



APPORTS DES TECHNOLOGIES EN RÉPONSE AUX BESOINS EN EAU DOUCE

Rapport de l'Académie



Académie des technologies
Le Ponant – Bâtiment A
19, rue Leblanc
75015 PARIS
+33(0)1 53 85 44 44
secretariat@academie-technologies.fr
www.academie-technologies.fr
ISBN : 979-10-97579-47-0

couverture :

*Barrage d'irrigation romain (Premier siècle A;D.) de Cornalvo
Wikipédia - ©Charly Mordok*

*Usine de dessalement d'eau de mer par osmose inverse de Barcelone
Wikipedia - ©Le plombier du désert*

APPORTS DES TECHNOLOGIES EN RÉPONSE AUX BESOINS EN EAU DOUCE

*EN FRANCE DANS LE CONTEXTE
DU CHANGEMENT CLIMATIQUE*

*RAPPORT DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES
PÔLE ENVIRONNEMENT ET IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE*

PRÉAMBULE

Le présent rapport est consacré aux principales technologies permettant de contribuer à la fourniture d'eau douce. Il n'a pas pour objet, malgré leur importance également majeure, de traiter des stratégies et moyens permettant de réaliser des économies de prélèvements d'eau et de réduire les consommations.

Un premier chapitre est destiné à illustrer les grands enjeux concernant les prévisions d'évolution des masses d'eau douce en France et leur confrontation au regard des demandes de prélèvement, mais il ne constitue pas un rapport exhaustif sur le sujet.

Le sujet des changements de pratiques agricoles est abordé, de manière non détaillée, considérant l'importance des enjeux de cette activité et de ses besoins en eau en période d'été et l'importance de l'évapotranspiration. Il est d'évidence que tous les autres secteurs consommateurs sont également concernés, surtout s'ils contribuent à ne pas restituer l'eau directement au milieu.

Le lecteur est invité à considérer les différences entre la notion de prélèvements d'eau dans la nature et celle des usages qui sont ensuite associés à une restitution locale pouvant être partielle (pertes par évaporation...) ou totale de l'eau sous forme liquide, plus ou moins polluée après usage.

TABLE DES MATIÈRES

P RÉAMBULE	III
I NTRODUCTION	1
G LOSSAIRE	5
I MPLICATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE : SITUATIONS ET ENJEUX LIÉS AUX BAISSES DES RESSOURCES EN EAU DOUCE PRÉVUES EN FRANCE	9
D ES ADAPTATIONS AGRICOLES	41
L ES APPORTS TECHNOLOGIQUES POUR L'APPROVISIONNEMENT EN EAU DOUCE	47
C ONCLUSIONS	75
R ECOMMANDATIONS	81
R ÉFÉRENCES	87
I NTERVENANTS	91

INTRODUCTION

Au cours du xxe siècle, la demande en eau douce a augmenté en France proportionnellement aux développements démographiques et économiques. Toutefois, depuis l'année 2000, le volume d'eau douce prélevée se réduit lentement, que ce soit pour la production d'eau potable ou pour les usages industriels et le refroidissement des centrales électriques, en dehors du turbinage des barrages hydroélectriques. En 2019, ce volume s'élevait à 31,4 milliards de m³ pour la France métropolitaine.

Les rapports entre la demande et les volumes disponibles conduisent, de plus en plus fréquemment, à des situations locales de restrictions d'usages en périodes de faible pluviométrie.

Trois éléments majeurs accroissent ces difficultés :

- les déversements de pollutions chimiques et biologiques, ponctuelles ou diffuses, vers les ressources en eau nécessitant des traitements particuliers avant utilisations ou la recherche de ressources alternatives ;
- les conséquences du changement climatique sur le cycle de l'eau et sur les prélèvements dans les ressources en eau ;
- les conflits entre, d'une part, les prélèvements pour satisfaire les besoins des activités humaines et, d'autre part, les besoins en eau indispensables pour le maintien du bon état chimique et écologique des écosystèmes naturels.

Il est donc nécessaire de prendre en compte les difficultés liées aux besoins, les conflits d'usage, les politiques de gestion, mais aussi les possibilités offertes par des technologies pour répondre aux attentes, en aidant à fournir des volumes d'eau douce en qualité et quantité suffisantes et adaptées aux besoins selon les régions et les périodes d'usage qui l'exigent.

Au niveau national, les Assises de l'eau de juillet 2019 ont conduit le gouvernement à considérer que « *la priorité doit être donnée aux économies d'eau, à la mise en place d'une gestion collective ainsi qu'à des règles de partage. Nous nous fixons donc un objectif de réduction des prélèvements d'eau de 10 % en 5 ans et de 25 % en 15 ans* ».

L'action n° 7, issue de ces assises, fixe un objectif : « *Tripler les volumes d'eaux non conventionnelles réutilisées d'ici 2025 en facilitant leurs usages* ».

Un *Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique* s'est achevé le 1er février 2022, actant des actions à mettre en œuvre collectivement afin d'anticiper les effets du changement climatique sur l'agriculture.

En novembre 2022, un rapport d'information, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective sur l'avenir de l'eau, décrit les grands enjeux liés aux besoins et aux possibles conflits d'usage avec des recommandations sur les retenues d'eau, les solutions basées sur la nature, l'adaptation des pratiques agricoles, la politique de gestion, la recherche... (Belrhiti *et al.*, 2022).

Le 30 mars 2023, le président de la République a présenté un plan d'action national « *pour une gestion résiliente et concertée de l'eau* » intégrant 53 mesures au sein de trois axes :

- **Organiser la sobriété des usages pour tous les acteurs** en envisageant des mesures d'économies avec une baisse souhaitée de 10 % des prélèvements d'eaux en 2030, des planifications et adaptations au changement climatique par bassins et une meilleure mesure des volumes prélevés ;
- **Optimiser la disponibilité de la ressource** en réduisant les fuites dans les réseaux d'eau de consommation humaine, en valorisant les eaux « non conventionnelles » parmi lesquelles les eaux usées traitées et les eaux de pluie venant des toitures. Sont également envisagés les stockages dans le sol, les nappes et les ouvrages ;
- **Préserver la qualité de l'eau** notamment en engageant des actions de réduction des intrants agricoles et en poursuivant la protection des captages ; la désimperméabilisation des sols et les solutions basées sur la nature sont également promues.

En avril 2023, le Conseil économique, social et environnemental (CESE) a publié un avis intitulé « *Comment favoriser une gestion durable de l'eau (quantité, qualité, partage) face aux changements climatiques ?* » (Guihéneuf et Le Quéau, 2023). Il décrit les situations sous tension croissante, la nécessaire adaptation au changement climatique et les moyens à mettre en œuvre dans une gouvernance améliorée.

La fréquence des situations locales de restrictions d'usages s'est accélérée ces dernières années, rendant nécessaires des actions rapides et d'importance pour permettre la fourniture d'eau douce en quantité suffisante et dont la qualité réponde aux exigences de chaque usage.

Il s'agit principalement de :

- la mise en place de stratégies coordonnées, adaptées et locales, de réduction des consommations pour tous les secteurs, sans pour autant induire d'effets indésirables ;
- la réduction des fuites dans les réseaux de distribution d'eau potable ;
- la redéfinition de la juste valeur de l'eau selon les usages et les périodes ;
- un véritable changement des pratiques agricoles afin qu'elles soient moins exigeantes en eau ;
- la promotion des développements technologiques permettant des gains quantitatifs et qualitatifs ;
- des transferts et stockages d'eaux quand les mesures précédentes s'avèrent insuffisantes.

Le groupe de travail de l'Académie des technologies s'est placé à un horizon d'une trentaine d'années pour aborder la question des baisses prévisibles de ressources, qui complique la satisfaction des demandes d'eau douce sur le territoire national pouvant créer des situations de pénuries.

Son travail et ses conclusions/recommandations ne sont pas le fruit d'une réaction ponctuelle à une année 2022 de sécheresse exceptionnelle, mais sont justifiés par les données historiques et les modélisations décrivant les conditions et situations de baisse des ressources face aux demandes de prélèvements et leurs perspectives pour les années à venir.

Le groupe de travail n'a pas considéré comme objet de réaliser une étude approfondie, à l'échelle des différents territoires français, des difficultés et situations de manques de ressources en eaux douces au regard des demandes et de leurs causes. Il a jugé indispensable d'en synthétiser les grandes conclusions actuelles avant d'examiner les technologies les plus adaptées pour en réduire les fréquences et impacts, et d'émettre ses recommandations.

Pour faciliter la lecture de ce rapport par les nombreux lecteurs qui ne seront pas des spécialistes du domaine, il nous a semblé utile de placer en tête de rapport un glossaire donnant la définition précise des notions les plus importantes.

GLOSSAIRE

Bassin versant : un bassin versant (bassin hydrographique) est une portion de territoire délimitée par des lignes de crête (lignes de partage des eaux) et irriguée par un même réseau hydrographique (une rivière, avec tous ses affluents et tous les cours d'eau qui alimentent ce territoire). Dans un bassin versant, toutes les eaux reçues suivent, du fait du relief, une pente naturelle et se concentrent vers un même point de sortie appelé exutoire.

Bilan hydrique : il correspond au volume de précipitation auquel se soustrait le volume de l'évapotranspiration (évaporation par la végétation), ce qui alimente les eaux de ruissellement et les stockages sous forme de neige, de glace et d'infiltration souterraine.

Débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans : débit mensuel minimal ayant la probabilité de 1/5 de ne pas être dépassé une année donnée. Il correspond à la valeur du débit minimal annuel tel qu'il ne se produit, en moyenne, qu'une année sur 5, soit 20 fois par siècle.

Eaux « non conventionnelles » : le terme recouvre des ressources en eau jusqu'à présent peu utilisées en grands volumes en France pour la production d'eau de consommation humaine ou pour l'irrigation : des eaux usées traitées, les eaux de pluie récupérées sur les toitures ou d'autres surfaces imperméables, des eaux saumâtres ou de mer.

Évaporation-évapotranspiration : l'évaporation de l'eau est un retour sous forme de vapeur depuis la surface terrestre vers l'atmosphère. Ces masses d'eau peuvent retomber localement sur le même bassin versant sous forme de précipitations ou se déplacer vers d'autres régions selon les configurations géographiques et climatiques. L'évapotranspiration est une évaporation réalisée par les végétations. L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la somme de la transpiration du couvert végétal, à travers les stomates des plantes, et de l'évaporation du sol qui pourrait se produire en cas d'approvisionnement en eau suffisant (disponibilité en eau non limitative) pour un couvert végétal bas, continu et homogène sans aucune limitation (nutritionnelle, physiologique ou pathologique).

Pluie intense : selon Météo-France, ce sont des pluies qui apportent sur une **courte durée** (d'une heure à une journée) une importante quantité d'eau. Cette quantité peut égaler celle reçue habituellement en un mois, voire en plusieurs mois. Des cumuls de l'ordre de 50 mm en 24 heures dans la plupart des régions de plaine et de l'ordre de 100 mm en 24 heures dans les régions montagneuses sont considérés comme des seuils critiques. Le dépassement de ces seuils peut provoquer, lorsque la nature du terrain s'y prête, de graves inondations.

Pour les phénomènes les plus violents, le cumul des précipitations dépasse généralement les 100 mm en une heure. Dans le sud de la France, les cumuls observés peuvent même dépasser 500 mm en 24 heures.

Pénurie : définie par l'Académie française comme l'absence ou la rareté d'un bien nécessaire à la vie et, par extension, une insuffisance eu égard aux besoins, un manque. Elle correspond donc à un manque de matière au regard de la demande du moment ou à venir et ces deux aspects doivent être considérés. La réduction de la demande est une manière de faire disparaître la situation de pénurie.

Réutilisation : la réutilisation est une opération qui permet à un déchet d'être utilisé à nouveau en détournant éventuellement son usage initial (par exemple : la réutilisation des eaux usées urbaines comme source d'eau industrielle ou pour l'irrigation).

Scénarios RCP : les quatre scénarios RCP (en anglais *Representative Concentration Pathway*, en français *trajectoires représentatives de concentration*) sont des trajectoires décrivant des évolutions futures de concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre et le forçage radiatif correspondant. L'étiquette de chaque scénario RCP décrit l'ampleur de la perturbation des flux de rayonnement au sommet de l'atmosphère, en watts/m² en 2100. Ils sont utilisés pour modéliser la réponse du climat et comparer les modèles de climat globaux (Climate Model Intercomparison Project Phase 5, 2010-2014); ils sont également utilisés par le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) pour évaluer ces projections climatiques dans son cinquième rapport (2013). Une nouvelle génération de scénarios illustratifs issus de narratifs socio-économiques contrastés, les SSP (Shared Socio-economic Pathways), et une plus large fourchette de forçage radiatif a été développée à partir de 2014 et utilisée pour la génération suivante de modèles de climat (CMIP6) et pour le 6^e cycle d'évaluation du GIEC (2021).

Conséquences observées et projetées du réchauffement planétaire en France : dans les projections réalisées à l'aide de modèles de climat globaux et régionaux, il est attendu que les tendances observées s'intensifient à mesure de la hausse du niveau de

réchauffement planétaire. Le 6e rapport du GIEC évalue que le niveau de réchauffement planétaire atteindrait 1,5 °C au cours des 20 prochaines années. Il pourrait dépasser 2 °C d'ici à 2050 et se rapprocher de 3 °C (pour des scénarios d'émissions intermédiaires ou élevées), voire davantage (scénarios d'émissions fortes ou très fortes), ou se stabiliser sous 2 °C (pour des scénarios d'émissions basses ou très basses).

Sécheresse : la sécheresse correspond à un déficit anormal d'une (au moins) des composantes du cycle hydrologique terrestre sur une période prolongée :

- **la sécheresse météorologique** correspond à un déficit prolongé de précipitations ;
- **la sécheresse agricole** se caractérise par un déficit en eau des sols superficiels (entre 1 et 2 m de profondeur), suffisant pour altérer le bon développement de la végétation. Elle dépend des précipitations et de l'évapotranspiration des plantes. Cette notion tient compte de l'évaporation des sols et de la transpiration des plantes (l'eau puisée par les racines est évaporée au niveau des feuilles). La sécheresse agricole est donc sensible aux précipitations, à l'humidité et à la température de l'air, au vent, mais aussi à la nature des plantes et des sols ;
- **la sécheresse hydrologique** se manifeste lorsque les lacs, rivières ou nappes souterraines montrent des niveaux anormalement bas. Elle dépend des précipitations, mais aussi de l'état du sol influant sur le ruissellement et l'infiltration.

Les sécheresses météorologiques se propagent vers les autres types de sécheresse en fonction de la nature du sol, de la végétation (et la saison), de phénomènes climatiques plus ou moins accentués (vent, température), du fonctionnement hydrologique des différents aquifères.

Valeur de l'eau : la notion est évoquée dans le texte en précisant l'importance de ne pas la confondre avec la notion de prix de l'eau. La valeur de l'eau est nécessairement variable et influencée par son importance dans la pérennité d'activités sanitaires, industrielles, écologiques, de transports, agricoles, de paysages, de loisirs et, globalement, au maintien de la vie. Sa perception varie en fonction de sa disponibilité.

CHAPITRE 1

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE : SITUATIONS ET ENJEUX LIÉS AUX BAISES DES RESSOURCES EN EAU DOUCE PRÉVUES EN FRANCE

Le réchauffement planétaire, causé par les activités humaines selon l'état actuel des connaissances scientifiques reflété dans le rapport du GIEC de 2023, continue d'augmenter et atteint + 1,15 °C en 2013-2022 par rapport à 1850-1900, plus prononcé au-dessus des continents (+ 1,65 °C) comme en France (+ 1,8 °C) où le rythme du réchauffement a été de + 0,3 °C par décennie depuis 1959, et plus marqué au printemps et en été. Ceci s'accompagne d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des extrêmes chauds et une diminution des extrêmes froids. (GIEC, 2021, Haut Conseil pour le climat 2022, Ribes *et al.*, 2022)

Il entraîne une diminution de la durée de la période d'enneigement en moyenne montagne de l'ordre de 5 jours de moins par décennie vers 1500 mètres d'altitude depuis 1960, et un recul des glaciers.

Outre la grande variabilité de la pluviométrie d'une année à l'autre, il apparaît au cours des derniers 70 ans une tendance à la hausse des précipitations annuelles dans la moitié nord et une baisse dans la moitié sud de la métropole, plus prononcée en été. Il est aussi observé une intensification des pluies extrêmes dans les régions méditerranéennes françaises et à l'échelle de l'Europe de l'Ouest comme à l'échelle mondiale (l'intensité des pluies extrêmes augmente de 7 % par degré de réchauffement).

Tableau I - Évolutions des températures estimées par le GIEC

Réchauffement planétaire moyen	Réchauffement en France
1,5 °C visé par l'accord de Paris	2 °C moyen (1,8 °C en hiver, 2,5 °C en été)
2 °C d'ici à 2050	Environ 3,5 °C en été
3 °C d'ici à 2100	Environ 4 °C moyen (environ 5 °C en été)

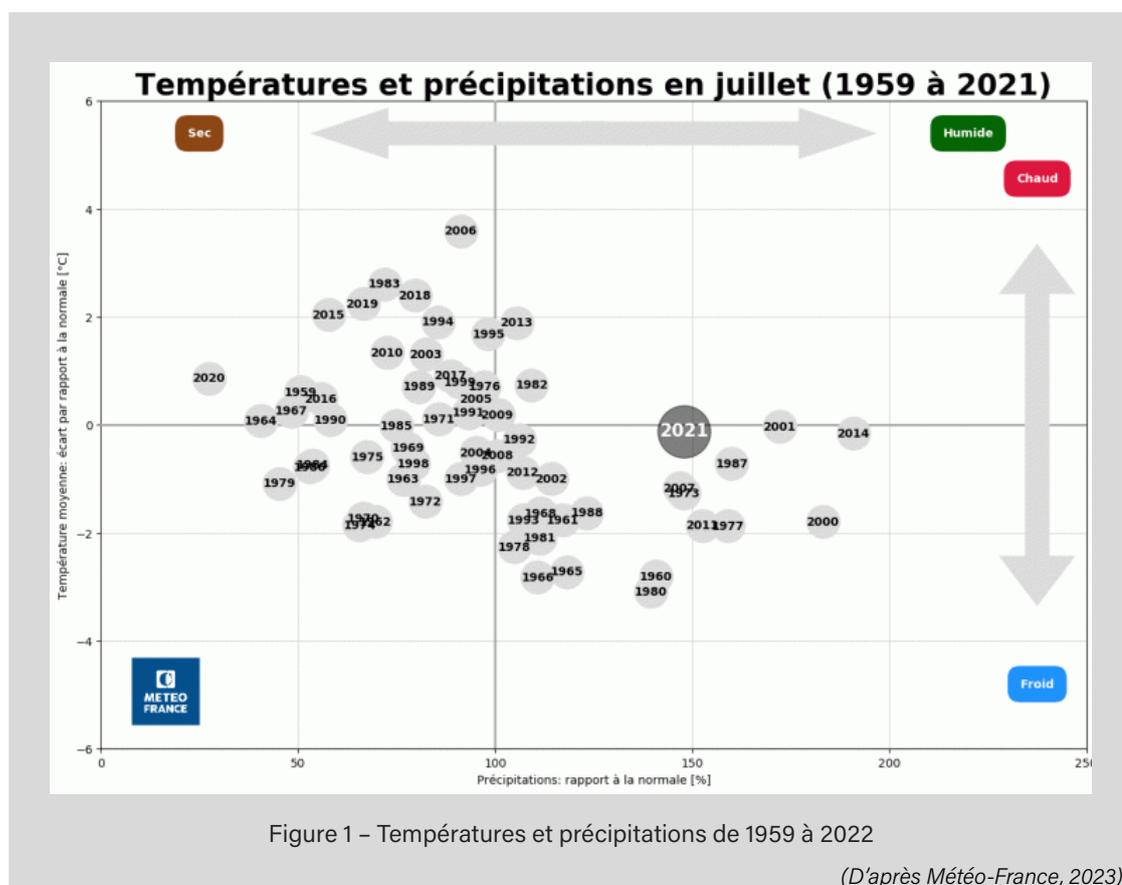
L'accord de Paris sur le climat a pour objectif de contenir le réchauffement planétaire bien en dessous de 2 °C au-dessus des niveaux préindustriels » et de poursuivre les efforts pour limiter l'augmentation de la température à 1,5 °C au-dessus des niveaux préindustriels.

Le 6e rapport du GIEC évalue que le niveau de réchauffement planétaire atteindrait 1,5 °C au cours des 20 prochaines années ; et pourrait dépasser 2 °C d'ici à 2050 pour se rapprocher de 3 °C en fin de siècle (pour des scénarios d'émissions intermédiaires ou élevées), voire davantage (scénarios d'émissions fortes ou très fortes), ou se stabiliser sous 2 °C (pour des scénarios d'émissions basses ou très basses).

La baisse projetée de la durée d'enneigement en moyenne montagne est d'environ 1 mois par degré de réchauffement planétaire supplémentaire.

L'année 2022 (la plus chaude enregistrée en France) correspondrait à une année « moyenne » vers 2050-2060 si le niveau de réchauffement planétaire atteint 2 °C (pour un scénario intermédiaire d'émissions). La figure 1 présente, pour la période 1959-2022, la position exceptionnelle de l'année 2022 ainsi que l'évolution des années 2000 vers des climats plus secs et plus chauds.

Dans les projections à l'aide de modèles de climat globaux et régionaux, il est attendu que ces tendances observées s'intensifient à mesure de la hausse du niveau de réchauffement planétaire.



**Tableau II - Les bouleversements climatiques attendus
en Europe de l'Ouest et Europe centrale**

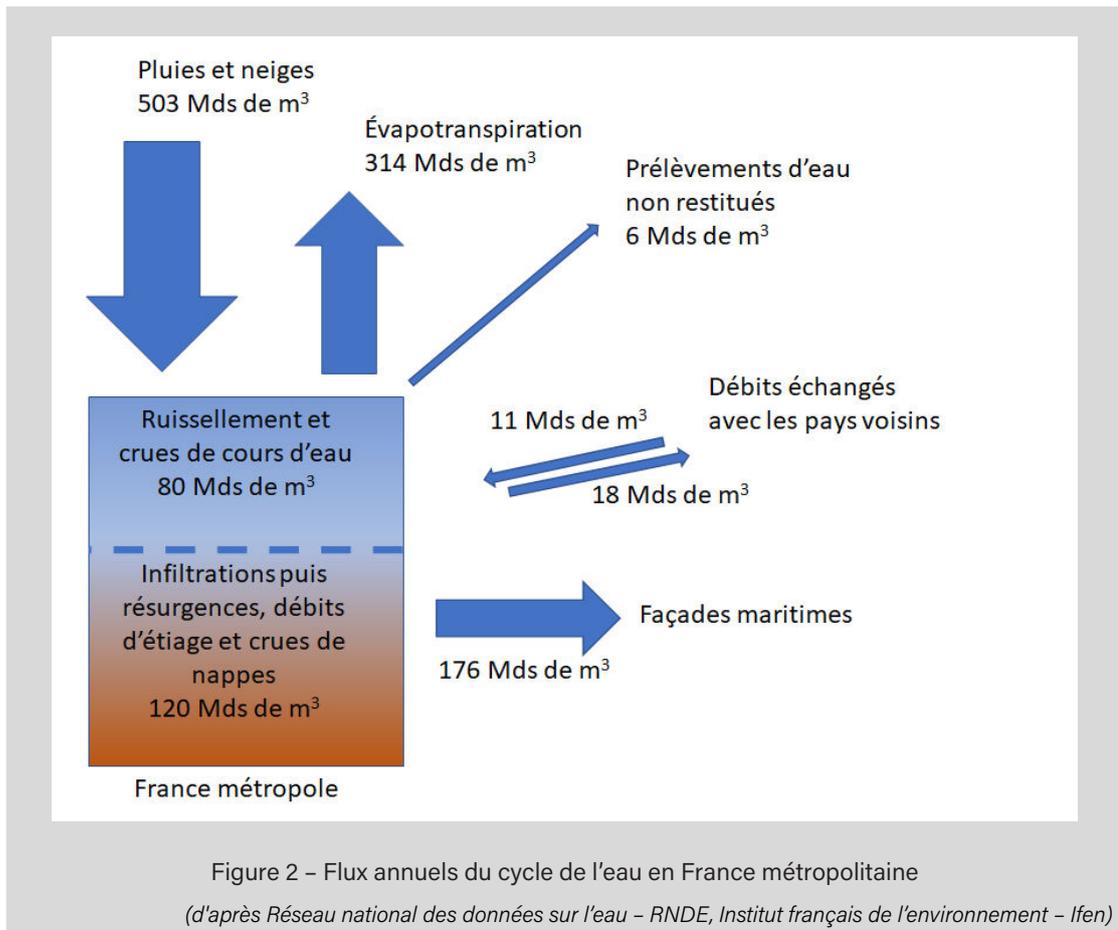
Éléments probants pour la tendance des observations
(hausse/baisse, degré de confiance moyen/fort).

(IPCC WGI Interactive Atlas: Regional synthesis - Western and Central Europe)

Changements futurs/ Degré de confiance	
Température	
Température moyenne de surface	↑ fort
Chaleur extrême	↑ fort
Vagues de froid	↓ fort
Gel	↓ fort
Humidité et sécheresses	
Inondations par rivières	↑ fort
Fortes précipitations et inondations pluviales	↑ fort
Sécheresse hydrologique	↑ moyen
Sécheresses agricole et écologique	↑ moyen
Temps favorable aux incendies	↑ moyen
Vent	
Sévères tempêtes de vents	↑ moyen
Neige et glace	
Neige, glaciers	↓ fort
Permafrost	↓ fort
Lacs, rivières et banquise	↓ fort
Côtes maritimes	
Niveau relatif de la mer	↑ fort
Inondations côtières	↑ fort
Érosion côtière	↑ fort
Vagues de chaleur océanique	↑ fort
Acidité des océans	↑ fort
Autre	
CO ₂ atmosphérique	↑ fort

TERRITOIRE MÉTROPOLITAIN

Les flux globaux de volumes d'eau annuels sont estimés, pour la France métropolitaine, comme présenté sur la figure 2. Ces estimations montrent l'importance, dans ce bilan, de l'évapotranspiration faisant retourner environ 62 % du volume des précipitations vers l'atmosphère et des grands volumes de stockages souterrains.



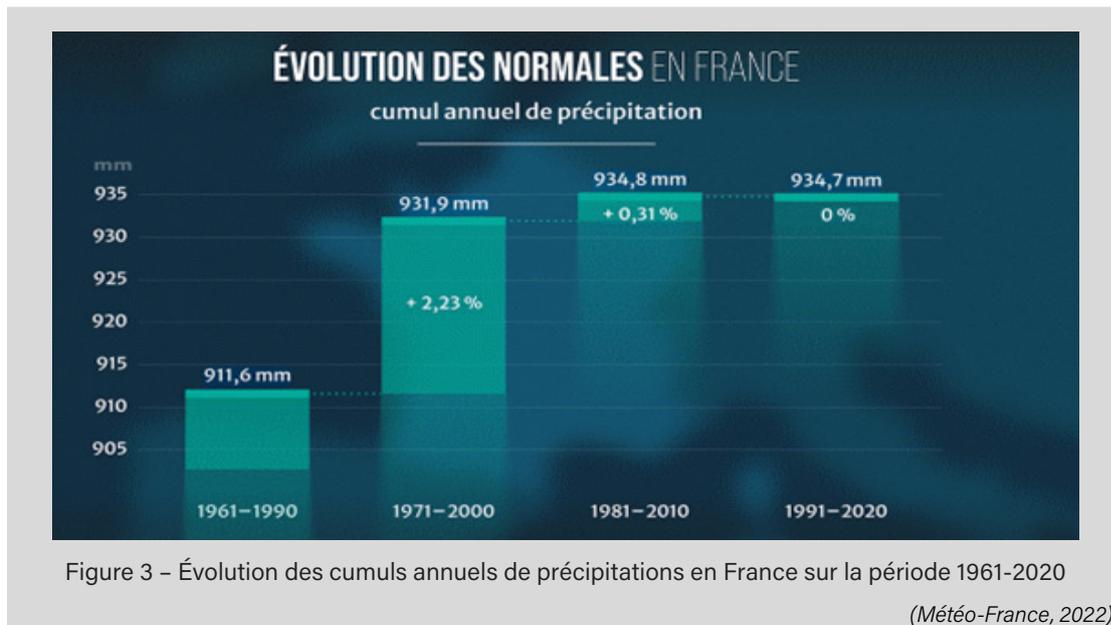
Une hétérogénéité territoriale et saisonnière des volumes de précipitations

À l'horizon 2050, par rapport à la période 1976-2005, la température moyenne annuelle est estimée augmenter en France de + 2,2 °C (avec un intervalle de confiance : + 1,8 °C à + 2,9 °C) et la valeur de cumul annuel de précipitations de + 3,5 % (- 1,9 % à + 10,2 %) avec une augmentation en hiver (+ 16,7 % [+ 10,9 % à + 33,5 %]) et une réduction en été (- 10,8 % [- 27,8 % à + 7,3 %]) (ministère de la Transition écologique, 2022).

Les données chronologiques montrent une **relative constance** des volumes de précipitations lorsque le territoire métropolitain est considéré en son entier (Figure 3). Les modélisations montrent de faibles variations (Figure 4). Cette situation confirme que les baisses de précipitations en été, accompagnées d'une augmentation de l'évapotranspiration du fait d'une atmosphère plus chaude, ne peut qu'aggraver et complexifier les bilans besoins/ressources en périodes estivales, à un moment où les besoins sont justement plus importants (agriculture, loisirs, chaleur...).

Il faut de plus souligner une forte incertitude sur l'évolution de la répartition de la pluviométrie, notamment sur la tendance des précipitations hivernales du fait de la variabilité interne du climat. Il est estimé, sous ces réserves :

- des disparités régionales très nettes (Figures 5 et 6);
- une forte variabilité interannuelle de 200 mm (100 Mm³) à 500 mm (250 Mm³) pour l'alimentation des cours d'eau et des nappes en métropole (en moyenne de l'ordre de 350 mm/an soit 175 Mm³).



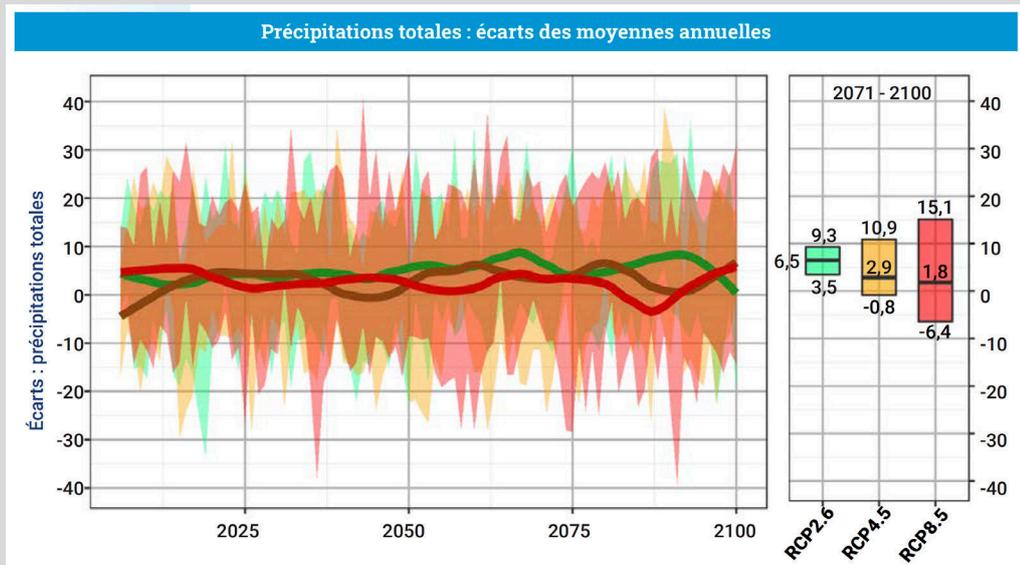


Figure 4 – Évolution de l'écart relatif du cumul annuel de précipitations au cours du 21e siècle par rapport à la référence 1976-2005 et pour chaque saison pour les trois scénarios : RCP-2.6 en vert, RCP-4.5 en orange et RCP-8.5 en rouge. Le trait continu correspond à la médiane lissée. L'enveloppe de couleur illustre l'intervalle entre les centiles 5 et 95 de la distribution de l'ensemble des simulations. À droite, les écarts sur le dernier horizon 2071-2100.. (Soubeyrou., 2020)

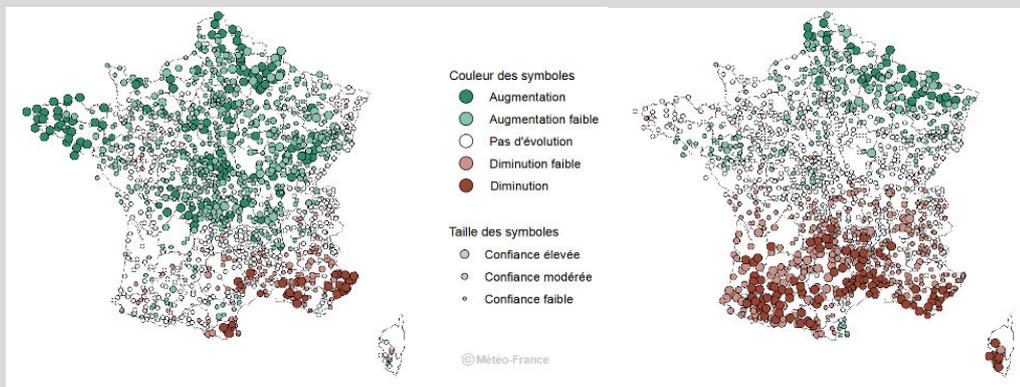
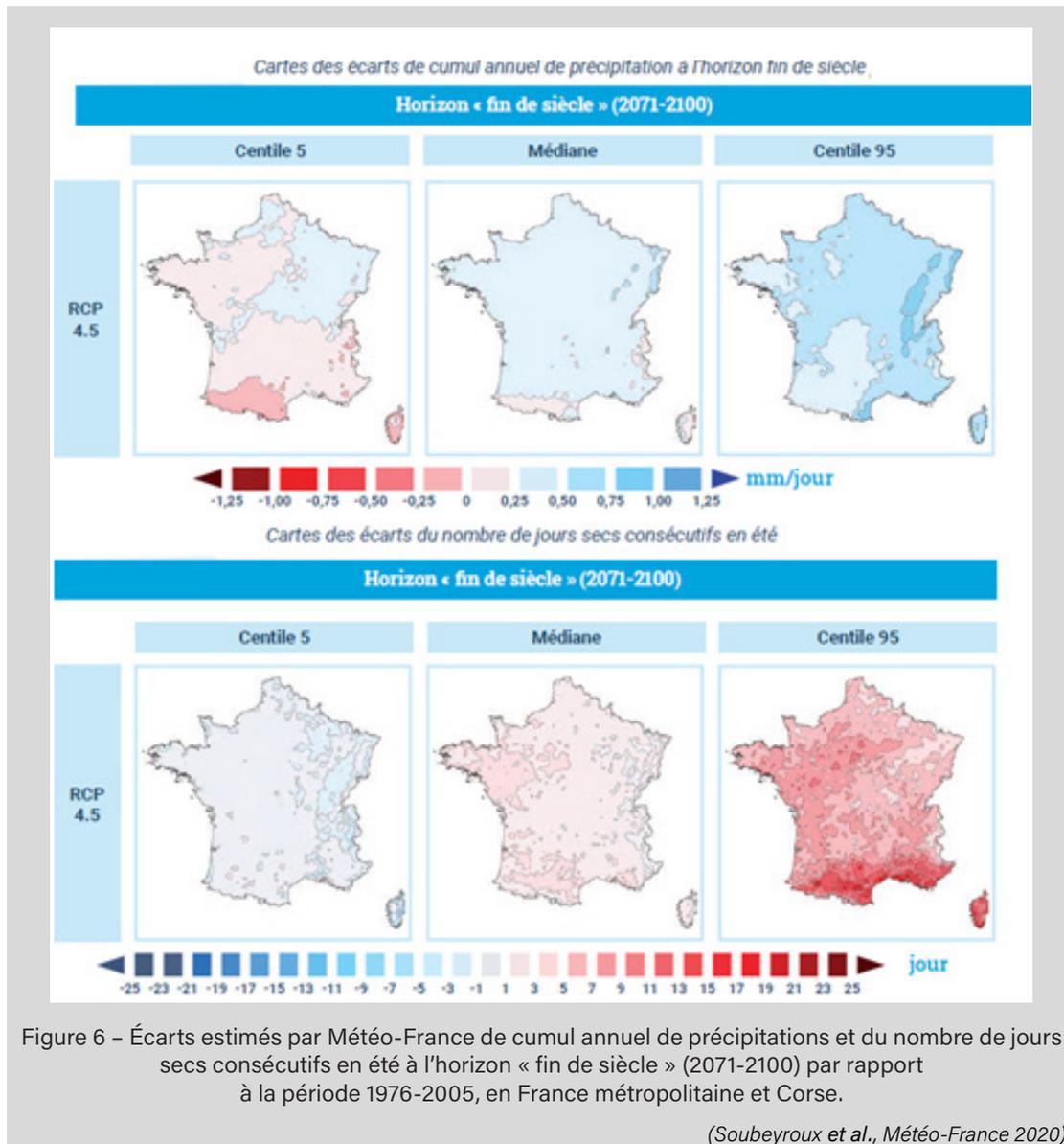


Figure 5 – Évolution territoriale observée des précipitations au cours de la période 1961-2012 pour les deux saisons été (à gauche) et hiver (à droite) en France métropolitaine et Corse (Météo-France, 2022)



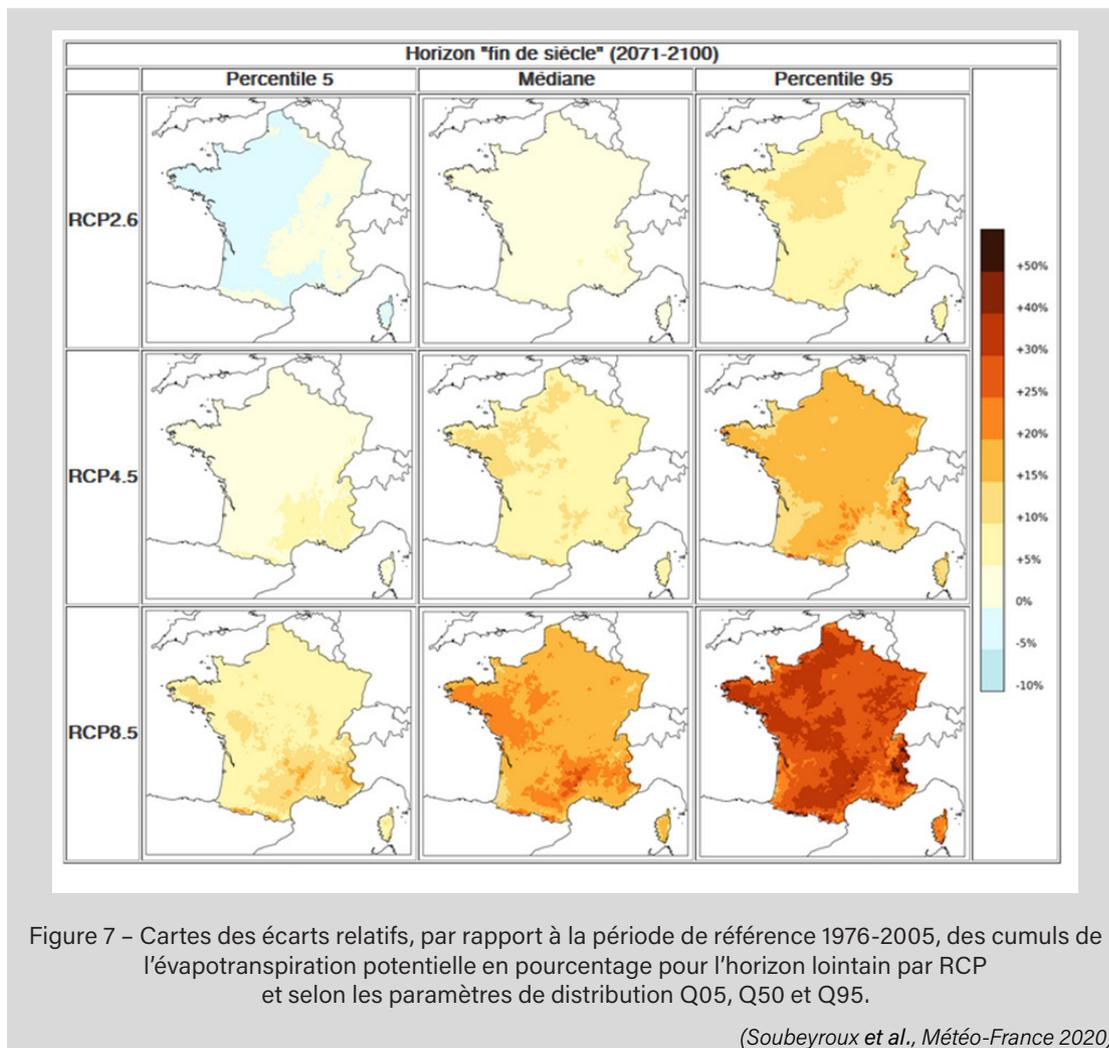
Il est donc déjà constaté une augmentation des cumuls saisonniers de précipitations dans certaines zones du nord et une diminution tout au long de l'année, plus marquée dans le sud, conduisant à des difficultés de recharge des réserves souterraines et superficielles, surtout dans le sud. Dans les projections climatiques, ces tendances se poursuivent avec l'augmentation du niveau de réchauffement planétaire. À ces tendances se superpose une variabilité interannuelle importante présentant une cinétique de variabilité plus élevée.

Une évapotranspiration intensifiée

L'évapotranspiration (évaporation de l'eau par les plantes) est une composante essentielle du cycle de l'eau et du bilan hydrologique. Environ 60 à 70 % des précipitations totales sur une zone est ainsi renvoyée dans l'atmosphère, tandis que le restant rejoint les écoulements de surface et souterrains. L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la somme de la transpiration du couvert végétal, à travers les stomates des plantes, et de l'évaporation du sol qui pourrait se produire en cas d'approvisionnement en eau suffisant (disponibilité en eau non limitative) pour un couvert végétal bas, continu et homogène sans aucune limitation (nutritionnelle, physiologique ou pathologique) (ministère de la Transition écologique, 2022). L'écart entre l'ETP théorique et l'évapotranspiration réelle mesurée (ETR) est une mesure pertinente du déficit hydrique, cette différence ETP-ETR caractérisant l'assèchement de la végétation et du sol.

Les forêts occupent en France 31 % de la surface du territoire, davantage en proportion en zones de montagne, fortement boisées, notamment dans les parties hautes des bassins versants qui sont aussi les plus arrosées. Leur rôle dans le cycle hydrologique général et leurs interactions avec les ressources en eau sont très importants. La consommation en eau nette des forêts excède presque toujours celle d'autres couverts végétaux. La moindre disponibilité en eau « bleue » (eau qui transite rapidement dans les cours d'eau, les lacs, les nappes) qui en résulte peut être compensée par : i) un impact positif du couvert sur la qualité de l'eau de surface et souterraine, et sur la protection des sols ; ii) la fourniture par les forêts d'un ensemble d'autres biens et services (Biro, 2019). Il convient aussi de noter que les forêts, par leur capacité d'évapotranspiration, limitent le réchauffement de surface et l'intensification des vagues de chaleur, notamment par des racines plus profondes que les cultures. Les stress thermique et hydrique augmentent la mortalité des arbres, qui a doublé en France sur la dernière décennie par rapport à la précédente. Il s'agit de phénomènes de cavitation et d'embolie gazeuse dans les arbres lors de sécheresses sévères (McDowell *et al.*, 2022). L'importance du fonctionnement hydrique des arbres est majeure et le bilan général complexe et fragile.

Dans un climat plus chaud, l'évapotranspiration de référence va augmenter sous l'effet d'une augmentation de l'énergie disponible en surface et d'une augmentation de l'humidité spécifique à saturation (saturation dans l'air) qui augmente avec la température. **L'évapotranspiration potentielle devrait donc augmenter** tout au long du xxie siècle (Figure 7).



Le programme de recherche Explore 2070, qui s'est déroulé de juin 2010 à octobre 2012, a été porté par la direction de l'eau et de la biodiversité du ministère en charge de l'écologie avec la participation de l'Onema, du CETMEF, des agences de l'eau, des DREAL de bassin, du CGDD, de la DGEC et de la DGPR. Il a rassemblé une centaine d'experts venant d'établissements de recherche et de bureaux d'études spécialisés et a eu pour objectifs :

- d'évaluer les impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau à l'échéance 2070, pour anticiper les principaux défis à relever et hiérarchiser les risques;
- d'élaborer et d'évaluer des stratégies d'adaptation dans le domaine de l'eau en déterminant les mesures d'adaptation les plus appropriées tout en minimisant les risques.

Il projette sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse une augmentation de l'évapotranspiration de référence de l'ordre de 20 % à l'horizon 2046-2065 par rapport à la période 1961-1990 (Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse, 2017).

Les tendances estimées, notamment par l'Agence de l'eau Adour-Garonne pour ses bassins versants particulièrement concernés et malgré les incertitudes, sont :

- une augmentation des températures de l'air et de l'eau et de l'évapotranspiration ;
- une diminution de l'enneigement ;
- une diminution quantitative de la ressource en eau ;
- des périodes d'étiage plus longues ;
- une dégradation probable de la qualité de l'eau ;
- une fragilisation des écosystèmes aquatiques et humides.

L'Agence de l'eau évoque aussi une « cascade de conséquences » dues à des réactions d'adaptation aux nouvelles conditions entraînant des impacts indirects, et notamment un accroissement des prélèvements dans les nappes souterraines pour compenser la baisse des débits des cours d'eau.

Sur la base de la comparaison des zones à prélèvements importants et à ressources fragiles et prioritaires, le Comité de bassin Rhin-Meuse estime que 30 % de son territoire est concerné par des situations qualifiées de « pénuries » à court et moyen terme.

Dans les régions côtières, l'intensification inconsidérée des prélèvements des eaux souterraines conduit à augmenter le problème de « biseau salé », correspondant à l'intrusion d'eau saumâtre ou salée dans les masses d'eaux douces souterraines à l'intérieur des terres.

La montée du niveau de la mer est inéluctable dans les siècles à venir, liée au temps de réponse des glaciers, de l'océan profond et des calottes polaires aux émissions de gaz à effet de serre à ce jour et à venir. La vitesse et l'ampleur vont dépendre du pic de réchauffement à venir. Le niveau moyen de la mer a monté de + 20 cm depuis 1900, et a accéléré, le rythme atteignant 3,7 mm/an sur la période 2006-2018. À l'horizon 2050, le GIEC (2021) évalue une montée du niveau moyen de la mer médiane de l'ordre de 20 cm de plus qu'en 1995-2014, avec un rythme plus élevé (de l'ordre de 4 mm/an en cas de très fortes baisses des émissions de gaz à effet de serre, mais de 8 mm/an dans le scénario de très fortes émissions et en cas d'instabilités des calottes). Les conséquences sont, en particulier, une augmentation des intrusions d'eau salée dans les estuaires et les aquifères, et des inondations fréquentes à marée haute qui vont aussi s'amplifier au cours de cette décennie dans les basses terres, avec des enjeux sur les aménagements pour l'eau potable et l'assainissement.

En matière de qualité des eaux, la réduction des débits entraîne des influences sur la dynamique de dégradation des polluants (métabolites), une augmentation de la matière organique naturelle dissoute et la libération possible des stocks de polluants

(sédiments, sols).

Par ailleurs, si les volumes de rejets polluants restent constants, une dégradation de la qualité chimique sera observée. Ces éléments auront un impact probable sur la production de l'eau destinée à la consommation humaine et sur son coût.

Une réduction du manteau neigeux et une baisse de la masse des glaciers

Le manteau neigeux alimentant les cours d'eau à la fin du printemps est **déjà en baisse** dans les Alpes. En climat futur, les précipitations se feront plus souvent sous forme de pluie au cœur de l'hiver et la fonte du manteau neigeux sera plus **précoce au printemps**.

Le stock nival se réduit sur tous les massifs en moyenne de 20 kg/m² par décennie, soit - 12 % par rapport à la normale 1981-2010 (ministère de la Transition écologique, 2022) et l'épaisseur des glaciers est en baisse rapide (Figures 8 et 9).

Selon Verfaillie *et al.* (2018) le changement de hauteur moyenne de neige à 1500 mètres d'altitude dans le massif de la Chartreuse évoluerait de - 25 % et - 32 % respectivement pour des augmentations de + 1,5 °C et + 2 °C de température globale par rapport aux niveaux préindustriels.

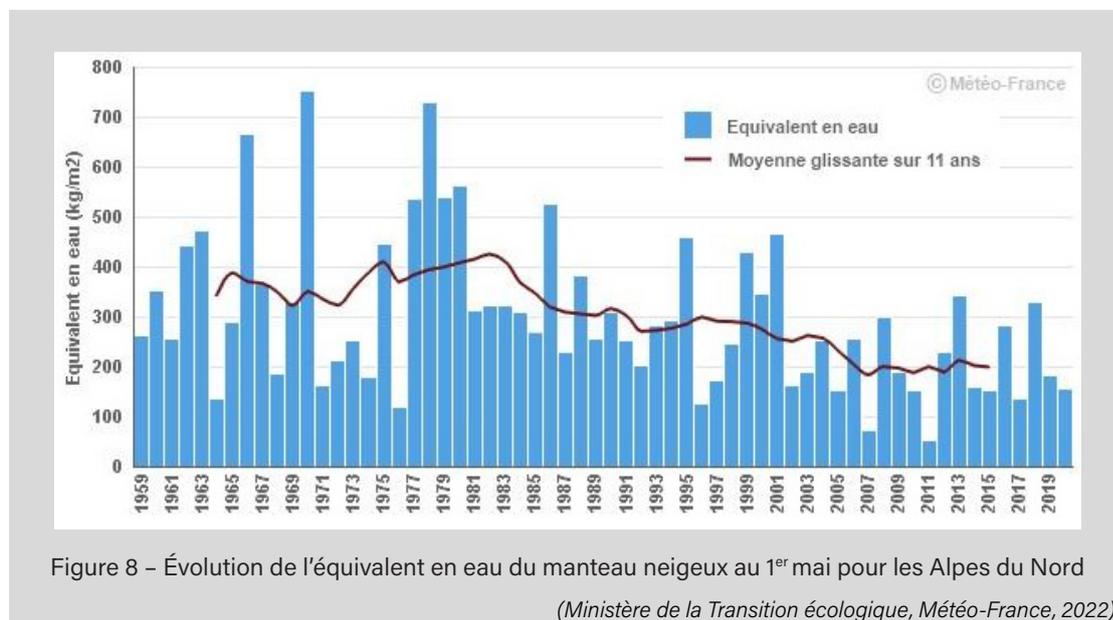


Figure 8 – Évolution de l'équivalent en eau du manteau neigeux au 1^{er} mai pour les Alpes du Nord

(Ministère de la Transition écologique, Météo-France, 2022)

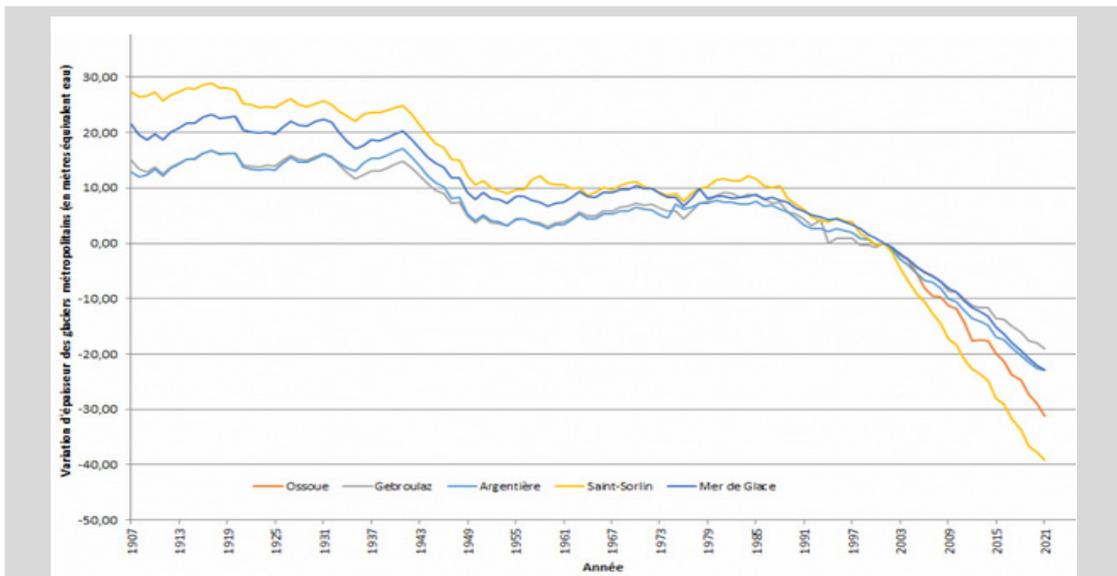


Figure 9 – Évolution de l'épaisseur des glaciers en France

(Ministère de la Transition écologique, Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique, Association Moraine et Institut des géosciences de l'environnement, 2022)

La puissance de l'impact augmenterait significativement, atteignant des réductions de 80 % pour une augmentation de 4 °C de la température globale.

Des résultats similaires sont obtenus en moyenne montagne dans d'autres massifs et il est prévu un mois de durée d'enneigement en moins par degré Celsius de réchauffement planétaire. Le point clé est un recul de l'enneigement en moyenne montagne.

La réduction de ces réserves nivales induit une diminution des capacités de stockage d'eau en altitude.

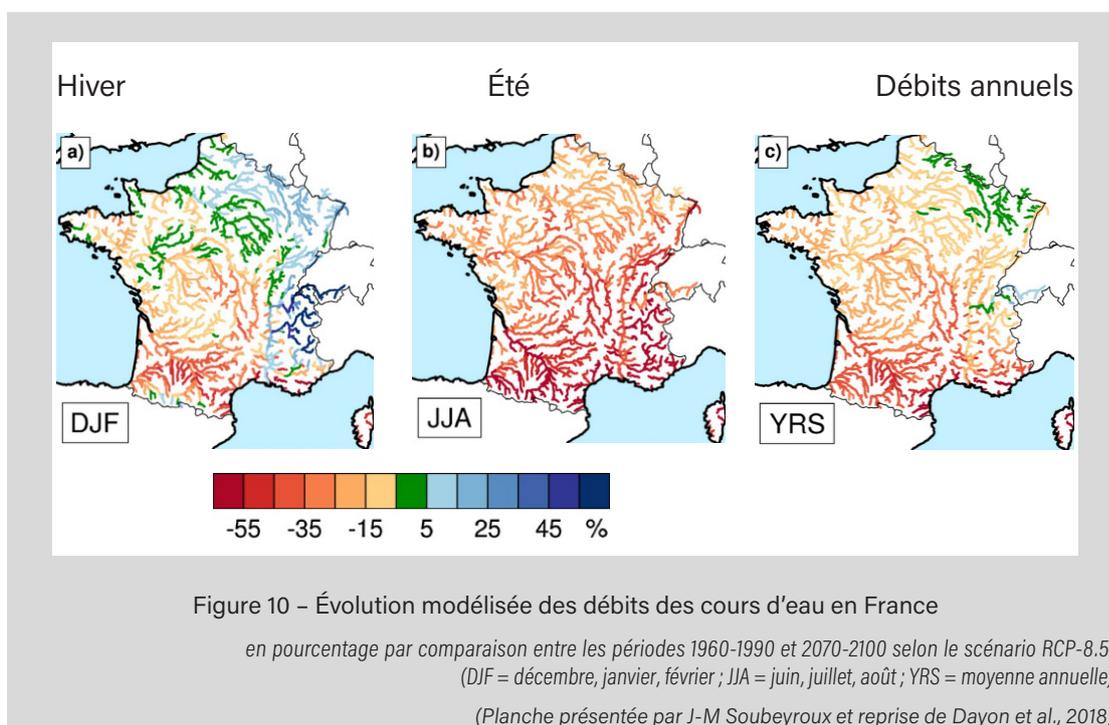
Une réduction des débits moyens des cours d'eaux avec des disparités régionales et saisonnières

Les débits observés dans les cours d'eau sont une fonction de l'offre en eau naturelle, des consommations des usages et de la gestion de l'eau notamment au travers des ouvrages hydrauliques.

En raison des changements climatiques, il apparaît en France une **réduction des débits moyens annuels** avec des variations intersaisonniers et interrégionales et une baisse des débits d'étiage. L'augmentation attendue de l'évapotranspiration contribue à une baisse globale des débits (Figure 10).

Le programme Explore 2070, estime une **diminution globale significative des débits moyens annuels**, de l'ordre de 10 % à 40 % selon les simulations à partir du scénario d'émission de gaz à effet de serre du GIEC A1B correspondant au scénario + 3 °C (+ 4 °C en France), particulièrement prononcée sur les bassins de Seine-Normandie et d'Adour-Garonne.

Les résultats sont obtenus à partir des anomalies évaluées entre des simulations futures (2046-2065) et les simulations passées (1961-1990). Le scénario d'émission de gaz à effet de serre choisi est le scénario médian A1B du GIEC ; ce scénario, ni optimiste ni pessimiste, conduit à une augmentation de la température moyenne mondiale de 2,8 °C en 2100 par rapport à l'an 2000.



Les résultats s'accordent sur les points suivants (Explore, 2022) :

- une baisse générale des débits d'étiage pour la majorité des bassins de la métropole ;
- pour la plupart des bassins et des simulations, la baisse du débit mensuel minimal d'une année civile pour une période de retour 5 ans (telle qu'elle ne se produit, en moyenne, qu'une année sur cinq ou vingt années par siècle – QMNA5) est de l'ordre de 5 % à 65 % ;
- pour une majorité de bassins de régime pluvial-océanique, une baisse prévisible de 10 à 70 % des débits des mois d'août et de septembre ;
- des résultats plus dispersés pour les étiages que pour les ressources moyennes annuelles ;

- une majorité des projections qui indiquent une baisse de la ressource plus sévère en période d'étiage qu'en moyenne annuelle sur la majeure partie du territoire ;
- dans les bassins de montagne, des étiages estivaux plus sévères et des projections qui divergent concernant l'évolution des étiages hivernaux.

Les modèles développés par EDF confirment une baisse des débits annuels de 5 à 10 % à l'horizon 2050. La baisse des débits d'étiage serait de 30 à 40 %, induisant notamment des préoccupations pour le refroidissement des centrales de production d'électricité, mais pas uniquement. À titre d'exemple, EDF a modélisé la Dordogne à Bort-les-Orgues, en Corrèze (régime pluvio-nival), observant une réduction de l'apport de fonte au printemps, un étiage estival anticipé, une baisse de l'écoulement annuel de 10 %. Pour Tignes, en Savoie (régime nivo-glaciaire), il apparaît principalement une avancée de l'onde de fonte (de 15 jours plus précoce) et une baisse de l'écoulement annuel de quelques pourcents.

Une augmentation de la variabilité des fortes pluviométries

La hausse du nombre de jours sans pluie, variable selon les régions, pour un même cumul moyen saisonnier signifie une augmentation du nombre de jours de pluies intenses.

Pour la région méditerranéenne (Aude, ex-Languedo-Roussillon) Soubeyroux *et al.* (2022) montrent une tendance à la hausse de la fréquence, de la surface et des volumes précipités des événements de pluies intenses pour la période 1961-2018 à partir des analyses spatialisées de précipitations quotidiennes « Prescilia » sur la France pour des seuils élevés supérieurs à 150 mm/jour. Une hausse des intensités de pluies extrêmes est attendue en milieu de siècle de l'ordre de 7 % en valeur médiane, mais jusqu'à 20 % dans les pires simulations (jeu DRIAS-2020 sous scénario climatique RCP2.6, RCP4.5 ou RCP8.5).

À l'horizon milieu de siècle, les simulations de l'ensemble DRIAS-2020 annoncent des augmentations des précipitations intenses assez homogènes entre RCP et sur le territoire de l'ordre de 9 % à 12 %. Le ruissellement de ces pluies extrêmes est amplifié par l'urbanisation et l'imperméabilisation des sols (nouveau type de risque d'inondation pluviale rapide).

Cette intensification de la variabilité induit des contraintes de gestion, mais aussi des réflexions indispensables pour favoriser la capacité à capter et ne pas perdre cette eau délivrée en conditions brutales et difficiles lors de ces épisodes pour une utilisation plus tardive.

Une augmentation des surfaces de sols concernées par la sécheresse

L'augmentation de la demande évaporative d'une atmosphère plus chaude entraîne un assèchement (diminution de l'humidité des sols), surtout entre février et septembre, avec un allongement de la période de sols secs en été, une augmentation de la surface des sécheresses agricoles passant de 5 % du territoire dans les années 1960 à 10 % actuellement, une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses depuis la fin des années 1980 et des événements majeurs répétés depuis le début du xxi^e siècle. Des sécheresses à intensification rapide ont été observées du fait d'événements composites de déficit de précipitations et de températures très élevées.

Les projections montrent **une augmentation des surfaces de sols en sécheresse** dans un climat plus chaud (Figures 11 et 12).

Selon Soubeyrou et al. (2012), à l'horizon 2050, des sécheresses inhabituelles en termes d'extension spatiale ou d'intensité apparaissent en France. À l'horizon 2080, des sécheresses météorologiques plus fortes apparaissent également. La situation continue à s'aggraver de manière plus marquée pour les sécheresses agricoles, et une grande partie du territoire pourrait connaître de très longues sécheresses du sol, presque sans retour à la situation normale par référence au climat actuel. Pour les sécheresses météorologiques, aucune évolution sensible n'est notée jusqu'en 2050 à l'échelle du pays, mais, quelle que soit la saison, les sécheresses estivales, voire automnales, s'aggravent sur une grande partie du pays en fin de siècle. Il n'est pas constaté d'évolution sur les sécheresses hivernales et printanières.

Si une forte baisse des émissions mondiales de gaz à effet de serre était effective, une stabilisation du réchauffement serait possible vers 2050-2070.

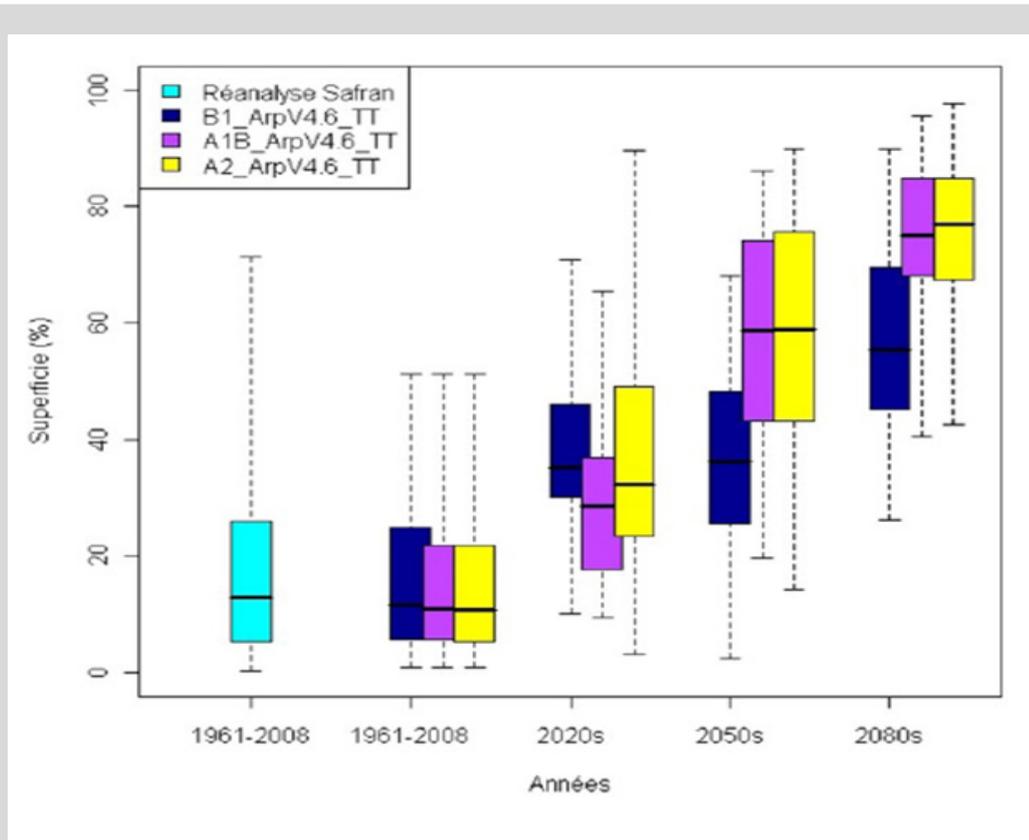


Figure 11 – Évolution de la superficie de France en sécheresse selon le scénario SSWI-3 (SSWI= Indice sécheresse d'humidité des sols)

(Soubeyroux et al., Météo-France 2012)

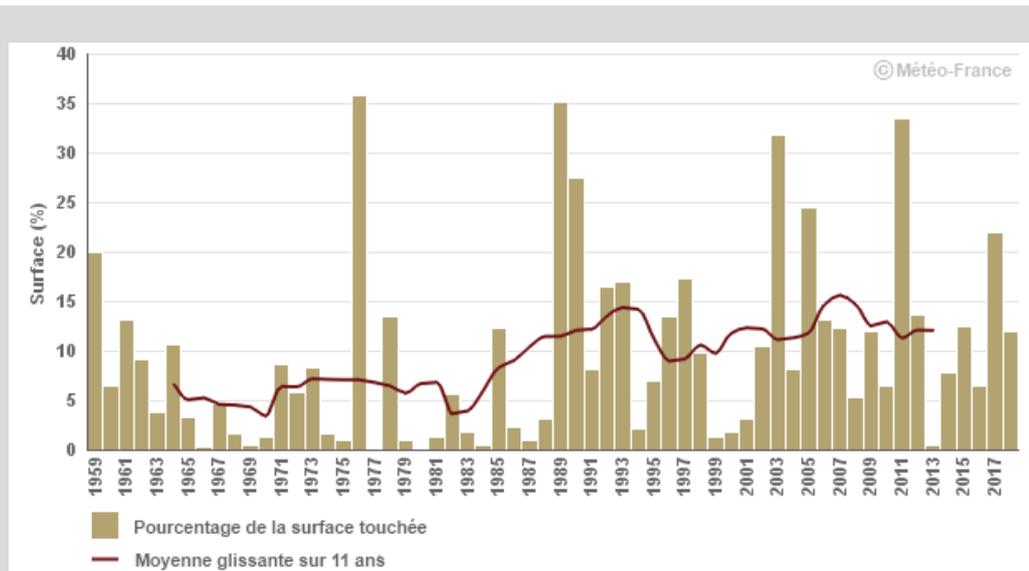


Figure 12 – Évolution du pourcentage annuel de la surface de la France métropolitaine touchée par la sécheresse de 1959 à 2018 montrant de fortes variabilités annuelles

(Météo-France, 2020)

Une tendance à la baisse des prélèvements dans les ressources sauf pour l'agriculture, mais une sollicitation forte des nappes souterraines

Environ 33 milliards de m³ d'eau douce ont été prélevés en métropole en 2013, dont 5,5 milliards de m³ d'eau en nappe (DataLAB, 2017).

Les principaux prélèvements (indépendamment des retours sous forme liquide au milieu) concernent, en moyenne annuelle, le refroidissement des centrales de production d'électricité (50 %), la production d'eau destinée à la consommation humaine (17 %), l'agriculture (9 %), les canaux de navigation (16 %), les industries (8 %) (Figure 13). Pendant les trois mois d'été l'agriculture peut représenter jusqu'à 80 % de l'eau prélevée dans certaines zones géographiques où les ressources sont les moins importantes.

Cette répartition est très variable selon les bassins : l'eau prélevée est attribuée majoritairement à l'agriculture dans les bassins Adour-Garonne (78 % du total) et Loire-Bretagne (55 %), à l'eau potable en Artois-Picardie (62 %) et en Seine-Normandie (56 %), et à la production d'électricité en Rhin-Meuse (58 %) et en Rhône-Méditerranée (46 %) (ministère de la transition écologique, 2022).

En France métropolitaine, l'impact de l'utilisation de l'eau est plus important en période estivale (de juin à août), pendant laquelle 60 % des prélèvements en eau s'opèrent, alors que seulement 15 % du volume annuel d'eau douce s'écoule sur le territoire (moyenne sur la période 2008-2018).

Certains prélèvements restituent l'eau liquide plus ou moins polluée (pollutions urbaines, agricoles, industrielles, chaleur...) vers les milieux récepteurs. Elle peut alors, sous réserve de garantir le bon état écologique des milieux aquatiques locaux, être réutilisée après épurations naturelles ou artificielles adaptées. D'autres, comme l'irrigation agricole ou les aéroréfrigérants, transfèrent cette eau vers l'atmosphère avec un niveau de perte sur le bassin versant local.

À l'échelle nationale, les deux tiers de l'eau potable sont produits à partir de ressources souterraines. Les proportions sont inversées pour l'irrigation agricole (Figure 14).

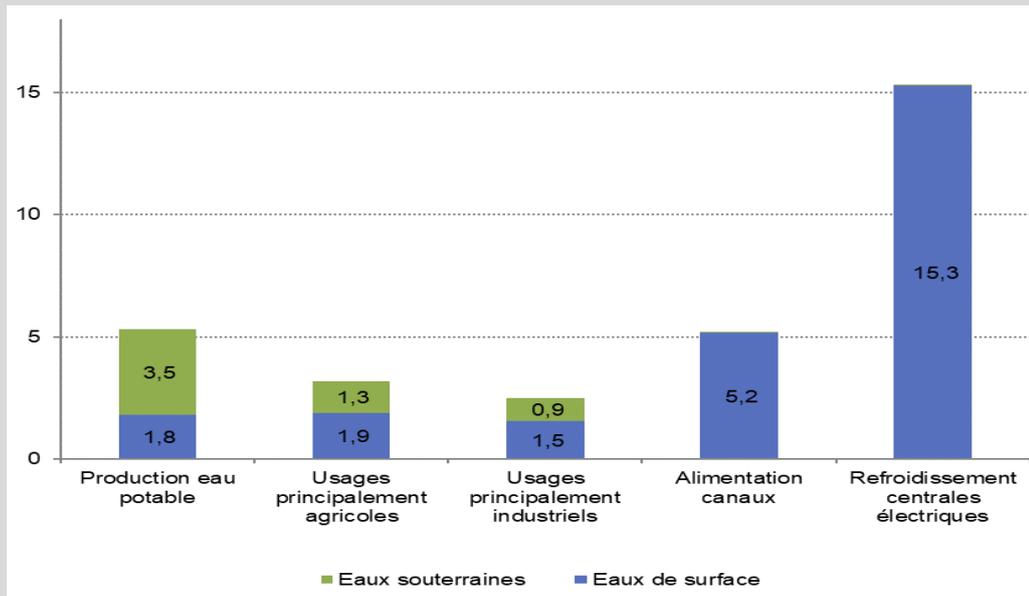


Figure 13 – Répartition des volumes d'eau douce prélevés par usage et par milieu, en 2019, en milliards de m³

(BNPE, OFB, Ministère de la Transition écologique.Traitement SDES, 2022 - www.notre-environnement.gouv.fr)

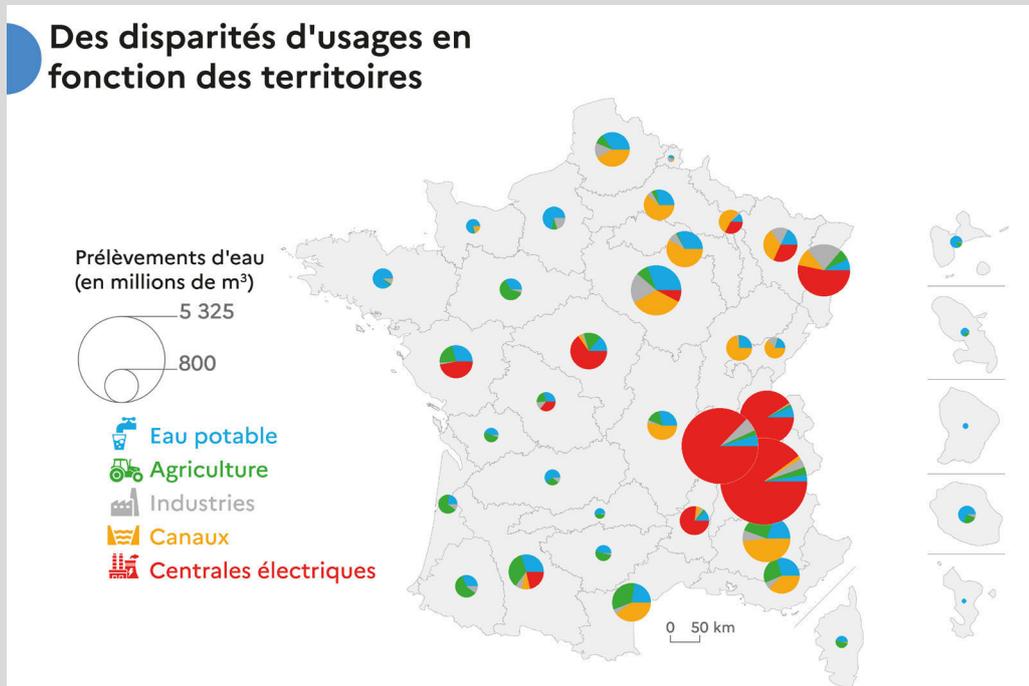
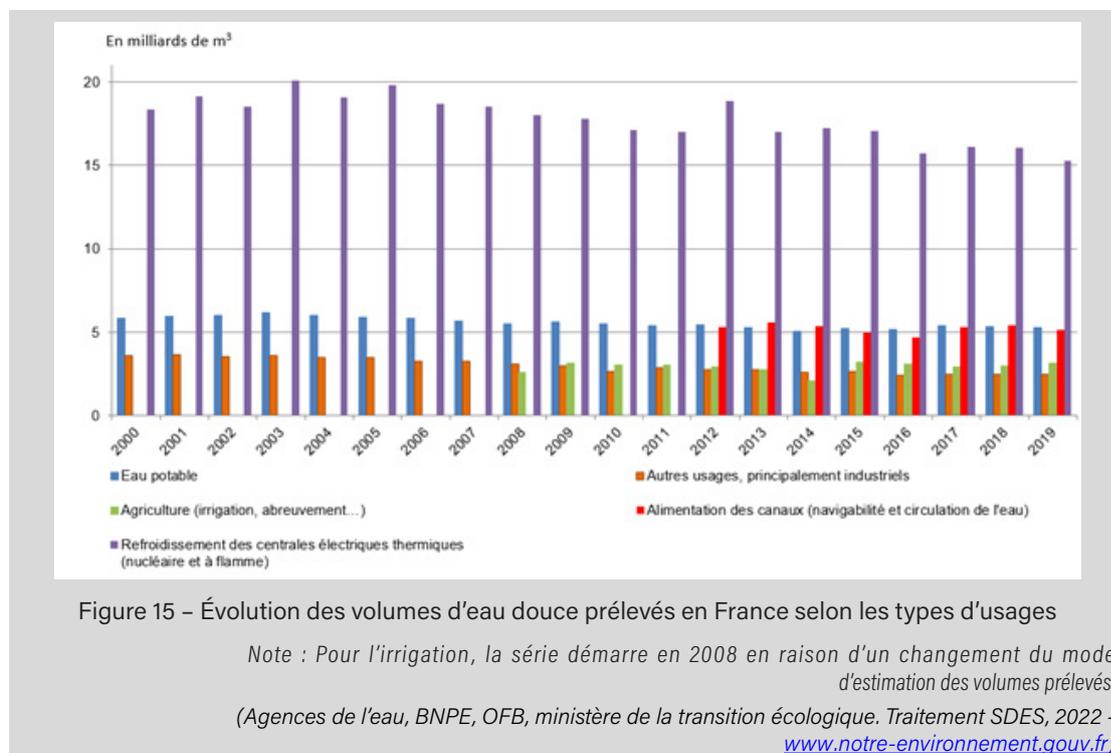


Figure 14 – Prélèvements d'eau selon l'utilisation dans les sous-bassins hydrographiques français, en 2020

(BNPE, OFB, Ministère de la Transition écologique.Traitement SDES, 2023 - www.notre-environnement.gouv.fr)

En France, depuis le début des années 2000, l'ensemble du volume prélevé se réduit (Figure 15). Tel est notamment le cas pour l'eau potable (- 13 % entre 2003 et 2017), l'utilisation industrielle (- 29 % entre 2003 et 2017), les centrales électriques (- 20 % entre 2003 et 2017).



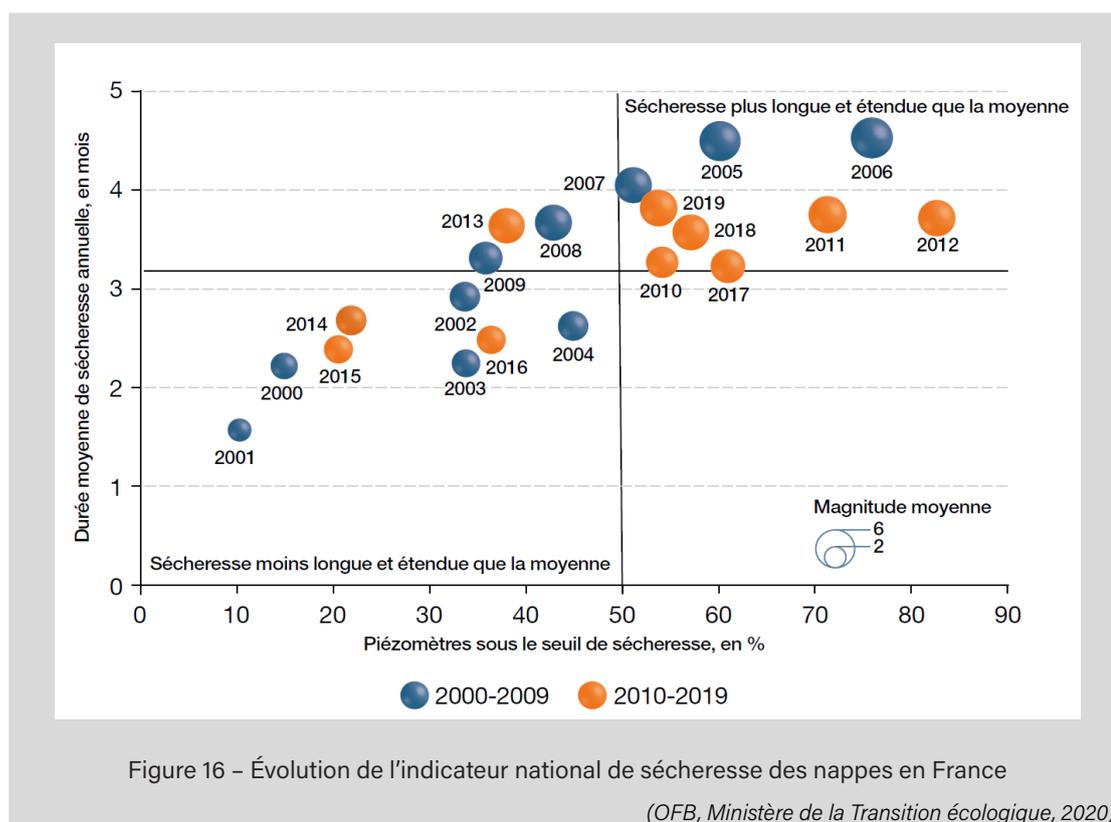
Actuellement, les prélèvements pour l'irrigation agricole varient entre 2 et 3 milliards de m³ selon les conditions météorologiques, et sont principalement effectués en été. Pour la période 2008-2017, l'agriculture utilise en moyenne plus de 50 % du volume d'eau prélevé pour les usages ménagers, agricoles et industriels en période estivale dans 22 sous-bassins couvrant les trois quarts du territoire métropolitain (OFB, ministère de la Transition écologique, 2020.)

Conformément à la définition retenue par l'Agence européenne pour l'environnement, « l'eau renouvelable » apportée sur un territoire par le cycle naturel de l'eau a pour origine l'eau douce apportée par les cours d'eau entrant sur ce territoire et la fraction des précipitations qui ne retournent pas à l'atmosphère par évaporation ou évapotranspiration et rejoignent alors les eaux superficielles (cours d'eau, lacs, etc.) et souterraines (nappes d'eau).

Certains sous-bassins recèlent de faibles ressources en eau renouvelables, tout en faisant face à une forte consommation estivale, c'est principalement le cas des sous-bassins de Mayenne-Sarthe-Loir, de Charente, des littoraux aquitains et charentais et, dans une

moins mesure, des sous-bassins du Tarn-Aveyron et de Corse. Dans ces secteurs, la part d'eau consommée par l'usage agricole en période estivale dépasse 90 %. Elle est essentiellement destinée aux cultures céréalières, majoritairement le maïs.

La sollicitation des eaux souterraines, associée avec les manques de remplissage en hiver et au printemps, conduit à des sécheresses des nappes souterraines. La figure 16 montre la variabilité de ces évolutions et il apparaît que les années 2010 ont présenté plus majoritairement qu'auparavant des niveaux de sécheresse plus longues que la moyenne et de durées en augmentation.



La demande en eau pour l'agriculture et l'évolution du territoire (population, industries, type de cultures, surfaces irriguées...) est dépendante de la météorologie (et donc du climat) et elle augmente avec le réchauffement et l'intensification des extrêmes chauds, entraînant de grandes incertitudes à l'échelle locale des prévisions et des évolutions probables. Néanmoins, le sens reste partiellement prévisible du fait des tendances liées à la démographie, au réchauffement, aux types de pratiques agricoles et aux grandes infrastructures urbaines, touristiques et industrielles.

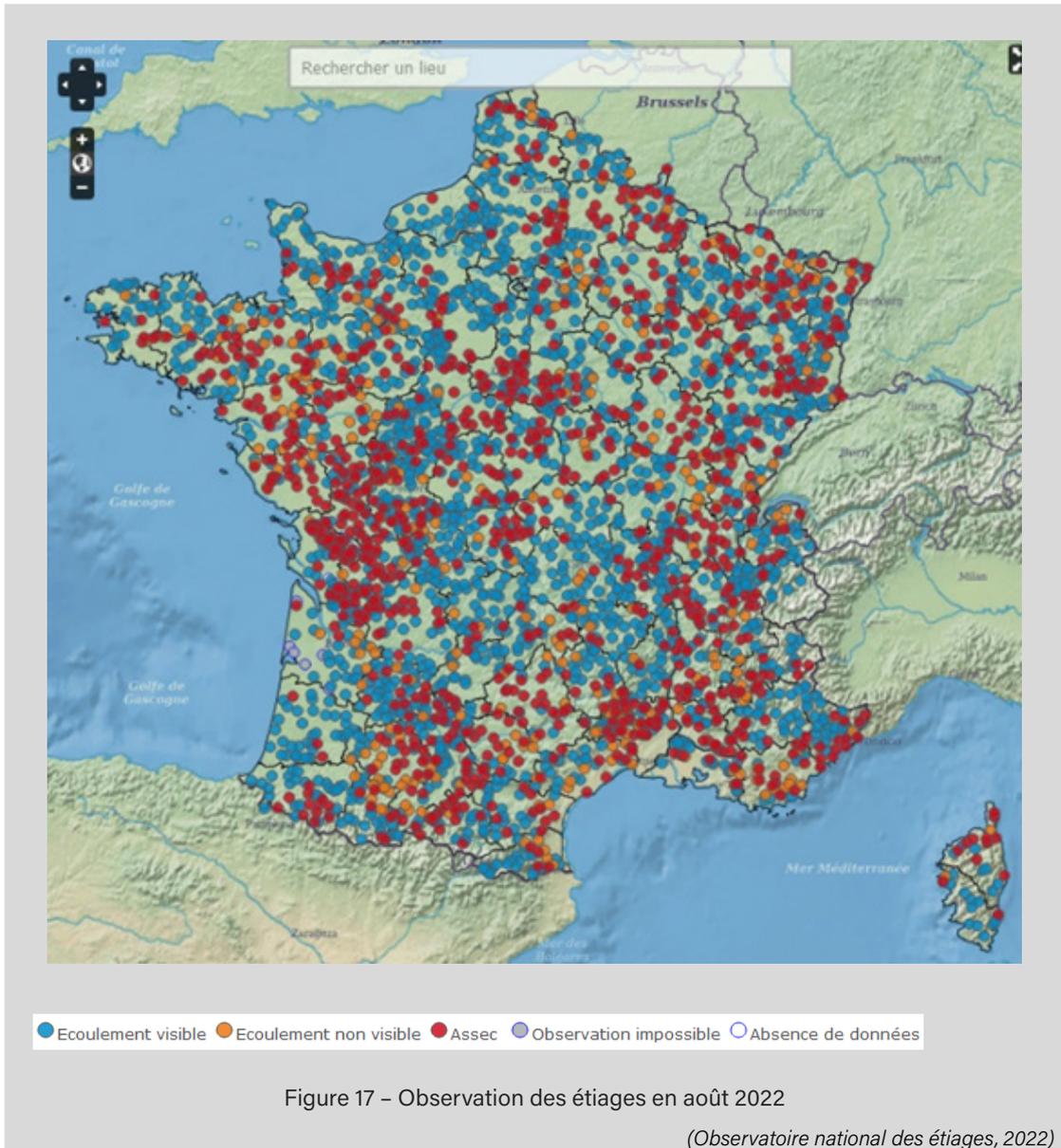
Une fréquence plus élevée que par le passé des périodes de restrictions d'usages

Selon le ministère en charge de l'environnement et l'Office français de la biodiversité, plus de 67 % du territoire métropolitain était concerné par des mesures de restriction d'eau en 2019 et 90 départements ont fait face à des cours d'eau en situation d'assèchement de fin mai à fin septembre 2019. Le volume des précipitations et des pluies « efficaces » varie fortement selon les années, mais avec plus de 60 % d'années déficitaires depuis 1990 (OFB, ministère de la Transition écologique, 2020).

Entre les mois de juin et octobre, l'Observatoire national des étiages (Onde) assure un suivi annuel renforcé qui permet de contrôler l'état des ressources (<https://onde.eaufrance.fr>) (Figure 17).

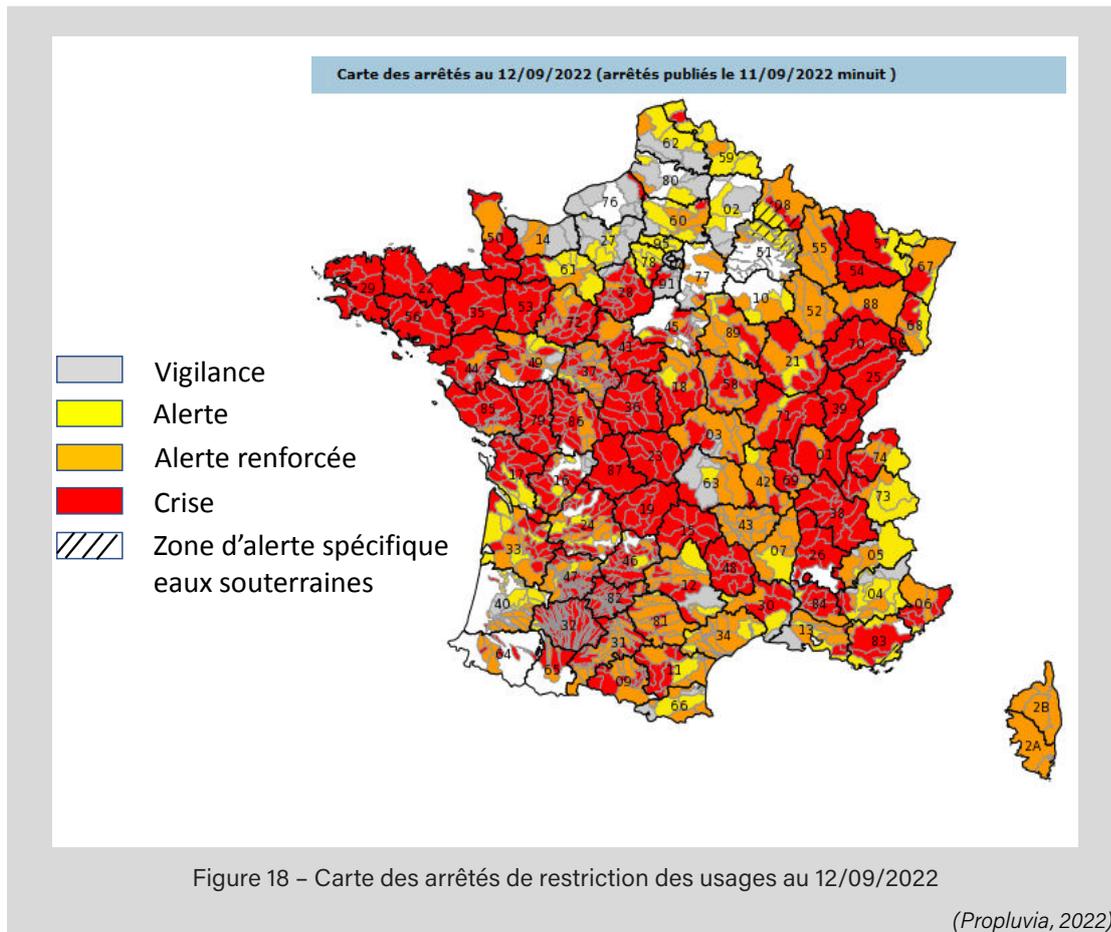
Neuf fois en 20 ans, la sécheresse annuelle des nappes a été plus longue et plus étendue que la moyenne : trois fois sur la décennie 2000-2009 et six fois sur la décennie 2010-2019. Cinq fois depuis 2012 et chaque année depuis 2017, des restrictions d'eau ont été prescrites sur au moins 30 % de la superficie du territoire métropolitain, eaux superficielles et souterraines confondues.

En 2019, des vagues de chaleur record ont induit des mesures de limitation d'utilisation des eaux de surface étendues à plus du tiers du territoire de mi-juillet à fin octobre. L'amplitude territoriale maximale des restrictions est observée fin septembre, avec 28 % du territoire soumis à des mesures de crise, 21 % à des mesures d'alerte renforcée, et 18 % à des mesures d'alerte.



Ces situations difficiles se sont reproduites en 2022. La liste des arrêtés de restriction des usages est actualisée sur le site Propluvia (2022) (Figure 18).

Les choix stratégiques concernant les restrictions d'usage par les autorités devraient impliquer une élaboration préventive basée sur un **calcul des bénéfico-risques** des différentes solutions.



Des évolutions de la qualité

L'augmentation de température des eaux de surface peut favoriser l'évaporation de polluants les plus volatils et favoriser la dégradation des plus biodégradables, mais aussi augmenter la solubilité de certains contaminants augmentant alors leur concentration dissoute, donc préjudiciable aux organismes en contact.

Cette augmentation réduit la quantité de gaz solubilisés dont le CO₂ qui influence l'acidité et le développement des algues, mais aussi l'oxygène indispensable à la vie aquatique, contribuant à la dégradation évolutive des écosystèmes aquatiques appelée « eutrophisation », ce qui complique par ailleurs la traitabilité pour la production d'eau potable.

Les phénomènes de prolifération des cyanobactéries pouvant produire des toxines neurologiques et hépatiques se développent depuis de nombreuses années, en particulier dans des retenues d'eau, selon des conditions de température, de luminosité et surtout d'apports d'éléments nutritifs azotés et phosphorés drainés par les ruissellement et déversements. Une augmentation des stockages d'eau doit intégrer ce type

de risque (ANSES, 2020) et, en particulier, mettre en place des mesures pour limiter l'absence d'oxygène de la couche thermique la plus profonde et de température stable (hypolimnion) des plans d'eau.

Globalement, les risques de contamination vont augmenter pour plusieurs raisons :

- si les volumes déversés d'eaux usées contaminées n'évoluent pas ou trop peu, et si leur charge polluante est toujours aussi élevée, la concentration en polluants sera en augmentation dans les ressources en période d'étiage en raison d'une plus faible dilution. L'augmentation de concentration accentue la toxicité envers les organismes exposés ;
- un plus fort prélèvement des eaux souterraines peut contribuer à augmenter localement des niveaux de contamination de l'eau par aspiration des contaminants venus de la surface du sol et des eaux superficielles, mais aussi par remontée depuis les sols de composants naturels (fer, manganèse, eaux saumâtres...) ;
- certains polluants atmosphériques (métaux, composés organiques) stockés dans les glaces au cours des âges sont libérés lors des fontes des glaciers constituant un apport nouveau de contaminants vers les rivières (Pawlak *et al.*, 2021) ;
- les épisodes de pluies extrêmes peuvent libérer des contaminants lors des inondations (stockages d'hydrocarbures et de produits chimiques notamment). Les premières pluies suivant de fortes périodes sans pluviométrie induisent des lessivages de surfaces imperméabilisées (toitures, voiries...) ayant accumulé des pollutions diverses, ce qui entraîne de fortes concentrations toxiques de contaminants déversés vers les cours d'eau pendant les premières heures ;
- indirectement, les stockages d'eau dans des contenants peuvent relarguer des composants par corrosion (métaux, bétons) ou diffusion (plastiques) altérant la qualité de l'eau diffusée. En complément, les stockages de grands volumes en faible épaisseur et exposition à la lumière évoluent, selon la composition en matières dissoutes vers des phénomènes réduisant la concentration en oxygène (eutrophisation) et favorisant le développement de microorganismes, en particulier de cyanobactéries dont certaines produisent des toxines. La gestion quantitative des masses d'eau implique donc nécessairement une préoccupation qualitative associée ;
- la gestion du maintien permanent d'un niveau d'oxygène dissous suffisant dans la colonne d'eau de fleuves et de plans d'eau est un sujet de préoccupation. Des oxygénations artificielles sont déjà nécessaires dans la Seine lors de la traversée de Paris et dans des plans d'eau ;
- les situations d'étiage, d'augmentation des concentrations en polluants, de réduction de l'oxygène par augmentation de la température, de phénomènes de prolifération massive (efflorescence) de cyanobactéries, de réduction des débits entre autres, sont des facteurs majeurs de perturbation de la vie aquatique et des évolutions de leur biodiversité.

Concernant l'aspect réglementaire de la gestion de l'eau

La politique de l'eau en France est encadrée par la directive-cadre européenne sur l'eau (DCE) publiée en 2000 et dont les grands principes ont été posés dès les années 1960, bien avant la prise de conscience actuelle du changement climatique. La DCE poursuit plusieurs objectifs :

- la non-dégradation des ressources et des milieux ;
- le bon état des masses d'eau, sauf dérogation motivée ;
- la réduction des pollutions ;
- le respect de normes dans les zones protégées.

Adoptée en 2000, à une époque où les impacts des changements climatiques étaient moins bien connus qu'aujourd'hui, la DCE n'affiche pas pour priorité le renforcement des ressources en eau.

La politique française est déclinée à travers les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) élaborés pour une période quinquennale sous l'égide d'un comité de bassin. Le SDAGE « type » est un document de planification organisé en trois axes :

- il définit les orientations permettant de satisfaire les grands principes d'une gestion équilibrée et durable de la ressource en eau ;
- il fixe les objectifs de qualité et de quantité à atteindre pour chaque masse d'eau du bassin : cours d'eau, plans d'eau, nappes souterraines, estuaires, eaux côtières ;
- il détermine les aménagements et les dispositions nécessaires pour prévenir la détérioration et assurer la protection et l'amélioration de l'état des eaux et des milieux aquatiques, afin de réaliser les objectifs fixés.

Il existe six SDAGE en France métropolitaine, un par comité de bassin, et douze au total en incluant les bassins de Corse et de l'outre-mer. Pour la période 2022-2027, tous traitent de l'ensemble des aspects de l'eau et sont très orientés vers l'amélioration de la qualité de l'eau, la protection de la biodiversité, la sobriété dans les usages de l'eau et les réductions des quantités d'eau utilisées pour chaque type d'usage.

Le renforcement de la ressource en eau à partir de la rétention des eaux pluviales est abordé inégalement dans ces SDAGE, et cette composante n'est pas suffisamment mise en avant dans la hiérarchie des priorités à mettre en œuvre. Pour renforcer la ressource en eau, les mesures suivantes sont présentées : la réduction des quantités prélevées, la sobriété dans les usages, l'infiltration locale des eaux pluviales dans les zones périurbaines. Suivant le principe de « zéro artificialisation nette », ils préconisent d'éviter d'imperméabiliser les zones urbaines et, à l'inverse, de les désimperméabiliser dès que possible. Ils promeuvent également la mise en place de « zones de répartition des eaux », l'utilisation des eaux usées traitées et l'infiltration artificielle des aquifères.

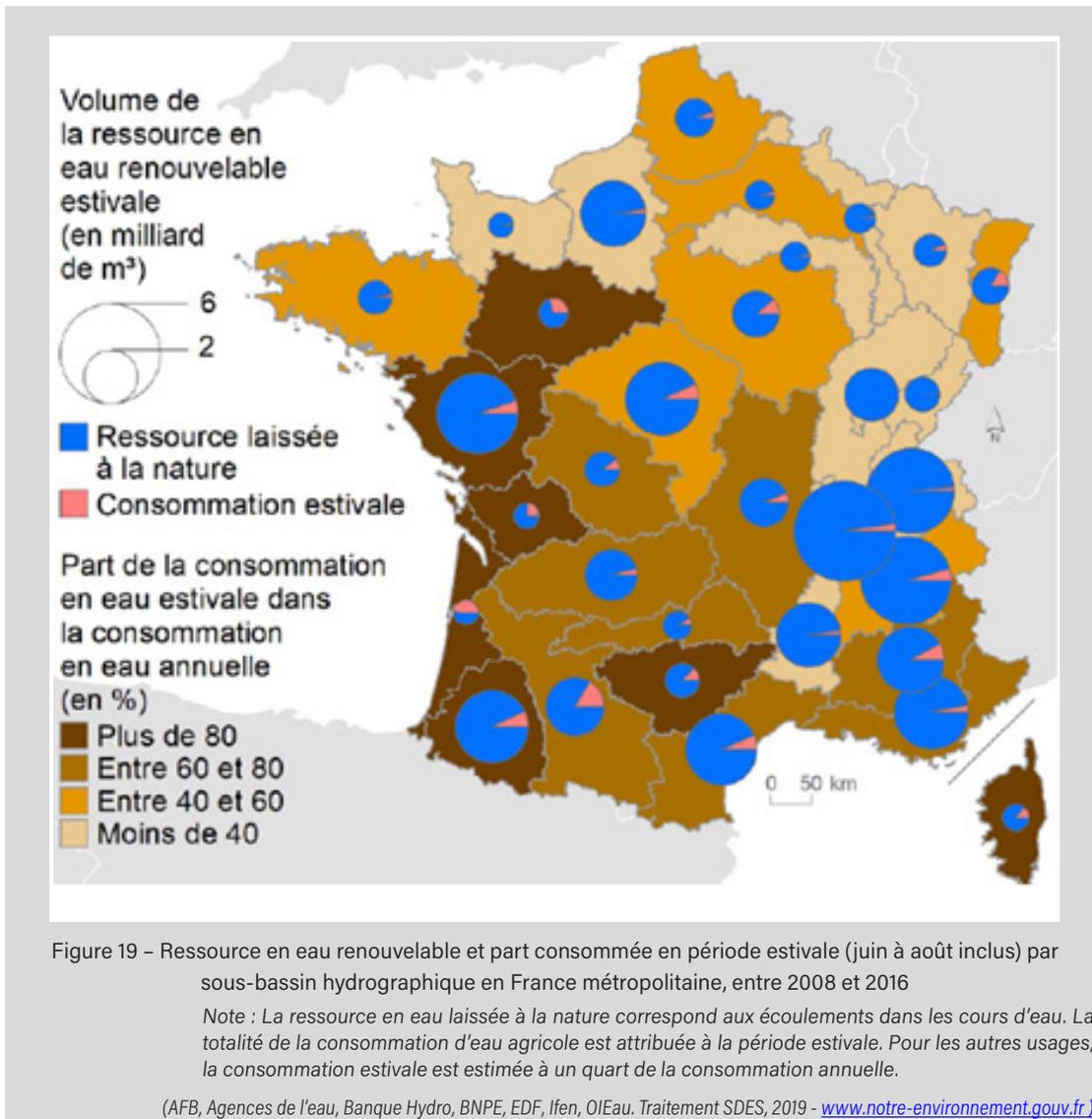
La nécessité de s'adapter : un enjeu collectif

La France métropolitaine a la chance de disposer d'un climat tempéré avec d'importantes ressources en eau. Ceci est objectivé par deux indicateurs :

- le concept de **stress hydrique** qui est le rapport de la quantité disponible d'eau renouvelée annuellement prélevée pour les activités humaines sur la quantité renouvelée moins un débit minimum réservé pour les écosystèmes. Il s'agit de l'indicateur mondial pour la cible 6.4 des Objectifs de développement durable (ODD) des Nations unies : « *D'ici à 2030, augmenter considérablement l'utilisation rationnelle des ressources en eau dans tous les secteurs et garantir la viabilité des retraits et de l'approvisionnement en eau douce afin de tenir compte de la pénurie d'eau et de réduire nettement le nombre de personnes qui souffrent du manque d'eau* ». Avec un stress hydrique de 24 %, la France se trouve à la limite supérieure de la tranche « sans stress », celui-ci commençant à 25 %. Une nuance s'impose, car ce calcul de l'ONU inclut, pour une grosse moitié, les prélèvements pour refroidissement des centrales thermiques dont l'essentiel est réutilisable. La plupart de ses voisins (Belgique, Allemagne, Italie, Espagne) ont des niveaux de stress hydrique plus élevés, dépassant 30 % ;
- l'**index d'exploitation de l'eau** (Water Exploitation Index + ou WEI+), calculé par Eurostat, considère la proportion de la quantité d'eau renouvelée annuellement qui est prélevée par les activités humaines sans retourner dans le cycle de l'eau. Il s'agit donc d'une indication de consommation nette qui différencie les eaux réutilisables des eaux évaporées. Un territoire est considéré en pénurie d'eau lorsque le WEI+ est supérieur à 20 % et en pénurie sévère au-delà de 40 %. La valeur 2019 pour la France est de 2,8 % (Allemagne 2,57 %, Espagne 8,1 %, Italie 7,3 %, Pays-Bas 4,8 %).

Cette valeur moyenne nationale est à considérer en examinant aussi les différences été/hiver et les différences régionales. La figure 19 montre les régions pour lesquelles la consommation d'eau estivale (par rapport à la consommation annuelle) est forte ou très importante (Corse, sud-ouest, façade atlantique...) et présente également, au sein des prélèvements en été, la part qui retourne à la nature et celle qui est estimée sans retour direct. Sont concernées les régions du sud et du centre, la Corse et l'Alsace.

Ce faible niveau de stress hydrique actuel annuel moyen laisse envisager une marge de mobilisation de ressources en eau supplémentaires pour une adaptation du pays aux baisses de ressources causées par les changements climatiques et ce d'autant plus que, contrairement à la majorité des pays en développement, la demande en eau est en tendance légèrement baissière dans le pays. Cette tendance pourrait cependant ne pas se poursuivre si davantage d'eau devait être mobilisée pour l'irrigation agricole. Par ailleurs, ces indicateurs sont grossiers et ne rendent pas compte des disparités locales et des contrastes entre hiver et été.



En pratique, ces baisses actuelles et futures de ressources liées au changement climatique viennent bouleverser les habitudes d'usage de l'eau. Dès lors, les habitudes ancestrales et les droits supposés acquis ne fonctionnent plus.

Le pays doit donc agir pour s'adapter à ces nouvelles conditions hydrologiques. Comme la plupart des mesures envisageables sont des actions de long terme, dont la mise en œuvre peut prendre une dizaine d'années, voire plus, ces mesures d'adaptation doivent traiter les difficultés au-delà de leur niveau actuel. Elles doivent anticiper les conditions hydrologiques qui existeront dans cinquante ans, voire à la fin du siècle, comme ce fut le cas en France au cours des années 1950-80 avec la création de nombreux barrages-réservoirs, et être dimensionnées en conséquence de façon à programmer des investissements qui s'inscrivent dans une gestion durable des ressources.

L'État vient d'indiquer comme raisonnable d'organiser les mesures d'adaptation dans le cadre d'un scénario de réchauffement moyen de la métropole de 4 °C. C'est un réchauffement plus élevé que celui visé par l'accord de Paris, mais les utilisateurs de l'eau ont besoin de se prémunir avec réalisme contre des imprévus pour éviter des crises difficiles à surmonter.

Lors de l'augmentation des tensions locales sur les ressources en eau, agir signifie combiner des actions dans trois directions complémentaires :

- réduire les volumes d'eau douce utilisés : des secteurs comme l'agriculture dépendante des pluies ou l'hydroélectricité n'ont pas le choix. Ils doivent s'adapter à des quantités plus faibles. Toutefois, les autres utilisateurs doivent aussi chercher à réduire leurs volumes utilisés de façon à limiter leurs prélèvements. C'est d'ailleurs ce qu'ils font depuis des décennies comme, par exemple, en réduisant les fuites dans les réseaux d'eau potable, en recyclant des eaux dans des procédés industriels ou pour certains agriculteurs, en utilisant des pratiques d'irrigation et culturales moins consommatrices d'eau ;
- mobiliser des ressources en eau supplémentaires selon principalement trois types d'actions : stocker de l'eau en saison humide pour l'utiliser en période sèche, produire de l'eau douce à partir d'eau salée ou transférer des volumes depuis des zones excédentaires ;
- organiser des utilisations successives des mêmes flux d'eau par différents utilisateurs, ce qui permet, à condition de garantir le bon état écologique du milieu récepteur local, de réduire les prélèvements à volume utilisé constant.

Au vu de l'importance des volumes qui sont en train de disparaître, en période estivale notamment, il est difficile d'imaginer n'utiliser que des actions dans une seule de ces directions. C'est nécessairement l'ajout de mesures dans chacune de ces directions qui permettra une adaptation au changement climatique en assurant une gestion durable des ressources (les objectifs du développement durable des Nations unies 6.4 et 13.1). Or, pour chacune, des technologies existantes peuvent être mises en œuvre.

Elles doivent être choisies au cas par cas en tenant compte de leurs caractéristiques propres et de leurs différents effets. Les principales sont décrites au chapitre 3 tandis que le chapitre 2 décrit plus spécifiquement les enjeux liés aux utilisations agricoles de l'eau douce.

CERTAINS TERRITOIRES ULTRAMARINS

Le besoin d'adaptation aux variations des pluviométries et ressources en eau décrit pour le territoire métropolitain s'applique également aux territoires ultramarins. Toutefois, plusieurs de ceux-ci ont un enjeu de résilience particulier pour l'alimentation en eau potable. En effet, contrairement à la métropole où les prélèvements pour la production d'eau potable ne sont qu'une faible part des prélèvements totaux, ils représentent l'essentiel des prélèvements dans certains de ces territoires d'outre-mer qui ont peu d'irrigation et peu d'eaux douces en usage industriel. Ainsi, alors qu'en cas de sécheresse exceptionnelle la métropole arrive à maintenir l'alimentation en eau potable en réduisant les utilisations de l'eau par les différents secteurs de l'économie, pour plusieurs départements d'outre-mer, une sécheresse se traduit immédiatement par des coupures d'eau potable comme cela s'est produit récemment à La Réunion et la Martinique. Dans ces départements, le stockage de l'eau pour l'alimentation en eau potable a ainsi un enjeu d'adaptation particulier et essentiel. Quelques exemples sont présentés ici.

- Saint-Martin, Saint-Barthélemy : le rapport pluie efficace/habitant est très faible. Les aquifères y sont quasiment inexistantes et il existe peu de surfaces disponibles pour installer des retenues ou réservoirs. La ressource en eau est très faible au regard des besoins modernes des populations actuelles.
- Guadeloupe : la pluviométrie est importante avec un rapport pluie efficace/habitant similaire à la métropole, mais avec de plus fortes variabilités spatiales et temporelles. Les prélèvements en eau sont effectués pour 70 % dans les eaux de surface avec des transferts entre Basse-Terre vers Grande-Terre. Les pesticides sont un problème de qualité significatif. Les usages sont de 86 % pour l'alimentation en eau potable, 11 % pour l'irrigation. Il est envisagé une amplification éventuelle des sécheresses/déficits de saison sèche. Une augmentation de l'intensité des cyclones tropicaux les plus intenses est attendue avec le réchauffement accompagné de records de pluies. Il existe également des enjeux liés aux inondations chroniques avec la hausse du niveau de la mer. Il existe des besoins de rénovation d'infrastructures, des problèmes de perte d'eau potable en réseaux (60 %).
- Martinique : la pluviométrie est importante et le rapport pluie efficace/habitant est similaire à celui de la métropole pour une démographie stable. Il existe des tensions sur la demande en période d'étiage. Les eaux de surface sont utilisées à 94 %, principalement pour l'alimentation en eau potable. L'eau souterraine (6 %) sert à quelques ressources locales. La contamination par des pesticides est un problème. Les infrastructures sont vieillissantes, les réseaux fuyards (40 % de perte).

Un rééquilibrage des usages eaux de surface/eaux souterraines en saison sèche est possible avec un potentiel théorique de 30 Mm³/an vs 2 Mm³/an utilisés pour une consommation totale de 45 Mm³/an. Une régression des usages agricoles est à confirmer.

- Mayotte : la pluviométrie est modérée et le rapport pluie efficace/habitant est faible. La démographie est en très forte augmentation (x 10 en 50 ans) et les besoins per capita également. Il existe une très forte pression sur les ressources en eau (+ 10 % par an) avec un déficit estimé de 15 à 30 000 m³/j en 2030. 78 % des usages se font avec des eaux de surface (dont les eaux des retenues), 17 % avec des eaux souterraines et 5 % avec le dessalement d'eau de mer. Un plan d'action envisage la poursuite de la mobilisation des eaux souterraines, des retenues collinaires supplémentaires, la limitation des prélèvements agricoles et la promotion des solutions alternatives (économies, récupération des eaux pluviales, augmentation des capacités de dessalement...).
- Nouvelle-Calédonie : il existe une disparité de pluviométrie est/ouest qui s'accompagne d'une répartition très inégale des populations, surtout concentrées dans le grand pôle urbain de Nouméa et quelques grandes communes. La pluie moyenne est de 24 km³/an avec une consommation d'environ 0,1 km³/an. La ressource semble donc très abondante. De grandes variabilités interannuelles existent en fonction des événements El Niño et La Niña. Il existe des épisodes de pluviométrie ponctuelle forts avec un tarissement rapide et peu de réserves. Les aquifères sont à perméabilité faible, mais avec un stockage important dans les latérites et saprolites qui viennent en soutien aux débits d'étiage. S'agissant des îles Loyauté, la réserve d'eau douce souterraine est suffisante sauf à Ouvéa. Il apparaît des intrusions d'eau salée. Le scénario du plus fort réchauffement prévoit une baisse moyenne de pluviométrie de 18 % et la région de Nouméa est très concernée. 80 % du signal se produit en été. Considérant l'asymétrie est/ouest, il peut être envisagé des transferts de soutien. Des évolutions peuvent apparaître, liées à l'évolution du couvert végétal et notamment à l'accroissement des feux de brousse.

POINTS À RETENIR

Le réchauffement planétaire et ses conséquences vont entraîner des limites dures sur les ressources en eau (hausse de l'évapotranspiration, baisse de la pluviométrie estivale, hausse de la sécheresse des sols, recul de l'enneigement et des glaciers, hausse de la durée des périodes d'étiages) avec une forte variabilité interannuelle/décennale.

Les données et prévisions montrent que si les cumuls annuels de précipitations en France métropolitaine restent relativement constants, des déficits été versus hiver vont s'accroître et plus particulièrement dans certaines régions, entraînant des problèmes de ressources et de qualité en été.

L'hétérogénéité territoriale est une caractéristique majeure des données hydrographiques ainsi que la nature et l'intensité des usages.

L'évapotranspiration est un facteur très important, lié notamment aux caractéristiques de température et de la végétalisation des surfaces dans les composantes d'estimation et de gestion. Elle sera plus importante à l'avenir avec le réchauffement climatique diminuant de façon notable le volume « d'eau renouvelable ».

La baisse du manteau neigeux et sa fonte précoce, la fonte estivale des glaciers, les évolutions de précipitations en montagne rendent difficiles les prévisions d'influence sur les débits des cours d'eau.

La réduction des débits moyens et d'étiage va s'aggraver en période sèche induisant des impacts sur la qualité des eaux, des manques face aux usages, la production énergétique et industrielle, la biodiversité... et augmenter les conflits d'usage.

Les influences sur la qualité des ressources superficielles et souterraines, surtout aux périodes d'étiage, est une préoccupation pour de nombreux usages.

Une aggravation des surfaces de sols concernées par la sécheresse nécessite une préparation et adaptation avec changements des pratiques agricoles dans les régions concernées.

Une sollicitation plus intense des réserves d'eaux souterraines risque d'entraîner des augmentations de contaminations.

Une fréquence plus élevée des restrictions d'usage en période de basses eaux si des solutions pérennes et adaptées ne sont pas développées.

En conséquence, la France doit s'adapter aux variations hydrologiques et anticiper les baisses de ressources futures résultant du changement climatique en combinant des actions de réduction des volumes utilisés, de mobilisation de ressources supplémentaires et d'utilisations successives de mêmes volumes d'eaux.

Les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) nécessitent une meilleure prise en compte du problème avec une vision prospective allant bien au-delà de la durée de cinq années.

CHAPITRE 2

DES ADAPTATIONS AGRICOLES

AVERTISSEMENT – Tous les acteurs qui prélèvent de l'eau douce doivent prévoir et mettre rapidement en œuvre les stratégies visant à les réduire autant que possible, avec une prise en compte des perspectives d'évolution des masses d'eau disponibles localement et régionalement, et selon les saisons. Aborder en détail ces aspects liés à la politique et à la gouvernance de l'eau n'est pas l'objet du présent rapport. Les nécessaires évolutions des pratiques agricoles y sont néanmoins rapidement présentées en raison de leur participation importante aux prélèvements en période d'été dans certaines zones les plus concernées par les baisses de pluviométrie.

Le réchauffement entraîne un allongement de la saison de croissance de la végétation avec deux jours de plus par décennie en moyenne aux latitudes tempérées de l'hémisphère nord, et notamment un démarrage plus précoce.

Considérant l'importance des usages agricoles de l'eau en période d'été (irrigation) et les situations de conflits d'usage qui peuvent en découler, il est important d'aborder les perspectives d'adaptations agricoles visant à réduire les prélèvements pour irrigation en période estivale et dans les zones à déficit.

Globalement, l'eau dite « verte », car intégrée dans les masses végétales, représente environ 61 % des 500 milliards de m³ de précipitations.

L'irrigation représente 27 % du total des prélèvements pour les usages d'eau potable, d'eau agricole, et d'eau industrielle et 10 % des 33 milliards de m³ prélevés annuellement. Cependant, ces prélèvements sont concentrés sur quatre mois, voire cinq dans certaines régions, qui coïncident généralement avec l'étiage des cours d'eau et entre alors en conflit avec les autres usages.

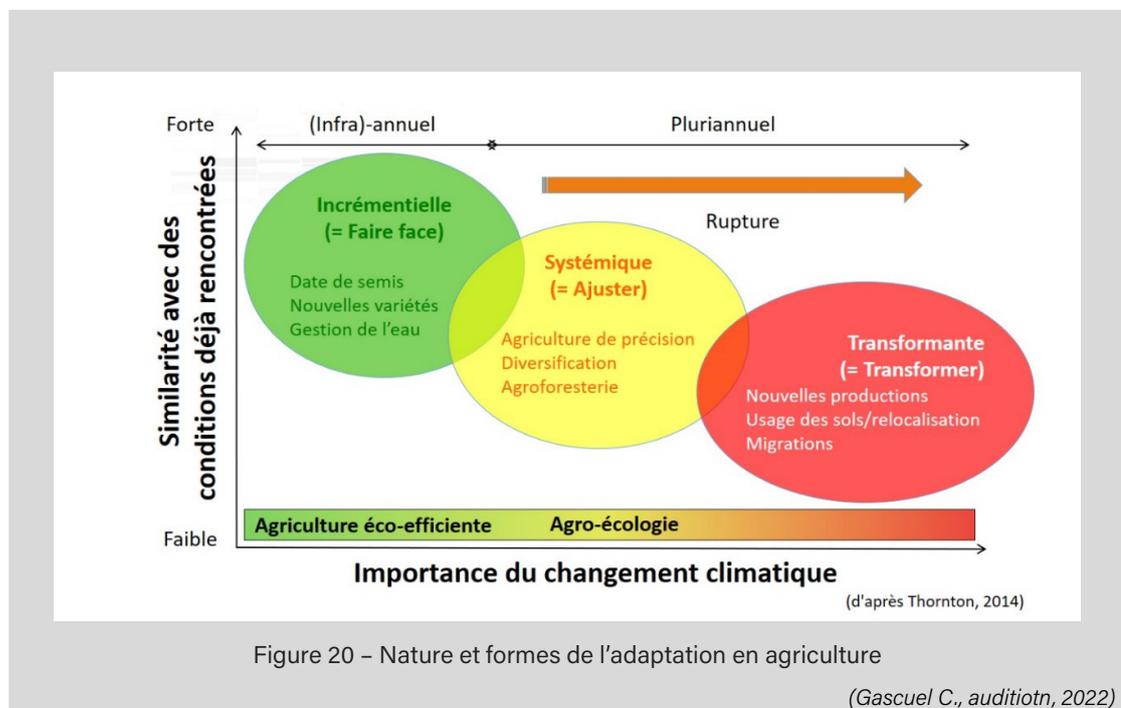
L'augmentation de l'évapotranspiration et la sécheresse accrue des sols résultant des changements climatiques réduisent les tonnages de production d'agriculture pluviale, ce qui pousse certains agriculteurs à vouloir développer leurs prélèvements d'eau pour irrigation.

Les enjeux visent essentiellement à :

- optimiser le fonctionnement des couverts végétaux cultivés en situation hydrique limitante : l'amélioration variétale et des idéotypes, l'adaptation des systèmes de culture à la sécheresse, la répartition spatiale des systèmes de culture dans les paysages, l'optimisation des techniques et de la gestion de l'irrigation aux échelles parcellaires, de l'exploitation agricole et du territoire ;
- améliorer l'offre en eau pour les sites où cela sera indispensable en mobilisant des ressources en eau additionnelles (retenues, recyclages...), et en limitant les pertes en eau dans les ressources disponibles ;
- développer les approches de concertation entre acteurs pour la gestion territorialisée équitable des ressources en eau ;
- développer l'information (services agroclimatiques) pour anticiper et identifier les problèmes relatifs à la gestion quantitative des ressources en eau (multiéchelle temporelle et spatiale), motiver une meilleure gestion.

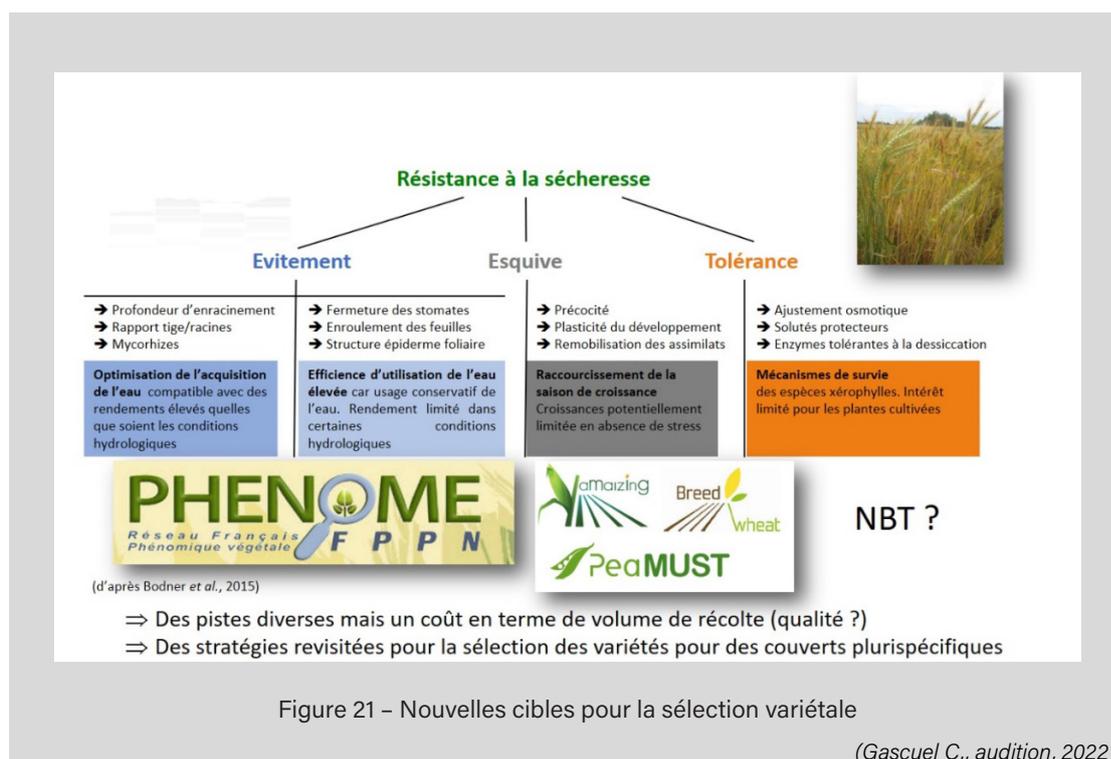
Il s'agit souvent de faire face à l'augmentation du risque de sécheresses, mais parfois aussi à des excès d'eau, y compris la même année.

Il est nécessaire d'anticiper une modification du régime pluviométrique, une moindre ressource en eau mobilisable, une potentielle plus grande demande de l'agriculture et donc une non-viabilité de l'agriculture réalisée dans certaines régions, telle qu'aujourd'hui.



Les voies d'action consistent à :

- réaliser des décalages de semis en esquivant le stress thermique ;
- adapter les techniques culturales et les systèmes de culture : irrigation de résilience sans viser l'optimum, nouvelles technologies plus économes pour l'irrigation, partage de l'eau, limitation des contraintes avec des semis sous couvert et de l'agroforesterie ;
- reconcevoir/diversifier les systèmes de culture : décalage des aires de culture, remplacement d'espèces (ex. maïs → sorgho), diversification intraparcelle (associations, successions de cultures...), intraexploitation (« panier » de cultures) et intrasurface de la région, nouvelles domestications ;
- mieux gérer les sols agricoles par des pratiques qui permettent d'accroître le contenu en matière organique ou de mieux les couvrir. Ceci permet une augmentation de la capacité de rétention de l'eau, la réduction de l'érosion, le développement de micro-organismes utiles ainsi que le stockage de carbone atmosphérique dans les végétaux ;
- augmenter les volumes d'eau stockés en périodes humides sans nuire à l'écosystème proche, voire implanter des retenues dans le bassin avec des connexions entre elles.

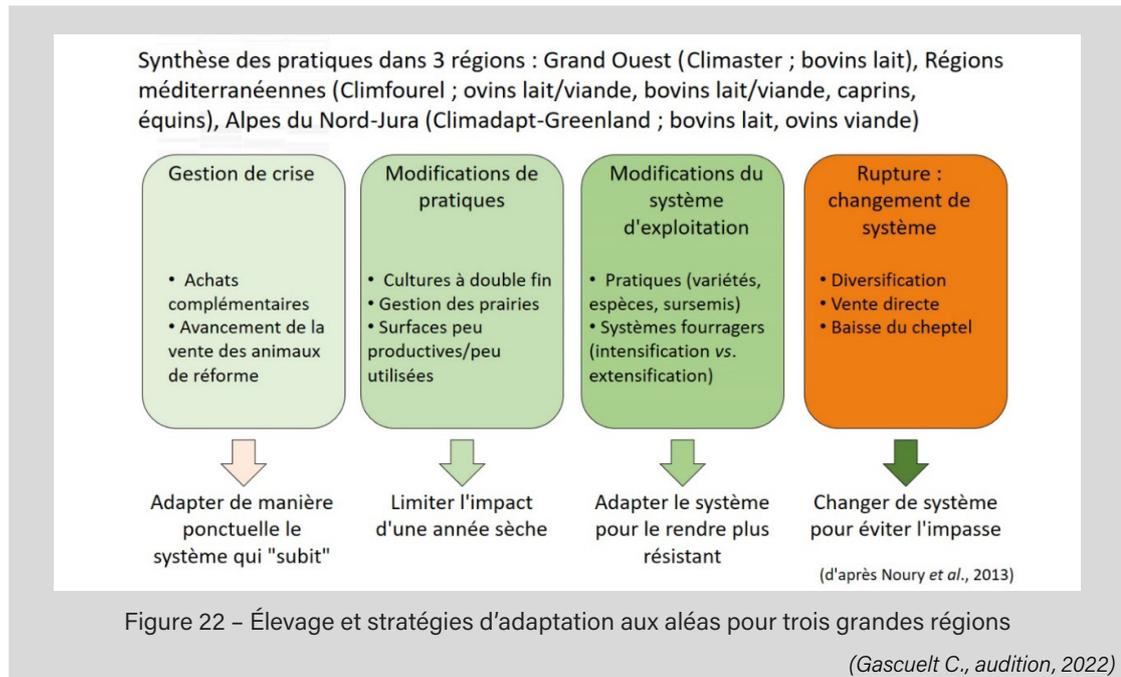


Pour mener ces actions, il est nécessaire de :

- disposer d'informations à haute résolution spatiale et temporelle sur les territoires pour analyser l'impact des activités agricoles localisées sur la ressource en eau ;
- représenter finement l'hétérogénéité des interactions entre les surfaces de culture, les événements climatiques au niveau du sol, les ressources en eau, les diverses occupations du sol ;

- assimiler les données pour la simulation en temps réel et/ou le paramétrage de modèles à développer à l'échelle territoriale.

Il existe peu de connaissances sur les processus de décision des agriculteurs lorsqu'ils réalisent des prélèvements dans diverses ressources en eau. Le numérique est donc au cœur du processus d'amélioration : modélisation, contrôle des procédés, en lien avec le développement de chaînes de capteurs innovants connectés adaptés, de gestion des données associées (apprentissage, fusion de données).



L'utilisation agricole des eaux usées comporte des atouts et des risques à gérer. Une compétition existe avec d'autres usages, ce qui implique de décider sur ce point en fonction de la pression sur l'eau, des possibilités de traitement et d'acheminement, des risques et des coûts/bénéfices.

La solution la plus classique actuellement consiste à irriguer directement avec les eaux usées traitées. Toutefois, comme les stations d'assainissement ont pour fonction d'éliminer au maximum l'azote, le carbone et le phosphore, les eaux usées une fois traitées comportent peu d'éléments pouvant servir d'engrais, et ce sont les boues qui sont utilisées en agriculture. Une autre voie consiste à extraire des urines, avant rejets vers les réseaux d'égouts, une part de l'azote pour son emploi comme engrais, mais cette filière n'est encore qu'en développement.

Concernant l'irrigation avec les eaux usées traitées :

- les avantages sont : outre les apports d'eau, la valorisation des composants présents dans l'eau usée pour des usages agricoles (azote, phosphore, potassium) avec la

réserve que les traitements d'assainissement ont justement la fonction d'éliminer la plus grande partie de ces composants ;

- les inconvénients sont : des risques qui restent à maîtriser en même temps que l'acceptabilité par les professionnels et les citoyens. Ces risques sont technologiques (fiabilité des traitements, acheminement) et avals (environnementaux, agricoles et sanitaires), liés à la présence de contaminants chimiques et microbiens et à la salinité des eaux. Utiliser de manière plus intensive les eaux usées traitées en agriculture nécessite un effort pour réduire les concentrations en polluants dans ces eaux usées, ce qui représente une consommation énergétique.

Le lien entre pratiques agricoles et besoins en eau implique d'optimiser une gestion intégrée tenant compte des écosystèmes aquatiques. Les aspects quantitatifs sont à lier aux aspects qualitatifs. Il est nécessaire de progresser dans le couplage des modèles (énergie - urbanisation - cultures - hydrogéologie - écosystèmes aquatiques - changement climatique) et de développer l'analyse des incertitudes et des modélisations. Il faut aider à l'assimilation des nouvelles méthodes comme la télédétection. Il importe de mener des analyses viabilité/coûts-bénéfices/risques des projets sur leur durée de vie prévue.

L'accompagnement des transitions est nécessaire pour lever les verrous techniques et sociologiques.

Un *Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique* s'est achevé le 1er février 2022, actant des actions à mettre en œuvre collectivement afin d'anticiper les effets du changement climatique sur l'agriculture pour mieux la protéger et s'adapter.

Il vise notamment, selon le ministère de l'Agriculture (2022), à :

- obtenir un engagement total de l'ensemble des acteurs agricoles pour identifier les leviers d'adaptation au changement climatique et se doter de stratégies d'adaptation et d'anticipation ;
- protéger les agriculteurs par une meilleure gestion de l'accès à l'eau dans le respect des équilibres et milieux naturels ;
- valoriser les eaux « non conventionnelles » en engageant des expérimentations ;
- mobiliser les retenues existantes ;
- renforcer les projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE) ;
- renforcer le rôle du préfet coordonnateur de bassin dans la détermination des volumes prélevables hors période d'étiage ;
- renforcer la résilience de l'agriculture en agissant notamment sur les sols, les variétés, les pratiques culturales et l'efficacité de l'eau d'irrigation.

En avril 2022 le gouvernement a nommé un préfet délégué interministériel chargé du suivi des conclusions de ce *Varenne de l'eau et de l'adaptation au changement climatique*.

Les enjeux consistent à apporter des réponses à la situation actuelle tout en anticipant les évolutions inéluctables, notamment du fait des conséquences du changement climatique sur la ressource en eau, sans oublier que d'autres aspects tout aussi inéluctables peuvent être liés à l'urbanisation régionale avec ses effets sur le ruissellement et sur la demande en eau ainsi qu'à l'évolution démographique...

L'évolution des pratiques de gestion de l'eau fait partie des stratégies d'adaptation. La prise en compte des vulnérabilités, notamment pour certains types d'exploitations agricoles tel le maraîchage, reste généralement trop limitée dans les stratégies d'adaptation au changement climatique liées à la gestion efficace et durable de l'eau.

POINTS À RETENIR

L'agriculture, dans ses activités de culture et d'élevage, est particulièrement concernée par ses relations avec la demande en eau et la diffusion d'engrais et de pesticides vers les ressources en eau.

Elle subit déjà les impacts du changement climatique et doit, dans les zones prioritaires, s'adapter dans une logique locale et en concertation avec les autres demandeurs de masses d'eaux douces.

Il s'agit d'adaptation des occupations de sols, des types de culture, des périodes de semis, des types d'arrosages...

Le *Varenne agricole* de l'eau présente d'importantes perspectives d'action qui doivent être menées en concertation au sein des bassins versants.

Le transfert des solutions doit être promu, depuis les domaines de la recherche et de l'innovation vers la réalité de l'application sur le terrain.

Les aspects dynamiques liés au changement climatique et des implications sur les ressources doivent être pris en compte, notamment à l'échelle de la durée de vie des projets.

L'adaptation au changement climatique pour la gestion de l'eau doit éviter une « maladaptation » qui peut sembler efficace à court terme, mais ne le sera pas à long terme, et pourrait exacerber les risques (vulnérabilités sociales et économiques, écosystèmes et services écosystémiques, équité actuelle et future). Notamment, il ne faut pas verrouiller des pratiques qui seraient, à terme, non soutenables. Une adaptation réussie prend à bras le corps les changements systémiques permettant une gestion soutenable de l'eau à long terme.

Les projets de stockages en surface posent la question de la capacité de modélisation hydrogéologique à échelle fine prenant en compte les éléments du changement climatique pour évaluer la faisabilité et la durabilité des projets dans le climat actuel et dans le climat des prochaines décennies.

CHAPITRE 3

LES APPORTS TECHNOLOGIQUES POUR L'APPROVISIONNEMENT EN EAU DOUCE

Les développements de technologies alternatives fournissant des volumes d'eaux douces sont conditionnés à cinq exigences majeures :

- l'absence d'impact négatif sur les écosystèmes : les prélèvements dans les ressources, les systèmes d'assainissement employés et la qualité des rejets aux milieux ne doivent pas induire une écotoxicité et une perte de biodiversité, être économes en énergie et ne doivent pas intensifier les émissions de gaz à effet de serre ;
- la sécurité sanitaire des usages et des usagers : l'innocuité envers la santé humaine doit être garantie lors des contacts directs des professionnels et des citoyens avec les eaux, ou indirects via les produits ou environnements ayant été en contact avec ces eaux (irrigation, arrosage des voiries, élevages...);
- la viabilité économique selon les conditions actuelles et les projections climatiques tenant compte des effets liés à l'influence humaine sur le climat et de la plage de la variabilité naturelle, intégrant les coûts liés aux traitements et à la distribution jusqu'aux points d'usage ;
- la construction de manière collective par la population et les décideurs des meilleures solutions et leur appropriation par les populations ;
- la durabilité des solutions envisagées notamment au regard de la situation locale (assèchement de nappe, évaporation accentuée...).

Les masses d'eaux disponibles et utilisables, actuellement peu ou mal employées, sont les eaux usées urbaines essentiellement, mais aussi des eaux usées industrielles de qualité compatible, les eaux salées ou saumâtres, les eaux de pluie et, de manière plus anecdotique en France, l'humidité de l'air.

Globalement, les technologies de traitement et de production nécessaires à l'utilisation sécurisée de ces eaux sont déjà disponibles même si des progrès sont toujours nécessaires. Ainsi l'innovation et les besoins de R&D sont à soutenir, ne serait-ce que pour réduire les coûts et garantir l'absence d'impacts négatifs sanitaires ou environ-

nementaux notamment en développant les méthodes prédictives des effets toxiques des expositions aux micropolluants et en fixant des objectifs de qualité garantissant l'innocuité des eaux délivrées.

La limitation technique des implantations et du développement de ces technologies est liée à une ou plusieurs des exigences citées précédemment.

Il est également fréquent que l'absence de modèle économique véritablement mobilisateur, malgré le rôle incitatif des agences de l'eau, réduise, voire rendent impossibles, les initiatives locales de valorisation de ces masses d'eaux disponibles.

Il est devenu nécessaire de mettre en œuvre un modèle économique de valorisation de la ressource en eau qui soit déconnecté du calcul de la rentabilité locale de court terme, mais que celle-ci soit calculée sur une base nationale avec l'introduction d'une composante « d'intérêt national » dans le calcul du temps de retour sur investissement. Ainsi, le temps de retour sur investissement d'intérêt national (TR2IN) pourrait apparaître pour ces grands projets, la ressource en eau n'étant plus seulement un sujet local, mais national.

Les choix décidés mettent de longues années à se mettre en place de manière opérationnelle. Les agences de l'eau peuvent être le relais de cette vision nationale « décentralisée » et devenir le vecteur financier apportant la composante financière « d'intérêt national » dans le calcul du TR2IN, rendant ainsi ces choix possibles, car fondés sur une analyse financière appropriée et basée sur le long terme (cinquante ans au moins). Elles doivent tenir compte, à cette échelle de temps, des contraintes géophysiques liées aux conséquences du réchauffement climatique. À l'horizon 2050, une augmentation de 2 °C au niveau planétaire est possible (et même plausible), soit 3 °C en France avec des limites dures (situations de non-retour) sur les ressources en eau. De plus, la montée du niveau de la mer pourrait être de l'ordre de 20 cm de plus qu'en 2000 et aura des effets croissants sur les eaux littorales.

L'UTILISATION DES EAUX USÉES TRAITÉES

Dans de nombreux pays en crise majeure de disponibilité, le rejet à l'environnement de masses d'eaux douces est considéré comme regrettable. Que ce soit par l'usage direct d'eaux usées non traitées ou après des traitements préalables plus ou moins évolués, de très nombreuses installations existent dans le monde et se développent principalement pour l'irrigation, mais aussi pour les industries, la propreté urbaine, l'évacuation des excréta et, plus rarement, pour la production d'eau de consommation humaine.

L'utilisation des eaux usées urbaines traitées est plus communément appelée la « réutilisation » des eaux usées traitées (REUT ou, en anglais, reuse). Selon la Commission européenne, environ 1 milliard de m³ d'eaux usées urbaines traitées sont aujourd'hui utilisés en Europe chaque année, soit environ 2,4 % des effluents d'eaux usées urbaines traitées (données de 2018).

Certains contenus des eaux usées pourraient être valorisés. La valeur potentielle des eaux usées en Europe serait proche de 157 milliards de dollars US en 2050, dont 53 milliards pour l'eau et 98 milliards pour les métaux (aluminium, argent, magnésium, titane...) selon les estimations de Stacklin (2012) axé sur la réutilisation de l'eau, et la valorisation de ses composantes énergie, matières nutritives et métaux.

Le principe consiste à utiliser les eaux prélevées en sortie de stations d'assainissement des eaux usées (STEU) classiques qui ont été débarrassées d'une large partie de leurs contaminants, en assurant des traitements complémentaires plus ou moins évolués. L'ajout de ces traitements complémentaires dépend des conditions économiques et des réglementations environnementales et sanitaires locales. Afin d'obtenir une eau de grande qualité, les unités les plus avancées appliquent un (ou des) traitement(s) complémentaires avec (Figure 23) :

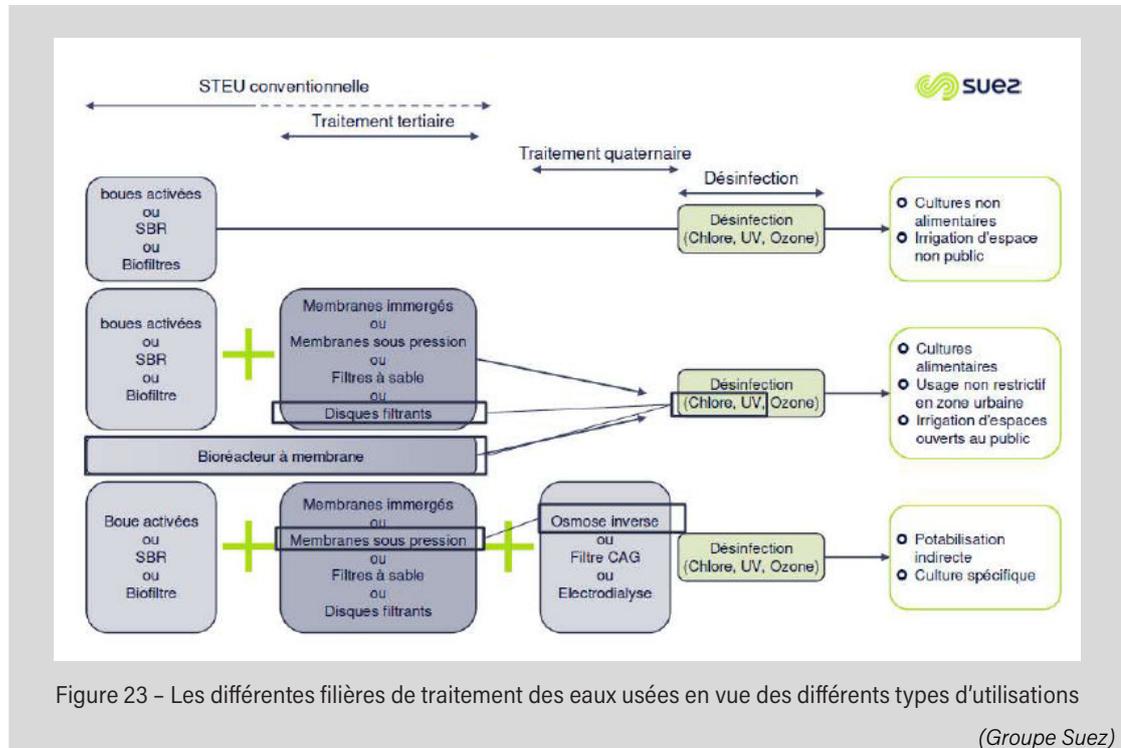
- des oxydants, utilisés notamment pour la désinfection (élimination des micro-organismes pathogènes) et la destruction d'une partie des micropolluants organiques. Ces oxydants (chlore, ozone) génèrent des sous-produits par interaction avec les matières organiques dissoutes qu'il convient de maîtriser ;
- des adsorbants venant fixer les contaminants, notamment le charbon actif qui doit être changé ou régénéré régulièrement ;
- des membranes de filtration pour la rétention de particules et de micropolluants ; leur efficacité varie selon le degré de rétention des membranes employées (microfiltration, nanofiltration, osmose inverse basse pression). L'eau est filtrée par pression ajoutée et il faut gérer le devenir du rétentat qui contient les contaminants. Ces membranes exigent d'être décolmatées et nettoyées régulièrement.

Les systèmes les plus évolués appliquent (ou envisagent d'appliquer) des traitements par membranes d'osmose inverse basse pression conduisant à une eau de qualité proche de celle de l'eau potable. Le coût est significatif pour l'énergie de pompage et ne pas réduire la durée de vie des membranes.

Ainsi, l'investissement doit être modulé en fonction des objectifs de qualité fixés pour les usages considérés et des moyens disponibles.

La qualité des eaux usées brutes, et celle obtenue après prétraitement, conditionnent le choix des technologies à mettre en œuvre pour atteindre une eau produite qui res-

pecte les engagements de qualité. Par exemple, certaines eaux usées influencées par des rejets industriels ou des biseaux salés ou saumâtres contiennent des ions chlorure indésirables en irrigation ou en raison de leur corrosivité sur les métaux; ceci exige donc des niveaux élevés de filtration membranaire avec le coût correspondant.



Le Cerema (2020), a réalisé un inventaire entre mai 2015 et mai 2017 ayant permis de recenser 128 cas de REUT en France avec 113 cas d'utilisation directe, deux cas indirects, trois cas de micro-irrigation des espaces situés dans l'emprise même de la station d'assainissement des eaux usées (Figures 24 à 26).

Les premières réalisations en France (avant 1990) ont été impulsées par des problèmes de disponibilité en eau : sur les franges littorales (Fort-Mahon, Pornic, Baden), sur des îles (Ars-en-Ré, Noirmoutier, Porquerolles), en zones de piémonts (pieds des chaînes de montagnes) soumises à un phénomène météorologique créé par la rencontre de la circulation atmosphérique et du relief quand un vent dominant rencontre une chaîne montagneuse (effet de foehn), telle la plaine de la Limagne où les grandes cultures sont protégées des pluies par le Puy-de-Dôme.

Les 58 cas d'utilisation d'eaux usées traitées au niveau de STEU urbaines françaises servent majoritairement à l'arrosage de golfs : quinze cas (26 %) et l'irrigation agricole : trente-deux cas (60 %). Ces deux usages majoritaires se sont intensifiés après 2006 (taux d'augmentation : 50 %) avec cinq cas pour les golfs et douze cas pour l'irrigation

des cultures. Les usages d'irrigation urbaine restent minoritaires avec seulement trois cas en fonctionnement (6 %).

Les eaux usées traitées utilisées sont majoritairement issues de STEU dont le procédé de traitement est basé sur des « boues activées » (73 %), devant le lagunage (23 %) et les procédés membranaires (3 %). Dix-neuf cas procèdent à une désinfection par UV ou chloration (38 %), le plus souvent après une filtration (quinze cas), parfois mise en œuvre après une étape de décantation, à la sortie d'une lagune, pour assurer la qualité requise pour l'aspersion dans des espaces verts, terrains de sports ou golf.

Cinq cas utilisent un procédé membranaire (10 %). Un seul cas d'ultrafiltration (2 %) est prévu pour le bioréacteur à membrane de la STEU de Cannes-Mandelieu, d'une capacité supérieure à 100 000 équivalents habitants, dans l'objectif également de maximiser les types d'usages de l'eau usée traitée avant le rejet en mer.

Il existe des projets ou réalisations pour l'arrosage des hippodromes (Chambray-les-Tours, mis en œuvre en 1998 avec l'arrosage du stade voisin), mais des freins réglementaires sont invoqués, en particulier les préventions sanitaires liées à la présence des chevaux et du public. Concernant les espaces verts urbains les cas de réutilisation restent fragiles économiquement et demandent souvent de prévoir un « multi-usage » de l'eau usée traitée (arrosage, industrie, nettoyage de rues). t

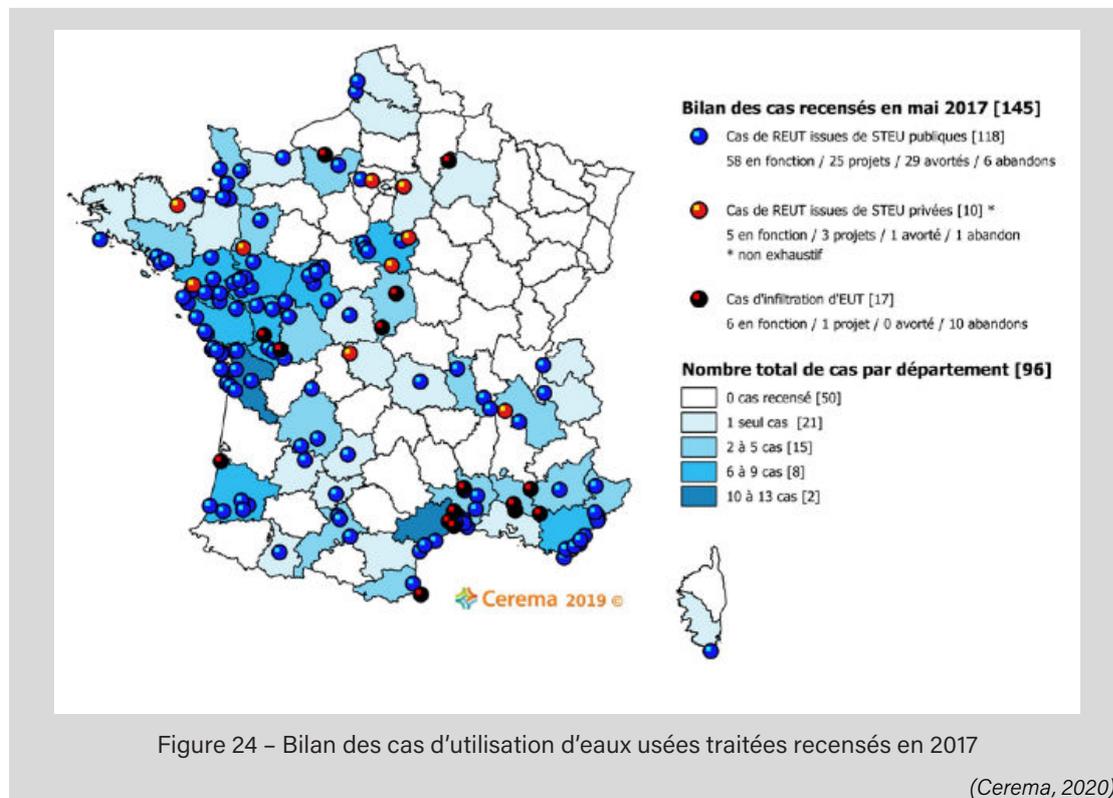


Figure 24 – Bilan des cas d'utilisation d'eaux usées traitées recensés en 2017

(Cerema, 2020)

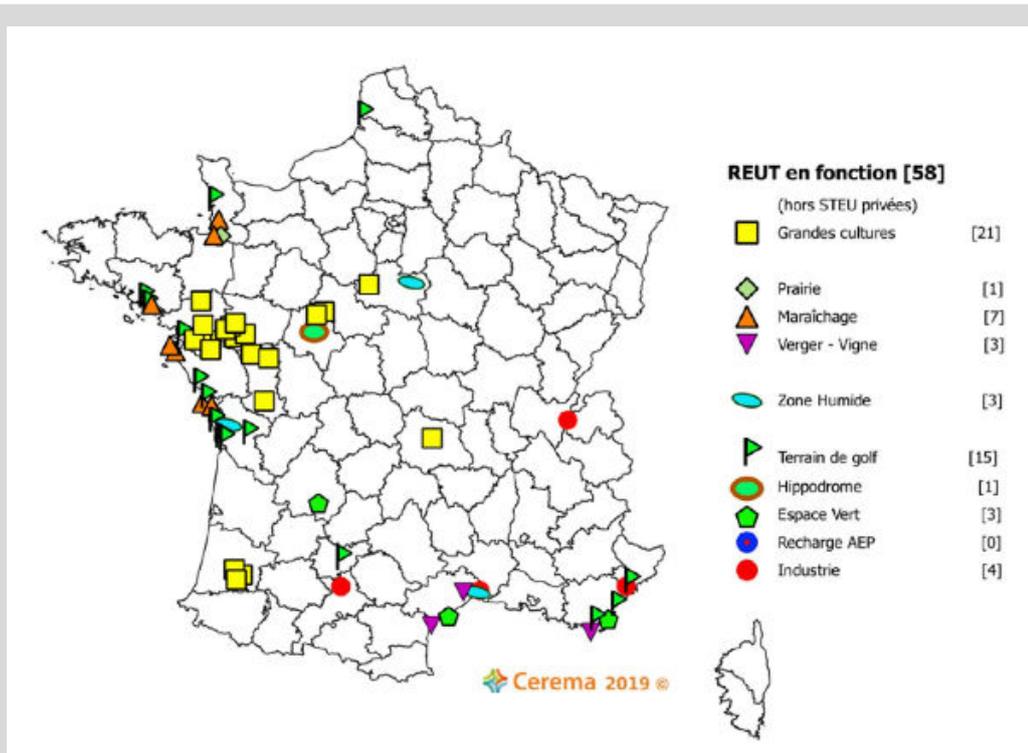


Figure 25 – Bilan des cas d'utilisation d'eaux usées traitées en fonction recensés en 2017

(Cerema, 2020)

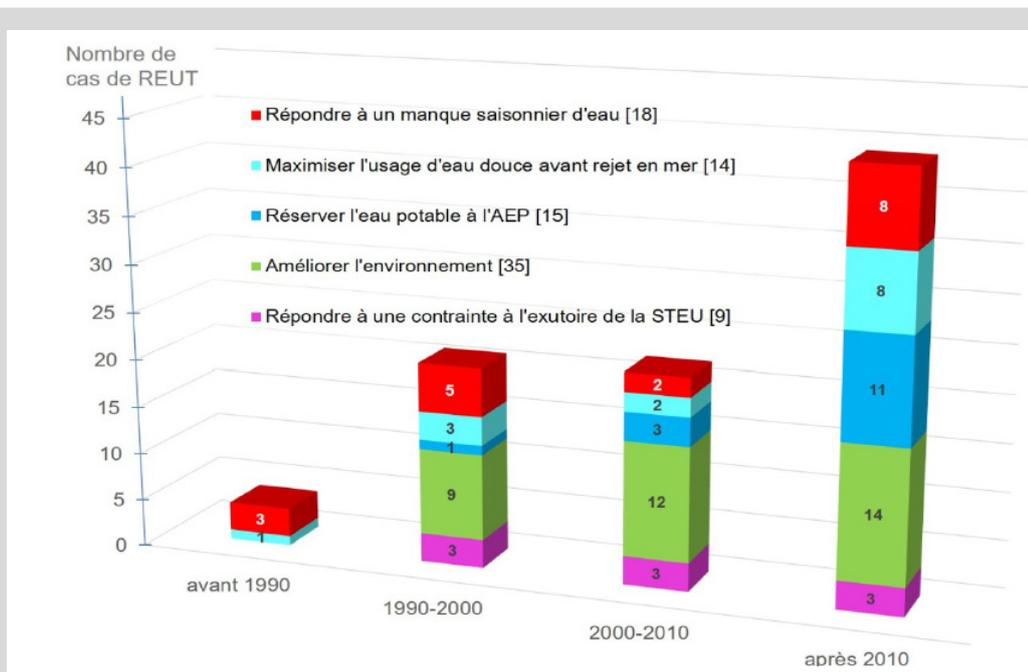


Figure 26 – Évolution des objectifs de gestion de l'eau des 91 cas d'utilisation d'eaux usées traitées en fonction et en projet recensés en 2017

(Cerema, 2020)

En termes de rentabilité, une étude menée en 2014 par l'Onema (AFB) et l'Irstea montrait une rentabilité pour trois cas concrets d'arrosage de golfs et d'usage agricole (Loubier et Declercq, 2014). Les auteurs précisait que des critères physiques conditionnent la rentabilité : tailles de STEU, technologies, proximité de surfaces agricoles irriguées, état qualitatif et quantitatif des masses d'eau d'origine et réceptrices, proximité d'espaces urbains, de golfs... Leur étude montre que « ces conditions favorables (opportunités) sont des conditions nécessaires à l'émergence de projets de REUSE. Ce ne sont pas pour autant des conditions suffisantes puisque les déclencheurs de projets sont souvent des conjonctions de relations sociales ou économiques particulières entre les usagers et les producteurs d'eaux usées traitées ».

Comme expliqué précédemment, la justification du recours à cette solution nécessite de tenir compte des autres solutions et l'utilisation des eaux usées traitées représente un coût qu'il est difficile de rendre attractif et de justifier dans un environnement économique avec un accès à une autre ressource (rivière, nappe) peut parfois exister à un coût dérisoire. La rentabilité doit se calculer en tenant compte des pertes de valeur et des coûts engendrés par la pénurie.

L'utilisation des eaux usées traitées est encadrée en France par deux arrêtés ministériels (arrêté du 2 août 2010 modifié par l'arrêté du 25 juin 2014 [Legifrance 2010, 2014]) relatifs à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts.

L'instruction interministérielle DGS/EA4/DEB/DGPE/2016/135 du 26 avril 2016, relative à la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts, fixe des niveaux de qualité d'eaux exigés pour chacun des principaux types d'usages concernés.

Le 25 mai 2020, est paru un règlement européen visant à promouvoir et faciliter l'utilisation d'eaux usées traitées (EUR-Lex, 2020). De très nombreux points sont précisés dans son préambule justifiant une « souplesse » accordée au développement de ces usages. Il établit « des exigences minimales de qualité et de surveillance de l'eau et des dispositions en matière de gestion des risques, pour une utilisation sûre de l'eau de récupération dans le cadre d'une gestion intégrée de l'eau ». Il fixe les obligations de l'exploitant et notamment celle de la mise en œuvre d'un plan de gestion des risques, les contrôles, les exigences de communication ainsi que les types d'usages autorisés et les qualités d'eaux exigées.

Le décret 2022-336 du 10 mars 2022 (Legifrance 2022) relatif aux usages et aux conditions de réutilisation des eaux usées traitées précise que « L'utilisation des eaux

usées traitées peut être autorisée à condition que les caractéristiques de ces eaux et les usages qui en sont faits soient compatibles avec les exigences de protection de la santé humaine et de l'environnement. » Il dresse la liste des sites et usages autorisés et interdits et les conditions de demande d'exploitation, de surveillance et d'évaluation. Il est accompagné de l'arrêté du 28 juillet 2022 relatif au dossier de demande d'autorisation d'utilisation des eaux usées traitées.

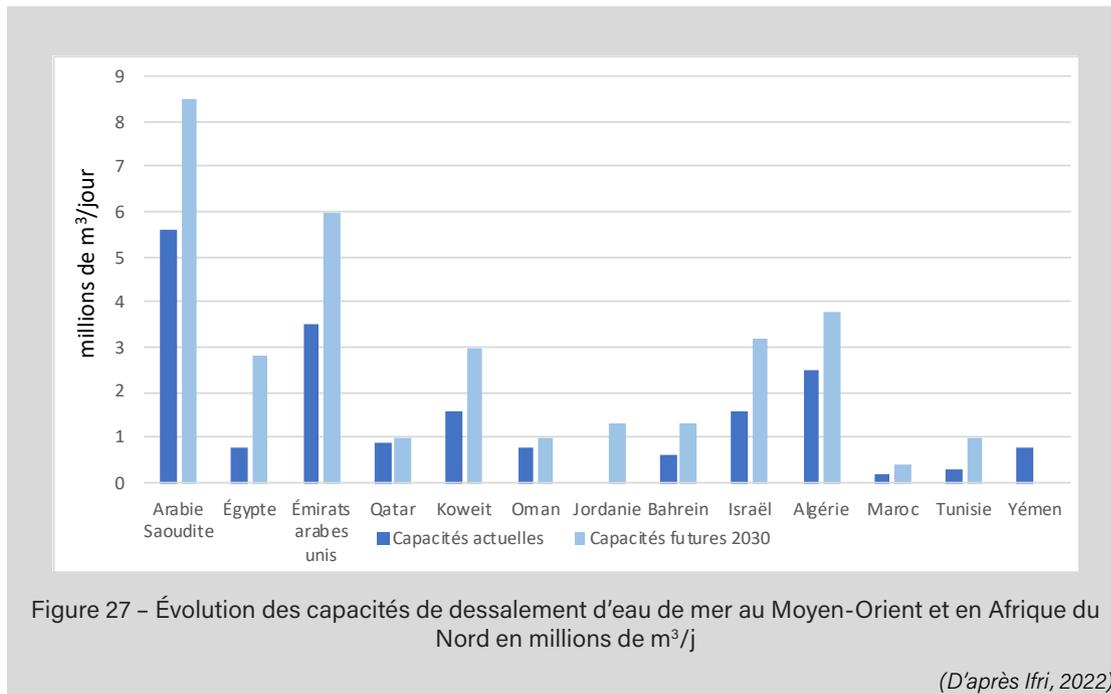
LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER ET DES EAUX SAUMÂTRES

Cette solution est adoptée dans de nombreux pays, généralement à très faible disponibilité en eau douce et disposant de conditions locales favorables (proximité avec la mer, sources d'énergie...). Le dessalement de l'eau de mer permet de produire une eau de grande pureté qui doit ensuite être partiellement reminéralisée avant distribution.

Jones et al. (2019) estimaient à environ 95,4 millions m³ le volume d'eau desalée produit chaque jour dans le monde avec le rejet d'environ 140 millions m³ de saumure.

Selon Eyl-Mazzega et Cassignol de l'Institut français des relations internationales (2022), 42 % de l'eau potable des Émirats arabes unis provient d'usines de dessalement représentant plus de 7 millions m³/j, 90 % pour le Koweït, 86 % pour Oman, 70 % pour l'Arabie saoudite. En 2022, plus de 21000 stations de dessalement d'eau de mer sont opérationnelles dans le monde, et le secteur connaît une croissance de l'ordre de + 10 % de capacité par an. D'ici à 2030, les capacités de dessalement des pays du Moyen-Orient devraient quasiment doubler (Figure 27).

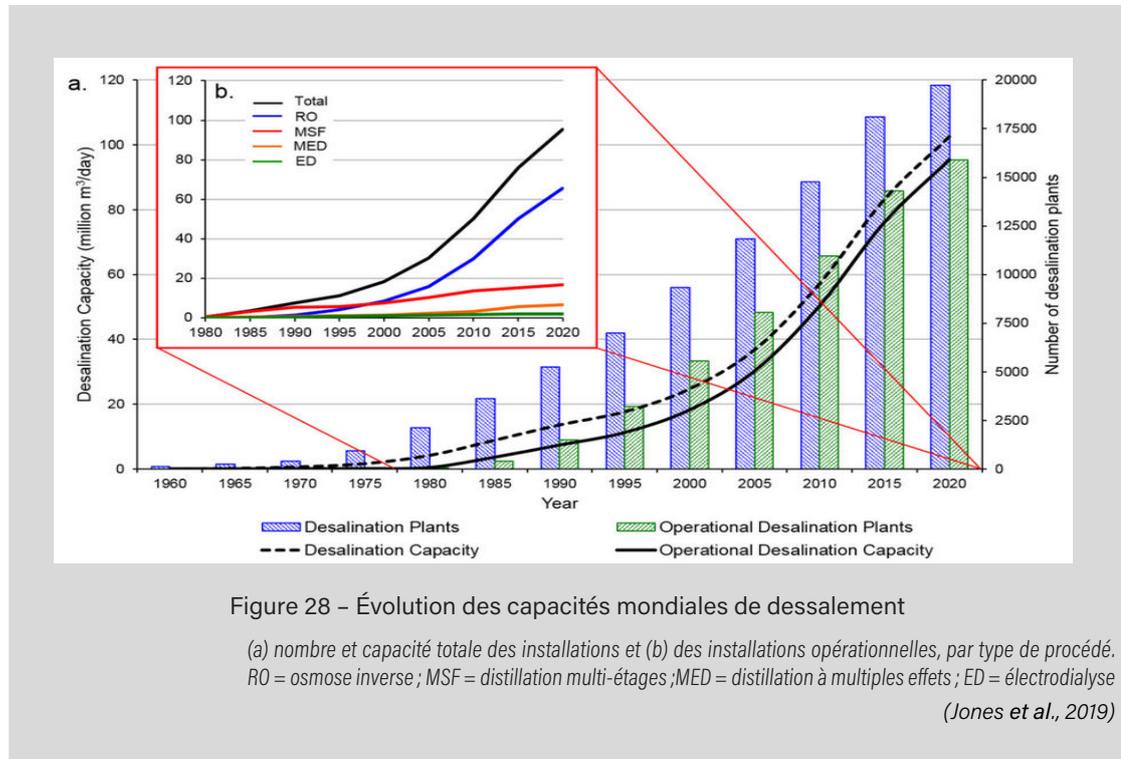
Dans huit pays — Antigua-et-Barbuda, les Bahamas, Bahreïn, le Koweït, les Maldives, Malte, le Qatar — le dessalement semble répondre à l'ensemble des besoins nationaux en eau potable. Dans six autres — les Barbades, le Cap-Vert, les Émirats arabes unis, la Guinée équatoriale, Oman et les Seychelles — il en couvrirait la moitié.



Il s'agit d'une part de procédés thermiques visant à évaporer l'eau, puis à la condenser ainsi débarrassée de ses sels minéraux et d'une grande partie de ses contaminants organiques (distillation à multiples effets, distillation flash à plusieurs étages, compression de vapeur). D'autre part, sont employés des traitements de filtration membranaire (osmose inverse, électrodialyse) qui purifient l'eau par rétention des composants particulaires et dissous.

Ces types de traitements sont gourmands en énergie soit pour chauffer et évaporer l'eau, soit, dans une moindre mesure, pour assurer la pression nécessaire au franchissement des barrières membranaires. L'eau traitée doit ensuite être partiellement reminéralisée, notamment pour éviter la corrosion pendant sa distribution et pour ses usages alimentaires. Les technologies de dessalement produisent des rejets de saumure concentrée contenant également des métaux et parfois du chlore. Au niveau mondial, le volume global de rejets de saumure excéderait le volume d'eau dessalée produite (Jones *et al.*, 2019), 80 % étant rejeté à moins de 10 km des côtes. Des impacts écotoxiques ont été observés. Ceci exige la réalisation d'un système de rejet de ces concentrats très salés à une distance significative des côtes, avec des dispositifs de diffusion permettant une forte dilution à l'endroit des rejets, afin de ne pas induire un impact perturbateur significatif sur les écosystèmes récepteurs, sauf à mettre en œuvre une solution coûteuse de traitement des concentrats. Des méthodes de réduction de l'impact des rejets sont développées par mélange avec des eaux moins salées, par dispersion, par des buses de dispersion sous pression, et par la valorisation en extrayant des éléments à valeur ajoutée (lithium, rubidium, strontium, gallium ou par conversion en acides et bases avec

des limites de rentabilité (del Vilar *et al.*, 2023). Le programme des Nations unies pour l'environnement (UNEP, 2017) recommande d'accroître les taux de récupération et de reprendre la saumure dans de nouvelles technologies de dessalement pour accroître davantage le rendement en eau douce.



Selon Eyl-Mazzega et Cassignol (2022), les usines de dessalement fonctionnant majoritairement grâce aux énergies fossiles, leur empreinte carbone est particulièrement élevée. Le dessalement de 1000 m³/jour consomme l'équivalent approximatif de 10 000 tonnes de pétrole par an (Tal, 2018). Chaque année, le secteur du dessalement produit au moins 120 millions de tonnes de CO₂. Les techniques par osmose inverse émettraient entre 2,1 à 3,6 kg de CO₂ par m³ d'eau dessalée tandis que les technologies thermiques se situent plutôt entre 8 à 20 kg de CO₂ par m³ d'eau dessalée.

Plusieurs pays du Golfe commencent à mobiliser les énergies renouvelables, à l'image de la centrale par osmose inverse d'Al Khafji en Arabie saoudite qui dessale chaque jour 60 000 m³, alimentée par des panneaux photovoltaïques. L'éolien est notamment utilisé sur les îles espagnoles de la Grande Canarie et Fuerteventura, qui disposent de conditions météorologiques particulièrement adaptées. En Australie, l'usine de Perth est alimentée par l'électricité produite par le parc éolien de 80 MW de Emu Downs Wind Farm.

**Tableau III - Consommations énergétiques comparées
des procédés de dessalement
(Artelia)**

kWh/m ³	Énergie électrique	tÉnergie thermique	Équivalent total en énergie électrique
Flash à étages multiples	3,4 - 4,5	5,6 - 8	9 - 12,5
Distillation à effets multiples	1,5 - 2,5	4 - 5,5	5,5 - 8
Osmose inverse	2,5 - 5	Non nécessaire	2,5 - 5

**Tableau IV - Coûts estimatifs du dessalement en 2019
(Banque mondiale, 2019)**

	Investissement moyen (millions USD/mil- lions litre jour)	Coût moyen de fonctionnement (USD/m ³)	Coût moyen de production (USD/m ³)
Distillation flash multi-étages (MSF)	2,1	0,26	1,44
Distillation multi-effets avec compression de vapeur (MED)	1,4	0,14	1,39
Osmose inverse Méditerranée	1,2	0,35	0,98
Osmose inverse Golfe arabe	1,5	0,64	1,35
Osmose inverse mer Rouge	1,5	0,51	1,38
Osmose inverse océans Atlantique et Pacifique	4,1	0,21	1,82
Hybride MSF/MED	1,8	0,23	1,15
Hybride Osmose inverse	1,3	0,35	1,03

Même si le coût de ces installations et de leurs productions est encore relativement élevé, les prix de l'osmose inverse ont significativement diminué ces dix dernières années grâce aux progrès technologiques accomplis et à l'augmentation du nombre d'installations dans le monde. Le recours possible par ailleurs aux énergies renouvelables pour cette technologie a permis son développement.

Le bureau d'études Artelia a réalisé une comparaison des consommations énergétiques estimées entre les différentes technologies de dessalement.

Aujourd'hui, un mètre cube d'eau dessalée est commercialisé en concession sur des contrats de long terme à moins d'un dollar US, soit autour d'un euro +/- 20 %. Ainsi,

l'Algérie a confié il y a déjà plus d'une dizaine d'années à des concessionnaires étrangers le financement, la construction et l'opération de plusieurs unités de dessalement d'eau de mer au prix de vente de 0,8 à 0,9 USD/m³.

La Banque mondiale (2019) constate que la dépense d'investissement (CAPEX) de l'osmose inverse est inférieure aux procédés thermiques et que les coûts d'exploitation sont plus faibles notamment en raison des coûts énergétiques et d'un besoin de personnel sur site moins conséquent. Les avantages de l'osmose inverse par rapport aux traitements thermiques sont : une plus faible quantité d'eau de mer prélevée, un concentrat salé rejeté de volume plus faible (mais plus concentré), une absence d'augmentation de température, une meilleure empreinte carbone et moins de nuisances sonores. Par contre, l'osmose inverse présente des rejets contenant des réactifs chimiques coagulants et flocculants liés aux prétraitements avant les membranes.

L'eau dessalée est produite en bord de mer. Son transfert loin de la côte à des altitudes plus élevées renchérit considérablement son coût.

En France, les freins actuels au développement du dessalement par osmose inverse sont essentiellement dus à la distance entre les usages potentiels et les zones côtières et, dans une moindre mesure, les impacts des saumures à rejeter, la consommation énergétique par rapport à des traitements conventionnels d'eau de surface (0,2 - 0,4 kW/m³) et, pour la production d'eau potable, le faible nombre de membranes ayant reçu une attestation de conformité sanitaire pour la production d'eau de consommation humaine.

Outre quelques cas spécifiques en France insulaire (Polynésie, Mayotte...), les expertises actuelles concluent, à une solution pouvant être intéressante pour les zones côtières pour accompagner les développements démographiques de ces zones, mais, pour l'heure, peu adaptée pour la métropole en l'état des contraintes encore faibles sur les ressources en eau et des autres solutions envisageables. Les baisses futures de ressources pourraient cependant faire évoluer cette situation, en particulier pour des installations de secours destinées à faire face à des sécheresses exceptionnelles.

LES STOCKAGES D'EAU

Les manques de volumes nécessaires pour les usages aux endroits et aux périodes nécessaires ont déjà conduit historiquement à la constitution de stockages d'eau douce lorsque la pluviométrie permet de remplir ces réserves. L'augmentation de la variabilité des précipitations va nécessiter la réalisation de nouveaux stockages d'eau dans les bassins versants qui souffrent d'une irrégularité inacceptable pour les consommateurs. La localisation de ces

réservoirs et leur dimensionnement appellent une approche hydrologique, géographique et environnementale. La France compte aujourd'hui une capacité de stockage d'eau de surface en barrages-réservoirs de 12 milliards de m³. Ces capacités sont de 56 milliards de m³ en Espagne, 22 milliards de m³ au Maroc et bientôt 12 milliards de m³ en Algérie, pays ayant été amenés à devoir gérer les manques d'eau douce depuis très longtemps.

Ces réserves existent déjà aujourd'hui sous forme de grandes retenues particulièrement utilisées pour la production d'hydroélectricité, la production d'eau de consommation humaine, pour des loisirs et la régulation de débits comme dans le cas des grands barrages en amont de la Seine. Ce sont aussi de plus petites réserves sous forme de retenues collinaires ou de réserves de substitution.

Le stockage est aussi souterrain par la réalimentation naturelle des nappes et, dans quelques exemples, par une réalimentation artificielle lorsque les conditions sont favorables et en veillant à l'absence de contamination.

Les flux importants lors des orages ou autres fortes précipitations temporaires conduisent à des écoulements rapides en « eau perdue » qui ne permettent pas la réalimentation des eaux souterraines, ce qui engage à une réflexion d'une gestion rendant plus disponibles ces volumes massifs pour des usages ultérieurs.

L'implantation et la gestion de ces stockages sont des sujets techniques et technologiques, mais aussi des sujets qui interpellent les riverains et induisent de forts débats sociétaux.

Des barrages pour la régulation du régime hydraulique

Les barrages sont construits en travers du lit des rivières de manière à constituer un réservoir d'eau. Les barrages de régulation se remplissent lorsque l'eau est en excès, notamment lors des crues et se vident lorsque le gestionnaire du barrage souhaite fournir de l'eau à ceux qui le demandent, y compris le soutien d'étiage en aval.

Ces barrages de régulation sont des outils d'adaptation qui s'imposent lorsque la période où la pluie ou la neige sont abondantes est décalée par rapport à la période où l'eau est demandée et a le plus de valeur. Un barrage de régulation trouve son importance lorsqu'il se vide, car alors il fournit de l'eau. Un barrage dont le niveau est stable présente une valeur pour les loisirs sans valeur significative de régulation.

La gestion du régime hydraulique a justifié la construction de nombreux barrages en France et dans le monde et leurs technologies de conception et de construction spé-

cifiques ont fondamentalement évolué et continuent d'évoluer.

722 grands barrages, définis par la Commission internationale des grands barrages par une hauteur supérieure à 15 mètres, sont recensés en France. La liste n'inclut pas les nombreux plus petits barrages en maçonnerie, en terre ou mixtes qui servaient à fournir de l'énergie mécanique aux moulins, aux forges, aux pompes des mines et à créer des pêcheries. La majorité de ces petits barrages est aujourd'hui désaffectée. Ils servaient de fait à la régulation des cours d'eau et à la garantie de la ressource en eau des riverains.

Après 1945, la France a constitué des compagnies d'aménagement chargées des investissements et de la gestion de l'eau dans le sud du pays.

La Compagnie nationale d'aménagement de la région du Bas-Rhône et du Languedoc (devenue BRL), chargée de dériver 75 m³/s du Rhône vers le Languedoc a construit trois grands barrages. La Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne a eu la charge d'exploiter le vieux canal de la Neste (1848-1862) et d'alimenter toute la Gascogne avec l'eau des Pyrénées. Elle a construit 29 km de canaux, 4 réservoirs de montagne (48 millions de m³ mobilisables) et 15 réservoirs de piémont (70 millions de m³ mobilisables). La compagnie garantit le partage équitable de 220 millions de m³/an pour tous les usages, dans un contexte de baisse de ressource accentuée par le changement climatique. La Société du Canal de Provence met l'eau des Alpes à disposition des habitants de la Provence. Elle exploite un grand barrage et partage avec EDF la gestion de 7 grands barrages construits depuis 1946. Ces compagnies travaillent en étroite collaboration avec le monde agricole et avec les villes et les départements concernés.

Les barrages de régulation ont été développés généralement en France dans tous les territoires qui ne disposent pas de nappes phréatiques facilement accessibles et qui assurent cette régulation naturellement. C'est le cas en particulier des régions granitiques comme la Bretagne, le Limousin, les Vosges, etc. où de nombreux grands barrages ont été construits pour assurer principalement la satisfaction des besoins en eau des grandes villes. La retenue d'eau est connectée à l'usine de production d'eau potable de la ville. Dans beaucoup de cas, tout ou partie de l'eau est rejetée dans la rivière pour maintenir un débit écologique durant la période sèche. Les agriculteurs peuvent obtenir des autorisations de pompage dans la rivière.

Les barrages de régulation sont placés en fonction de l'existence de sites favorables et de la proximité de la demande, car transporter l'eau sur de grandes distances exige des investissements très lourds. Les barrages sont réalisés sur des sites soigneusement

choisis en fonction de la géologie, des conséquences socio-environnementales de leur présence, des conséquences de la modification du débit de la rivière à l'aval. Ils sont aussi conçus en fonction des matériaux disponibles à proximité. Pour cette raison, les barrages de régulation sont de tous types : en terre à noyau, en terre ou en enrochement à masque, barrage-voûte ou voûtes multiples en béton, barrage-poids traditionnel ou en béton compacté au rouleau.

Les gestionnaires de ces grands barrages tentent d'assurer une constante adéquation entre les moyens de stockage, leur entretien et leur renouvellement et les évolutions de la demande en eau. La nécessité et la possibilité d'augmenter le volume de stockage est un choix local qui doit être coordonné à l'échelon régional. Cette nécessité est de plus en plus présente. Elle peut prendre la forme de la recherche de nouveaux sites ou de la surélévation des ouvrages existants.

QUELLES CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA SÉCURITÉ DES BARRAGES ?

L'augmentation de l'intensité des pluies et de la durée des périodes de pluie intense peuvent avoir un impact sur l'érosion des talus aval des barrages en terre ou des digues latérales lorsque ceux-ci ne sont pas protégés de manière suffisante. L'expérience des pays de mousson donne de nombreuses références de ce type d'érosion. Il est l'une des causes principales de rupture de barrages en terre, par exemple en Inde.

Les crues dont le volume est supérieur à la capacité de stockage du réservoir au moment où elles se produisent sont évacuées par des déversoirs (évacuateurs de crue à seuil libre ou vannés). La majorité des barrages de régulation sont d'ailleurs équipés d'évacuateurs à seuil libre pour éviter tout risque de mauvaise manœuvre des vannes qui provoquerait une crue artificielle. Le dimensionnement de ces évacuateurs de crue est réglementé et c'est en général la crue de période de retour 10 000 ans qui est prise en compte. Pour un barrage en terre, les conséquences d'une crue de période de retour 100 000 ans doivent être analysées. Les hydrologues considèrent que le système est stationnaire pour analyser les fréquences rares des pluies et des débits. Même si la dernière période de 10 000 ans a connu des cycles (petit optimum médiéval, optimum romain), et à plus forte raison les dernières 100 000 ans, le raisonnement des hydrologues est probabiliste et suppose la stationnarité des phénomènes de pluies. Le chapitre 8 du rapport 6 du WG1 du GIEC indique : « *Les projections de débit fluvial nécessitent en outre l'utilisation de modèles hydrologiques forcés par les conclusions des modèles climatiques et n'ont pas été aussi largement explorées, car elles ne sont pas des variables directement incluses dans les modèles climatiques [...]* ». C'est un sujet important et difficile. Aujourd'hui, l'attention renforcée aux possibles impacts des crues en France et dans de nombreux pays n'est pas guidée par l'anticipation d'un changement structurel des crues du fait du climat, mais par la valeur croissante des menaces sur les biens et les personnes par des crues rares.

Des barrages pour la production hydroélectrique

Aujourd'hui, les nouveaux projets sont très souvent sujets à polémiques par leur taille et leurs impacts : les déplacements de population, les effets sur la faune et la flore, les conséquences climatiques, le patrimoine englouti, la méthanisation des végétaux, l'influence sur l'aval, etc.

L'hydroélectricité est une énergie renouvelable, disposant d'une longue expérience, ce qui en fait une énergie durable qui repose sur l'anticipation, le suivi et le dialogue avec les parties prenantes locales pour développer, construire et exploiter des infrastructures. Les grands barrages français ont été, pour la plupart, construits dans l'après-guerre pour doter la France d'une énergie électrique abondante et l'hydroélectricité a souvent été à l'origine du développement industriel d'un territoire.

La contribution au développement durable des barrages doit se regarder d'un double point de vue :

- sur le plan global, la force de l'eau permet de produire une électricité renouvelable, généralement peu émettrice de gaz à effet de serre. En France métropolitaine est évoquée la valeur faible de 12 g/kWh de CO₂ ;
- sur le plan local, les retenues sont des réserves d'eau utilisables pour l'agriculture et la production d'eau potable, pouvant aussi apporter un développement touristique.

Il existe aujourd'hui des lignes directrices développées par l'International Hydropower Association (IHA) pour favoriser la prise en compte des impacts positifs et négatifs d'un barrage afin de trouver un équilibre satisfaisant. Les barrages-réservoirs présentent de nombreux avantages et peuvent être de véritables instruments du développement durable des territoires. La fonction du barrage contribue à un objectif global national tout en recherchant un équilibre local entre le développement économique, l'équité sociale et le respect de l'environnement.

Les exigences environnementales et sociétales envers ces installations et leur mode de fonctionnement évoluent. Les enjeux de la biodiversité, de la protection des écosystèmes et des espèces (migratrices notamment) sont désormais mieux évalués. Les équilibres économiques se sont déplacés avec l'apparition de nouvelles formes de tourisme et de loisirs. Mais, alors même que la recherche d'un équilibre n'est jamais figée au moment de la construction du barrage, le maître d'ouvrage attend une stabilité des conditions d'exploitation lui permettant de rentabiliser son investissement. La durée usuelle de concession de 75 ans était sûrement trop longue. La diminuer pour les futures installations imposera un partage des charges et/ou la rémunération de la prise en compte des nouveaux enjeux. Les mécanismes sont à développer et doivent faire l'objet de réflexions entre les acteurs, d'autant que les outils économiques existent.

CONCERNANT LE STOCKAGE

Les barrages hydroélectriques contribuent à la gestion des fleuves et des rivières. Ils n'ont pas tous les mêmes qualités et ne peuvent donc pas répondre aux mêmes besoins : la taille des réservoirs, la nature (pluviale, glaciaire, nivale, fluviale...) de l'eau qu'ils stockent, l'usage qui en sera fait, en font des outils très différents. En France, la plupart des grands réservoirs sont saisonniers. Ils sont remplis par l'eau de pluie en automne et au printemps ainsi que par la fonte des neiges et des glaciers. Un barrage-réservoir ne pourra stocker de l'eau que s'il en dispose et ne pourra qu'écrêter les crues. Il faut avoir conscience de ses limitations techniques pour l'utiliser au mieux dans la gestion de l'eau.

Le critère principal utilisé pour catégoriser les centrales hydroélectriques est la durée de remplissage de leurs réservoirs, qui détermine la capacité de modulation et de fonctionnement en pointe de l'ouvrage. Des centrales sont installées « au fil de l'eau » et turbinent l'eau d'un cours d'eau comme elle arrive, n'étant pas dotées d'un réservoir important. Elles se trouvent principalement sur le Rhin et le Rhône (avec une capacité de production installée totale de 4,4 GW). Elles ont cependant des faibles capacités de modulation de la ressource en eau et participent à la prévision et à la gestion de l'eau sur leur cours.

Les centrales dotées d'un réservoir (pour une capacité totale actuelle de 518 GW), permettent de concentrer leur production pendant les périodes de forte consommation. Elles ont des performances dynamiques exceptionnelles, c'est-à-dire qu'elles sont capables de passer de l'arrêt à leur puissance maximale en quelques minutes, et donc de faire face aux variations parfois très rapides de la demande en électricité lors d'un incident sur le système électrique. Mais, là encore, le soutien de débits d'étiage peut être en contradiction avec l'objectif du barrage.

Il faut aussi distinguer les « centrales d'éclusées » qui disposent d'un réservoir amont de taille moyenne (entre 2 heures et 400 heures de production) et les « centrales de lac », qui disposent, elles, d'un volume stocké important, qui apporte la garantie de pouvoir disposer de leur puissance indépendamment des conditions hydrologiques instantanées.

Enfin, il existe les centrales de pompage-turbinage, appelées aussi stations de transfert d'énergie par pompage (STEP), 5,5 GW qui disposent d'un réservoir supérieur et d'un réservoir inférieur, reliés par une conduite forcée au bas de laquelle sont installés des groupes réversibles qui pompent l'eau du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur pendant les périodes de faible consommation, puis la turbinent pendant les heures de pointe.

Le stockage hydroélectrique est encore aujourd'hui le seul véritable stockage massif pilotable de l'électricité. Avec le développement de la production d'électricité intermittente dans le système électrique, et un souhait plus affirmé de production d'électricité renouvelable et locale, la question du développement de la production hydraulique en France est à nouveau un sujet d'actualité, les décisions et choix dépendent des objectifs donnés à l'hydroélectricité, notamment pour compenser les insuffisances de production éolienne durant les périodes anticycloniques polaires d'hiver. L'hydroélectricité est actuellement très sollicitée durant ces périodes qui touchent presque toute l'Europe simultanément.

Les arbitrages entre les usages, qui sont déjà sources de conflits, vont s'aggraver. Le cas sera encore plus compliqué si les ressources sont transfrontalières avec les conséquences politiques induites. La gestion de l'eau est technique et il faut en connaître les limites et les possibilités, mais elle est aussi politique s'appuyant sur des outils et des organisations parfois très anciennes, comme les canaux d'Adam de Craponne ou le canal de Provence, souvent ciblées sur un ou deux usages. La concurrence entre les usages a créé des conflits locaux et ce problème risque de s'aggraver. Les comités de bassins, véritables parlements locaux de l'eau, font partie des instances qui permettent une approche plus intégrée des enjeux de l'eau dans un territoire et une régulation des conflits d'usage.

Rehausse des barrages

La rehausse des barrages existants constitue une solution d'augmentation des capacités de stockage des eaux douces. La mise en œuvre de cette solution permet généralement de limiter les impacts environnementaux sur le bassin versant amont, conséquence de l'élévation du niveau de l'eau en amont, la plupart du temps en se cantonnant sur les surfaces dites de « revanche » qui sont déjà la propriété du maître d'ouvrage. Cette solution doit être étudiée au cas par cas. Certains ouvrages peuvent s'avérer inadaptés pour être rehaussés de manière économique ou en raison de questions de sécurité de l'ouvrage. Les rehausses pratiquées sont variables, et peuvent aller d'une hauteur aussi faible qu'un mètre jusqu'à plus de 40 à 50 mètres. Deux critères sont décisionnels, au-delà des aspects hydrologiques : la capacité de l'ouvrage à recevoir une telle rehausse, et les conséquences attendues de la rehausse proposée en termes de submersion des surfaces en amont. Dans tous les cas, les conséquences et les impacts sur les usages en amont du barrage sont toujours moindres que ceux engendrés par la création d'une nouvelle retenue, et ce type de réalisation est souvent perçue de manière positive par les populations.

En Suisse, 10 % des barrages pourraient bénéficier d'une surélévation, notamment

les barrages alpins, avec des rehausses pouvant varier de quelques mètres jusqu'à 40 mètres. Des augmentations de capacité de stockage de l'ordre de 15 à 30 millions de m³ avec une production électrique de 45 à 100 GWh sont annoncés pour chacun d'eux. Ces études ne sont pas publiques aujourd'hui en France, et l'Académie ne peut que recommander de les rendre publiques et les développer afin de hiérarchiser les choix des cibles des barrages à rehausser, par rapport à des critères de rareté des disponibilités de l'eau douce, et des critères économiques et environnementaux.

Lorsque les bassins versants sont très aménagés, et qu'il n'est pas possible de disposer de la différence entre l'altitude du remblai et le niveau des plus hautes eaux (revanche), généralement disponible en périphérie des plans d'eau, la technique des hausses fusibles peut être utilisée. Suivant le niveau de la retenue, l'élément de hausse fusible reposant sur le seuil déversant fonctionne :

- comme un barrage, tant que le niveau amont est inférieur à la cote supérieure d'arase des hausses ;
- comme un déversoir, quand le niveau d'eau est compris entre la cote d'arase des hausses et la cote de réglage entraînant le basculement ;
- comme une digue fusible, quand le niveau atteint la cote de basculement fixée.

Dans les deux premiers cas, la hausse est dimensionnée pour être stable très largement et conserver sa stabilité même en cas d'incident.

Cette technologie, développée initialement en France il y a 30 ans, a fait le tour du monde. Elle est peu mise en place en France alors qu'elle procure d'importantes augmentations de capacités de stockage d'eau douce derrière des barrages existants.

Retenues collinaires et réserves de substitution

Ces solutions de stockage sont actuellement associées à d'importants conflits qui portent principalement sur les conditions d'appropriation des ressources et de partage de l'eau.

L'eau peut aussi être stockée dans des retenues collinaires et des réserves de substitution.

Les retenues collinaires sont de taille réduite, installées derrière des digues à flanc de coteau. Leur alimentation est réalisée par les eaux de ruissellement lors des précipitations ou par pompage dans le milieu en période d'excédent de la ressource en eau, sans restitution immédiate. Elles sont utilisées essentiellement pour l'irrigation des cultures ou l'alimentation des canons à neige et d'autres usages secondaires.

Les réserves de substitution sont des ouvrages artificiels prévus pour substituer des volumes qui seraient prélevés à l'étiage par des volumes prélevés en période de hautes

eaux : il s'agit donc à proprement parler de « substitution ». Elles sont élaborées pour stocker l'eau par des prélèvements anticipés ne devant pas mettre en péril les équilibres hydrologiques. Comme le décrivent bien certains SDAGE, cette notion de retenues de substitution recouvre des réservoirs situés en-dehors des cours d'eau à la différence des barrages et retenues collinaires (ministère de la Transition écologique, 2022). L'eau conservée dans ces « bassines » se réduit par évaporation comme pour les barrages et retenues collinaires. En revanche, ne barrant pas les écoulements naturels, elles ne gênent ni le transport des sédiments ni la remontée des poissons.

La technologie des « bassines » inclut un réservoir, un ou des pompages en rivière ou en nappe et des autorisations datées de pompage à des périodes données. Dans le cas de prélèvement en nappe souterraine, elle n'a de sens que si la nappe est suffisamment dynamique pour se recharger bien avant la période d'étiage. Ce peut être le cas de certaines nappes d'accompagnement des cours d'eau. C'est plus difficilement envisageable pour des nappes profondes à recharge lente. La gestion des prélèvements depuis les nappes pour le remplissage en période de forte disponibilité en eau exige ainsi une étude amont visant à définir les seuils et conditions de prélèvements pour garantir la protection qualitative de la nappe et les étiages des cours d'eau ainsi que la vie des zones humides.

Ces réserves de substitution, comme les retenues collinaires, font l'objet de débats et de conflits en raison des nombreux avantages et inconvénients liés à leurs implantations et à leur gestion, pouvant être très variables selon les zones concernées. Des enjeux économiques et sociaux importants existent autour de ce type de projet ainsi que des préoccupations sur la prise en compte des écosystèmes aquatiques, les retenues collinaires étant souvent implantées sur des zones humides pouvant conduire à perdre leurs fonctions et services. Si le principe de conserver de l'eau excédentaire en hiver pour des usages en période sèche est une cause importante, il est nécessaire de prendre en compte les attentes des usagers, les questions du partage et du coût de l'eau, les vulnérabilités économiques des différents types d'exploitations agricoles, mais aussi la réduction des déséquilibres naturels environnementaux locaux. Vicente-Serrano *et al.* (2017) montrent que les changements de pratiques de gestion de l'eau avec des barrages sur un bassin versant espagnol ont induits une augmentation des sécheresses hydrologiques en aval des barrages installés. Les paramètres à maîtriser dans un intérêt commun local sont : les impacts d'implantation sur les terres locales et sur les zones humides en aval et en amont, les évolutions de la qualité de l'eau stockée, les pertes par évaporation, des prélèvements sur les eaux souterraines...

Il s'agit donc d'exemples types de structures nécessitant de rigoureuses études préalables tenant compte des effets du changement et de la variabilité climatique sur la

durée de vie des projets, ainsi que des travaux de concertation transparente avec les parties prenantes locales. Elles peuvent permettre de pouvoir évaluer leurs bénéfices, leurs limites, leurs coûts et leurs effets indésirables avant leur mise en œuvre, voire réajuster la gestion des ouvrages au fil du temps.

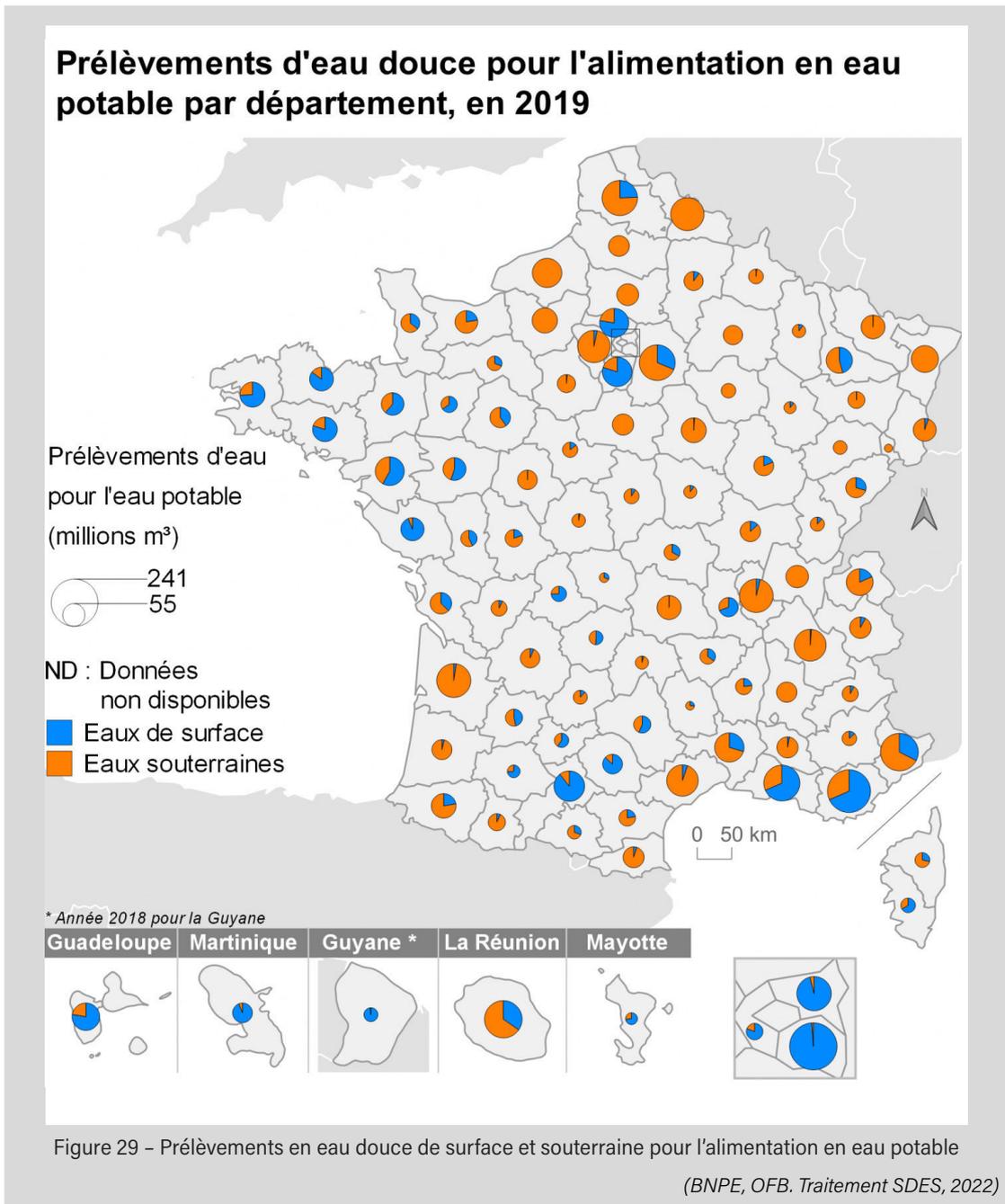
GESTION DES EAUX SOUTERRAINES

Sur les 5,4 milliards de m³ prélevés en 2016 en vue de la distribution d'eau potable, plus des deux tiers (65,1 %) sont issus des eaux souterraines. Cependant, la répartition entre eau souterraine et eau de surface continentale est assez variable d'une région à l'autre. Dans neuf des treize régions métropolitaines, la proportion d'eau souterraine prélevée se situe au-dessus de 50 % ; pour sept d'entre elles, elle est même au-dessus de 75 %. Pour les quatre régions restantes, l'eau destinée à la potabilisation est majoritairement issue d'eau de surface continentale. En outre-mer, en dehors de la Réunion et Mayotte, l'eau destinée à l'alimentation en eau potable est en revanche très majoritairement issue des eaux de surface continentales (Eaufrance, 2019).

Les ressources en eaux souterraines sont un élément crucial pour l'alimentation en eau potable, car elles constituent en France les deux tiers des ressources utilisées.

Le secteur agricole représente, en France, 20 % des prélèvements en eaux souterraines selon l'OCDE (2015). En 2016, sur les 3,2 milliards de m³ prélevés pour l'irrigation en France, près du tiers est issu des eaux souterraines.

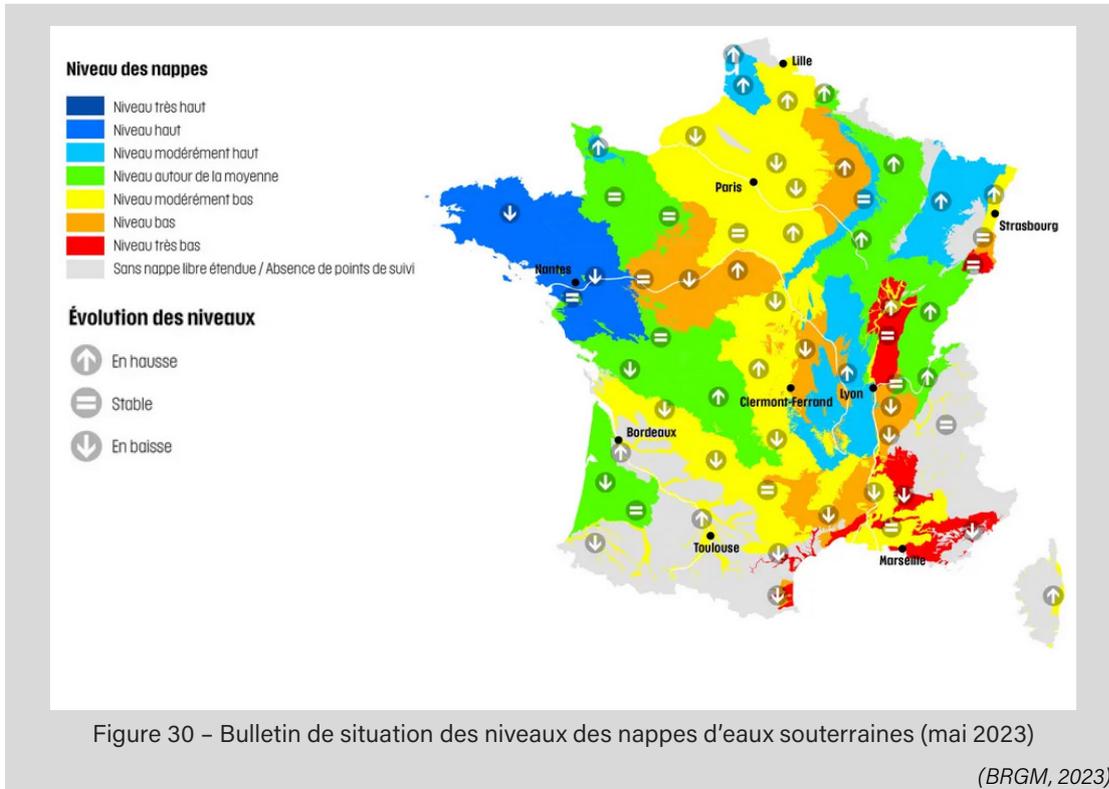
La situation de ce point de vue est néanmoins particulièrement contrastée entre les franges sud-est et nord-ouest du territoire métropolitain. Dans les régions de la frange sud (Occitanie, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Corse), dont les prélèvements pour l'irrigation représentent près de la moitié du total (46 %) en France métropolitaine, l'irrigation est très majoritairement (pour près de 70 %) assurée avec de l'eau de surface. Dans les autres régions métropolitaines, dont les prélèvements pour l'irrigation représentent près de 54 % du total, l'irrigation est basée à près de 70 % sur de l'eau souterraine. En outre-mer, l'eau prélevée pour l'irrigation est quasi exclusivement issue des eaux de surface terrestres (de 89 à 100 % selon les DOM, avec une valeur inférieure pour Mayotte, à 63 %) (Eaufrance, 2019).



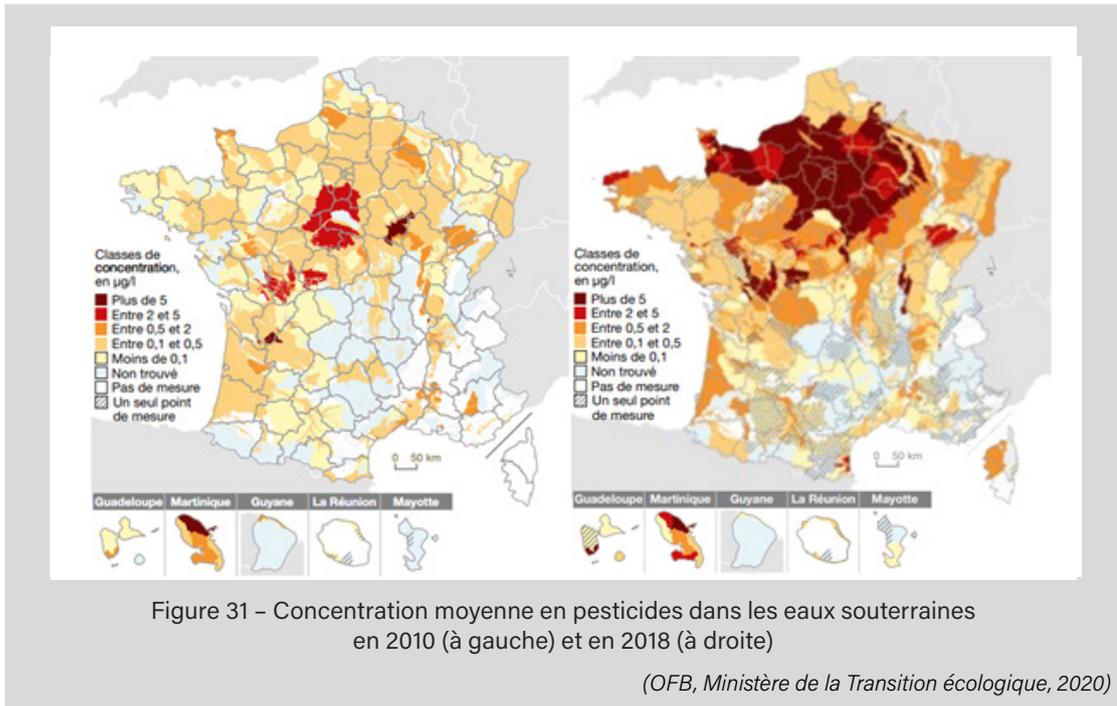
Les eaux souterraines réalimentent également de nombreux cours d'eau en période d'étiage par écoulement gravitaire en aval de leur point de recharge. En 2015, près de 90 % des masses d'eaux souterraines étaient considérées comme en bon état d'un point de vue quantitatif (ministère de la Transition écologique, OFB, 2020). Toutefois, depuis cette date, la situation enregistre probablement des évolutions.

Le bilan régulier publié par le Bureau de recherche géologiques et minières (BRGM) permet de suivre la situation hydrogéologique des nappes d'eaux souterraines. Celui de mai 2023 fait apparaître que les niveaux restent sous les normales mensuelles avec

80 % des niveaux modérément bas à très bas. La plupart des secteurs affichent des niveaux nettement inférieurs à ceux de février de l'année 2022. Ceci est lié à une recharge automnale et hivernale jusqu'à présent insuffisante (BRGM, 2023 - Figure 30).



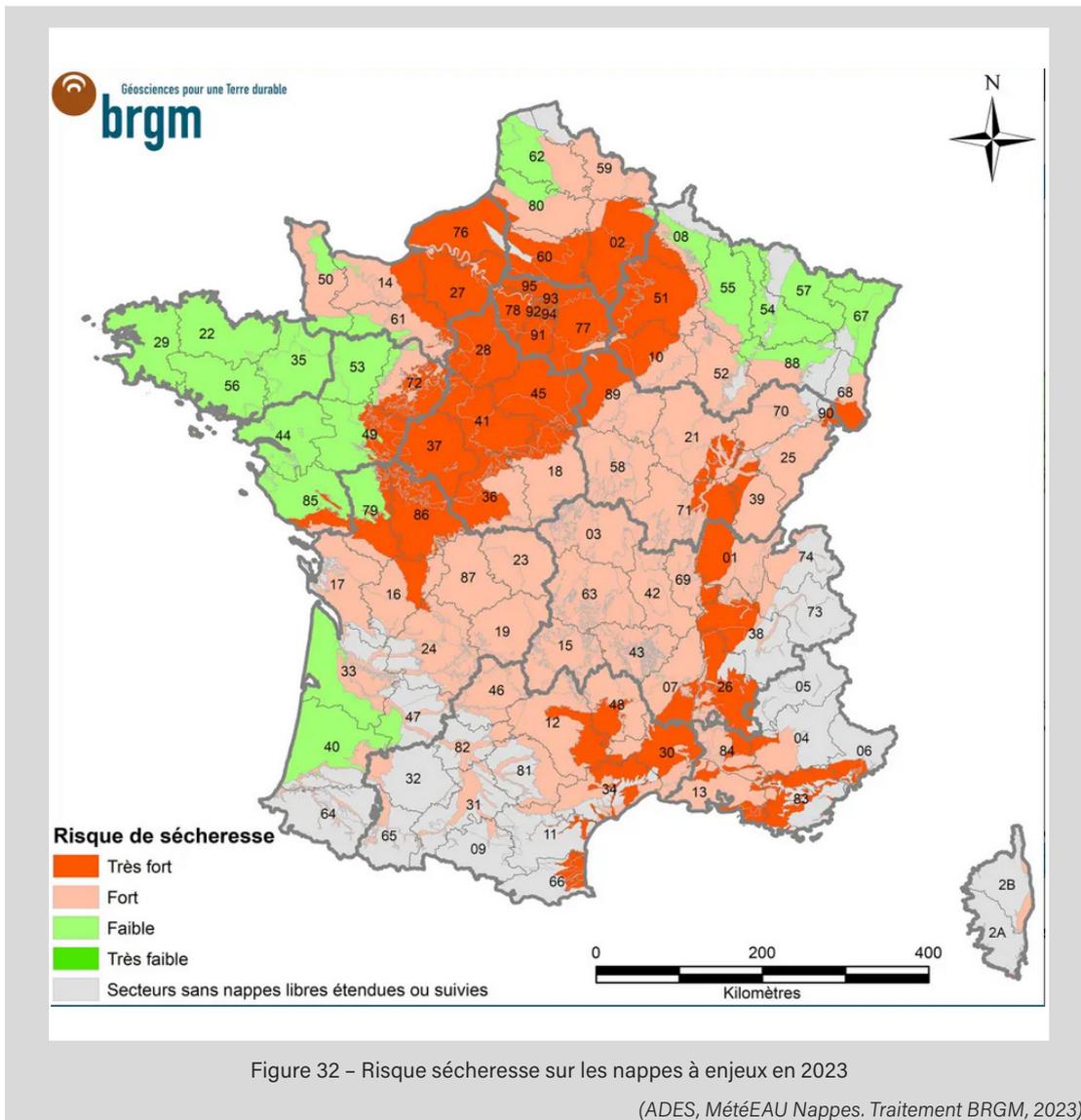
Concernant la qualité : selon Eaufrance (2022), en 2015, en France, parmi les 645 masses d'eau souterraines, 69,1 % étaient en bon état chimique. Cependant, il apparaît une dégradation au cours des années du fait de l'accentuation des pressions exercées par les activités humaines : contaminations par les engrais et les pesticides issus de l'agriculture, autres polluants organiques et métaux lourds issus d'activités industrielles, de rejets d'eaux usées parfois non maîtrisés, et de l'expansion urbaine. Les données pour les pesticides, illustrées sur la figure 31, sont particulièrement éloquentes, et témoignent entre autres de l'impact de pratiques agricoles intensives.



Le BRGM résume ainsi les enjeux concernant la ressource en eaux souterraines : « La contrainte sur la disponibilité de cette ressource s'accroît du fait du changement climatique et de la croissance de la demande pour les différents usages. Les ressources en eaux souterraines peuvent être localement ou régionalement surexploitées. La demande devenant supérieure à la recharge des aquifères, la surexploitation peut ainsi engendrer des phénomènes irréversibles tels que des intrusions salines dans les régions côtières, des phénomènes de subsidence (effondrement de terrains), des problèmes de qualité d'eau, des assèchements de cours d'eau avec des impacts sur les écosystèmes associés. Certains de ces phénomènes peuvent être irréversibles. Avec l'augmentation de la fréquence d'inondations, les nappes peuvent être davantage exposées à des pollutions diffuses ou ponctuelles » (BRGM, 2022).

Compte tenu de la grande variabilité des hydrosystèmes souterrains, liée à la grande diversité géologique de nos territoires métropolitains et ultra-marins, mais aussi de grande diversité des situations climatiques, les approches de gestion sont avant tout territoriales et locales, au sein d'un système gouverné en métropole par les six agences de l'eau. L'année 2022 a été marquée par un déficit de pluviométrie et d'enneigement prolongé conduisant en été à une sécheresse exceptionnelle pour l'humidité des sols et affectant les nappes, une situation qui persiste encore début 2023, car non suffisamment compensée par les pluies d'automne et d'hiver (Figure 32).

L'évolution du climat attendue dans les 30 à 50 années à venir devrait avoir pour conséquence en France métropolitaine d'exacerber les sécheresses estivales des nappes.



QUELLES SOLUTIONS DE GESTION DÉVELOPPER ?

Le souci de préservation à la fois de la qualité et de la disponibilité des masses d'eaux souterraines engendre des complexités inédites. Il faut en effet faciliter la recharge des nappes, en laissant disponibles suffisamment de zones de ré-infiltration tout en limitant le risque d'inondation suite à des épisodes de pluies intenses. Cependant, cette ré-infiltration doit se faire avec des eaux de la meilleure qualité possible, afin de ne pas dégrader la qualité des nappes souterraines. Il est donc impératif que ces zones de recharge puissent au préalable permettre une auto-épuration, si possible par des processus naturels ou utilisant des solutions fondées sur la nature. Selon l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN), elles sont définies comme

les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité. Ces modes de recharge sont de plus généralement économiques, et bien acceptés par les populations environnantes comme en témoignent les résultats de cette étude sur le bassin du Lez, mené dans le cadre du projet européen NAIAD : la population accorde en moyenne une valeur supplémentaire aux solutions fondées sur la nature par rapport aux solutions « grises » pour un même niveau de gestion du risque, et des co-bénéfices nets suffisants pour justifier des programmes d'investissement des autorités locales dans des solutions fondées sur la nature ambitieuses (Hérivaux et Le Coënt, 2021).

La recharge artificielle à partir d'eau superficielle traitée a été développée depuis plus de cinquante ans à l'ouest de Paris et dans le Pas-de-Calais. Elle a pour but de permettre de stocker en période hivernale, quand l'eau est de bonne qualité et disponible en quantité, pour pouvoir disposer en été des ressources nécessaires. Cette technique permet ainsi d'utiliser les nappes comme réservoirs souterrains bien intégrés au paysage. Elle est un peu plus consommatrice d'énergie puisqu'il faut repomper l'eau (100 à 200 Wh/m³).

CHOISIR LES TECHNOLOGIES ADAPTÉES EN PRENANT EN COMPTE LE DÉLAI POUR LEUR MISE EN ŒUVRE

La mise en place de solutions ponctuelles structurantes se fait sur un temps long : au moins 4 à 5 ans pour l'utilisation des eaux usées traitées ou l'installation d'une rehausse de barrage, dix à quinze ans pour ériger un barrage et constituer une nouvelle réserve. Des solutions décentralisées plus modestes, mais nombreuses peuvent être encouragées par voie réglementaire, et produire des effets à plus court terme de trois à cinq ans comme, par exemple, l'infiltration artificielle des nappes phréatiques à partir de dépressions humides équipées de bassins d'infiltration en bordure de fleuve.

Dans tous les cas, il est plus important de tenir compte des évolutions à venir (demande en eau, climat) dans le dimensionnement et l'étude de faisabilité et de soutenabilité (temps de mise en œuvre/durée de vie attendue) des solutions plutôt que de se limiter à des solutions aux seules difficultés actuelles, qui ont toutes chances de s'aggraver dans le temps. Il importe également d'estimer les éventuelles limites dures pour ces solutions dans un climat plus chaud.

Dans chaque projet, les finalités de l'emploi des différentes technologies ont besoin d'être explicitées dans les débats sociétaux afin que les parties prenantes comprennent bien les objectifs et les modalités de gestion qui permettront de les atteindre.

Cette transparence est indispensable pour l'appropriation locale des technologies. En effet, chacune peut avoir des effets jugés indésirables par certains s'ils ne voient pas l'objectif principal ou s'ils ont des doutes sur la réalité de la gestion qui en sera faite.

POINTS À RETENIR

Les situations à gérer sont des crises éphémères et ponctuelles, mais également une situation de contraintes croissantes du fait du changement climatique qui va accentuer l'assèchement estival, posant des limites dures à l'eau disponible (recul de l'enneigement et fonte des glaciers).

Des solutions/aides technologiques existent pour augmenter la fourniture d'eau douce et ont déjà été développées en France et dans le monde.

Nombre de ces technologies ont été éprouvées et, sous réserve d'une mise en œuvre fiable et contrôlée, ne demandent pas de phase pilote avant implantation.

Il n'existe pas de technologie unique et universelle, mais une gamme d'outils capables de répondre aux différents besoins locaux. Les solutions adaptées pour un site peuvent ne pas l'être pour un autre, ce qui implique un travail local sur la base de recommandations nationales et d'un choix entre des différentes solutions intégrant toutes leurs dimensions (sociales, économiques, énergétiques...).

Les contributions technologiques impliquent un travail préalable complet de connaissance des disponibilités et besoins en eau et interviennent après les solutions d'économie d'usages fructueuses préalablement implantées localement et selon un calcul faisabilité - viabilité - coût - bénéfices - effets indésirables adapté à la valeur locale de l'eau.

Ces solutions technologiques ont leurs caractéristiques propres. Dans chaque cas d'utilisation, leurs effets dépendent du contexte et, pour certaines, des objectifs et des modalités de leur gestion.

L'utilisation des eaux usées traitées est, moyennant les précautions indispensables pour rendre les risques sanitaires indirects négligeables et garantir l'absence d'impact sur les milieux aquatiques locaux, une solution apportant des volumes vers d'autres usages et, par exemple, permettre de supprimer leurs prélèvements.

Le dessalement de l'eau de mer, en développement dans le monde, n'apparaît pas en l'état actuel, comme une solution à grande échelle en France métropolitaine, même si elle a déjà été installées (Île de Sein) ou envisagée (Belle-Île, Porquerolles), mais cette situation pourrait évoluer notamment en fonction des coûts de l'énergie et des croissances démographiques sur les zones côtières.

Les stockages superficiels ou souterrains sont des moyens importants de gérer la rétention d'eau en période de forte pluviométrie pour des usages ultérieurs. Ils constituent une nécessité au regard des prévisions de situations de crise de certaines régions. Leurs contraintes imposent une stratégie par bassin versant élaborée en concertation et transparence. Les développements de ces stockages ne doivent se faire qu'en complément éventuel de transformation des pratiques pour réduire les demandes en eau et avec une vision anticipée des évolutions des besoins et disponibilités.

CONCLUSIONS

Anticiper d'urgence les baisses de ressources pour éviter l'aggravation des situations de manque d'eau douce face aux demandes

Les situations actuelles et les prévisions confirment la nécessité d'anticiper d'urgence les conséquences pour la France des baisses de ressources en eau douce résultant du changement climatique. Des pénuries existent d'ores et déjà résultant d'un déséquilibre entre les demandes locales de prélèvement et la ressource disponible en saison sèche et se développeront, mais de manière hétérogène sur le plan géographique, selon les saisons et selon les usages locaux. Elles conduisent localement ou régionalement à des situations d'urgence. Le rapport d'information du Sénat (Belrhiti C. et al., 2022) et l'avis du CESE (Guihéneuf et Le Quéau, 2023) apportent leurs contributions à cette analyse.

Les tendances évolutives conduisant à la récurrence de situations de crise, il est indispensable d'anticiper les difficultés à venir par des approches stratégiques (changement climatique, évolution démographique, transformation de pratiques...) et éviter les inégalités, réelles ou perçues, et les conflits d'usage pour un bien commun aussi indispensable qu'est la disponibilité en eau.

Il convient d'abord de maîtriser la demande par des pratiques de « sobriété collective » à construire.

À ce titre, les politiques mises en œuvre comportent ou comporteront des composantes technologiques.

Les dynamiques actuelles de création des « projets de territoire pour la gestion des eaux » (PTGE) permettent l'engagement vers des solutions locales adaptées en intégrant les attentes de tous les secteurs ayant la nécessité de prélever dans les ressources.

L'adaptation au changement climatique remet en cause les habitudes et les « droits acquis »

Même si la France possède un climat tempéré avec des ressources en eau douce aujourd'hui annuellement importantes, les baisses significatives régionales et saisonnières de ressources actuelles et modélisées ne peuvent pas être indolores pour les trois grands domaines préleveurs d'eau douce que sont l'agriculture, l'industrie et les villes, considérant également que les prélèvements en eau doivent être compatibles avec les évolutions des besoins pour la nature et la préservation de sa biodiversité. Chacun va devoir accepter que ce qui était possible hier ne le soit pas forcément demain.

Des développements à composantes nationales et régionales

La nature fortement régionale des orientations de gestion basées sur des données de disponibilité et de consommation des eaux douces comporte néanmoins des volets communs d'ampleur nationale, voire européenne. Il s'agit notamment de validations portant sur l'innocuité pour la santé publique ou l'environnement de procédures ou de technologies mises en œuvre, mais aussi d'éventuels transferts d'eaux ou d'usages d'intérêt national ou international (alimentation, énergie, transports...).

Une valeur de l'eau à réévaluer

La valeur d'usage (et non le prix) de l'eau subit des évolutions évidentes selon les lieux, les saisons, les types d'usages. Les conditions évolutives rendent nécessaire de mieux juger de cette valeur et d'en considérer les conséquences afin d'encourager les choix collectifs de partage de l'eau orientés pour fixer les règles d'usage et d'économie en période de manque au regard des demandes.

Une exigence de concertation et de transparence

La baisse des ressources en eau douce dans ses spécificités régionales et saisonnières au regard des prélèvements actuels induisant des situations de manque d'eau, face aux demandes, est identifiée comme l'un des quatre risques majeurs liés au changement climatique en Europe de l'Ouest, avec la chaleur extrême et ses effets sur la santé et les écosystèmes, les risques d'inondations pluviales, fluviales et littorales, et les chocs sur les rendements agricoles.

Considérant le contexte de crise pour les citoyens et les activités économiques que représente nécessairement la gestion d'un manque local ou régional d'eau douce, les solutions mises en œuvre, et particulièrement l'implantation de technologies pour la fourniture d'eau douce, exigent une adhésion collective et une promotion générale. Le comportement collectif escompté, notamment en période de restrictions des usages, doit reposer sur une participation collective citoyenne jugée indispensable, en considérant toutes les mesures d'économies devant être mises en œuvre, par tous les grands acteurs consommateurs.

Ceci implique une forte transparence auprès des populations dans la présentation des données factuelles expliquant la pénurie, des solutions proposées (économies de prélèvements + technologies + modalités de gestion), et de celles jugées inacceptables et des mesures de garantie contre les effets indésirables (sanitaires, environnementaux, économiques...) éventuels.

La prise de conscience collective progressive, accentuée après l'été 2022, représente une forte attente des citoyens envers les solutions envisagées, et renforce la mise en évidence des risques de conflits de partage. Elle exige le fait de se projeter à 20-30 ans, voire plus pour les grandes infrastructures, et ne pas se limiter à gérer la situation actuelle pour anticiper les effets liés au réchauffement.

Les acteurs locaux sont les mieux à même pour évaluer les besoins, et ils doivent disposer des meilleures informations techniques et économiques possibles, pour définir les orientations et les solutions les plus adaptées à leur situation.

De nombreuses compétences nationales

Dans tous les domaines nécessaires, des compétences existent en France permettant d'aider aux décisions de gestion. Les agences de l'eau, les comités de bassin et commissions locales sont des éléments forts contributifs. Les compétences des industriels français en la matière, que ce soit dans le traitement des eaux ou dans la construction des barrages, sont indéniables. Les technologies disponibles sont nombreuses, mais elles ne doivent toutefois pas conduire à des développements et implantations inconsidérés aux plans individuels ou collectifs pouvant conduire à des risques pour la santé ou l'environnement, et ne peuvent à elles seules régler la situation.

L'instruction du 7 mai 2019 encourage les projets de territoire pour la gestion des eaux (PTGE). Ces PTGE se développent et doivent être pensés sur un périmètre cohérent d'un point de vue hydrologique ou hydrogéologique. Ils sont élaborés pour arriver sur

la durée à un équilibre entre besoins et ressources en eau, à une certaine sobriété dans les usages, à préserver la qualité des eaux et la fonctionnalité des écosystèmes aquatiques, à anticiper le changement climatique et ses conséquences sur la ressource et à s'y adapter. Ils s'appuient sur un diagnostic et un dialogue avec les acteurs du territoire et permettent de déterminer le programme d'actions à mettre en œuvre. En 2019, le gouvernement s'est fixé comme objectif de faire aboutir au moins 50 PTGE d'ici à 2022 et 100 d'ici à 2027, ce qui semble en passe d'être réalisé.

L'urgence d'une priorisation locale des grands postes de consommation

Aucune politique adaptée ne peut se structurer sans connaître les cibles prioritaires au regard des prélèvements dans les ressources et des postes principaux de consommation. Que ce soit par bassin, par sous-bassin et par communauté de communes, il est indispensable de connaître les principaux points d'usage en termes de volumes, en particulier en période de basses eaux. Au sein de chaque entité, les usages collectifs doivent être tracés et individualisés afin de hiérarchiser ceux qui seront les cibles prioritaires visant à de possibles réductions, et ceux pouvant être couverts par des eaux non conventionnelles.

Une palette d'outils disponibles pour des choix régionaux/locaux

Pour la mise en œuvre des politiques d'action, il existe des solutions technologiques pouvant être employées seules ou en association. Ces procédés doivent disposer de garanties de sécurité/fiabilité/efficacité validées au niveau national. Toutefois, compte tenu de la diversité des situations locales, une réflexion localisée avec l'aide d'orientations nationales est indispensable pour définir, parmi les outils disponibles, celui ou ceux qui seront, pour la zone définie, les plus efficaces et présentant le meilleur compromis efficacité/innocuité/coût.

Au-delà des politiques globales visant à réduire les consommations individuelles ou collectives, notamment en faisant évoluer les pratiques agricoles, agronomiques et de paysage, les principales voies d'action technologiques (individuelles ou collectives) sont :

- la production de volumes supplémentaires d'eau douce : dessalement, condensation ;
- les stockages : recharge de nappes, augmentation des volumes d'eau retenus ;
- la récupération et l'utilisation des eaux usées (noires, grises, industrielles) pour d'autres usages et celle des eaux pluviales ;
- la désimperméabilisation des surfaces.

Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise technologie. Chacune possède un domaine d'emploi spécifique avec des impacts différents sur les utilisateurs de l'eau, les écosystèmes et le cycle de l'eau. Chacune nécessite des ressources en énergie ou en matières différentes et chacune présente des coûts de réalisation et de gestion dans la durée. Elles sont à examiner au regard de la réévaluation des évolutions de la valeur de l'eau (et non de son coût).

La bonne utilisation des technologies nécessite, dans chaque cas, la prise en compte raisonnée au préalable des divers impacts et des ressources physiques et économiques mobilisées.

Chacune possède ses détracteurs qui privilégient un aspect plutôt qu'un autre, ce qui peut être légitime dans un cas local particulier, mais ne saurait être généralisé. Ainsi, les rejets de saumure ne disqualifient pas le dessalement, car il existe des solutions garantissant une forte dilution. Les inquiétudes envers la réutilisation des eaux usées au motif qu'elle supprime un flux de retour dans le réseau hydrographique méconnaissent la réduction simultanée d'un prélèvement de même volume...

C'est pourquoi, au regard des exigences de solutions, les choix effectués doivent se baser sur une présentation transparente des études de diagnostic et des hypothèses et hiérarchisations de solutions envisagées.

Une adaptation nécessaire des SDAGE

Les mesures actuelles des SDAGE sont utiles, et indispensables, mais elles seront sans doute loin d'être suffisantes pour répondre aux enjeux identifiés. La gestion de volumes de pluies concentrés sur de courtes périodes avec de fortes intensités, pose la question de la rétention.

Les SDAGE doivent recommander l'évaluation de la disponibilité des volumes d'eau douce sur une base mensuelle pour la bonne compréhension des situations. Tous les SDAGE constatent des réductions annoncées de débits à l'étiage de 10 à 40 % en moyenne. Tous les SDAGE mettent en avant le nécessaire recours aux mesures de sobriété. Peu en tirent des conclusions sur la mise en œuvre de moyens de rétention des eaux douces en période excédentaire. Les SDAGE présentent aujourd'hui une insuffisance dans le traitement du renforcement de la ressource en eau et surtout des techniques de rétention des eaux pluviales s'abattant sur notre pays, lors de périodes de plus en plus courtes. Les bases climatiques sur lesquelles la gestion des eaux de surface a été basée entre 1900 et 1990, avec les renforcements des stockages de surface assurant

les soutiens d'étiage, l'approvisionnement en eau en période sèche, ont changé. Il devient nécessaire de les actualiser et de prendre les mesures de renforcement pour la rétention d'importants volumes d'eau douce, de manière souterraine ou/et de surface.

RECOMMANDATIONS

Sur la base des conclusions précédemment exposées et considérant que :

- les données disponibles confirment une baisse de la disponibilité d'eau douce en France essentiellement métropolitaine et Corse au regard des besoins tels qu'existants aujourd'hui. Ceci conduit à des situations de pénuries dans certaines zones géographiques et à certaines périodes de l'année;
- l'eau, comme l'énergie, est une composante fondamentale de l'existence et de l'organisation des sociétés humaines;
- la construction d'un accès pour tous à l'eau potable et à l'assainissement des eaux usées a constitué et constitue une valeur majeure ayant permis des progrès importants dans l'espérance de vie;
- l'hygiène individuelle et collective, l'alimentation disponible et diversifiée sont également des contributeurs fondamentaux de progrès et dépendent des accès à l'eau;
- des aides technologiques existent pour contribuer à résoudre localement certaines situations de manque d'eau douce;
- les solutions à mettre en œuvre exigent des orientations nationales précises et des adaptations nécessairement locales à l'appui de diagnostics territorialisés au regard de la diversité des situations;
- une implantation dispersée de solutions utilisant des technologies, de manière trop hétérogène, sans stratégie et sans programmes de surveillance et de contrôles peut conduire à des risques sanitaires et environnementaux;
- une adaptation pour toutes les zones à risques doit être structurée en urgence;
- il existe des contraintes de délais pour la définition et l'implantation de solutions;
- les dimensions importantes à prendre en compte pour les réponses et l'efficacité d'adaptation au changement climatique liées à l'eau sont les aspects économiques et financiers, les éléments liés à la vulnérabilité, les enjeux environnementaux et sociétaux. Il faut également prendre en compte les éventuelles situations de non-retour (limites dures), en fonction du niveau de réchauffement planétaire;
- les principes d'une adaptation réussie (équitable et effective avec des co-bénéfices sur l'économie, les écosystèmes et la réduction des émissions de gaz à effet de serre) *versus* une « maladaptation » inéquitable (qui augmente les risques pour les personnes vulnérables et les écosystèmes ou qui entraîne davantage d'émissions de gaz à effet de serre), pourraient être davantage mobilisés en tenant compte des

questions des vulnérabilités sociales et environnementales, et de l'équité actuelle et future.

L'Académie des technologies recommande :

Recommandation 1

Développer d'urgence, en partenariat avec les pays voisins partageant des ressources en eau, **une stratégie nationale à 5, 15 et 30 ans** permettant aux acteurs locaux de définir, choisir et implanter rapidement les actions et solutions technologiques visant à anticiper et éviter les manques d'eau douce pour les usages locaux, tenant compte des besoins pour les activités humaines et pour la préservation des écosystèmes. Elle devra anticiper les conséquences du changement climatique pour la viabilité des projets.

Cette stratégie doit se déployer sur deux niveaux :

- Un niveau national de résolution des problèmes communs, visant à guider les décideurs, contrôler et fiabiliser les solutions mises en œuvre, éviter les risques environnementaux et sanitaires, organiser le partage des retours d'expérience et éviter la répétition d'expérimentations locales de type pilote, inutiles. Elle comporte nécessairement des orientations cadrées, mais aussi des guides techniques favorisant ce double niveau de décisions nationales et locales.
- **Un niveau régional et local**, appuyé au besoin par des expertises nationales, permettant d'établir le diagnostic initial visant, en fonction du calendrier prévisionnel des états de manque d'eau, à orienter vers les meilleurs choix en termes d'économies des usages, d'orientation et de gestion des ressources disponibles conventionnelles, nouvelles et complémentaires en fonction des types d'usages et de définition des solutions à composantes, technologiques ou non, complémentaires à développer.

Elle doit se construire sur la base des expériences et des données disponibles auprès des acteurs nationaux et notamment des agences de l'eau et des comités de bassin, du BRGM, de Météo-France, de l'ANSES, des ARS, du Haut Conseil de la santé publique et des organismes de recherche, en particulier de l'INRAE et des UMR universités-organismes de recherche. Elle comporte des volets pluridisciplinaires (hydrogéologie, écologie, santé publique, développement des territoires, sociologie, économie...).

Elle doit permettre de hiérarchiser les zones et périodes à risques afin d'organiser des actions progressives prenant en compte les besoins de gestion de l'amont des bassins versants.

Le développement des projets de territoire pour la gestion des eaux (PTGE) doit être accompagné pour leur permettre de déboucher au plus vite sur des solutions durables. Il faut une capacité à mobiliser rapidement des solutions pour les situations d'urgence et réactualiser les choix au regard de l'évolution de l'état des lieux, des projections, et des technologies dans une vision de trajectoire résiliente.

Recommandation 2

Anticiper des conséquences issues de la réduction des réserves nivales et glaciaires et de la transformation de la disponibilité de l'eau en montagne notamment pour le soutien des débits d'écoulements en aval et les conséquences majeures sur tous les usages.

Des limites à l'adaptation sont prévisibles du fait de la réduction de la ressource pendant la saison de pic de demande. Cela implique d'intégrer à la fois des stratégies de réduction de la demande et l'intégration de nouvelles possibilités de stockage d'eau dans des réservoirs, notamment en altitude, ou en utilisant des capacités de stockages souterrains, en particulier par la réalimentation de nappes, dans un schéma compatible avec les contraintes environnementales et de paysage.

Recommandation 3

Engager d'urgence la mise en œuvre des solutions pertinentes, considérant qu'il faut entre 10 à 15 ans pour réaliser et rendre opérationnelle une grande partie de celles-ci (retenue d'eau, désimperméabilisation, évolutions agricoles...)

15 ans, c'est la durée de trois SDAGE. Les dimensions écologiques et politiques de telles créations sont élevées et il faut aussi beaucoup de temps pour que les populations se les approprient. Les rapports « coûts/bénéfices » sous toutes leurs formes : financiers, sociétaux, écologiques, agricoles, industriels, touristiques devront être évalués, et suivis de décisions politiques réalistes et volontaristes.

Recommandation 4

Implanter d'urgence de nouveaux modes de pratiques agricoles, d'évolution du système alimentaire et d'amélioration des techniques d'irrigation, selon les conclusions des programmes de recherche réalisés au niveau national ou international et mis à l'échelle des systèmes alimentaires territoriaux.

Une augmentation du potentiel de recherche et développement est nécessaire pour proposer aux agriculteurs, dont les éleveurs, des solutions locales adaptées aux scénarios de stress hydrique ainsi que des études économiques garantissant le revenu des professionnels malgré les ralentissements des gains de productivité agricole et des effets négatifs sur la stabilité des récoltes.

Une stratégie d'incitation doit viser à adapter les pratiques agricoles et de paysage locales aux solutions issues des activités de recherche et développement notamment via la formation accélérée des agriculteurs et paysagistes notamment dans le choix des essences/cultures permettant de réduire la demande en eau.

Une information doit être réalisée également à l'attention de tous les usagers pour une meilleure compréhension des contraintes, des ordres de grandeur et du rôle global des espèces végétales, avec un enjeu également portant sur leur fonction dans les écosystèmes et pour la biodiversité. Pour la protection de la qualité des eaux surtout en période d'étiage, les épandages de pesticides doivent être réduits.

Recommandation 5

Développer des compétences en recherche et développement (R&D) et des programmes de co-construction de connaissances (services climatiques) tenant compte des connaissances locales et des besoins spécifiques d'informations (climat, hydrogéologie, écosystèmes aquatiques...) de sorte à fournir des connaissances scientifiques régulièrement réactualisées, robustes et fiables pour éclairer les choix d'adaptation.

Recommandation 6

Élaborer, par les collectivités les plus concernées qui ne l'ont pas fait, des plans d'adaptation à 5, 15 et 30 ans, pour hiérarchiser les solutions et les mettre en œuvre.

Ces plans impliquent des observations et un diagnostic territorialisé préalable pour connaître et mesurer les flux globaux des eaux concernés (ressources superficielles et souterraines, estimation

des volumes de précipitations sur les surfaces imperméabilisées, fuites des réseaux, exportations...) et de mesurer les principaux usages d'eau par la collectivité par type d'eau (irrigation, nettoyage des espaces publics et des matériels, refroidissement...), et des possibilités locales de rétention des eaux pluviales.

Les échanges doivent être menés au niveau des bassins et sous-bassins-versants, afin d'établir les besoins et les périodes concernées pour définir les priorités d'investissement dans les technologies d'assistance.

Recommandation 7

Accompagner les décisionnaires dans l'implantation des solutions technologiques afin d'éviter des pertes de temps liées à des répétitions d'expériences pour des systèmes déjà validés et pour les études et actions de concertation.

Les projets de type stockage en surface posent la question de la capacité de modélisation hydrogéologique à échelle fine et surtout tenant compte du changement climatique pour évaluer la faisabilité et la durabilité des projets dans le climat actuel et dans le climat des prochaines décennies. De même, la réalimentation artificielle des nappes phréatiques existantes impose le contrôle de la qualité des eaux infiltrées afin d'éviter des contaminations des eaux souterraines.

Recommandation 8

Fournir aux institutions de contrôle environnemental et sanitaire des moyens techniques et humains permettant d'accompagner les programmes technologiques mis en œuvre pour la préparation des projets et la validation de leur efficacité, de leur innocuité et leur fiabilité dans la durée.

Recommandation 9

Promouvoir des activités de R&D permettant au plus vite de répondre aux questions non encore résolues concernant les impacts environnementaux et sanitaires des solutions à base de technologies ou non, y compris basées sur la nature, et visant à réduire les coûts et augmenter la fiabilité et la sécurité.

Recommandation 10

Prendre en compte la notion « d'intérêt national » dans les calculs de rentabilité des solutions structurantes susceptibles d'être mises en place, en considérant leur durée de vie longue dans les calculs de rentabilité, et en y insérant les bénéfices nationaux élargis induits.

Les projets doivent tenir compte, sur la durée de vie attendue dans leur montage financier, de toute la plage de l'évolution climatique régionale possible.

Recommandation 11

Expliquer systématiquement les objectifs, les modalités de gestion et les impacts de la (ou des) solution(s) envisagée(s) afin de maximiser l'appropriation des solutions jugées les plus adaptées par les parties prenantes.

Éviter, dans les rapports, discours et débats, toute qualification générale d'une technologie ou de son intérêt, ces effets dépendant essentiellement du contexte et des modalités de leur mise en œuvre et de leur gestion. L'importance du diagnostic guide une solution à un problème préalablement identifié et caractérisé. La technologie choisie pour résoudre un problème parfaitement identifié, n'est pas systématiquement transposable pour résoudre des problèmes d'origines différentes.

RÉFÉRENCES

- Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse, *Impacts du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse. Bilan actualisé des connaissances*, Journée Eau et connaissance 2017
https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2018-02/bilan_connaissances_chgt-clim_2016.pdf
- ANSES (2020), *Évaluation des risques liés aux cyanobactéries et leurs toxines dans les eaux douces*
<https://www.anses.fr/en/system/files/EAUX2016SA0165Ra.pdf>
- Banque mondiale (2019), *The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World*
<https://elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/31416>
- Belrhiti C., Cukierman C., Richard A., Sol J. et al. (2022) Sénat :
Rapport d'information fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective sur l'avenir de l'eau
<https://www.senat.fr/rap/r22-142/r22-1421.pdf>
- Birot Y. (2019), *Évapotranspiration. Eau et forêt : quels liens entre les deux ?*, Académie d'agriculture de France
<https://www.academie-agriculture.fr/mots-clefs-encyclopedie/evapotranspiration>
- BRGM (2022), *Une sécheresse sans précédent cet été 2022*
<https://www.brgm.fr/fr/actualite/article/secheresse-sans-precedent-cet-ete-2022>
- BRGM (2023), *Nappes d'eau souterraine au 1^{er} mai 2023 et risques de sécheresse estivale*
<https://www.brgm.fr/fr/actualite/communique-presse/nappes-eau-souterraine-au-1er-mai-2023-risques-secheresse-estivale>
- Cerema, *Réutilisation des eaux usées : le panorama français* (2020)
<https://www.Cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/reutilisation-eaux-usees-traitees-panorama-francais>
- Dayon G., Boé J., Martin E., Gailhard J. (2018), Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties, *Comptes rendus Geoscience*, 350, 4, 141-153
- del Villar A., Melgarejo J., García-Lopez M., Fernandez-Aracil P., Montano B. (2023) The economic value of the extracted elements from brine concentrates of Spanish desalination plants. *Desalination*, 560, 116678

- Eaufrance (2018), Prélèvements quantitatifs sur la ressource en eau, *Bulletin n° 5* https://www.eau-france.fr/sites/default/files/2019-03/bnpe_2016_201903.pdf
- Eaufrance (2022), *La qualité des eaux souterraines* <https://www.eaufrance.fr/la-qualite-des-eaux-souterraines>
- EUR-Lex (2020), Règlement (UE) 2020/741 du Parlement européen et du Conseil du 25 mai 2020 relatif aux exigences minimales applicables à la réutilisation de l'eau <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000029186641>
- Explore 2070 (2022), OFB, Portail technique <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/44>
- Eyl-Mazzega M.A., Cassagnol E. (2022), Géopolitique du dessalement d'eau de mer, *Études de l'IFRI* https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/eyl-mazzega_cassagnol_geopolitique_dessalement_eau_mer_2022.pdf
- GIEC (2022), Atlas interactif <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>
- Guihéneuf P., Le Quéau S. (2023) CESE : Avis « *Comment favoriser une gestion durable de l'eau (quantité, qualité, partage) face aux changements climatiques ?* » https://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2023/2023_08_gestion_eau.pdf
- Hérivaux C., Le Coënt P. (2021), Introducing nature into cities or preserving existing peri-urban ecosystems? Analysis of preferences in an urbanizing catchment, *Sustainability*, 13, 2, 587
- Jones E., Qadir M., van Vliet M.T.H., Smakhtin V., Kang S. (2019), The state of desalination and brine production: A global outlook, *Science of The Total Environment*, 657, 1343-56
- Légifrance (2010), Arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32020R0741>
- Légifrance (2014), Arrêté du 25 juin 2014 modifiant l'arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000029186641>
- Légifrance (2022), Décret n° 2022-336 du 10 mars 2022 relatif aux usages et aux conditions de réutilisation des eaux usées traitées <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000045331735r>
- Loubier S., Declercq R. (2014), *Analyses coûts-bénéfices sur la mise en œuvre de projets de réutilisation des eaux usées traitées (REUSE). Application à trois cas d'études français* https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/2014_025.pdf
- McDowell, N.G., Sapes, G., Pivovarov, A. et al. (2022), Mechanisms of woody-plant mortality under rising drought, CO₂ and vapour pressure deficit, *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 5, 1-15

- Météo-France, *Sécheresses et changement climatique* (2020)
<https://meteofrance.com/changement-climatique/observer/changement-climatique-et-secheresses>
- Météo-France, *De nouvelles normales pour le climat en France* (2022-1) <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/de-nouvelles-normales-pour-qualifier-le-climat-en-france>
- Météo-France, *Climat HD* (2022-2)
<https://meteofrance.com/climathd>
- Ministère de l'Agriculture, *Conclusions du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique* (2022)
<https://agriculture.gouv.fr/dossier-de-presse-conclusions-du-varenne-agricole-de-leau-et-de-ladaptation-au-changement>
- Ministère de la Transition écologique (2022), DRIAS, *Les futurs du climat, Évolution des composantes météorologiques : précipitation et évapotranspiration potentielle*
<http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/327>
- Ministère de la Transition écologique, *Guide juridique construction de retenues* (2022)
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2012_03%20guide%20juridique_construction%20retenues.pdf
- Ministère de la Transition écologique/ONERC/Association Moraine/Institut des Géosciences de l'Environnement (2022), *Impacts du changement climatique : Montagnes et Glaciers*
<https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-montagne-et-glaciers>
- Ministère de la Transition écologique, OFB (2022), *L'eau en France : ressource et utilisation – Synthèse des connaissances en 2021*
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/leau-en-france-ressource-et-utilisation-synthese-des-connaissances-en-2021>
- Ministère de la Transition écologique, OFB (2020), *Eau et milieux aquatiques. Les chiffres clés*
https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2021-02/datalab_80_chiffres_cles_eau_edition_2020_decembre2020v2.pdf
- Ministère de la Transition écologique (2022) Propluvia
<http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr/propluvia/faces/index.jsp>
- Observatoire national des étiages, Onde (2022), Eaufrance
<https://onde.eaufrance.fr/>
- OCDE (2015), *Politiques de gestion de l'utilisation des eaux souterraines en agriculture – France*
<https://www.oecd.org/agriculture/topics/water-and-agriculture/documents/groundwater-country-note-FRA-2015%20final.pdf>

- OFB (2022) Explore 2070
<https://professionnels.ofb.fr/fr/node/44>
- Pawlak P., Koziol K., Polkowska Z. (2021), Chemical hazard in glacial melt? The glacial system as a secondary source of POPs (in the Northern Hemisphere). A systematic review, *Science of The Total Environment*, 778, 145244
- Ribes A., Boé J., Qasmi S., Dubuisson B., Douville H., Terray L. (2022), An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint, *Earth System Dynamics*, 13, 4, 1397-1415
- Soubeyroux J.M., Kitova N., Blanchard M., Vidal J.P. et al. (2012), Sécheresses des sols en France et changement climatique : Résultats et applications du projet ClimSec, *La Météorologie*, 78
https://www.researchgate.net/publication/230897407_Secheresses_des_sols_en_France_et_changement_climatique_Resultats_et_applications_du_projet_ClimSec
- Soubeyroux J.M., Bernus S., Corre L., Drouin A. et al. (2020), *Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole*, DRIAS
 Les futurs du climat
<http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/296>
- Soubeyroux J.M., Dubuisson B., Gouget V., Samacoits R. (2022) *Évolution passée et future des précipitations extrêmes sur les régions méditerranéennes*, 35e colloque de l'association internationale de climatologie 2022
http://www.meteo.fr/cic/meetings/2022/aic/resumes/obs_model_soubeyroux.pdf
- Stacklin C. (2012), *The Value of Wastewater: An Econometric Evaluation of Recoverable Resources in Wastewater for Reuse*, Conference paper, WEF Proceedings, Nouvelle-Orléans
https://www.researchgate.net/publication/269037957_The_Value_of_Wastewater_An_Econometric_Evaluation_of_Recoverable_Resources_in_Wastewater_for_Reuse
- Tal A. (2018), *Addressing Desalination's Carbon Footprint: The Israeli Experience*, *Water*, 10, 2, 197
<https://www.mdpi.com/2073-4441/10/2/197>
- UNEP (2017), *Réunion régionale d'experts visant à examiner le projet de Lignes directrices sur le dessalement et sur le Protocole « immersion »*, Grèce – Draft, UNEP(DEPI)/MED WG.435/3
https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/17335/17wg435_3_eng.pdf
- Verfaillie D., Lafaysse M., Déqué M., Eckert N., Lejeune Y., Morin S. (2018), Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps, *The Cryosphere* 12, 1249-71
- Vicente-Serrano S.M., Zabalza-Martínez J, Borràs G., López-Moreno J.I. et al. (2017), Extreme hydrological events and the influence of reservoirs in a highly regulated river basin of northeastern Spain, *Journal of Hydrology: Regional Studies* 12 DOI:10.1016/j.ejrh.2017.01.004

INTERVENANTS

GROUPE DE TRAVAIL

Diane d'Arras
Jean-Pierre Chevalier
Claude Karman Nahon
Yves Lévi, animateur
Valérie Masson-Delmotte
Gérard Payen
Bernard Saunier
Bernard Tardieu
Pierre Toulhoat

Secrétariat technique :

Martine Le Bec

PERSONNALITÉS AUDITIONNÉES

AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE

Françoise Goulard, conseillère en charge de la recherche et de la prospective
Ariette Sourzac Pollet, chargée d'études pilotage de la stratégie d'utilisation des
eaux non conventionnelles, Micropolluants

AGENCE DE L'EAU RHÔNE-MÉDITERRANÉE CORSE

Thomas Pelte, chef du service Ressources en eau, Milieux et Fleuve Rhône

ARTELIA

Hovsep Der Kevorkian, directeur des activités Eau, Climat, Déchets
Gwenaëlle Fleury, chef de projet traitement de l'eau, assainissement
& eau potable

EDF

Bruno Carlotti, directeur du programme de recherche environnement
Frédéric Hendrickx, ingénieur chercheur expert
Laure Pellet, directrice du Laboratoire national d'hydraulique et environnement
(LNHE, EDF-R&D)

FNSEA

Sabine Battegay, Association générale des producteurs de maïs (AGPM), respon-
sable analyse et défense des dossiers environnement et eau
Philippe Jougla, administrateur, et président de la FDSEA du Tarn

GROUPE SUEZ

Xavier Litrico, vice-président Recherche, science & technologie
Delia Pastorelli, directrice du secteur dessalement des eaux de mer

HYDROSCIENCES MONTPELLIER, unité mixte de recherche IRD, CNRS

Pierre Genthon, IRD Nouméa Nouvelle-Calédonie, directeur de recherche

Patrick Lachassagne, directeur

INRAE

Chantal Gascuel, directrice de recherche, responsable de l'unité mixte de recherche
Sol, agro et hydrosystèmes, Spatialisation (UMR SAS)

MÉTÉO-FRANCE

Jean-Michel Soubeyrou, directeur adjoint scientifique de la climatologie

L'Académie et le groupe de travail remercient toutes ces personnalités pour leurs apports à la réflexion du groupe, leurs présentations imagées et les planches qui viennent enrichir le texte du présent rapport.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 – Températures et précipitations de 1959 à 2022	10
Figure 2 – Flux annuels du cycle de l'eau en France métropolitaine	12
Figure 3 – Évolution des cumuls annuels de précipitations en France sur la période 1961-2020	13
Figure 4 – Évolution de l'écart relatif du cumul annuel de précipitations au cours du xxie siècle	14
Figure 5 – Évolution territoriale observée des précipitations au cours de la période 1961-2012	14
Figure 6 – Écarts estimés par Météo-France de cumul annuel de précipitations et du nombre de jours secs consécutifs en été à l'horizon « fin de siècle » (2071-2100) par rapport à la période 1976-2005, en France métropolitaine et Corse.	15
Figure 7 – Cartes des écarts relatifs, par rapport à la période de référence 1976-2005, des cumuls de l'évapotranspiration potentielle en pourcentage pour l'horizon lointain par RCP et selon les paramètres de distribution Q05, Q50 et Q95.	17
Figure 8 – Évolution de l'équivalent en eau du manteau neigeux au 1er mai pour les Alpes du Nord	19
Figure 9 – Évolution de l'épaisseur des glaciers en France	20
Figure 10 – Évolution modélisée des débits des cours d'eau en France	21
Figure 11 – Évolution de la superficie de France en sécheresse selon le scénario SSWI-3 (SSWI= Indice sécheresse d'humidité des sols)	24
Figure 12 – Évolution du pourcentage annuel de la surface de la France métropolitaine touchée par la sécheresse de 1959 à 2018 montrant de fortes variabilités annuelles	24
Figure 13 – Répartition des volumes d'eau douce prélevés par usage et par milieu, en 2019, en milliards de m ³	26
Figure 14 – Prélèvements d'eau selon l'utilisation dans les sous-bassins hydrographiques français, en 2020	26

Figure 15 – Évolution des volumes d'eau douce prélevés en France selon les types d'usages	27
Figure 16 – Évolution de l'indicateur national de sécheresse des nappes en France	28
Figure 17 – Observation des étiages en août 2022	30
Figure 18 – Carte des arrêtés de restriction des usages au 12/09/2022	31
Figure 20 – Nature et formes de l'adaptation en agriculture	42
Figure 21 – Nouvelles cibles pour la sélection variétale	43
Figure 22 – Élevage et stratégies d'adaptation aux aléas pour trois grandes régions	44
Figure 23 – Les différentes filières de traitement des eaux usées en vue des différents types d'utilisations	50
Figure 24 – Bilan des cas d'utilisation d'eaux usées traitées recensés en 2017	51
Figure 25 – Bilan des cas d'utilisation d'eaux usées traitées en fonction recensés en 2017	52
Figure 26 – Évolution des objectifs de gestion de l'eau des 91 cas d'utilisation d'eaux usées traitées en fonction et en projet recensés en 2017	52
Figure 27 – Évolution des capacités de dessalement d'eau de mer au Moyen-Orient et en Afrique du Nord en millions de m ³ /j	55
Figure 28 – Évolution des capacités mondiales de dessalement	56
Figure 29 – Prélèvements en eau douce de surface et souterraine pour l'alimentation en eau potable	68
Figure 30 – Bulletin de situation des niveaux des nappes d'eaux souterraines (mai 2023)	69
Figure 31 – Concentration moyenne en pesticides dans les eaux souterraines en 2010 (à gauche) et en 2018 (à droite)	70

LISTE DES TABLEAUX

T ableau I Évolutions des températures estimées par le GIEC	9
T ableau II Les bouleversements climatiques attendus en Europe de l'Ouest et Europe centrale	11
T ableau III Consommations énergétiques comparées des procédés de dessalement	57
T ableau IV Coûts estimatifs du dessalement en 2009	57

Il est urgent d'anticiper les conséquences des baisses de ressources en eau douce. Les crises ne sont pas qu'éphémères et ponctuelles.

Les collectivités doivent anticiper ces évolutions, recenser les prélèvements qui ne rendent pas l'eau localement, promouvoir la sobriété et anticiper les besoins en aides technologiques. Celles-ci aident à réduire les consommations, augmenter la fourniture d'eau, améliorer les réutilisations. Éprouvées dans le monde, non universelles, aux domaines d'emploi différents, elles répondent à différents besoins locaux.

Les solutions, nécessairement collectives, doivent être choisies avec transparence sur les diagnostics, la hiérarchisation des solutions, les garanties de bonne gestion et de protection de la santé publique et des écosystèmes.

Des stratégies à 30 ou 40 ans doivent être arrêtées du niveau national au local. L'Académie formule onze recommandations.

Académie des technologies
Le Ponant — Bâtiment A
19, rue Leblanc
75015 PARIS
+33(0)153854444
secretariat@academie-technologies.fr
www.academie-technologies.fr

ISBN : 979-10-97579-47-0



9 791097 579470