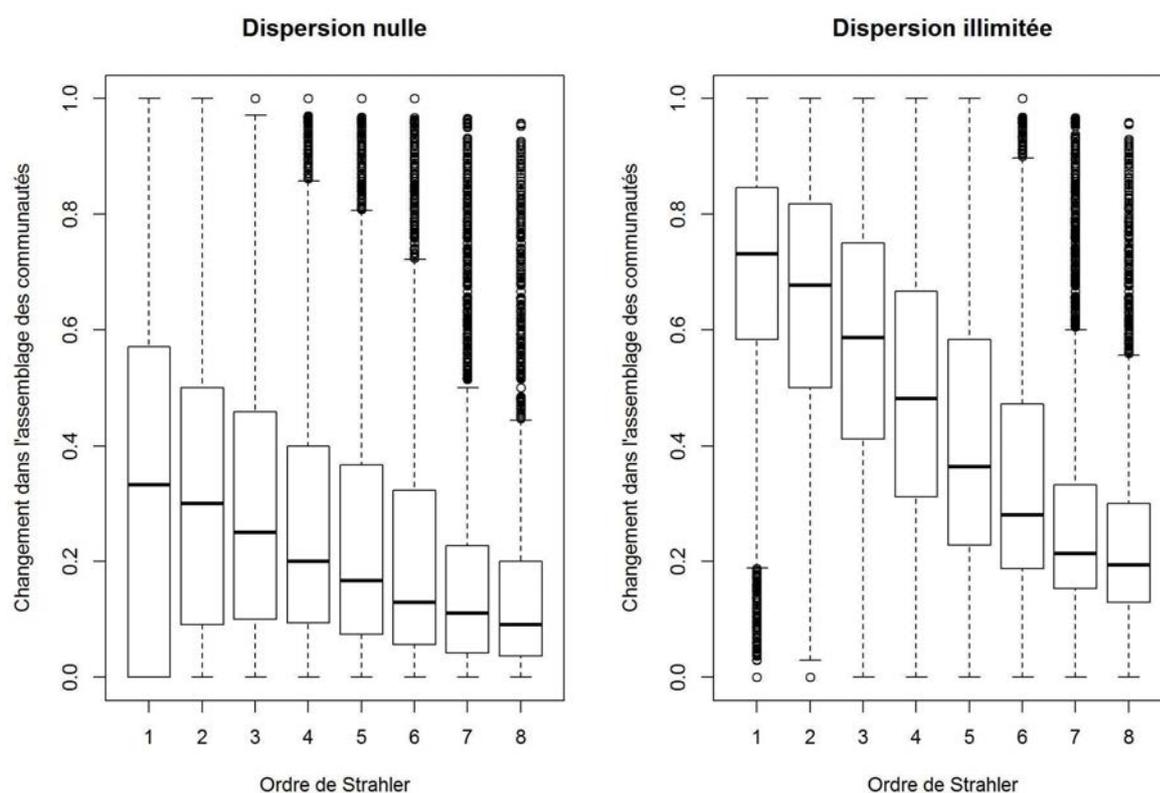


Fig. 2.3.10 Boîtes à moustaches représentant la distribution du renouvellement (n=490) pour le scénario de dispersion nulle et le scénario de dispersion illimitée

2.3.3.2. RICHESSSE SPECIFIQUE

L'analyse de la variation de richesse spécifique entre la situation actuelle et la situation future (Fig. 2.3.11) indique que celle-ci varie peu sur l'ensemble du territoire, à l'exception de 2 ensembles. Il s'agit d'une part des régions montagneuses, au sein desquelles la richesse spécifique augmente considérablement, en particulier dans le Massif Central où l'on observe un gain de 8 à 9 espèces. Et d'autre part une vaste région qui couvre les Pays de la Loire ainsi que le nord du Poitou-Charentes, où l'on observe au contraire une perte importante d'espèces, allant jusqu'à 8 espèces pour de nombreux cours d'eau.

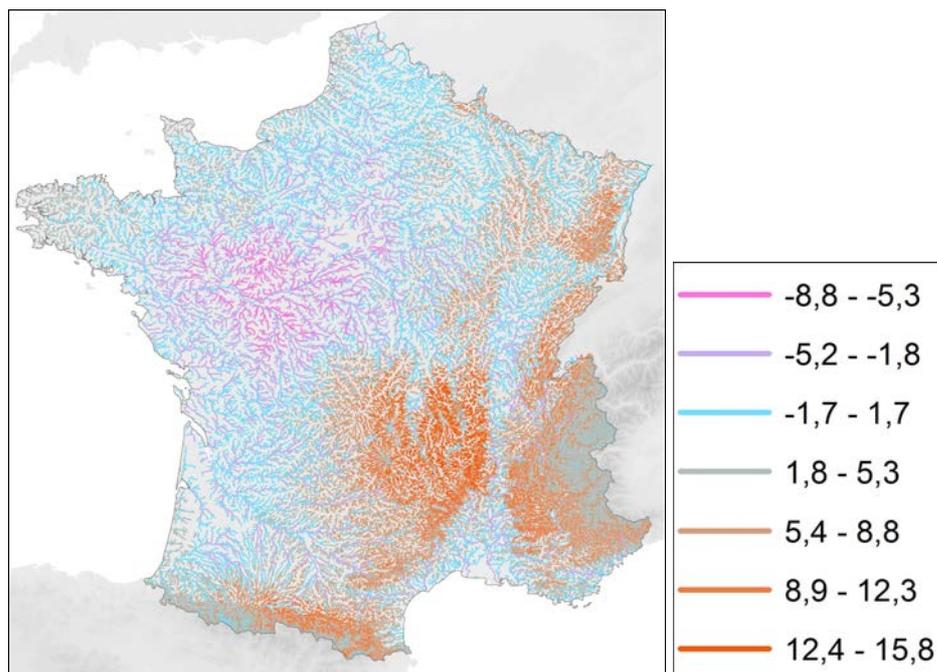


Fig. 2.3.11 Représentation cartographique de la différence moyenne de richesse spécifique entre futur et présent pour le scénario de dispersion illimitée

La différence de richesse spécifique (Tableau 2.3.5) montre une augmentation pour les zones amont et une légère diminution pour les zones en aval. Les richesses spécifiques prédites actuelles et futures diffèrent significativement, et ce pour chaque ordre de Strahler (test de Wilcoxon en échantillons appariés, p-value < 0,001).

Strahler	Richesse actuelle	Richesse future	Différence
1	7,01 ± 5,89	11,96 ± 7,96	4,95 ± 7,23*
2	9,9 ± 7,93	14,48 ± 8,48	4,59 ± 8,24*
3	14,1 ± 9,38	17,66 ± 8,85	3,56 ± 8,83*
4	18,14 ± 9,35	20,45 ± 8,8	2,31 ± 8,63*
5	22,11 ± 7,93	22,55 ± 8,41	0,44 ± 7,98*
6	24,99 ± 5,4	24,11 ± 8,11	-0,88 ± 7,42*
7	27,44 ± 3,12	25,64 ± 7,05	-1,8 ± 6,58*
8	27,11 ± 3,04	25,59 ± 7,42	-1,52 ± 6,29*

Tableau 2.3.5 Moyenne de la richesse spécifique (\pm ET) actuelle et future, et de la différence future - actuelle, pour le scénario de dispersion illimitée. Les * correspondent aux différences significative au seuil de 0.001 (test de Wilcoxon apparié)

2.3.1. PRISE EN COMPTE DE LA TEMPERATURE DE L'EAU

Les résultats produits dans le cadre du projet Explore 2070 soulignent une augmentation de la moyenne annuelle des températures de l'eau de 1,6°C en moyenne sur

l'ensemble de 31 stations étudiées. Cette augmentation varie entre un minimum de 1,1°C et un maximum de 2,2°C (Tableau 2.3.6). Pour la température de l'air, les résultats indiquent une augmentation de la moyenne annuelle de 2,2°C (minimum 1,6°C, maximum 2,7°C). Ces augmentations moyennes cachent cependant de fortes inégalités selon les stations : augmentation médiane comprise entre 0,6 et 2,2°C pour la température de l'eau, et entre 2 et 2,5°C pour la température de l'air. Selon les stations, le choix de la température de l'air comme proxy de la température de l'eau est donc susceptible d'induire un biais non négligeable dans la modélisation de la niche écologique des espèces. Cependant, l'erreur type associée à ces valeurs est de l'ordre de 1°C. Il est donc difficile de conclure fermement.

Pour cette même raison de fortes incertitudes associées aux résultats de température de l'eau, l'interprétation écologique qui en est faite donne donc seulement une tendance probable. Par ailleurs, les résultats ne donnent pas d'information sur l'évolution du cycle annuel des températures pour chaque station. L'interprétation ne peut donc se faire qu'à une échelle grossière. Dans la mesure où ces résultats ne constituent probablement qu'une borne inférieure des échauffements futurs réels, nous n'avons retenus que les températures moyennes annuelles maximales modélisées pour chaque station. Prenons pour exemple le seuil de 15°C. D'après ces résultats, 13 des 31 stations seraient susceptibles d'avoir une température moyenne annuelle dépassant les 15°C. Il s'agit en particulier des stations localisées sur la Seine, l'Ardèche, sur la Garonne intermédiaire et les fleuves du Languedoc-Roussillon.

D'après les *preferenda* thermiques des espèces retenues, deux espèces *a minima* (pour lesquelles les données sont disponibles – Tissot et Souchon, 2011) seraient vulnérables à une augmentation durable de la température de l'eau au-delà de 15°C durant le stade embryonnaire. La vandoise et du brochet présentent en effet des gammes de températures optimales pour ce stade inférieures à cette température (mais leur limite de résistance est supérieure : 25 et 23°C respectivement). Les modèles ne projettent pas dans le futur la présence du brochet sur les stations concernées (scénario de dispersion illimitée). En revanche, les 3 stations sur la Seine aval (6, 28 et 29) sont modélisées comme favorables à l'horizon 2070 pour les vandoises. Si l'on considère que la température moyenne annuelle de l'eau sur ces stations atteindrait plus de 16°C, et sans évolution des traits de vie de l'espèce, il est légitime de se demander dans quelle mesure l'habitat au niveau de ces stations sera effectivement favorable à l'espèce. D'autant plus que les tolérances thermiques des vandoises sont encore plus restreintes pour le stade de reproduction (optimum 7°C, résistance maximum 12°C). Le blageon est également une espèce sensible à des températures trop élevées à certains stades de son cycle biologique (températures optimum pour le juvéniles comprises entre 13 et 15°C). Les projections futures d'habitat favorable (scénario de dispersion illimitée) indiquent pourtant la présence de l'espèce sur les stations de la Garonne, de l'Ardèche et du Languedoc-Roussillon.

Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	30	31	
T° de l'eau future maximale (°c)	12,8	10	11,2	11,8	10,8	16,2	11,8	14,2	13,6	12,4	12,6	14,9	17,1	15,8	17,7	16,8	15,2	10,6	16,2	10,5	15,4	16,8	13,9	14,8	14,9	16,8	15,8	15,9	12,2	16,8	
Delta (futur-présent) mediane	1,3	1	0,8	1,5	1,5	2	0,6	1,7	1,5	1,3	1,3	1,8	2,2	1,7	2	2,1	1,9	1,2	2	1,8	1,5	1,2	1,9	1,7	1,7	2,1	2	2,1	2,1	1,5	
ABL-act	-	-	-	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o
ABL-fut	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	-	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o
BAF-act	-	o	-	o	-	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o	o
BAF-fut	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
BLN-act	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	o	-	o	o	-	-	-	-	-	-	-	o	o
BLN-fut	o	o	o	o	o	-	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	-	o	-	-	o	-	o	o
BOU-act	-	-	o	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	-	-	-	-	-	-	o	o	o	-	o
BOU-fut	-	o	-	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	-	-	-	-	-	-	-	o	o	o	-	o
BRB-act	-	-	-	-	-	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	-	-	-	o	o	o	o	o	o	-	o
BRB-fut	-	-	-	-	-	o	-	o	o	-	o	-	o	-	-	o	o	o	-	-	-	-	o	-	-	o	o	o	-	o	
BRE-act	-	-	-	-	-	o	-	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	-	-	-	-	o	o	o	o	o	o	-	-	
BRE-fut	-	-	-	-	-	o	-	o	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	o	o	-	o	o	-	-	
BRO-act	-	-	-	-	-	o	o	-	-	-	-	-	-	-	-	-	o	-	-	-	-	-	-	o	o	o	o	o	-	-	
BRO-fut	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CHE-act	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o
CHE-fut	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
GAR-act	-	-	-	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o
GAR-fut	-	-	-	-	-	o	o	-	-	-	-	-	-	-	-	o	o	-	-	-	-	-	o	o	o	o	o	o	-	-	
GOU-act	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o
GOU-fut	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
GRE-act	-	-	-	-	-	o	-	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	-	-	-	-	o	o	o	o	o	o	-	o	
GRE-fut	-	-	-	-	-	o	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	o	-	o	-	
HOT-act	o	o	-	o	-	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	-	o	-	-	-	o	-	o	-	o	
HOT-fut	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o	o	-	-	o	o	o	o	o	o	
PER-act	-	-	-	-	-	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	-	-	-	-	o	o	o	o	o	o	-	o	
PER-fut	-	-	-	-	-	o	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	o	o	o	-	
PES-act	-	-	-	o	-	o	-	o	o	o	o	-	o	-	-	o	o	o	o	-	-	o	-	o	o	o	o	o	-	o	
PES-fut	-	-	-	-	-	o	o	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	o	o	-	o	o	o	-	-	
SAN-act	-	-	-	-	-	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	-	-	-	o	o	o	o	o	o	-	o	
SAN-fut	-	-	-	-	-	o	-	o	o	-	o	-	o	-	-	o	o	o	-	-	-	-	o	o	o	o	o	o	-	-	
SIL-act	-	-	-	-	-	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	-	-	-	-	-	-	-	o	o	o	-	o
SIL-fut	-	-	-	-	-	o	-	o	o	o	o	-	o	-	-	o	o	o	-	-	-	-	o	-	-	o	o	o	-	o	
SPI-act	o	o	o	o	-	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	-	o	-	-	-	-	o	o	o	o	
SPI-fut	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o	o	-	-	o	o	o	o	o	o	
TOX-act	-	-	-	-	-	-	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o	-	o	o	-	-	-	-	-	-	o	
TOX-fut	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
VAN-act	-	o	-	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-	-	-	o	o	o	o	o	o	o	o	-	o	
VAN-fut	-	-	-	-	-	o	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	o	-		

Tableau 2.3.6 Températures moyennes annuelles maximales et variations moyennes modélisées à l’horizon 2070 (données produites dans le cadre du projet Explore 2070), et présences (o) / absences (-) de 19 espèces sur les 31 stations de mesure en situation actuelle et future.

2.4. LIMITES ET INCERTITUDES DE L'ETUDE

Bien que les résultats de cette étude soient pour la majorité cohérents et partagés par d'autres études, certaines limites doivent être abordées.

2.4.1. HYPOTHESES DE DISPERSION

Une tentative de prise en compte de différents scénarios de dispersion a été réalisée sans toutefois aboutir (voir paragraphe 2.2.6.2). Les résultats obtenus donnent donc la plage possible de répartition future des différentes espèces étudiées, entre la répartition obtenue pour le scénario de dispersion nulle et celle pour le scénario de dispersion illimitée. La dispersion effective des espèces est comprise entre ces extrêmes, et dépend d'une part de la probabilité de dispersion de chaque espèce, et d'autre part de la densité des obstacles présents le long du réseau hydrographique et de leur franchissabilité. Ces différents aspects n'ont pu être pris en compte dans les projections habitat favorable, mais ont été traités indirectement dans la phase d'analyse de la vulnérabilité des espèces, au travers d'un indice de probabilité de dispersion (cf. § 2.2.6.3).

2.4.2. HYPOTHESE DE NON-ADAPTATION

La modélisation de la répartition future correspond à l'habitat favorable projeté sous l'hypothèse de changement climatique. Cette modélisation se base sur l'hypothèse que les caractéristiques de la niche écologique de chaque espèce de poisson étudié ne changent pas en 2070. Or des adaptations comportementales, physiologiques et morphologiques sont possibles, et ont été observées par exemple pour des amphibiens avec une reproduction plus précoce (Beedee, 1995), ou pour des plantes dont la floraison est également plus précoce (Bradley *et al.*, 1999).

2.4.3. DONNEES D'ECHANTILLONNAGES

Certaines espèces de poissons sont plus difficilement détectées que d'autres du fait de leur écologie. Ainsi leur absence dans l'échantillon n'implique pas nécessairement l'absence de l'espèce sur le site (écologie, migration saisonnière). C'est le cas de la carpe commune, dont les stades adultes vivent dans des zones trop profondes pour être échantillonnées en pêche électrique ; on estime ainsi que, dans le présent jeu de données, la répartition observée de cette espèce est potentiellement sous-estimée. Les zones d'estuaires, quant à elles, ne sont tout simplement pas échantillonnées du fait de l'hyper conductivité de l'eau en ces endroits. De ce fait, certains sites et certaines espèces sont sous-échantillonnés, et donc les informations écologiques de la niche réalisée de certaines espèces peuvent comporter des lacunes plus ou moins importantes (N. Poulet, S. Brosse, com. pers. ; Sinclair *et al.*, 2010).

2.4.1. INTERACTIONS BIOTIQUES

La répartition projetée des sites favorables à chaque espèce est réalisée indépendamment de toutes interactions biotiques (ressources trophiques, compétition, prédation). Cette hypothèse peut avoir des conséquences sur les résultats, cependant il a été mis en évidence que les interactions n'agissaient que peu dans la structuration des assemblages piscicoles. Leur influence se restreignant non pas à la présence ou l'exclusion d'une espèce, mais plus à son abondance. Enfin, elles seraient implicitement présentes dans les données d'échantillonnages (Sinclair *et al.*, 2010, Davis *et al.*, 1998, Oberdoff *et al.*, 2001). Si cela est vrai pour les projections actuelles, il faut très certainement le nuancer pour les projections futures. Les interactions biotiques sont en effet fortement susceptibles d'évoluer, notamment sous l'influence du changement climatique. Par exemple, des espèces exotiques volontairement ou accidentellement introduites dans les cours d'eau métropolitains pourraient bénéficier du changement climatiques et devenir invasives, entrant potentiellement en compétition (voire prédation) avec les espèces autochtones (Leprieur et Rubin, 2011).

2.4.2. CHOIX DES VARIABLES

Contrairement à d'autres études qui n'utilisent que des variables climatiques dans leurs modèles de distribution d'espèces (Saetersdal *et al.*, 1998 ; Berry *et al.*, 2002 ; Thuiller *et al.* 2005 ; Virkkala *et al.*, 2008), nous avons choisi d'utiliser huit variables climatiques et deux variables physiques. Trivedi *et al.* (2008) ont démontré que l'utilisation de variables climatiques sans la prise en compte de variables physiques peut entraîner une mauvaise estimation des impacts potentiels (Pearson et Dawson, 2003).

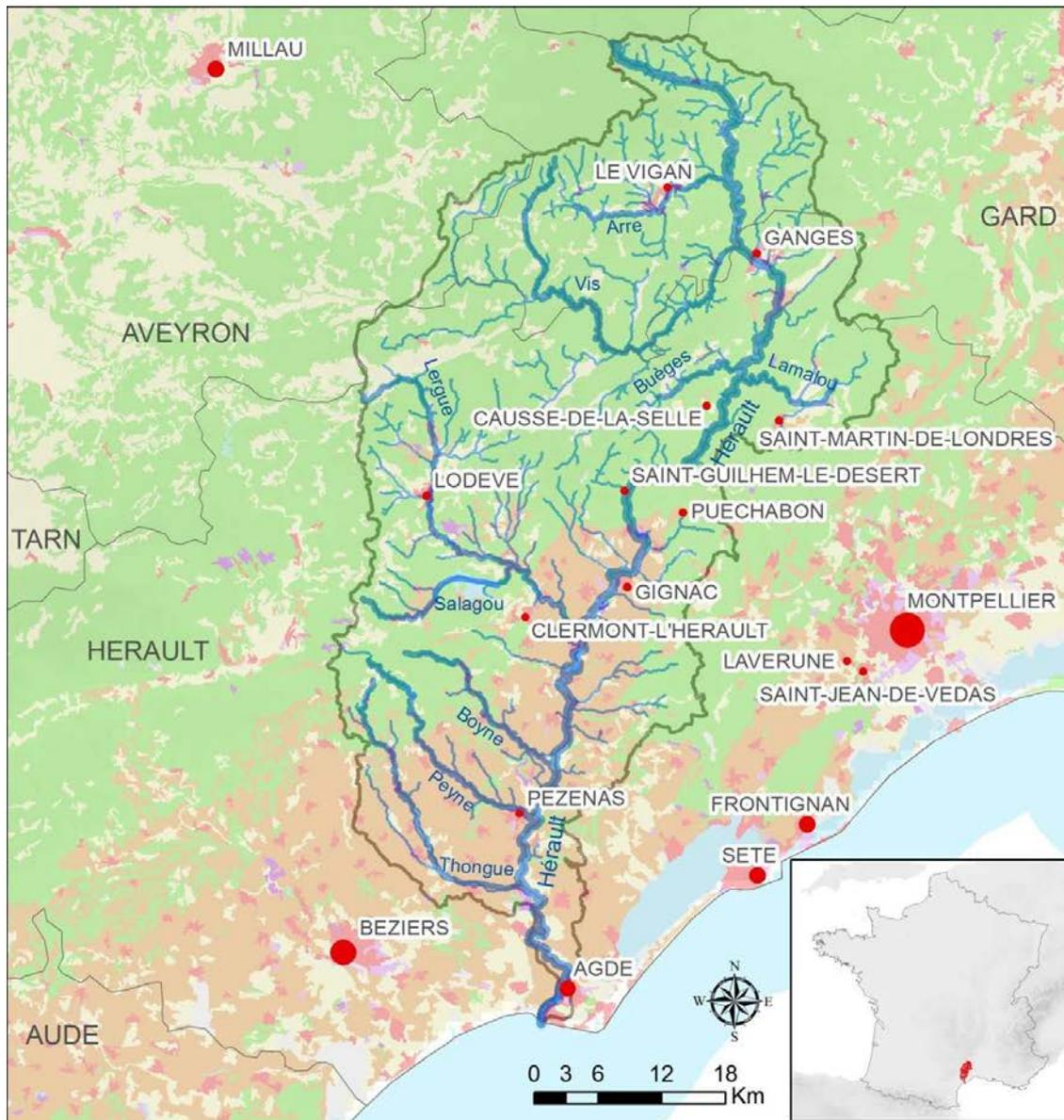
Aux vues des projections actuelles et futures qui concordent pour la grande majorité avec les attentes des experts, ainsi que des performances prédictives bonnes à excellentes, nous pouvons accorder un certain crédit aux huit variables que nous avons utilisées. Néanmoins la prise en compte de variables directement impliquées dans les caractéristiques des niches réalisées des espèces de poissons d'eau douce français peut certainement améliorer la qualité prédictive des modèles. En effet la composition chimique de l'eau (pouvant inclure la pollution, la quantité d'oxygène dissout, le pH, ...) ou encore l'hydrologie, sont des caractéristiques importantes pour les espèces de poissons d'eau douce.

3. IMPACT DES CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DES PRESSIONS ANTHROPIQUES SUR LES PEUPELEMENTS PISCICOLES ET LES ORGANISMES STYGOBIES AU SEIN DU BASSIN VERSANT DE L'HERAULT

3.1. PRESENTATION GENERALE

L'Hérault est un fleuve côtier méditerranéen situé dans la région Languedoc-Roussillon, au niveau des départements du Gard et de l'Hérault. La longueur totale des cours d'eau du bassin versant de l'Hérault est de 1 200 km (incluant les 160 km du fleuve), drainant une surface de 2 550 km². L'Hérault prend sa source au mont Aigoual (1 228 m), dans le massif des Cévennes. Il parcourt le département du Gard puis traverse du nord au sud le département de l'Hérault (auquel il donne son nom), et se jette dans la mer Méditerranée à Agde après avoir traversé 175 communes essentiellement rurales. Plus de 130 000 habitants résident sur le bassin versant de l'Hérault, population qui est plus que doublée par le tourisme durant la période estivale (station balnéaire d'Agde). En rive droite, il compte 5 affluents principaux : l'Arre, la Vis, la Lergue, la Boyne et la Peyne. En rive gauche, seul le Lamalou contribue aux eaux de l'Hérault.

Le bassin versant est soumis à des influences climatiques variées : en amont un climat de type montagnard ou continental domine, engendrant des fortes pluies notamment à l'automne et au printemps (pluies cévenoles). Les zones intermédiaires et aval sont situées dans le domaine climatique méditerranéen, se caractérisant par des étés chauds et secs, et des hivers frais. De manière générale, la caractéristique principale de ce bassin versant concerne la pluviométrie, intense et brutale avec des extrêmes entre saisons arrosée et sèche. Les précipitations annuelles moyennes du bassin sont de 1 126 mm avec un maximum de 120 mm pour les mois de janvier et février, et un minimum de 32 mm en juillet. La température annuelle moyenne est quant à elle de 12°C avec un maximum de 20,9°C en juillet et un minimum de 4,6°C en janvier.



Légende

Agglomérations

Nb Habitants

- 1 - 86
- 87 - 430
- 431 - 722
- 723 - 2516

□ Bassin Versant de l'Hérault

— Réseau hydrographique

Occupation du sol

- Tissu urbain
- Zones industrielles et commerciales
- Mines et décharges
- Agriculture
- Vignobles
- Forêts, landes et pelouses
- Plans d'eau, lagunes, estuaires

Ressources spatiales et urbaines
 Energie et climat, Développement durable
 Prévention des risques, Infrastructures, Transport et Mer

Présent
pour
l'avenir

www.developpement-durable.gouv.fr

Sources : Corine Land Cover, RGC Cartographie : Biotope, 2012



Fig. 3.1.1 Carte du bassin versant de l'Hérault et occupation du sol

3.1.1. OCCUPATION DU TERRITOIRE AU SEIN DU BASSIN VERSANT DE L'HERAULT

Le bassin versant de l'Hérault se caractérise par la prédominance des milieux naturels occupant plus de 64% de la surface totale (près de 1 700 km² - principalement des forêts de feuillus et une végétation méditerranéenne caractéristique). Suit l'activité agricole qui occupe 35% du territoire (près de 830 km² dont 530 km² de vignobles), et le tissu urbain qui ne représente que 1% (près de 60 km²).

Au sein du bassin versant, l'occupation du sol est cependant assez contrastée : la partie amont est globalement peu anthropisée et seules de petites à moyennes agglomérations sont présentes. Les milieux semi-naturels et naturels dominent (Fig. 3.1.1). En zones intermédiaire et aval, le tissu urbain se densifie ainsi que la surface des terres dédiées à l'agriculture (viticulture dominante), entraînant une régression des systèmes naturels comparativement aux zones situées plus en amont.

3.1.1.1. LES MILIEUX NATURELS AU SEIN DU BASSIN VERSANT DE L'HERAULT ET LEUR STATUT DE PROTECTION

Le bassin versant de l'Hérault abrite de nombreuses zones de fort intérêt écologique tels que la garrigue, les maquis, les chênaies, les pinèdes, etc.

Afin de protéger ce patrimoine naturel et limiter l'emprise anthropique, de nombreux périmètres juridiques s'appliquent sur le territoire incluant :

- 10 Zones de Protection Spéciale (ZPS – Natura 2000);
- 15 Sites d'Importance Communautaire (SIC – Natura 2000);
- 100 Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique de type 1 (ZNIEFF1) et 23 Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique de type 2 (ZNIEFF 2) ;
- 3 Réserves de Biosphère (les Cévennes : la zone centrale, tampon et son aire de coopération) ;
- 3 Arrêtés de Protection de Biotope (Gorges de l'Hérault, Cirque de Mourèze, Ravin des Arcs) ;
- 4 Zones d'Importance pour la Conservation des Oiseaux (Gorges de la Vis et Cirque de Navacelles, Hautes Garrigues du Montpellierais, Gorges du Rieutord-Fage-Cagnasse, Parc National des Cévennes) ;
- un tiers du territoire est proposé en sites Natura 2000 (soit 780 km²), dont plus de la moitié est déjà validée.

Un des affluent de la Vis (rivière la Virenque) est situé par ailleurs dans le Parc Naturel Régional (PNR) des Grands Causses, réserve épousant les limites de ce département. Une partie du PNR du Haut-Languedoc est également très proche de la Thongue. Enfin, la partie amont du bassin versant de l'Hérault est situé au cœur du Parc National des Cévennes.

3.1.1.2. BILAN HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT

- **Le fleuve et ses affluents**

Le fleuve compte 8 affluents principaux :

Affluent	Longueur	Bassin-versant (km ²)
Arre	24	155
Vis	58	310
Buèges	12	55
Lamalou	20	120
Lergue	45	426
Boyne	22	90
Peyne	33	120
Thongue	36	150

Tableau 3.1.1 Principaux affluents de l'Hérault

Le fleuve Hérault, long de 160 km, draine un bassin versant de 2 550km². Le module du fleuve à Agde, au niveau de l'embouchure, est de 51,6m³/s. Le VCN3 est de 3,2m³/s avec une périodicité moyenne d'un an sur deux ; le QMNA2 est de 6,82m³/s. Dans sa partie amont, le fleuve possède un débit d'étiage très faible. La confluence avec l'Arre, petit affluent alimenté par une résurgence karstique, n'augmente que légèrement ce débit. A l'inverse, la confluence avec la Vis peut jusqu'à tripler ce débit grâce au flux soutenu et régulier de cette rivière en période estivale (cette rivière est alimentée par des résurgences karstiques au niveau du moulin de la Foux). Enfin, dans le dernier secteur des Gorges de l'Hérault et dans la plaine, le débit d'étiage s'abaisse de nouveau, principalement dû aux prélèvements anthropiques. La naturalisation² des débits de l'Hérault au niveau d'Agde estime le module à 42,2m³/s (module non-naturalisé : 51,6m³/s) et le QMNA2 à 7,09m³/s (QMNA2 non-naturalisé : 6,82m³/s).

- **Les crues**

Le débit du fleuve est particulièrement irrégulier - caractéristique des fleuves méditerranéens - avec des crues soudaines, souvent liées aux précipitations d'automne dévalant du massif de l'Aigoual et pouvant dépasser 1 400m³/s. Les crues peuvent être particulièrement violentes, conduisant à des inondations importantes (par exemple le débit instantané maximal observé du fleuve à Agde a atteint 1 460m³/s lors de la crue du 1^{er} décembre 1958).

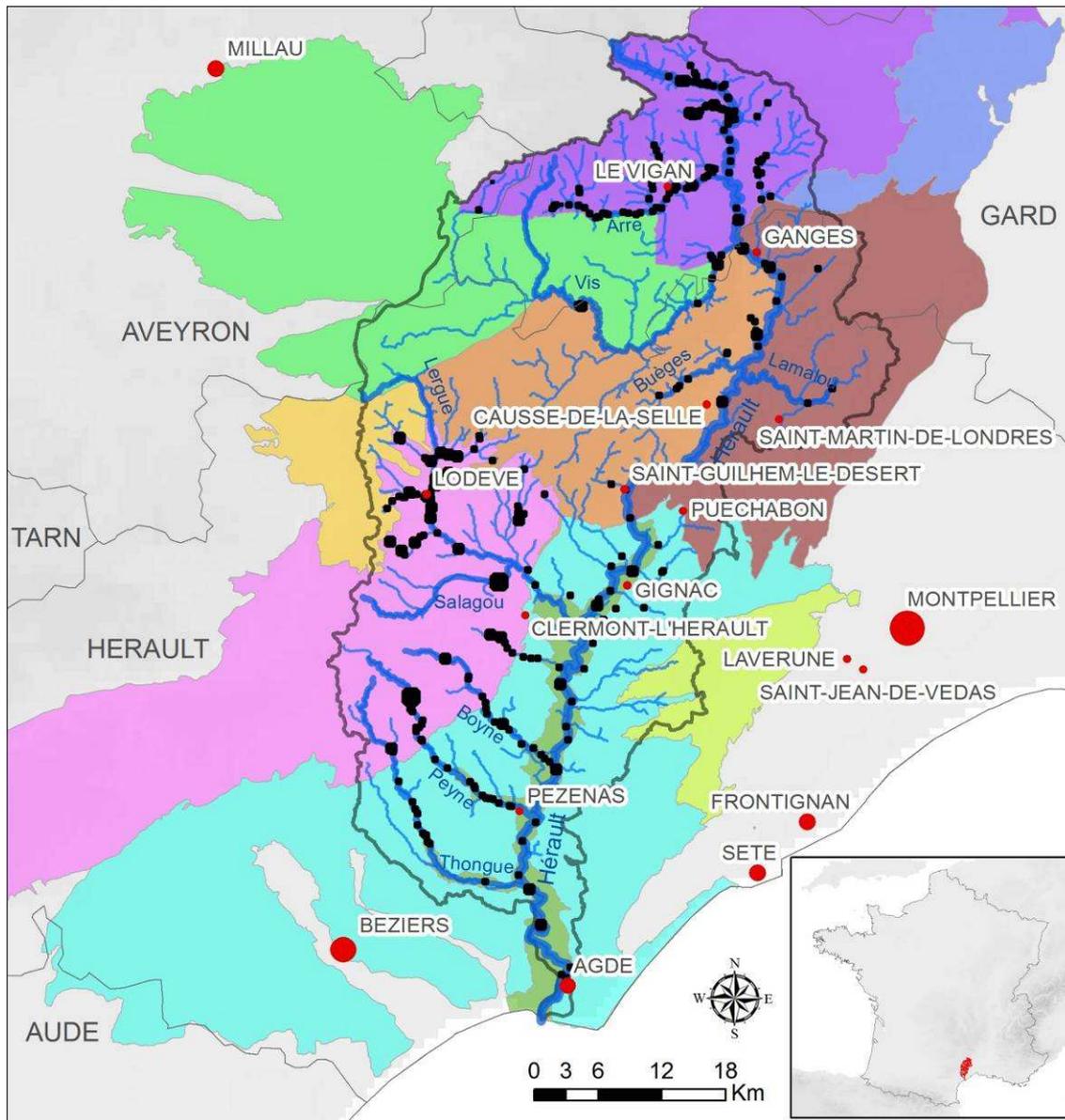
² La naturalisation des débits consiste à estimer *via* des modèles mathématiques les débits naturels hors aménagements et prélèvements anthropiques. Un débit naturalisé est donc l'estimation du débit d'un cours d'eau, où l'Homme n'aurait fait aucun aménagement, et ne prélèverait pas d'eau.

La contribution des différents affluents aux crues de l'Hérault est fonction de la taille de leur sous-bassin versant. En effet la crue de la Vis apporte plus de la moitié du volume d'eau de la crue à Ganges ; la crue de Ganges peut apporter entre 25% et 75% du volume d'eau de la crue à Gignac ; la Lergue participe jusqu'à 30% du volume de la crue au niveau d'Agde. Enfin, le volume de la crue au niveau de Gignac contribue pour au moins 50% du volume de la crue à Agde.

La plaine de l'Hérault joue un rôle majeur dans l'écrêtement des crues en se comportant comme une zone naturelle d'expansion *via* les inondations. En effet, elle diminue d'environ 20 à 30% le débit de pointe du fleuve entre Montagnac et Agde. Par ailleurs, le barrage des Olivettes sur la Peyne à Vailhan et le barrage du Salagou sur le Salagou à Clermont-l'Hérault ont été construits afin de réguler en partie ces fortes crues. Ils sont localement très efficaces puisqu'ils sont capables d'intercepter la quasi-totalité des crues provenant de leur bassin versant (de superficies respectives 76km² et 30km²), mais cet important effet local diminue à mesure que l'on s'éloigne des ouvrages. A Agde, ils ne contrôlent plus que 4% du bassin versant de l'Hérault.

- **Les étiages**

Les étiages estivaux sont très marqués sur le bassin versant de l'Hérault, pouvant conduire à l'assèchement total de certains cours d'eaux annexes. En effet, alors que le débit moyen annuel du fleuve est de 51,6m³/s, les débits moyens mensuels varient entre 102m³/s en février et 10,2m³/s au mois de juillet. Des valeurs encore plus faibles sont régulièrement observées, le VCN10 (débit moyen journalier des dix jours consécutifs les plus secs) étant de 3,73 m³/s en cas de période quinquennale sèche.



Légende

Agglomérations

Nb Habitants

- 1 - 86
- 87 - 430
- 431 - 722
- 723 - 2516

Obstacles à l'écoulement

Hauteur (en mètres)

- 0 - 2
- 2,01 - 12,5
- 12,51 - 62

□ Bassin Versant de l'Hérault

— Réseau hydrographique

Ressources souterraines

- Aquifère alluvial de l'Hérault, de la Lergue, de la Peyne et de la Thongue
- Domaine constitué de calcaires, schistes, grès et pérites des terrains primaires Haut-Minervois et Lodevois
- Domaine constitué de terrains cristallins, cristallophylliens et sédimentaires d'âge antéhercynien
- Domaine constitué de terrains sédimentaires d'âge Houiller, Trias, Jurassique et Crétacé
- Domaine très étendu composé de terrains variés, le plus souvent d'âge Tertiaire et Crétacé
- Ensemble multicouche des aquifères karstiques d'âges triasique, liasique et jurassique moyen et supérieur
- Système aquifère constitué de formations calcaires et de dolomies d'âge jurassique moyen et supérieur
- Système aquifère karstique d'âge jurassique et présence de basaltes fissurés sur les calcaires et les dolomies
- Système aquifère karstique d'âge jurassique
- Système aquifère karstique du Jurassique moyen et inférieur ou du Crétacé

Ressources : cartographie et logiciels : Biotopie, Biotopie et al. Développement durable : Prévention des risques : Inondations, tsunamis, etc.

Présent pour l'avenir

www.developpement-durable.gouv.fr

Sources : Corine Land Cover, RGC Cartographie : Biotopie, 2012



Fig. 3.1.2 Localisation des masses d'eau souterraine et des obstacles à l'écoulement sur le réseau de surface (source pour les barrages à l'écoulement : Réseau d'Obstacles à l'Écoulement – ONEMA – version juin 2011).

3.1.1.3. FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

- **Ressources en eaux souterraines (Fig. 3.1.2)**

Le sous-sol cristallin et métamorphique de la partie amont du bassin versant (de la source du fleuve jusqu'aux alentours de Ganges) ne présente globalement pas de nappe souterraine. Dans la partie sud de cette zone se trouvent de petites formations karstiques alimentées en eau par les précipitations et les pertes des ressources superficielles. Cette réserve est peu importante avec une alimentation limitée dans le temps, et de ce fait, les résurgences sont soumises à un tarissement rapide une fois les périodes pluvieuses passées.

Plus en aval (de Ganges jusqu'aux alentours de l'aquifère alluvial du fleuve), les grands domaines karstiques constituent des réservoirs importants. Leur alimentation en eau se fait *via* les infiltrations d'eau de pluie et les pertes des ressources superficielles. A l'inverse, les résurgences karstiques alimentent l'Hérault et ses affluents sur la commune de Puéchabon (source des Fontanilles), ou encore sur la commune de Causse de la Selle (source des Cent Fonts).

Enfin, la nappe alluviale de l'Hérault, de la Lergue, de la Peyne et de la Thongue s'étend de la sortie des Gorges de l'Hérault jusqu'à l'embouchure à Agde. C'est un milieu poreux constitué de sables et de graviers en étroite relation avec la ressource superficielle. En période de crue, le fleuve et les trois affluents alimentent la nappe, et inversement en période de basses eaux. Cet aquifère est par ailleurs en relation étroite avec l'aquifère astien (situé plus en profondeur) notamment au niveau de la commune Bessan sur environ 14km².

- **Ressources superficielles**

Les ressources en eaux superficielles se répartissent en deux catégories au niveau du bassin versant de l'Hérault : les lacs de retenue et les cours d'eau. Le régime hydraulique de ces derniers est caractéristique des cours d'eau méditerranéen, à savoir une forte variabilité saisonnière produisant des étiages sévères en période estivale, allant jusqu'à l'assèchement partiel à total de certains tronçons. Les étiages sont moins sévères dans la partie aval de l'Hérault et au niveau des gorges de la Vis du fait de la présence de résurgences karstiques permanentes. Les lacs de retenue au niveau des barrages des Olivettes et du Salagou soutiennent les étiages de la Lergue, de la Peyne et de l'Hérault.

- **Présence et influence des ouvrages hydrauliques**

La Fig. 3.1.2 illustre la forte présence d'obstacles à l'écoulement (plus de 300 ouvrages appartenant aux types barrages et seuils) présents sur le fleuve et ses affluents (Réseau d'Obstacles à l'Écoulement – ONEMA – version juin 2011). La partie amont de l'Hérault et les parties amont des principaux affluents comportent de nombreux seuils de 2 à 5 m. Ces seuils contribuent à l'écrêtement des crues durant les périodes printanières et automnales.

Au niveau des Gorges de l'Hérault, trois barrages (le barrage Bertrand à Causse-de-la-selle, le barrage Belbezet à Saint-Guilhem-le-Désert, et le barrage de la Meuse à Gignac), d'une hauteur de 8 à 15m et d'une capacité de 1 à 2Mm³, permettent d'écarter des crues faibles et modérées. Ils ont cependant peu d'influence en période de forte crue au regard de leur faible capacité.

La plaine de l'Hérault comporte douze barrages d'une hauteur de 2 à 5m présents sur le fleuve entre Gignac et Agde, de même que le barrage du Salagou (sur le Salagou, hauteur de 62m), et le barrage des Olivettes (sur la Peyne, hauteur de 35m). Les capacités de ces deux ouvrages sont respectivement égales à 102Mm³ et 4,1Mm³. Le règlement d'eau du barrage du Salagou ne prévoit aucun débit réservé (ou débit minimum biologique). Ce barrage relâche généralement le débit turbiné à la microcentrale, soit 500L/s en été. Le règlement d'eau du barrage des Olivettes prévoit quant à lui un débit réservé égal au débit entrant. Il relâche généralement entre 50 et 150L/s en été selon les besoins en eau des secteurs agricoles situés en aval.

Le fleuve et ses affluents comportent 22 centrales hydroélectriques qui n'influencent pas les ressources en eau d'un point de vue quantitatif à l'échelle du bassin versant puisqu'ils ne consomment pas d'eau : ils rendent au système toute l'eau qu'ils turbinent pour produire de l'électricité. Cependant à l'échelle locale, ils peuvent largement impacter les écosystèmes, en amont *via* la présence de retenues, et en aval *via* les débits relâchés puisque ces ouvrages ne turbinent pas le débit entrant de façon continue.

Les obstacles à l'écoulement présents sur le bassin sont pour certains équipés d'ouvrages de franchissement (passes à poissons) permettant la montaison voire la dévalaison des espèces migratrices. Cependant ces passes ne sont pas présentes sur la totalité des ouvrages, ce qui rend la migration des espèces difficile voire impossible.

3.1.1.4. LES PRELEVEMENTS EN EAU SUR LE BASSIN VERSANT DE L'HERAULT

D'après l'étude réalisée par le BIPE dans le cadre du projet Explore 2070, les prélèvements annuels dédiés à l'alimentation en eau potable (AEP), l'agriculture et l'industrie sont estimés à environ 69 millions de mètres cube (dont 53% proviendrait des ressources souterraines, données 2006).

- L'agriculture

Malgré des tentatives de diversification, la vigne domine largement le paysage agricole, occupant encore près de la moitié des surfaces cultivées du département de l'Hérault avec 530km². Au niveau du bassin versant, elle représente près de 40% de la Surface Agricole Utile (SAU). Suivent les céréales (3,5% de la SAU) et les vergers (0,3% de la SAU). L'élevage est également bien développé avec une production de plus de 10 000 UGB (Unité Gros Bétail).

Les prélèvements sont majoritairement issus des ressources superficielles. Ces prélèvements, compris entre 560 000m³ (janvier) et 5 608 000 m³ (juillet) pour une moyenne de 2 523 000 m³, sont effectués par BRL (Bas Rhône Languedoc) au niveau de Gourdiveau

(Aspiran au sud de Gignac) et par les Association Syndicales Autorisées (ASA) au niveau du canal de Gignac. Des prélèvements superficiels assez limités sont également réalisés au niveau du canal de Cazilhac (sud-ouest de Ganges). Au niveau de Gignac, le prélèvement est particulièrement important mais une grande partie est restituée plus en aval.

Les prélèvements en eau souterraine sont beaucoup moins importants, compris entre 4 000m³ (janvier) et 45 000m³ (juillet) pour une moyenne de 20 000m³. Ils sont réalisés principalement au niveau de la nappe alluviale de l'Hérault à Pézenas, Lavagnac et la Conseillère. Des prélèvements plus limités sur le karst du Larzac sud, Campestre, Blandas et Séranne ont également lieu.

De manière générale l'ensemble des prélèvements a principalement lieu entre le 15 avril et le 1^{er} septembre et affecte uniquement les débits des zones intermédiaires et aval du fleuve.

- **L'industrie**

Le bassin versant de l'Hérault ne comporte que trois carrières et six industries importantes spécialisées dans le textile, la métallurgie et les travaux des métaux, l'agroalimentaire et l'industrie chimique. Ce sont principalement les établissements viticoles qui dominent avec une cinquantaine de caves coopératives et cinq distilleries.

Les volumes d'eau prélevés en 2006 pour l'industrie sont faibles comparés à l'agriculture et l'AEP. Ils représentent 122 000 m³/mois, principalement issus des ressources superficielles. 60 000 m³/mois sont toutefois prélevés au niveau des ressources souterraines sur la nappe alluviale de l'Hérault. Les prélèvements annuels atteignent donc 2Mm³.

- **L'Alimentation en Eau Potable (AEP)**

La totalité de l'eau utilisée pour l'AEP provient du bassin versant de l'Hérault. Plus de 60 000m³/mois sont prélevés au niveau des ressources superficielles, et 3Mm³/mois dans les ressources souterraines, permettant d'alimenter la population du bassin versant (soit 36Mm³ annuels).

Les différents aquifères sont sollicités de manière très contrastée (SAGE, 2005) :

- **Le Domaine cristallin** : 14% de la production. Ces ressources sont utilisées localement au Vigan, à Avèze et dans les communes aux alentours. Cette masse représente un intérêt majeur local car les masses d'eau superficielles sont régulièrement déficientes à l'étiage. Certaines ressources supplémentaires pourraient être disponibles dans le secteur d'Avèze.
- **Les Karst** : 8 % de la production. Par rapports aux ressources disponibles, ces aquifères apparaissent peu exploités :
 - Les karsts du Larzac sud, Campestre, Blandas, Séranne et du Lodévois : Bien que peu sollicité pour l'instant (excepté dans le secteur de Lodève, la périphérie du lac de Salagou, de la Buèges au niveau des communes des Causses et des Gorges), ils sont considérés comme des masses d'eau patrimoniales à fort potentiel, notamment au niveau de la source des Cent Fonts.

- Le système karstique de la source du Lez et de l'Hérault est un aquifère qui déborde largement à l'Est du bassin versant de l'Hérault. Il est exploité à la source du Lez et au Boulidou. Cet aquifère est donc fortement sollicité dans sa partie Est (sources du Lez et de Fontbonne), et plus faiblement dans sa partie Ouest située dans le bassin versant de l'Hérault (secteur du pic Saint Loup, Saint Bauzille de Putois, Puechabon). Il est considéré comme une ressource d'intérêt majeur au niveau régional étant donné ses potentialités importantes. Ce karst, au même titre que celui du Larzac, a un intérêt écologique majeur (soutien d'étiage de certaines rivières telles que le Vidourle ou encore la Vis pour le karst du Larzac, régularité des débits des rivières) ;
- Le karst du pli de Montpellier (Aumelas) : Cet aquifère déborde à l'Est du bassin de l'Hérault vers le Bassin de Thau. Dans le bassin versant de l'Hérault, il est globalement peu exploité alors que la ressource semble être importante.
- **Les nappes alluviales** : Formé essentiellement par la nappe de l'Hérault, cet aquifère fournit 75% de l'eau potable issue du bassin versant. Cet aquifère subit une forte pression tout au long du fleuve, mais le prélèvement le plus important est situé à Florensac (second en volume sur le département de l'Hérault après la source du Lez). Ce prélèvement alimente principalement des communes qui se situent en dehors du périmètre de la masse d'eau (ouest Montpelliérain, Sète, Frontignan en partie). Le nombre d'habitants dépendant de l'eau du bassin versant est ainsi estimée à plus de 300 000, chiffre pouvant atteindre plus de 650 000 en période estivale. Le second captage est situé sur la commune de Pézenas, puis suivent les prélèvements de Cazouls d'Hérault, Bessan, St Thibéry, Montagnac, etc.

3.1.1.5. QUALITE DES EAUX DE SURFACE ET SOUTERRAINES

La qualité des ressources en eau du bassin versant de l'Hérault a été évaluée dans le cadre de l'élaboration du SAGE (2005)

- **Eaux de surface**

Concernant les nitrates, les différents cours d'eau du bassin comportent des concentrations faibles à négligeables. La qualité vis-à-vis des macro-polluants est globalement bonne hormis pour la Thongue (fortes concentrations en phosphore et nitrite, concentration basse en oxygène) et pour l'Hérault dans sa partie la plus en aval (forte élévation de la température de l'eau en période estivale, et ponctuellement concentrations élevées en ammoniac). La qualité des cours d'eau du bassin concernant les métaux lourds (tels que plomb, arsenic, zinc) est globalement bonne. L'origine de l'arsenic est principalement naturelle, alors que le plomb et le zinc proviennent de l'ancienne mine des Malines (à l'ouest de Ganges).

Les pesticides se retrouvent dans la majorité des cours d'eau à proximité de cultures agricoles, soit la partie aval du bassin. Les concentrations sont maximales de mars à août durant les épisodes de traitement des cultures, et peuvent également être ponctuellement plus fortes après des épisodes pluvieux du fait du lessivage des sols.

La qualité bactériologique est analysée vis-à-vis de la baignade et des activités aquatiques. Il en résulte une relative qualité pour l'ensemble des cours d'eau, la contamination n'étant pas nulle mais généralement non problématique pour la baignade et les activités aquatiques, même si des interdictions ponctuelles à la baignade sont décidées. Notons que la source majeure de la contamination bactériologique est d'origine anthropique, principalement au niveau des stations d'épuration suite à un débordement des eaux usées durant les épisodes pluvieux.

- **Eaux souterraines**

Les nitrates se retrouvent en concentration faible à très faible sur la grande majorité des ressources souterraines. Localement les concentrations en nitrates peuvent être plus importantes pour de petites nappes à proximité d'élevages et/ou de grandes cultures, mais les concentrations ne dépassent pas les limites de 50mg/L.

La contamination en pesticides est plus inquiétante. La partie amont du bassin est relativement exempte de pesticides puisque l'agriculture y est peu développée. Au niveau des zones intermédiaires et aval, les concentrations en pesticides augmentent de manière marquée à cause de la viticulture.

3.1.1.6. HABITATS ET ESPECES AQUATIQUES PRESENTS AU SEIN DU BASSIN VERSANT DE L'HERAULT

Le bassin versant de l'Hérault se caractérise par une biodiversité importante, s'expliquant en partie par la forte hétérogénéité de son territoire. Une telle diversité de milieux conduit à une multitude d'espèces présentes sur le territoire, dont une proportion non négligeable d'espèces endémiques et menacées. Parmi celles-ci nous pouvons citer l'écrevisse à pattes blanches, le triton marbré, le crapaud calamite ou encore la loutre.

- **Les zones piscicoles (Fig. 3.1.3)**

La zone amont est constituée de cours d'eau de faible profondeur, alimentés par les eaux froides du karst (les eaux karstiques sont à la température moyenne des températures annuelles de l'air, donc froides en été). Cette zone de tête de bassin présente un fort caractère d'isolement : les communications entre têtes de bassin sont limitées pour la plupart des espèces. En témoignent les radiations évolutives mises en évidence pour certains groupes et les enjeux de conservation subséquents, en particulier dans le Sud de la France (Crivelli, 1996 ; Keith et Allardi, 1996). Certaines espèces comme le Chabot de l'Hérault, endémique du bassin versant de l'Hérault, sont de fait tributaires de ces milieux pour leur survie.

Les populations de truites communes présentes dans cette zone sont dans un état de conservation perturbé (une ou plusieurs fonctions de leur cycle biologique est compromise). Les causes sont d'origine naturelle (étiages sévères, crues violentes et température estivale

marquée), et d'origine anthropique (prélèvements d'eau aggravant les étiages naturels). La Vis se distingue des autres cours d'eau de cette zone du fait de la très bonne qualité des eaux issues des résurgences karstiques (débit important toute l'année et températures relativement fraîches) Cette rivière fait donc figure d'exception pour les truites communes au sein du bassin versant.

La zone intermédiaire est caractérisée par la présence des cyprinidés rhéophiles. Cette zone correspond à des rivières dont le débit est plus lent et les températures plus élevées qu'en amont. Les fonds peuvent être profonds, sableux à vaseux. Les plantes rivulaires, immergées et submergées sont nombreuses.

Cette zone se scinde en deux parties :

- Les affluents caractérisés par des débits d'étiages faibles (assecs fréquents) et par des concentrations élevées en pesticides ;
- Les grands cours d'eau comme la Lergue aval et surtout l'Hérault, où les débits d'étiage plus importants offrent une quantité et une qualité d'habitat plus importante aux peuplements piscicoles.

La zone aval du fleuve se caractérise par la présence des Cyprinidés d'eaux calmes. Ces espèces de poissons se trouvent également dans les retenues des barrages, où les conditions hydrauliques sont comparables à l'aval du fleuve, à savoir une vitesse de courant faible à nulle et une importante masse d'eau. Cette zone apparaît comme globalement de bonne qualité pour les espèces de Cyprinidés d'eaux calmes qui y vivent.

Les poissons migrateurs effectuant une partie de leur cycle de vie au niveau du bassin versant trouvent des habitats relativement favorables. L'anguille est présente dans la partie aval du fleuve où elle remonte du printemps à la fin de l'été, afin d'y accomplir sa croissance (montaison - du stade civelle au stade juvénile) puis retourne en mer (dévalaison - grâce aux fortes inondations de l'automne et de l'hiver) pour effectuer sa reproduction (probablement dans la Mer des Sargasses). Les différents obstacles à l'écoulement peuvent être franchis par cette espèce, hormis quelques-uns qui limitent son aire de colonisation (par exemple le barrage Bladier-Ricard, SAGE 2005 ; SDVMA 2009). Bien que les cours d'eaux aval du bassin soient favorables aux anguilles, les observations montrent une diminution de la densité depuis plusieurs années. La surpêche passée semble avoir largement contribué à la réduction des stocks de juvéniles.

L'alose, les lamproies marines et fluviatiles ont une migration dite anadrome (soit à l'inverse de la migration de l'anguille dite catadrome), elles vivent en mer et viennent en eaux douces pour se reproduire. Ces espèces sont également bloquées par l'ouvrage Bladier-Ricard, et doivent se contenter des frayères situées en aval de cet obstacle, où la qualité est réduite et la capacité d'accueil limitée (SAGE 2005, SDVMA, 2009, Level *et al.*, 2001). Leur aire de répartition a donc considérablement diminué et se trouve limitée à la partie aval des cours d'eau.

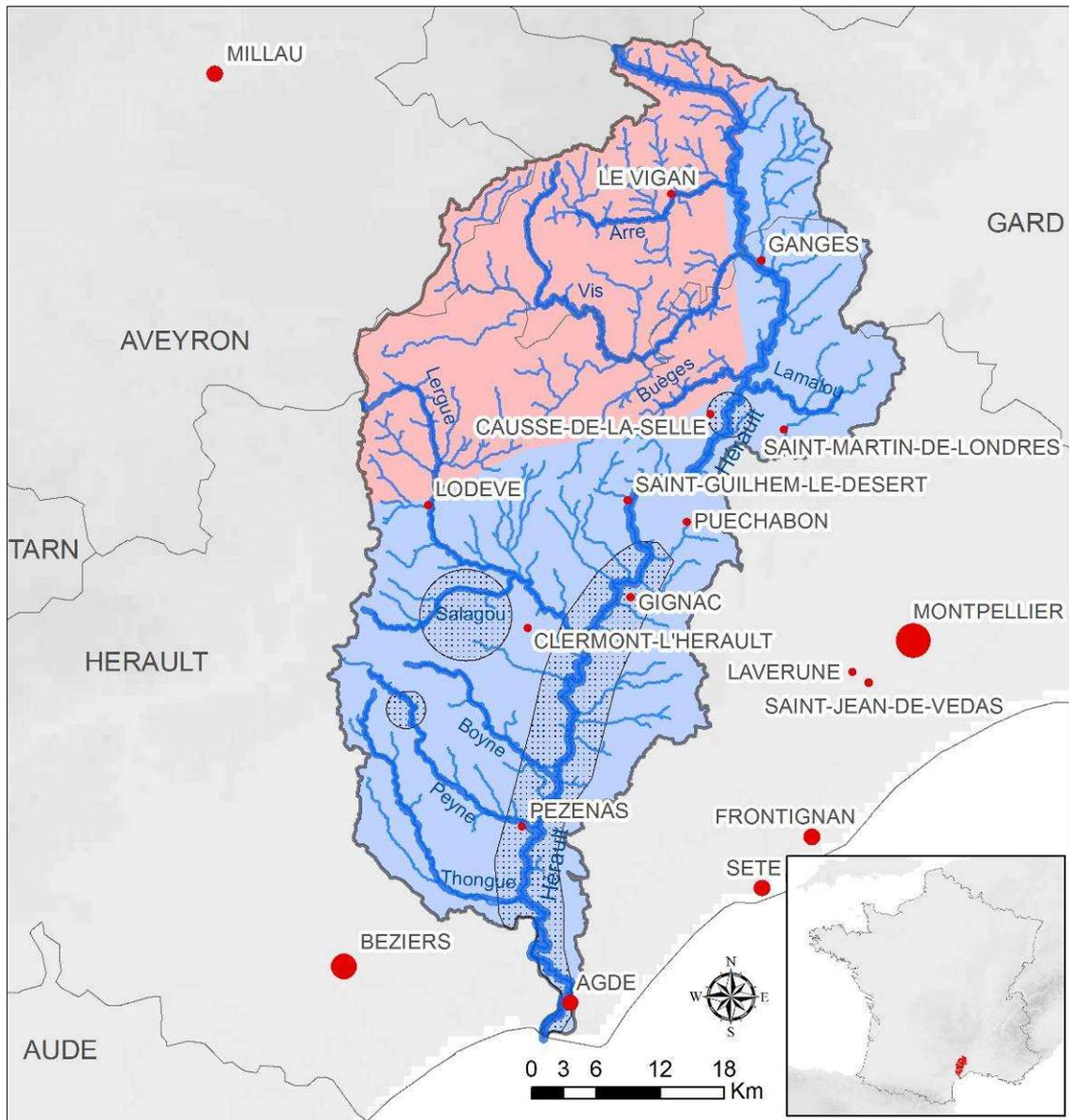
- **Les karsts et les sources**

Les karsts du causse de la Selle et de l'Hortus sont reconnus parmi les 20 karsts les plus riches au monde en espèces stygobies (espèces vivant strictement dans les milieux souterrains). Les organismes stygobies sont des espèces au cycle de vie et à la physiologie originales. Elles ont développé, au cours d'une longue évolution (généralement plusieurs dizaines de millions d'années), des caractéristiques biologiques et des capacités physiologiques qui répondent aux contraintes que leur impose le milieu souterrain. Ces contraintes correspondent tout d'abord à une absence de lumière donc de production primaire. Sans ce maillon trophique élémentaire, habituel point d'ancrage de la chaîne alimentaire, l'écosystème souterrain est contraint à l'hétérotrophie et les organismes qui y vivent doivent s'adapter à la rareté des ressources énergétiques et à l'allotrophie (transport des ressources énergétiques depuis la surface). Les eaux souterraines profondes sont également appauvries en oxygène et les organismes ont à faire face à une exposition fréquente à l'hypoxie. Les modifications anthropiques de l'environnement souterrain constituent une pression supplémentaire que les espèces doivent affronter et qui s'applique suivant une chronologie et une vitesse en dysharmonie avec leurs capacités biologiques.

Comme toute autre espèce, chacune des formes stygobies est caractérisée par une aire de distribution qui lui est propre et en dehors de laquelle elle est absente. Cette aire de distribution est contrôlée par la valence écologique de l'espèce (ensemble des caractéristiques environnementales en adéquation avec son développement) et par ses capacités de dispersion. Les capacités de dispersion sont elles-mêmes liées à la biologie de l'espèce (fécondité), à sa mobilité (propagation active) ou à une propagation passive, comme la dispersion d'amont en aval d'une rivière par l'écoulement du flux d'eau, ou les phénomènes de phorésie (processus par lequel un invertébré s'attache à un organisme pour émigrer d'un site à un autre). La mobilité des organismes souterrains est très variable d'un groupe systématique à l'autre. Ainsi chez les macro-crustacés de nombreuses formes sont pratiquement aussi mobiles que leurs homologues de surface (Isopodes, Amphipodes), mais les capacités de dispersion passives sont très réduites par rapport à ce que l'on observe en surface, en raison de la forte fragmentation qui caractérise les réseaux souterrains (surtout les réseaux karstiques). Cette faible connectivité se traduit par un compartimentage et un isolement de différentes populations d'une même espèce. Puis au fil du temps, par des phénomènes de spéciation elle aboutit à la formation d'espèces distinctes et à distribution géographique très étroite (espèces endémiques). L'environnement souterrain est celui qui comporte le plus fort taux d'endémisme au monde (Gibert et Deharveng, 2002). En France plus de 70% des espèces sont endémiques de France et la proportion d'endémiques stricts (espèces présentes sur un seul site) est maximale dans les régions méridionales (Dole-Olivier *et al.* 2005).

Sur le site des Cent Fonts, un inventaire réalisé en 2006 porte à 44 le nombre total d'espèces recensées c'est-à-dire potentiellement présentes. Bilan qui positionnerait ce système parmi les aquifères les plus riches au monde. Par ailleurs, la plupart de ces espèces sont endémiques. On citera notamment la Bythinelle de navacelles (*Bythinella navacellensis*) ou la moitessierie trompette (*Henrigirardia wienneni*) qui est par ailleurs considérée par l'UICN comme « en danger critique d'extinction » en raison des pressions qui pèsent sur la ressource en eau (prélèvement pour l'alimentation en eau potable).

Pour les espèces crénicoles (espèces vivant au niveau des sources), il faut ajouter pour l'Hérault *Bythinella eurystoma*, *Bythinella cebennensis*, *Belgrandiella dunalina* (une espèce au statut taxonomique compliqué), *Belgrandia gibberula*. Toutes sauf la dernière sont endémiques du bassin versant de l'Hérault.



Légende

Agglomérations Peuplements piscicoles

Nb Habitants	■	Domaine intermédiaire
● 1 - 86	■	Domaine salmonicole
● 87 - 430	■	Domaine cyprinicole
● 431 - 722	—	Réseau hydrographique
● 723 - 2516	□	Bassin Versant de l'Hérault

Ressources, territoires et paysages
 Énergie et climat, Développement durable
 Prévention des risques, Infrastructures, Transport et mer
 Présent pour l'avenir
 www.drd.donnees-herault.gouv.fr

Sources : Dires d'experts, RGC Cartographie : Biotope, 2012



Fig. 3.1.3 Localisation des domaines piscicoles au sein du bassin versant de l'Hérault

3.2. SYNTHÈSE DES PROJECTIONS CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT A L'HORIZON 2070

3.2.1. PROJECTIONS CLIMATIQUES

D'après les différents scénarios et études concernant le changement climatique, l'augmentation de la température à l'horizon 2070 serait comprise entre +2,1°C et + 4,6°C. Selon le scénario A1b, cette augmentation est en moyenne égale à 2.2°C [1.6°C – 2.7°C]³ sur le bassin versant de l'Hérault (Météo France dans le cadre du projet Explore 2070, 2012). Les précipitations subiraient une réduction comprise d'environ 40 mm soit environ 3% [-17% ; 5%] des précipitations actuelles moyennes (1267 mm). L'évapotranspiration devrait également subir des modifications importantes. Les projections selon le scénario A1b prédisent une augmentation d'environ 17% [11% ; 23%] soit une augmentation moyenne annuelle de 150 mm.

L'augmentation des températures estivales devrait être plus marquée que celle des températures hivernales et printanières. Conjointement, la saisonnalité des précipitations devrait être plus prononcée, caractérisée par des précipitations plus marquées en période humide et par des périodes sèches plus longues et plus intenses. La fréquence des événements extrêmes devrait également s'accroître : les canicules seraient plus fréquentes et les crues plus marquées, entraînant l'augmentation des apports en sédiments au niveau des lagunes littorales (risque de comblement)⁴.

3.2.2. EVOLUTION DU TRAIT DE COTE ET DU BISEAU SALE

Selon les scénarios, le niveau marin devrait s'élever de 0,18 à 0,59 mètre par rapport à la période 1980-1999 d'ici un siècle (GIEC, 2007). L'élévation du niveau de la mer aura pour conséquence une progression du trait de côte et donc du biseau salé vers les terres, entraînant la submersion directe de certains captages par l'eau de mer et la salinisation des ressources souterraines. Dans le bassin versant de l'Hérault, la nappe astienne est particulièrement vulnérable à ce phénomène. (Préfecture de région Languedoc-Roussillon, 2008 ; Hérivaux *et al.*, 2010).

³ Valeur médiane [valeur minimale ; valeur maximale] prédite par 7 modèles climatiques selon scénario A1b sur la période 2046 - 2065.

⁴ L'ensemble de ces éléments constituent une synthèse de différentes sources disponibles (ADEME, 2011 ; MEDCIE, 2008 ; GIEC, 2007 ; Météo France dans le cadre du projet Explore 2070, 2012).

3.2.3. PROJECTIONS HYDROLOGIQUES

Au niveau d'Adge (embouchure de l'Hérault), les débits moyens annuels diminueraient d'environ 4% [-31% ; +2%] comparativement aux conditions actuelles (29,2m³/s). Hormis la période hivernale où les débits seraient plus importants (19% [-38% ; +58%] en janvier, 9% [-58% ; 102%] en février) par rapport aux conditions actuelles, les huit autres mois devraient connaître une diminution des débits de l'ordre de 40% par rapport à la situation actuelle. Des tendances similaires sont prédites plus en amont comme par exemple au niveau du Causse de la Selle (réduction des débits moyens annuels de l'ordre de 4% [-32% ; 12%]) ou encore à Laroque (réduction des débits moyens annuels de l'ordre de 5% [-31% ; 13%]). De la même manière, les débits en période étiage (périodes de basses eaux) seraient fortement réduits. Par exemple, à Agde, le débit mensuel d'étiage de retour deux ans (QMNA2) subirait une réduction de 32% [-40% ; -13%] ; le débit moyen journalier des dix jours consécutifs les plus secs se caractériserait par une baisse de 19% [-22% ; -11%].

Les projections concernant les débits de crue prédisent également une réduction, mais les résultats sont assortis d'une forte variabilité selon les modèles utilisés.

Ainsi, les difficultés rencontrées aujourd'hui sur certains territoires de la région pourraient se généraliser : réduction des débits moyens, accroissement des étiages sévères, recharge plus difficile des nappes phréatiques⁵.

3.2.4. EVOLUTION DU CONTEXTE SOCIODEMOGRAPHIQUE AU SEIN DU BASSIN VERSANT DE L'HERAULT

3.2.4.1. EVOLUTION DE LA DEMANDE EN EAU POTABLE

La région Languedoc-Roussillon connaît actuellement la plus forte croissance démographique à l'échelle nationale (1% de croissance démographique par an). En 2005, la région comptait 2,5 millions d'habitants. En 2030, cette population pourrait atteindre 3,1 à 3,4 millions d'habitants (INSEE, 2007). Au niveau du bassin versant de l'Hérault, les projections sociodémographiques prédisent une augmentation de la population du bassin versant de l'ordre de 85% : la population actuelle de 130 000 habitants pourrait atteindre 241 000 habitants en 2070⁶. On note par ailleurs une importante fluctuation saisonnière sur le territoire. D'environ 130 000 habitants en hiver, on passe à 325 000 habitants de mai à septembre ; cet accroissement concerne principalement la zone côtière.

La consommation d'eau potable devrait donc fortement évoluer au regard de cette forte croissance démographique. Les besoins supplémentaires sont estimés en moyenne à 9

⁵ Données produites par BRLi et le CEMAGREF dans le cadre du projet Explore 2070

⁶ Données produites par le BIPE dans le cadre du projet Explore 2070

Mm³ annuels à prélever en majeure partie sur les eaux souterraines (soit une augmentation d'environ 25%)⁷.

3.2.4.2. EVOLUTION DES BESOINS D'IRRIGATION DANS LE BASSIN VERSANT DE L'HERAULT

Depuis quelques années, la viticulture héraultaise est confrontée à une crise profonde et multifactorielle liée à une baisse globale de la consommation en vin et un accroissement de la concurrence sur le marché intérieur et extérieur. L'accroissement des températures et la réduction des précipitations ces dernières années ont par ailleurs donné lieu à une réduction notable de la qualité et des rendements. Dans ce contexte, l'irrigation est considérée par la majorité des viticulteurs comme une solution pour maîtriser la qualité des vins et maintenir un rendement important. L'accès à la ressource en eau apparaît donc comme un enjeu majeur pour maintenir ce secteur d'activité dans la région. Une étude réalisée en 2008 par le BRGM (Maton, 2008) souligne un accroissement de 8% des besoins d'ici à 2020 (année de référence : 2000, augmentation de 3Mm³), essentiellement du à l'augmentation des surfaces en vignes irriguées (et l'augmentation des surfaces en grandes cultures). Ce scénario tendanciel⁸ est cependant nuancé par deux scénarios extrêmes (scénarios « déclin » et « regain » de l'agriculture) prédisant une diminution de 22% et une augmentation maximale de 33% des besoins d'ici 2020. L'étude réalisée dans le cadre du projet Explore 2070 prévoit quant à elle une légère baisse de la demande en eau comprise -0,7 et -10%, se rapprochant ainsi du scénario « déclin » présenté ci-dessus (arrachage des vignes pour reconversion en surfaces urbanisées, maintien de quelques AOC de qualité).

3.2.4.3. EVOLUTION DES BESOINS EN EAU DANS LE SECTEUR INDUSTRIEL

Dans la région, le développement de l'industrie est attendu dans le secteur tertiaire, BTP, services, technologies de pointe. La construction de nombreux parcs d'activité, la disponibilité du foncier et la proximité des voies de communication devraient favoriser l'implantation de ces entreprises. Cependant, les prélèvements en eau par ce secteur d'activité devraient fortement diminuer dans les décennies à venir (réduction de 68% des prélèvements, également répartie sur les ressources souterraines et superficielles)⁹. En effet, depuis les années 70, une diminution marquée des prélèvements d'eau a été observée liée à une meilleure gestion des ressources (pompage du strict nécessaire et augmentation de la

⁷ Données produites par le BIPE dans le cadre du projet Explore 2070

⁸ Scénario tendanciel : développement de l'irrigation sur les AOC et certains vins de pays, scénario « déclin » : développement de l'irrigation limité sur quelques AOC, scénario « regain » : développement de l'irrigation sur tous types de vins.

⁹ Données produites par le BIPE dans le cadre du projet Explore 2070

réutilisation des eaux usées après traitement). Ces projections s'appuient donc sur l'idée selon laquelle les industries devraient encore améliorer cette gestion.

3.2.4.4. SYNTHESE

Ainsi pour conclure, les prélèvements destinés à l'AEP devraient augmenter de 25% à l'horizon 2070, alors qu'ils devraient diminuer de 68% pour le secteur industriel. Les prélèvements destinés à l'agriculture devraient rester globalement stables même si une faible diminution est tout de même attendue. De manière générale, la demande supplémentaire annuelle devrait être égale à 6Mm³. Les principales masses d'eau pouvant être mobilisés pour répondre à ces besoins concernent l'Hérault par modification de gestion du barrage du Salagou et/ou amélioration de l'efficacité sur des prélèvements amonts comme au niveau du canal de Gignac (transformation des réseaux de canaux en conduite). Les karsts du Larzac et de la source de Lez présentent également des ressources exploitables (au niveau de la source des cent Fonts par exemple). La nappe alluviale, très exploitée notamment au niveau de Florensac, présente également un potentiel important. Cependant les conséquences sur le débit du fleuve ainsi que sur la nappe astienne (risque d'intrusion saline) restent méconnus.

Différents projets de sécurisation de l'approvisionnement en eau dans la région sont en cours d'élaboration. Un adducteur long de 16km d'1,20 m de diamètre a ainsi vu le jour entre le canal Philippe Lamour (eau du Rhône) et Fabrègues à l'ouest de Montpellier. Ce contournement permet d'alimenter en eau potable 25 communes entre Montpellier et Agde, et plus de 500 000 personnes en période estivale. Ce dispositif devrait être prolongé dans les années à venir en maillant les réseaux alimentés par le Rhône avec ceux alimentés par l'Orb, l'Hérault et l'Aude (projet AQUA DOMITIA).

Enfin, afin de préserver la ressource en eau, différentes actions sont également envisagées. Elles incluent la réduction des consommations individuelles d'eau potable, l'adaptation des pratiques d'irrigation (goutte à goutte) et la rénovation des réseaux de distribution (amélioration des rendements). Concernant ce dernier point, des études ont été menées par le département de l'Hérault sur la qualité des réseaux de distribution de l'eau en comparant les volumes prélevés et les volumes facturés à la population. Les résultats soulignent un rendement de l'ordre de 75% (72% sans Montpellier). Réduire les fuites des portions de réseau les plus vétustes semble donc une étape importante permettant d'économiser la ressource.

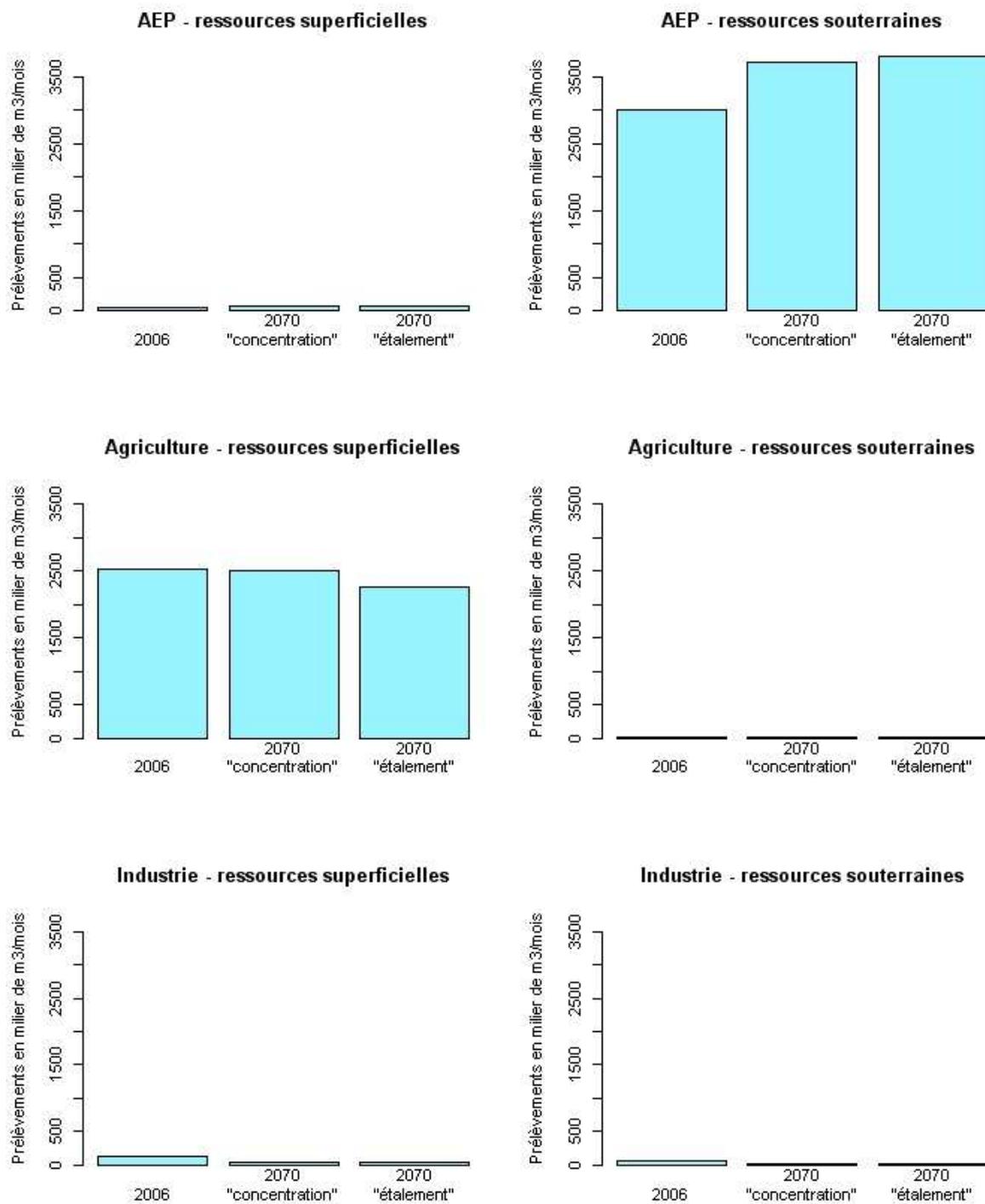


Fig. 3.2.1 Prélèvements en eau en situation actuelle et à l'horizon 2070 pour les différents secteurs d'activité (source : BIPE dans le cadre du projet Explore 2070, 2012)

3.2.5. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DES PRESSIONS ANTHROPIQUES SUR LES MILIEUX AQUATIQUES AU SEIN DU BASSIN VERSANT DE L'HERAULT

Les pressions anthropiques augmentent la vulnérabilité des milieux aquatiques au changement climatique. En effet, la réduction des débits annuels moyens et d'étiage, liés à une augmentation de l'évapotranspiration et une réduction des précipitations, sera accentuée par une augmentation des prélèvements en eau au niveau des différentes stations de pompage.

3.2.5.1. IMPACT SUR LES POPULATIONS DE POISSON

D'après les résultats obtenus à l'échelle nationale¹⁰, les espèces répondraient à l'élévation de la température par une remontée le long du gradient amont-aval (BIOTOPE, 2012). Par conséquent, les espèces inféodées aux tronçons les plus amont pourraient être particulièrement vulnérables puisque la disponibilité des habitats favorables tendrait à se réduire. Les espèces des parties intermédiaires conserveraient globalement la même surface d'habitat favorable vis-à-vis du changement climatique principalement *via* une légère remontée le long du gradient amont-aval. Enfin les espèces des parties aval des cours d'eau seraient globalement favorisées par le changement climatique (extension des habitats favorables).

Au niveau du bassin versant de l'Hérault, les espèces du domaine salmonicole seront principalement affectées par le changement climatique car les prélèvements anthropiques sont limités dans la partie Nord-Ouest du bassin versant. Des étiages marqués et même des assècs périodiques sont fréquents sur la Virenque, le burle du Jaoul, l'Arre et l'Hérault en amont de Ganges (QMNA5 inférieur au égal au 1/10 du module excepté à la confluence de l'Hérault avec la Vis¹¹), s'aggravant très probablement dans le futur. A l'inverse, la Vis devrait être relativement épargnée car alimentée principalement par une résurgence karstique au niveau du moulin de la Foux (sous réserve qu'aucun prélèvement ne soit réalisé à ce niveau là pour l'AEP dans le futur). Les espèces présentes dans ce secteur, notamment la truite commune et le chabot de l'Hérault présentent toutes deux une très forte sensibilité à l'élévation de la température des eaux, à la réduction des débits et aux événements climatiques extrêmes. La réduction des habitats favorables à l'amont, associée à une faible capacité de dispersion pour le chabot, les classent comme très vulnérables au changement climatique. Ces résultats doivent cependant être nuancés car la présence de résurgence karstique tamponnera dans une certaine mesure les variations des débits et des températures, créant des zones refuge pour ces espèces (sous réserve d'une augmentation limitée des températures).

¹⁰ Résultats obtenues dans le cadre de l'étude nationale réalisée par BIOTOPE (Projet Explore 2070)

¹¹ Le syndicat mixte du bassin du fleuve Hérault a engagé une étude en 2008 afin de définir les débits minimum garantissant le maintien de la vie aquatique. Les résultats préliminaires sont présentés sur le site du SAGE Hérault.

Les cyprinidés rhéophiles, caractéristiques des zones intermédiaires (de la zone à ombre à la zone à barbeau) sont moyennement vulnérables à l'élévation de la température des eaux. Par ailleurs, certaines de ces espèces, tel que le barbeau méridional, survivent aux étiages forts et mêmes aux assecs temporaires grâce à la présence de vasques d'eau. Dans la zone amont du domaine intermédiaire (en aval de Gange), la réduction des débits pourrait directement impacter le barbeau fluviatile et le blageon, favorisant leur remontée au niveau de la Vis, de l'Arre ou encore la zone amont de l'Hérault (au-delà de Notre Dame de la Rouvière). En outre, les prélèvements dans ce secteur restent minimes bien que la présence d'une station de pompage au niveau de Ganges ainsi que la construction d'un certain nombre de retenues collinaires dans la région de Saint André de Majencoule (production d'oignons doux) puissent à terme accroître la vulnérabilité des espèces présentes dans cette zone.

Plus au sud, au niveau des gorges de l'Hérault ou encore dans le cas de la Peyne, de la Thongue, de la Lène, de la Lergue, de la Boyne et de la Dourbie, les pressions climatiques et anthropiques devraient être plus marquées. En effet, dans ces zones, les débits d'étiage (QMNA5) sont déjà largement inférieurs aux débits réservés (contrairement aux zones situés entre Ganges et Gignac), les étiages sont sévères et les assecs fréquents pour les petits cours d'eau. La réduction annoncée des débits et l'augmentation de la température de l'eau, associées à un accroissement des prélèvements à Gignac, au niveau des karsts du Larzac, et de la source du Lez, pourraient accroître la vulnérabilité des cyprinidés rhéophiles (barbeau fluviatile, hotu, vandoise). La difficulté d'accéder à des zones situées plus en amont limite également leur survie. Le déclin lent de certaines de ces espèces est de fait attendu. Au niveau des petits affluents, des assecs prolongés et de plus en plus sévères entraîneront probablement la disparition des quelques espèces présentes dans ces milieux tels que le barbeau méridional.

Enfin le domaine cyprinicole concerne toute la partie aval du fleuve Hérault (de Gignac à Agde) ainsi que les deux lacs de retenue au niveau des barrages du Salagou et des Olivettes. Les espèces inféodées à ces milieux devraient de manière générale être favorisées par une augmentation de la température des eaux. Bien que les débits d'étiage (QMNA5) soient déjà largement inférieurs aux débits réservés (mesurés à Agde, Montagnac et Gignac), le maintien de ces espèces ne devrait pas être remis en question dans le futur. Des situations de crise sont cependant à attendre en cas d'élévation forte des températures de l'eau et/ou de pics de pollution (réduction de l'effet de dilution) entraînant une mortalité ponctuelle. Au niveau des lacs de retenue, une augmentation du marnage est prévue afin d'accroître la disponibilité des ressources en eau durant la période estivale. Ce marnage devrait *a priori* avoir un impact limité sur la faune et la flore à condition que le plan d'eau soit en mesure de remonter chaque hiver aux côtes de gestion actuelle, ce qui dans le contexte du changement climatique pourrait ne pas être le cas.

Concernant l'anguille, les résultats obtenus à l'échelle nationale soulignent une faible vulnérabilité au changement climatique. Sa bonne capacité de dispersion lui permettrait d'atteindre une partie des zones qui lui seraient nouvellement favorables à l'horizon 2070. Bien que l'Alose feinte n'ait pas été étudiée dans le cadre de cette étude, Lassalle et Rochard (2009) prédisent, tout comme pour l'anguille, un accroissement de l'aire de répartition de cette espèce sous hypothèse de changement climatique (sous réserve d'une bonne qualité

physique des frayères). Les pressions anthropiques, et notamment la rupture de la continuité, sont donc les principales menaces s'exerçant sur ces espèces. Dans le bassin versant de l'Hérault, divers aménagements ont été effectués ces dernières années (chaussée d'Agde en 2000, microcentrale de Carabotte en 2011) afin d'assurer la continuité écologique. Par ailleurs des propositions ont été établies par le Schéma Départemental pour la restauration, la préservation et la mise en Valeur des Milieux Aquatiques de l'Hérault (SDVMA, 2009) au niveau du :

- Barrage Bladier-Ricard à Bessan : Réaménagement du dispositif actuel pour le rendre efficace pour l'Anguille et l'Alose. L'ouvrage constitue aujourd'hui la limite de migration pour l'Alose.
- Barrage du Moulin de St Thibéry : Mise en place d'un dispositif de franchissement adapté pour l'Anguille et l'Alose.
- Barrage de Cazouls d'Hérault : Mise en place d'un dispositif de franchissement adapté pour l'Anguille et l'Alose. Le projet de renouvellement de concession du barrage de Cazouls d'Hérault devrait intégrer la mise en oeuvre d'une passe à Anguilles sur l'ouvrage.
- Seuil de Bélarga et barrage « Gare d'Aspiran » : Mise en place d'un dispositif de franchissement adapté pour l'Anguille et l'Alose.

Ces mesures devraient permettre de rétablir la circulation de ces espèces jusqu'à Gignac (barrage de la Meuse). Par ailleurs, les plans de gestion des migrateurs ainsi que l'application du règlement Européen de 2007 devraient aboutir à moyen-terme à la reconstitution des stocks.

Pour conclure, la truite commune et le chabot de l'Hérault devraient être particulièrement vulnérables au changement climatique. Plus en aval, c'est l'interaction entre les pressions anthropiques et climatiques qui engendre un risque élevé pour les cyprinidés rhéophiles. Les potentialités de dispersion en amont limiteront probablement la survie de ces espèces sur le long-terme. Les espèces du domaine cyprinicole devraient peu souffrir du changement climatique à condition que les prélèvements destinés à l'AEP ou l'irrigation respectent le débit minimum biologique. Enfin les espèces migratrices devraient être favorisées par le changement climatique à condition que soient mises en place les mesures permettant de rétablir leur libre circulation le long du cours d'eau.

3.2.5.2. IMPACT SUR LA FAUNE STYGOBIE

Le changement climatique ainsi que les pressions anthropiques peuvent impacter la faune stygobie présentes au niveau des karsts du Larzac et de la source du Lez à plusieurs niveaux (Ladouche *et al.*, 2006) :

- L'abaissement des niveaux d'eau à long terme (lié aux changements climatiques) et à court terme (lié au pompage de la nappe) pourraient entraîner :

- Une exondation prolongée d'une partie du massif face à laquelle très peu d'espèces disposent de stratégie de résistance : bien qu'il soit actuellement difficile de statuer sur la survie de la faune dans de telles conditions (réduction importante de la surface et du volume des habitats nécessaires au développement des organismes), on sait que certaines espèces comme *Niphargus virei* sont capables de construire des terriers dans lesquels ils s'enferment pour résister à la dessiccation. Cependant, les formes interstitielles (genres *Microcharon*, *Pseudectinosoma* etc..) ne présentent pas ces caractéristiques. Aucune étude, à ce jour, n'a été réalisée permettant d'évaluer l'impact de l'abaissement durable du niveau piézométrique sur les communautés stygobies ;
 - Une intrusion d'eau de surface par le lit de l'Hérault par différentes failles pouvant véhiculer des organismes et des bactéries de surface, de la matière organique et des polluants divers au sein du conduit karstique, entraînant une modification du fonctionnement écologique du système.
- L'entraînement direct d'individus dans les turbines des pompes. Si le taux d'entraînement est trop important et dépasse un seuil limite, les populations encourent un risque d'extinction. Cependant, des comptages pré- et post-pompage réalisés en 2006 sur le karst des Cent Fonts n'ont pu mettre en évidence un tel phénomène. L'impact est *a priori* temporaire et ne semble pas menacer cette faune. Une confirmation de ces résultats est cependant nécessaire ;
 - L'extinction de certaines espèces en lien avec l'augmentation des températures de l'eau : bien que sur une échelle de temps courte, la température des systèmes souterrains ne varie pas, le changement climatique pourraient sur le long-terme influencer significativement les conditions thermiques. Certaines études tendent à démontrer l'existence d'adaptation complexe chez les stygobies au regard des conditions thermiques (Issartel, 2007). Néanmoins les stygobies étant généralement sténothermes (faible capacité d'adaptation à des variations de températures et risque de mortalité élevée aux températures infra-optimales), ces espèces pourraient présenter une vulnérabilité élevée à une modification des conditions thermiques. Ceci reste à confirmer, l'état des connaissances sur ces organismes étant particulièrement fragmentaire.

4. MESURES D'ADAPTATION

Le scénario climatique A1b retenu dans cette étude, comme tous les scénarios socio-économique d'émission de gaz à effet de serre, est soumis à de fortes incertitudes. S'y ajoutent, comme déjà évoqué, les incertitudes associées à chacune des étapes de l'analyse (incertitudes sur les données piscicoles, sur la modélisation climatique globale, sur la

modélisation de la niche écologique des espèces,...). Malgré tout, la vulnérabilité d'au moins une partie des espèces aquatiques étudiées face au changement climatique est une certitude, sans que l'on puisse évaluer précisément ce degré de vulnérabilité. Il est donc urgent de s'appuyer sur les résultats obtenus pour proposer des mesures d'adaptation afin d'anticiper les conséquences probables du changement climatique. D'autant plus que, comme mis en évidence dans l'analyse sur le bassin de l'Hérault, les pressions anthropiques accentuent ce phénomène.

4.1. MAINTIEN ET RESTAURATION DES CONTINUITES ECOLOGIQUES ET DE LA QUALITE DES HABITATS AQUATIQUES

Les résultats obtenus montrent à quel point la circulation des espèces est un point clé dans leur adaptation au changement climatique. En effet, le réchauffement prévu par le scénario A1b entraîne un déplacement de l'habitat favorable de nombreuses espèces vers l'amont le long du réseau hydrographique. Pour certaines espèces cryophiles (saumon atlantique par exemple), l'aire d'habitat favorable projeté se retrouve cantonnée à des zones refuges en tête de bassin. Toutes les espèces dont les capacités de dispersion et de franchissement sont bonnes ne pourront donc coloniser ces nouvelles zones uniquement si la continuité écologique au sein du réseau est rétablie. Le maintien des continuités écologiques existantes, et la restauration de continuités actuellement infranchissables, serait donc un levier important pour permettre l'adaptation de nombreuses espèces. Pour certaines d'entre elles (truite commune, saumon), ce serait même potentiellement une question de maintien de l'espèce dans les bassins métropolitains.

La restauration des continuités écologiques peut être opérée à l'aide de différents outils. Il s'agit en premier lieu de l'effacement des obstacles (arasement de seuils et l'effacement de barrages). Cet outil se heurte certes à de possibles difficultés de faisabilité, du fait des considérations socio-économiques qui lui sont associées (pour les barrages principalement), mais reste une opportunité intéressante au vu du défi posé, du fait de son efficacité et de son coût. Le choix des obstacles devrait se faire en priorisant en fonction du niveau d'enjeu (en fonction des espèces et des bassins versants concernés), des avantages écologiques attendus et de la fonctionnalité de l'ouvrage (et de l'évolution de cette fonctionnalité sous condition de changement climatique). Le deuxième outil est la mise en place de passes à poissons. Cela doit se faire de manière opportune, en choisissant en priorité les espèces qui en bénéficieraient le plus (espèces à faibles capacités de franchissement et fortement menacées par le changement climatique), et en choisissant les ouvrages qui sont des verrous stratégiques au sein du réseau hydrographique. La restauration des continuités écologiques est d'ores et déjà un des objectifs de la Directive Cadre sur l'Eau (DEC, 2000); la circulaire DCE 2005/12 relative à la définition du « bon état » mentionne ainsi que « la continuité de la rivière est assurée par le rétablissement des possibilités de circulation

(montaison et dévalaison) des organismes aquatiques à des échelles spatiales compatibles avec leur cycle de développement et de survie durable dans l'écosystème ». La transposition de la DCE dans la loi française par la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA, 2006) précise les différents outils réglementaires mis en place dans ce cadre sur le territoire métropolitain.

Par ailleurs, la résilience des populations au changement climatique sera d'autant meilleure que la qualité et la quantité de leur habitat seront préservées. Par exemple, il est largement reconnu que les effets de la toxicité aigue de différentes substances toxiques sur les espèces aquatiques sont augmentés dans un contexte de réchauffement de l'eau. Toutes les mesures permettant de maintenir ou de restaurer les habitats aquatiques sont donc dans le sens d'une adaptation au changement climatique. Les exigences de la DCE d'atteinte du bon état chimique et écologique des masses d'eau sont déjà un premier pas dans ce sens. Cependant concernant l'état chimique, la législation ignore encore les substances dites « émergentes » comme les médicaments (hormones, bêtabloquants) ou les nouveaux pesticides et leurs produits de dégradation. La réduction voire l'élimination de ces substances dans l'environnement pourrait participer de l'adaptation au changement climatique en améliorant la résilience des populations aquatiques.

4.2. MAITRISE DU RECHAUFFEMENT ANTHROPIQUE DES EAUX

Le réchauffement des eaux semble inéluctable dans le cadre des changements climatiques annoncés. Toute mesure susceptible de limiter un échauffement supplémentaire résultant des activités anthropiques permettrait donc d'éviter un effet cumulatif avec ce réchauffement global.

En premier lieu, il s'agit de préserver toutes les fonctionnalités hydromorphologiques naturelles des cours d'eau qui permettent de limiter l'échauffement de l'eau et/ou de maintenir un taux d'oxygène dissous élevé, ou de restaurer ces fonctionnalités quand elles ont été perdues. Ainsi il est recommandé de préserver les ripisylves qui jouent un rôle dans la régulation du régime thermique des cours d'eau (Rutherford et al., 1997) ; de restaurer l'hétérogénéité du lit mineur afin de favoriser des conditions d'oxygène dissous satisfaisantes ; de supprimer les zones lenticules artificielles (seuils) qui favorisent le réchauffement des eaux.

Un second niveau d'action est le renforcement de la réglementation visant à éviter le réchauffement direct ou indirect des eaux. Le réchauffement direct concerne principalement les rejets d'eaux chaudes (notamment eaux issues des circuits de refroidissement des centrales nucléaires, eaux issues des retenues en période estivale). L'encadrement de ces rejets doit donc se poursuivre : température maximale, débit maximal, période de l'année autorisée, etc. Actuellement les rejets thermiques sont réglementés par la directive européenne sur la qualité des eaux piscicoles (1978) qui limitent l'élévation de la température à 3°C pour les eaux

cyprinicoles, et 1,5°C pour les eaux salmonicoles, avec des possibilités de dérogations selon la législation française. Depuis, la DCE a introduit la notion de « pollution thermique ».

Le réchauffement indirect est lié à la diminution du débit dans les cours d'eau. Outre la diminution directement imputable au changement climatique, il serait nécessaire de maîtriser les prélèvements dans les cours d'eau. Comme cela a été mis en évidence sur le bassin de l'Hérault, les prélèvements en eau sont en effet susceptibles de jouer un rôle non négligeable sur les débits et donc la température de l'eau, mais aussi sur la qualité et la quantité d'habitat disponible pour les espèces. L'outil réglementaire le plus pertinent dans ce cas est la valeur du débit réservé. Actuellement fixée au 1/10^e du module, le relèvement de cette valeur pourrait être un levier d'action dans le cadre de l'adaptation au changement climatique, selon les secteurs géographiques et les enjeux écologiques associés.

En parallèle des outils réglementaires, il paraît important de maintenir à long terme le réseau de surveillance étendu de la température de l'eau mis en place par l'ONEMA en 2008 (Réseau National de Température – RNT). Celui-ci permettra d'adapter à tout moment de façon pertinente les choix réglementaires faits comme proposés précédemment.

4.3. MAITRISE DE LA DISPERSION DES ESPECES D'ORIGINE ANTHROPIQUE

Les résultats de modélisation à l'échelle nationale montrent que certains secteurs au sein des bassins versants seraient susceptibles de devenir favorables à des espèces qui sont actuellement absentes de ces bassins versants. En outre, d'autres études montrent que des espèces exotiques risquent de se maintenir sous hypothèse de changement climatique (rapport INVAQUA, 2011). Bien que la complexité des interactions spécifiques ne permette pas aujourd'hui d'évaluer précisément quelles pourraient être les conséquences de la colonisation de nouveaux bassins versants par telle ou telle espèce, ni dans quelles mesures celles-ci deviendraient invasives ou non, les expériences passées montrent qu'elles peuvent être désastreuses (cas du silure glane par exemple). En conséquence, et au titre du principe de précaution, il serait pertinent de mettre en place des mesures visant à limiter les introductions volontaires ou accidentelles d'espèces aquatiques. Les outils seraient alors de 4 types : des contraintes réglementaires, comme c'est déjà le cas pour un certain nombre d'espèces allochtones ; une surveillance des bassins versants pour détecter l'arrivée d'une nouvelle espèce sur un territoire ; des actions de communication et de sensibilisation auprès des principaux vecteurs d'espèces aquatiques (pêcheurs particuliers et professionnels, ...) ; et enfin des mesures accompagnant la construction de canaux mettant en relation des bassins versants totalement ou partiellement indépendants afin de limiter les échanges d'espèces via ces réseaux artificiels (grilles, répulsifs sonores,... selon opportunités et avancée des connaissances). Concernant les espèces exotiques plus précisément, une stratégie nationale est actuellement mise en œuvre par la Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) du ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports afin de lutter contre le phénomène

des espèces exotiques envahissantes qui ont un impact négatif sur la biodiversité sauvage (Ménigaux et Dutartre, 2012).

4.4. SYNTHESE

Mesures	Outils
Maintien et restauration des continuités écologiques	<ul style="list-style-type: none"> - Arasement de seuils et effacement de barrages - Passes à poissons
Maintien et restauration de la qualité et la quantité des habitats aquatiques	<ul style="list-style-type: none"> - Relèvement du débit minimum biologique - Maintien de la continuité sédimentaire - Maintien de la qualité hydromorphologique des cours d'eau - Maintien de la qualité des eaux - Restauration des écotones
Maitrise du réchauffement anthropique des eaux	<ul style="list-style-type: none"> - Réglementation des rejets - Réseau de mesure de la température de l'eau - Relèvement du débit minimum biologique - Maintien et restauration de la qualité hydromorphologique des cours d'eau
Maitrise de la dispersion des espèces d'origine anthropique	<ul style="list-style-type: none"> - Réglementation sur les introductions d'espèces - Sensibilisation du public - Encadrement de la construction de canaux entre bassins versants indépendants

Tableau 4.4.1 Synthèse des mesures d'adaptation proposées et des outils associés.

5. CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

L'étude proposée ici s'est appuyée sur deux approches afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques. La première s'est intéressée, à l'échelle de la France métropolitaine, à évaluer l'évolution de l'aire des habitats favorables de 38 espèces de poissons d'eau douce sous hypothèse du scénario de changement climatique A1b du GIEC. Cette analyse a mis en évidence la vulnérabilité quasi-certaine d'un certain nombre d'espèces, en concordance avec les résultats d'études antérieures (Buisson *et al.*, 2008 ; Buisson et Grenouillet, 2009 ; Daufresne et Boët, 2007 ; Lassalle *et al.*, 2008 ; Pont *et al.*, 2006). Cependant les résultats obtenus s'accompagnent de nombreuses incertitudes, liées aux choix méthodologiques, aux données utilisées, et aux hypothèses faites sur l'écologie des espèces retenues. Par ailleurs, ces résultats ne sont pertinents qu'à une échelle spatiale large, et ne prennent en compte aucun contexte autre que celui du changement climatique et de ses effets directs (modification des températures et des précipitations).

Dans la cadre d'une seconde approche, l'étude a donc été complétée par une analyse des impacts des changements climatique et anthropique (évolution de la demande en eau à l'horizon 2070) sur les espèces de poissons et les organismes stygobies du bassin de l'Hérault.

Cette étude a permis de montrer que les pressions anthropiques augmenteront la vulnérabilité des organismes aquatiques au changement climatique notamment dans les secteurs intermédiaires (cyprinidés rhéophiles). Le secteur amont sera également touché mais les pressions s'exerçant sur les espèces seront principalement liées aux effets du changement climatique, les prélèvements en eau étant limités dans cette partie du bassin versant (perte d'habitats favorables pour les espèces du domaine salmonicole).

En s'appuyant sur les résultats de ces deux approches, il a été possible de proposer des mesures d'adaptation afin d'anticiper les conséquences du changement climatique. Ces mesures concernent principalement la restauration des continuités écologiques, la maîtrise du réchauffement des eaux par l'Homme et la gestion des introductions anthropiques d'espèces aquatiques. La plupart de ces mesures font déjà l'objet d'une réglementation européenne et/ou nationale (DCE et LEMA). Un élément clef futur sera donc d'adapter cette réglementation dans le contexte de changement climatique, par exemple par un renforcement de certains textes. Cependant, cela doit s'accompagner d'une poursuite de tous les travaux de recherche déjà engagés sur la compréhension des relations pressions/impacts qui interviennent dans la définition des mesures d'adaptation (notions de pollution thermique, de débit réservé, d'espèce invasive,...).

L'application des mesures d'adaptation proposées devrait se faire en fonction de la vulnérabilité des espèces, et des enjeux associés à chacune des espèces (enjeu halieutique, enjeu patrimoniale par exemple). En conséquence, il apparaît comme essentiel d'améliorer la qualité des résultats produits, en diminuant les sources d'incertitude quand cela est possible. Cela peut notamment passer par une meilleure connaissance de l'écologie des espèces, et donc de leur niche, et un choix plus adapté des variables pour la décrire (température de l'eau, débit, ...).

Enfin, le changement climatique ne constitue que l'un des éléments du changement global. Ce dernier se traduit pour les milieux aquatiques entre autres par : l'arrivée de plus en plus importante et de plus en plus rapide de nouvelles espèces, liée à la globalisation des échanges ; la forte régression de certaines espèces, et notamment les poissons migrateurs, du fait de la pression exercée sur leurs habitats (aménagement des cours d'eau, pollution) et de la surpêche (anguille en particulier) ; etc. Il sera donc important de replacer les résultats de cette étude dans ce contexte de changement global. Il est en effet légitime de se demander quelle est la part des impacts du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques, par rapport au changement global. Les écosystèmes de 2070 seront-ils à l'image des évolutions climatiques, ou la conséquence des pressions anthropiques qu'ils subissent aujourd'hui et subiront demain ?

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME Direction Régionale Languedoc-Roussillon & Météo-France Direction Interrégionale Sud-Est **2011** Indicateurs météorologiques du changement climatique en Languedoc-Roussillon.
- ADEME **2011** Changement climatique au 20ème siècle en Languedoc-Roussillon. Données et références.
- Agosta C. **2007** Naturalisation des débits et modélisation hydrologique sur des sous-bassins versant de la Garonne à Lamagistère, *Mémoire de Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie, Université Pierre et Marie Curie, Ecole des Mines de Paris & Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts*, 51p.
- Alcaraz G., Espina S. **1995** Acute toxicity of nitrite in juvenile grass carp modified by weight and temperature. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **55**: 473–478.
- Allouche O. **2006** Assessing the accuracy of species distribution models prevalence kappa and the true skill statistic TSS. *Journal of Applied Ecology* **43**: 1223–1232.
- Aprahamian MW, Davidson IC, Cove RJ. **2008** Life history changes in Atlantic salmon from the River Dee, Wales. *Hydrobiologia* **602**: 61-78.
- Arnell N., Bates B., Lang H., Magnuson J.J., and Mulholland P. **1995** Hydrology and Freshwater Ecology. In *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change, Scientific-Technical Analyses*. R.T. Watson, M.C. Zinyowera, R.H. Moss, and D.J. Dokken, eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 325-364
- Baglinière JL, Denais L, Rivot E, Porcher JP, Prévost E, Marchand F, Vauclin V **2004** Length and age structure modifications of the Atlantic salmon (*Salmo salar*) populations of Brittany and Lower Normandy from 1972 to 2002. Technical Report, INRACSP, 24p.
- Basilico L, Massu N, Seon-Massin N **2009** Changement climatique : impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion. Synthèse du séminaire des 29 et 30 juin 2009, Paris.
- Beaudou D., Richard S., Roset N., Saint-Olympe L., **2007** Réseau hydrobiologique et piscicole, Bassin Rhône Méditerranée et Corse, Synthèse des données de 1995 à 2004, ONEMA.
- Blaber S.J.M. **2000** Tropical Estuarine Fishes. Ecology, Exploitation and Conservation. Fish and aquatic resources series 7b, *Blackwell Science Publication* 372p.
- Besse P. **2009** Apprentissage statistiques et Data Mining. 124 p.
- Aqua Domitia **2008** Etude d'opportunité d'extension du réseau hydraulique régional B2. Etude des besoins en eau potable.
- Buisson L. **2009** Poissons des rivières françaises et changement climatique : impacts sur la distribution des espèces et incertitudes des projections. *Institut National Polytechnique de Toulouse*. Toulouse. Thèse. 282 p.
- Buisson L, Thuiller W, Lek S, Lim P, Grenouillet G **2008** Climate change hastens the turnover of stream fish assemblages. *Global Change Biology* 14(10);2232-2248.
- Buisson L, Grenouillet G **2009** Contrasted impacts of climate change on stream fish

- assemblages along an environmental gradient. *Diversity & Distributions* 15(4):613-626.
- Chatterjee N.A., Pal K., Manush S.M., Das T., Mukherjee C.S. **2004** Thermal tolerance and oxygen consumption of *Labeo rohita* and *Cyprinus carpio* early fingerlings acclimated to three different temperatures. *Journal of Thermal Biology* **29**: 265–270.
- Crivelli A.J. **1996** The Freshwater Fish Endemic to the Mediterranean region. An Action Plan for their Conservation. *Tour du Valat Publication, Arles, France*, p.171.
- Dai A, Qian T, Trenberth KE, Milliman JD **2009** Changes in Continental Freshwater Discharge from 1948 to 2004. *Journal of Climate* **22**:2773-2792.
- Daufresne M, Roger MC, Capra H, Lamouroux N **2004** Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River: effects of climatic factors. *Global Change Biology* **10(1)**:124-140.
- Daufresne M. & Boët P. **2007** Climate change impacts on structure and diversity of fish communities in rivers. *Global Change Biology* **13**: 2467–2478.
- Delnatte C. **2010** Le gradient altitudinal sur les sommets tabulaire de Guyane – base sur l'étude des *Areaceae*, des *Melastomataceae* et des Ptéridophytes. Thèse option Science de la Vie – Université Antilles-Guyane – Centre de Cayenne – 292 p.
- Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement, Languedoc-Roussillon **2011** Bulletin de situation hydrologique et de la ressource en eau en Languedoc-Roussillon au 1^{er} janvier 2011.
- Dole-Olivier M.J., Malard F., Ferreira D. et Gibert J. **2005**. Biodiversité dans les eaux souterraines *Groundwater Biodiversity. La Houille Blanche n°3-2005*, 39-44.
- Doudoroff P., Warren C.E. **1965** Environmental requirements of fishes and wildlife: dissolved oxygen requirements of fishes. *Oregon Agricultural Experiment Station*, 40 p.
- Dudgeon D. **2003** The contribution of scientific information to the conservation and management of freshwater biodiversity in tropical Asia. *Hydrobiologia* **500**: 295–314.
- Dzikowski R., Hulata G., Karplus I. and Harpaz S. **2001** Effect of temperature and dietary L-carnitine supplementation on reproductive performance of female guppy (*Poecilia reticulata*). *Aquaculture* **199**: 323–332.
- Eaton J.G. & Scheller R.M. **1996** Effects of Climate Warming on Fish Thermal Habitat in Streams of the United States. *Limnology and Oceanography* **41(5)**: 1109-1115.
- Ecofys, MEDCIE **2008** Rapport Languedoc-Roussillon.
- Esser G. **1992** Implications of climate change for production and decomposition in grasslands and coniferous forests. *Ecological Applications* **2**: 47-54.
- Farr T.G. *et al.* **2001** The Shuttle Radar Topography Mission. *Lecture Notes in Computer Science* **2181**: 65-77.
- Fedorov A.V., Philander S.G. **2000** Is El Nino Changing? *Science* **288**: 1997-2001.
- Ficke A.D., Myrick C.A. and Hansen L.J. **2007** Potential impacts of global climate change on freshwater Fisheries. *Reviews of Fish Biology and Fisheries* **17**: 581–613.
- Gagnon A.S., Bush A.B.G. and Smoyer-Tomic K. **2001** Dengue epidemics and the El Niño Southern Oscillation. *Climate Research* **19**: 35–43.
- Gibert J., Deharveng L. **2002** Subterranean ecosystems: a truncated functional biodiversity. *Bioscience* **52**: 473-481.

- GIEC **2007** Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.]. GIEC, Genève, Suisse. 103 p.
- Groupe interministériel : « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France » **2009** Evaluation du coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France - Rapport de la deuxième phase.
- Hallare A.V., Schirling M., Luckerback T., Kohler H.-R., Triebkorn R. **2005** Combined effects of temperature and cadmium on developmental parameters and biomarker responses in zebrafish (*Danio rerio*) embryos. *Journal of Thermal Biology* **30**: 7–17.
- Hari RE, Livingstone DM, Siber R, Burkhardt-Holm P, Güttinger H **2006** Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams 12(1):10-26.
- Hérivaux C, Maton L, Agenais AL, Caballero Y, Rey-Valette H, Kuhfuss L, Berthelie E **2010** Evaluation économique des dommages liés à l'élévation du niveau de la mer : démarche générale et application à la région Languedoc-Roussillon. *Journées "Impacts du changement climatique sur les risques côtiers", Orléans : France"*.
- Higgins R.W., Silvia V.B.S., Shi W. and Larson J. **2007** Relationships between Climate Variability and Fluctuations in Daily Precipitation over the United States. *Journal of climate* **20**: 356–3579.
- Hijmans R.J. **2005** Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **25**: 1965–1978.
- Hogg I.D., Eadie J.M., De Lafontaine Y. **1996** Atmospheric change and the diversity of aquatic invertebrates: are we missing the boat? *Environmental Monitoring and Assessment* **49**: 291-301.
- Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., Van der Linden P.J. and Xiaosu V. **2001** Climate Change 2001: The Scientific Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change: Working Group I. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Huey D.W., Beiting T.L., Wooten M.C. **1984** Nitrite-induced methemoglobin formation and recovery in channel catfish (*Ictalurus punctatus*) at three acclimation temperatures. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **32**: 674–681.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change **2001** Climate change 2001: the scientific basis. Cambridge University Press, Oxford, UK.
- Irion G., Junk W.J., Jasn M. de **1997** The large Central Amazonian river floodplains near Manaus: geological, climatological, hydrological, and geomorphological aspects. In: The Central Amazon Floodplains. *Ecology of a Pulsing System* (ed. JunkW), pp. 23–46. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- INVAQUA. **2011**. Prédiction de l'établissement des espèces exotiques dans les milieux aquatiques : vers une anticipation des invasions biologiques. Rapport ONEMA-MNHN, 93 p.
- Jacobs J.W. **1992** International River Basin Development and Climatic Change: The Lower Mekong of Southeast Asia. *PhD Dissertation*, University of Colorado.

- Kalff J. **2000** Limnology. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Karl T.R., Knight R.W., Easterling D.R. and Quayle R.Q. **1996** Indices of Climate Change for the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* **77**: 279-292.
- Kattenberg A., Giorigi F., Grassl H., Meehl G.A., Mitchell J.F.B., Stouffer R.J., Tokioka T., Weaver A.J. and Wigley T.M.L. **1996** “Climate Models — Projections of Future Climate.” In Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Keith P., Allardi J. **2001** Atlas des Poissons d’Eau douce de France. *Patrimoines Naturels*, **47**, 387p.
- Köck G., Triendl M., Hofer R. **1996** Seasonal patterns of metal accumulation in Arctic char (*Salvelinus alpinus*) from an oligotrophic Alpine lake related to temperature. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **53**: 780–786.
- Kutty M.N. and Sukumaran N. **1975** Influence of upper and lower temperature extremes in the swimming performance of *Tilapia mossambica*. *Transactions of the American Fisheries Society* **104**: 755–761.
- Labraga J.C. **1997** The climate change in South America due to a doubling in the CO2 concentration: intercomparison of general circulation model equilibrium experiments. *International Journal of Climatology* **17**: 377–398.
- Ladouche B., Maréchal J.-Ch., Dörfliger N., Lachassagne P. **2006** Système karstique des Cent Fonts. Simulation de Scénarios d’exploitation et de gestion de la ressource, **BRGM/RP-54865-FR**, 275 p.
- Lassalle G, Beguer M, Beaulaton L, Rochard E **2008** Diadromous fish conservation plans need to consider global warming issues: An approach using biogeographical models. *Biological Conservation* **141**:1105-1118.
- Lassalle G, Rochard E **2009** Impact of twenty-first century climate change on diadromous fish spread over Europe, North Africa and the Middle East. *Global Change Biology* **15**:1072-1089.
- Lebel I., Menella J.Y., Le Corre M. **2001** Bilan des actions du plan migrateur concernant l’alose feinte (*Alosa fallax rhodanensis*) sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse. *Bult.Fr.Pêche Piscic.* **362/363**: 1077-1100.
- Leprieur et Robin **2011** INVAQUA : Prédiction de l’établissement des espèces exotiques dans les milieux aquatiques : vers une anticipation des invasions biologiques. Rapport ONEMA, 93 p.
- MacLeod J.C., Pessah E. **1973** Temperature effects on mercury accumulation, toxicity, and metabolic rate in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Journal of Fisheries Research Board of Canada* **30**: 485–492.
- Malhi Y., Roberts J.T., Betts R.A., Killeen T.J., Li W. and Nobre C.A. **2008** Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science* **319**: 169-171.
- Marengo J.A., Nobre A., Nobre C.A., Tomasella J., Cardoso M. and Oyama M. **2008** Hydro-climatic and ecological behavior of the drought of amazonia in 2005. *Philosophical*

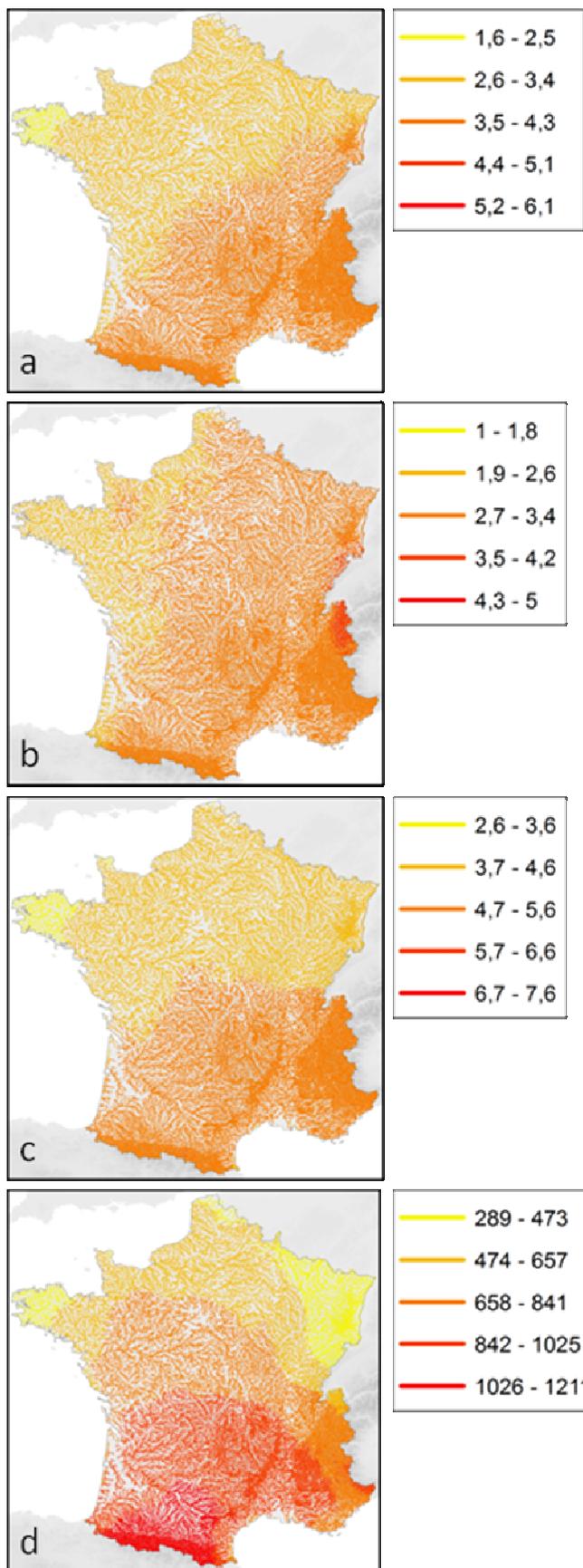
- Transactions of the Royal Society of London. Biological Sciences* **21**: 1-6.
- Maton L. **2008** Evaluation économique du programme de mesures de gestion quantitative des ressources en eau dans l'Ouest de l'Hérault. Volume 1 : Scénario tendanciel et analyse coût-efficacité pour l'usage agricole de l'eau. *Rapport BRGM-RP-56143-FR*. 86p.
- MEDCIE Grand Sud-est **2008** Etude des Effets du Changement Climatique sur le Grand Sud Est. Rapport de synthèse général.
- Meisner J.D. **1992** Assessing potential effects of global climate change on tropical freshwater fishes. *Geojournal* **28**: 21–27.
- Ménigaux H., Dutartre A. **2012** Les espèces exotiques envahissantes : éléments des stratégies nationale et communautaire,[en ligne], *Revue SET*, **06** : 70-73.
- Moyle P.B., Cech J.J. **2004** *Fishes: an introduction to ichthyology*, 5th edn. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Moisselin J.M., Schneider M., Canellas C. et Mestre O. **2002** Les changements climatiques en France au XXe siècle - Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie* **38**: 45-56.
- Nijssen B., O'Donnell G.M., Hamlet A.F. and Lettenmaier D.P. **2001** Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change. *Climate Change* **50**: 143–175.
- Ojima D.S., Kittel T.G.F., Rosswall T. and Walker B.H. **1991** Critical issues for understanding global change effects on terrestrial ecosystems. *Ecological applications* **1**: 316-325.
- Olivier M-J, Martin D., Bou C., Prié V., avec la participation de Galassi D. et Marmonier P. **2006** Interprétation du suivi hydrobiologique de la faune stygobie, réalisé sur le système karstique des Cents Fonts lors du pompage d'essai.
- Parmesan, C. **2006** Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. **37**: 637–669.
- Poff N.L., Angermeier P.L., Cooper S.D., Lake P.S., Fausch K.D., Winemiller K.O., Mertes L.A.K., Oswood M.W., Reynolds J. and Rahel F.J. **2001** Fish diversity in streams and rivers. In: Chapin FSI, Sala O.E., Huber-Sannwald E. (eds) *Global biodiversity in a changing environment: scenarios for the 21st century*. Springer, New York, pp 351–368.
- Poff N.L., Brinson M.M. and Day Jr. J.W. **2002** Aquatic ecosystems & global climate change: potential impacts on inland freshwater and coastal wetland ecosystems in the United States. *Pew Center on Global Climate Change, Arlington, Virginia*.
- Pont D, Hugueny B, Beier U, Goffaux D, Melcher A, Noble R, Rogers C, Roset N, Schmutz S **2006** Assessing river biotic condition at the continental scale : a European approach using functional metrics and fish assemblages *Journal of Applied Ecology* **43**:70-80.
- Ponton D. **2001** ENSO and the hydrology of the Sinnamary River (French Guiana) during the rainy season: will future El Niño events increase the impact of the Petit Saut dam on downstream fish communities? *Archiv für Hydrobiologie* **152(3)**: 451-468.
- Préfecture de région Languedoc-Roussillon **2008** Etude sur le changement climatique en Languedoc-Roussillon. Quelles conséquences économiques et sociales. Rapport final 10-2008.
- Rahel F.J. and Olden J.D. **2008** Assessing the Effects of Climate Change on Aquatic Invasive

- Species. *Conservation Biology* **22(3)**: 521–533.
- Rahel F.J., Bierwagen B., and Taniguchi Y. **2008** Managing aquatic species of conservation concern in the face of climate change and invasive species. *Conservation Biology* **22**: 551- 561.
- Ramirez J., Jarvis A. **2010** Downscaling global circulation model outputs. The delta method decision and policy analysis working paper No1.
- Ramirez J., Jarvis A. **2010** Disaggregation of global circulation model outputs decision and policy analysis Working paper No2.
- Regier H.A., Holmes J.A. and Pauly D. **1990** Influence of Temperature Change on Aquatic Ecosystems: An Interpretation of Empirical Data. *Transactions of the American Fisheries Society* **119**: 374-389.
- Roessig J.M., Woodley C.M., Cech J.J. Jr., Hansen L.J. **2004** Effects of global climate change on marine and estuarine fishes and fisheries. *Reviews of Fish Biology and Fisheries* **14**: 251–275.
- Rosenzweig C., Iglesias A., Yang X.B., Epstein P.R. and Chivian E. **2001** Climate change and extreme weather events - Implications for food production, plant diseases, and pests. *Global change and human health* **2(2)**: 90-104.
- Rutherford J.C., Blackett S., Blackett C., Saito L. and Davies-Colley R.J. **1997**. Predicting the effects of shade on water temperature in small streams, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, **31(5)**: 707-721.
- Schémas d'aménagement et de gestion des eaux du fleuve Hérault (SAGE), **2005**.
- Schéma Départemental pour la restauration, la préservation et la mise en valeur des Milieux Aquatiques de l'Hérault (SDVMA) **2009** Rapport de bassin : Moyenne et basse vallées de l'Hérault (Y23).
- Siemien M.J. and Stauffer J.R.J. **1989** Temperature preference and tolerance of the spotted tilapia and Rio Grande cichlid. *Archiv für Hydrobiologie* **115**: 287–303.
- Stern P.C. and Easterling W.E. **1999** Making climate forecasts matter. National Academy Press, Washington, DC.
- Stickney R.R. **2000** Encyclopedia of aquaculture. John Wiley and Sons, New York.
- Sweeney B.W., Jackson J.K., Newbold J.D. and Funk D.H. **1992** "Climate Change and the Life Histories and Biogeography of Aquatic Insects in Eastern North America." In *Global Climate Change and Freshwater Ecosystems*. P. Firth and S.G. Fisher, eds. Springer-Verlag, New York, pp. 143-176.
- Timmermann A., Oberhuber J., Bacher A., Esch M., Latif M. and Roeckner E. **1999** Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature* **398**: 694- 696.
- Tissot L., Souchon Y. **2011** Synthesis on thermal tolerances of the principal freshwater fish species of large Western Europe rivers. *Hydroécologie Appliquée* **17**: 17-76.

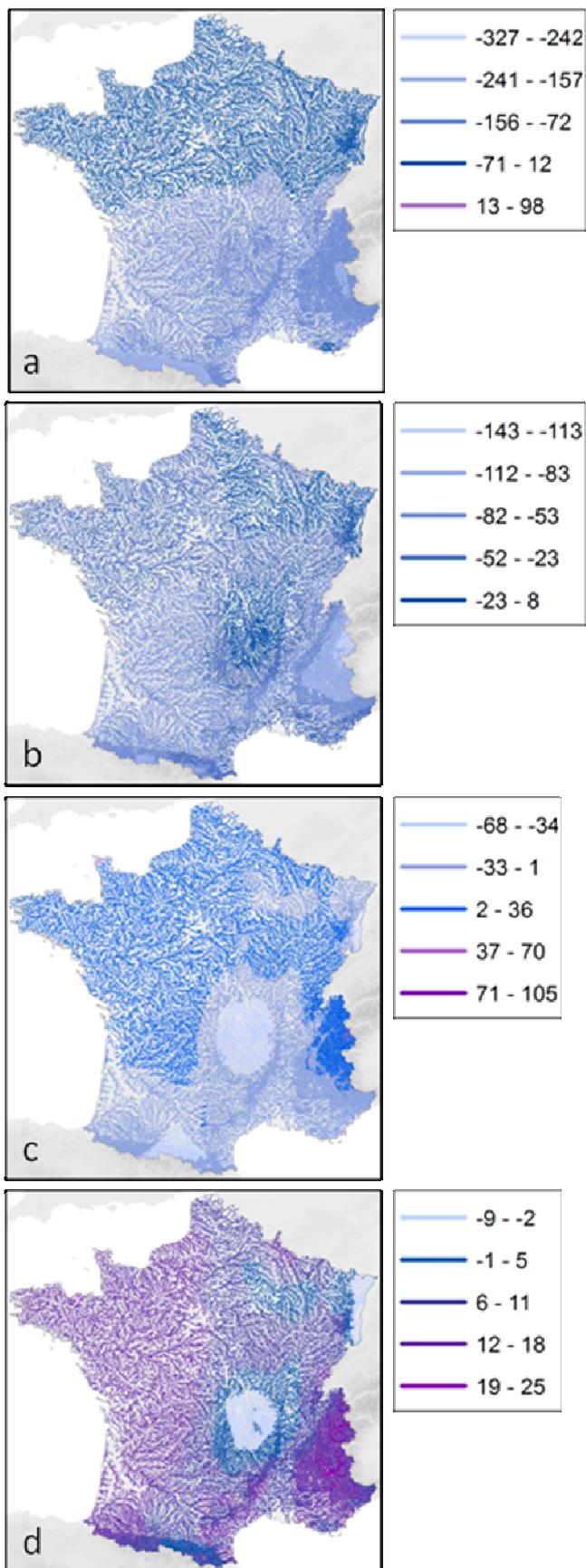
- Trenberth K.E. **1999** The extreme weather events of 1997 and 1998. *Consequences* **5**: 3-15.
- Vogt J. *et al.* **2007** A pan European River and Catchment Database. JRC Reference Report.
- Wang J. and Tsai C. **2000** Effects of temperature on the deformity and sex differentiation of tilapia, *Oreochromis mossambicus*. *Journal of Experimental Zoology Part A: Comparative Experimental Biology* **286**: 534–537.
- Waters T.F. **1995** Sediment in Streams: Sources, Biological Effects, and Control. American Fisheries Society, Monograph 7, Bethesda, MD.
- Weng Ph., Marchal J.P., Noël Y. **2004** L'eau dans le bassin versant de l'Hérault - Synthèse des travaux du BRGM. *BRGM/RP-53056-FR*, 84p.
- Weng Ph., Dörfliger N., **2002** Projet PACTES. Module : Contribution des eaux souterraines aux crues et inondations ; site de l'Hérault. *BRGM/RP-51718-FR*, 97p.
- Xenopoulos M.A., Lodge D.M., Alcamo J., Märker M., Schulze K. and Van Vuuren D.P. **2005** Scenarios of freshwater fish extinctions from climate change and water withdrawal. *Global Change Biology* **11**: 1557-1564.



6. ANNEXES



Annexe 1. Cartes présentant la différence entre la situation future et la situation actuelle (période 2060-2089, scénario A1b) dans le cas de la température annuelle moyenne (en °C, a), de la température moyenne du trimestre le plus froid (en °C, b), de la température moyenne du trimestre le plus chaud (en °C, c), de la saisonnalité des températures (sans unité, d).



Annexe 2. Cartes présentant la différence entre la situation future et la situation actuelle (période 2060-2089, scénario A1b) dans le cas des précipitations annuelles moyennes (en mm, a), des précipitations du trimestre le plus sec (en mm, b), des précipitations du trimestre le plus humide (en mm, c), de la saisonnalité des précipitations (sans unité, d).