



Société Hydrotechnique de France



Académie de l'Eau

Société Hydrotechnique de France,
25 Rue des Favorites,
75015 Paris
<http://www.shf-hydro.org>

Association Française pour l'Eau,
l'irrigations et le Drainage
361 rue Jean-François Breton, BP
5095, 34196 Montpellier Cedex 5
<http://www.afeid.org/>

Académie de l'Eau
51 rue Salvador Allende,
92000 Nanterre
<http://www.academie-eau.org/fr/>

Les tensions sur l'eau et les crises associées en Europe et dans le bassin méditerranéen d'ici 2050.

Risques et mesures d'adaptation envisageables.

Version 1

Pierre-Louis Viollet (SHF), Jean Verdier (AFEID), Marc-Antoine Martin (Académie de l'Eau)

Résumé. Ce rapport, issu du groupe de travail inter-associatif Tensions sur l'Eau, résume les principaux éléments connus caractérisant l'influence des changements globaux sur les déficits de la ressource en eau, et les conséquences sur les cours d'eau et les aquifères. Le périmètre concerné est l'Europe et le bassin Méditerranéen. Il introduit aux menaces que la tension sur la ressource fera peser sur la durabilité des aquifères et la qualité de leur eau, sur la qualité de l'environnement et la biodiversité, et sur les activités humaines, notamment l'agriculture, et l'hydroélectricité, avec un accent particulier sur le Sud de la Méditerranée. Il présente la boîte à outils des solutions d'adaptation utilisables, parmi lesquelles se situent les transferts et solutions de stockage d'eau (réservoirs), le dessalement, la réduction des pertes et le recyclage de l'eau, ainsi que l'utilisation de nouvelles pratiques agricoles. Il insiste sur le besoin de connaissance des situations locales avec des données physiques et socio économiques fiables, il évoque les questions de gouvernance lesquelles impliquent les acteurs des territoires concernés avec lesquels il convient d'adopter un langage clair, il alerte enfin sur la nécessité de prendre des décisions même si le futur reste incertain..

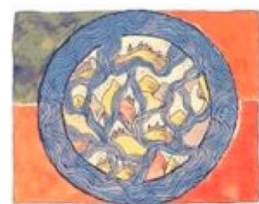
Le groupe de travail « Tensions sur l'Eau » a pour mission d'alerter sur les problèmes de tensions sur la ressource en eau qui vont aller s'aggravant au cours des prochaines années, de rapprocher des points de vue et des analyses qui n'ont pas forcément vocation à se rencontrer, de mettre en lumière les controverses existantes en favorisant les échanges entre parties n'ayant pas le même point de vue, et d'apporter à partir des expériences de ses membres et de celles de leurs associations une valeur ajoutée et un regard critique sur les réflexions existantes, tirant parti de la liberté de parole qu'autorise le contexte associatif.

SOMMAIRE

Préambule	page 3
1. Introduction	3
2. Constats et menaces	5
2.1 Evolutions sur la pluviométrie et l'état hydrique des sols	5
2.2 Conséquences sur les débits des cours d'eau et des nappes	6
2.3 Conséquences environnementales	8
2.4 Menaces sur les usages de l'eau	9
3. La boîte à outils des solutions d'adaptation utilisables	11
3.1 Augmentation et transferts de la ressource en eau	12
3.2 Réduction de la demande et optimisation de la ressource	17
3.3 La gouvernance et les outils économiques	19
4. Un avenir incertain, des décisions à prendre	20
4.1 Des décisions à prendre	21
4.2 Le développement de l'emploi dans les pays du Sud	21
5. Conclusions	21
Références	23



Société Hydrotechnique de France



Académie de l'Eau

Les tensions sur l'eau et les crises associées en Europe et dans le bassin méditerranéen d'ici 2050. Risques et mesures d'adaptation envisageables.

Pierre-Louis Viollet (SHF), Jean Verdier (AFEID), Marc-Antoine Martin (Académie de l'Eau)

Préambule. Depuis 2009, la SHF, l'AFEID, l'Académie de l'Eau et l'ASTEE ont mené des réflexions transverses sur les approches prospectives de la gestion de l'eau dans un contexte de changements globaux. Un premier séminaire avait été organisé à Paris les 25 et 26 mai 2011. Il a permis de faire une synthèse des représentations des principales tensions liées à l'eau à l'échelle mondiale, à partir de plusieurs études à caractère prospectif. Un second séminaire s'est tenu les 30 et 31 mai 2013, centré sur une perspective nationale française, replacée dans ses contextes européen et méditerranéen. Un troisième colloque organisé par la SHF, l'AFEID et l'Académie de l'Eau, avec le soutien de l'Union des Ingénieurs et Scientifiques Francophones, s'est tenu du 7 au 9 octobre 2015 à l'Ecole des Ponts Paris Tech à Marne-la-Vallée. Il a permis d'approfondir les questions liées aux futures tensions sur la gestion de l'eau en Europe et dans le bassin méditerranéen d'ici à 2050. La synthèse de ce colloque a été publiée en décembre 2015 dans la revue *La Houille Blanche*. Le présent document s'appuie sur cette synthèse, dont elle reprend de nombreux éléments, enrichie de contributions de membres du groupe de travail et de leurs associations

Les auteurs remercient notamment pour leurs contributions : Laurent Bellet (EDF), Jérôme Loyer (SHF), Michel Lang (IRSTEA), Mohamed Sinan (Ecole Hassania des Travaux Public, Expert et membre du comité scientifique de la COP 22), Sara Fernandez (IRSTEA).

1. Introduction

Un rapport de synthèse publié en janvier 2014¹ indiquait que :

- le risque de **crises de l'eau** à l'horizon 2050 est bien avéré, en Europe et dans le bassin Méditerranéen,
- le **facteur humain** sera particulièrement important dans la capacité des sociétés modernes à affronter les tensions sur l'eau et à réaliser des choix,
- il sera nécessaire de mettre en place des **politiques d'adaptation**.

Les ressources en eau douce sont mobilisées :

- pour l'approvisionnement en eau des populations humaines,
- pour la production agricole (alimentation, fibres, énergie, etc.),
- comme intrant de procédés industriels, notamment en tant que source froide des centrales thermiques et nucléaires,
- pour la production d'énergie hydraulique (renouvelable et flexible),
- pour la navigation et la flottabilité,

¹ Fernandez & al. (2014).

- en tant que milieux des écosystèmes aquatiques, et des zones humides,
- comme constitutives des patrimoines paysagers et culturels.

Ces différents usages peuvent être en compétition. Des oppositions entre usagers d'un même groupe peuvent également apparaître lorsque leurs demandes potentielles cumulées excèdent les capacités de la ressource ou détériorent sa qualité (situation de rareté). De telles situations de conflits sont apparues dès la plus haute antiquité en Méditerranée et ailleurs dans le monde, donc indépendamment de tout changement climatique, et l'analyse de leurs modalités de règlement ou non, des principes qui les ont inspirés, peuvent être source d'inspiration pour relaxer des tensions présentes ou pour prévenir des crises potentielles². Certaines dispositions anciennes ayant résisté à l'épreuve du temps méritent une attention toute particulière, comme :

- l'institution de l'eau en tant que bien commun inaliénable dans le droit romain antique, disposition reprise dans le code de l'environnement français actuel et objet d'un intérêt croissant de la part de nombreux pays,
- le tribunal des eaux de Valence (Espagne), mis en place au X^e siècle, et qui encore de nos jours se tient tous les jeudis,
- la création, en 1291 par Philippe le Bel, d'officiers royaux chargés de veiller à un bon usage des eaux et des forêts,
- les nombreuses chartes et décisions de justice qui, dès le moyen âge, en Chine, en Orient et en Occident, ont régi et tenté de régler les conflits entre usages et entre riverains (le mot « rivalité » ne vient-il pas du latin *rivus*, le ruisseau)³.

Des crises contemporaines locales, indépendantes de changements globaux, peuvent également contribuer à une réflexion sur l'émergence de conflits liés à l'eau et à de possibles approches pour les dépasser.

Ainsi, en Algérie, il a fallu attendre qu'en 2001, il n'y ait plus de distribution d'eau potable que deux jours par semaine dans la capitale pour que soit décidé de construire un ensemble d'usines de dessalement d'eau de mer susceptible d'augmenter notablement l'offre⁴. On peut également citer les cas de Paris au XIX^e siècle ou, plus récemment, de Barcelone⁵.

Si le changement climatique induira rapidement des diminutions des ressources en eau dans le bassin méditerranéen, les évolutions démographiques auront également un fort impact sur la disponibilité de la ressource par habitant. Ainsi les pays des rives méridionale et orientale de la Méditerranée qui comptaient 235 millions d'habitants en 2000 devraient en avoir de l'ordre de 420 millions en 2050, alors que les ressources en eau de surface devraient diminuer de 30 % à 40 %.

Des défauts de perception de réalités complexes peuvent aussi voir des crises où il n'y en a pas, voire induire ou accroître des crises de l'eau.

Par exemple, de nombreux acteurs de coopération internationale analysent la mobilisation des ressources en eau des Territoires palestiniens occupés dans le seul contexte d'une opposition entre Israël et l'Autorité palestinienne ignorant la part déterminante, mais complexe et

² Ruf (2015)

³ Viollet (2005)

⁴ Kettab, communication orale lors du colloque d'octobre 2015

⁵ Barraqué (2015).

*multiforme, jouée par des communautés paysannes, autonomes de fait et politiquement peu visibles*⁶.

Enfin, il est essentiel de garder à l'esprit le caractère complexe des évolutions de ressources en eau, la baisse anticipée sur le pourtour méditerranéen induite par le changement climatique n'étant qu'une tendance forte sur le long terme, pouvant être masquée ou exagérée par des variations climatiques à court terme. La disponibilité de la ressource dépend en effet beaucoup de la pluviométrie et cette dernière peut varier fortement d'une année sur l'autre, notamment du fait de perturbations du cycle du front intertropical.

Le présent document ne concerne que les questions de pénuries et de partage de l'eau. La question des excès d'eau (inondations) liés au changement climatique n'est pas abordée ici.

2. Constats et menaces

2.1 Evolutions sur la pluviométrie et l'état hydrique des sols

Il faut s'attendre à une **diminution des pluies** en saison estivale sur l'Europe du Sud et le monde Méditerranéen. Cette diminution pourra être dans l'ensemble de l'ordre de -20 à -50 % d'ici 2080-2100, inégalement répartie entre les saisons et les régions⁷, et elle se manifeste déjà de façon importante au sud de la Méditerranée. Il faut s'attendre par ailleurs à une remontée en altitude de la limite pluie-neige et à une réduction des volumes de glace.

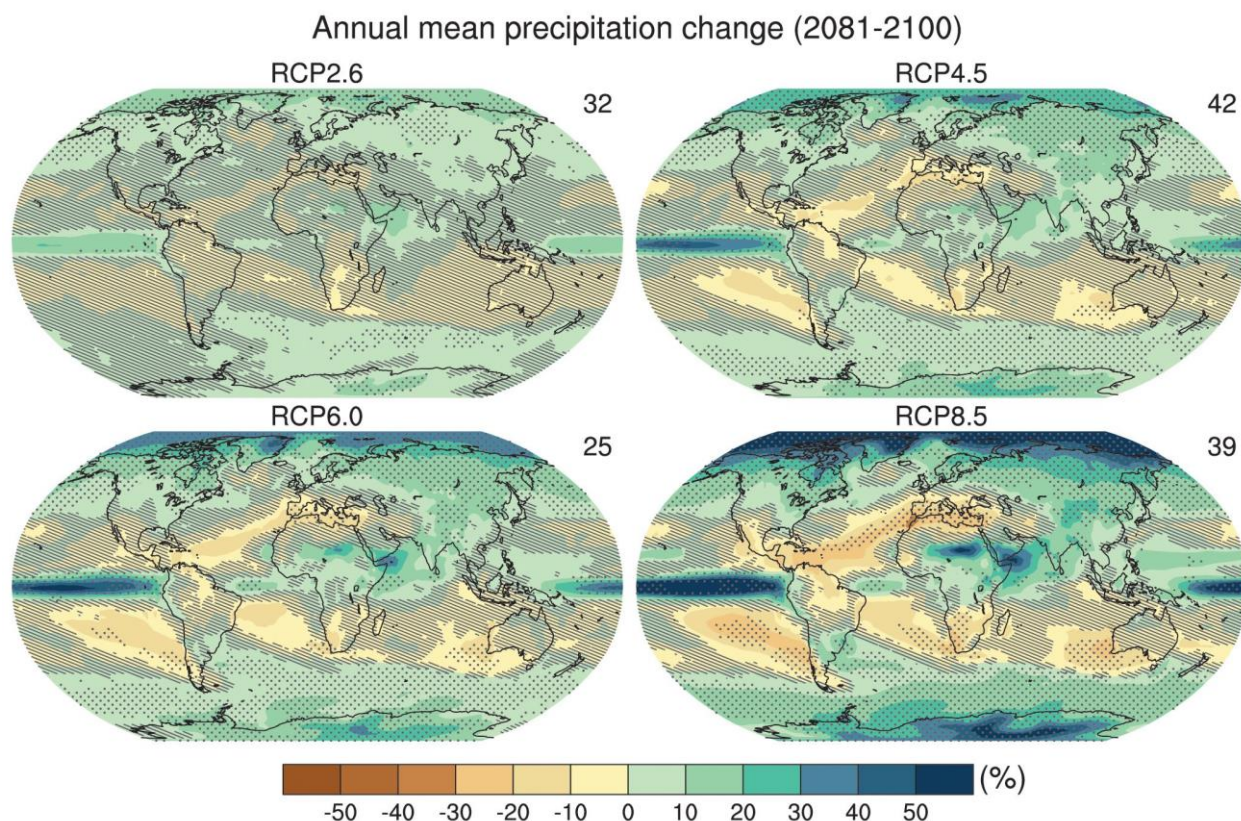
L'évolution prévue des sécheresses en métropole⁸ à partir des projections climatiques (4^e rapport du GIEC) montre une aggravation progressive au cours du XXI^e siècle. *« Pour le premier tiers du siècle (années 2020), les changements semblent peu marqués même si la probabilité de sécheresse agricole semble s'accroître, notamment pour les sécheresses longues. Au milieu du siècle (années 2050), malgré une évolution encore limitée du régime pluviométrique, des évolutions majeures commencent à concerner les sécheresses agricoles. Des sécheresses inhabituelles en termes d'expansion spatiale ou d'intensité sont simulées dans l'ensemble des projections climatiques. Les projections indiquent également que certaines régions, et notamment les zones montagneuses, du fait de probables modifications du régime nival, pourraient connaître les évolutions les plus marquées en matière d'assèchement des sols. À la fin du siècle (années 2080), des sécheresses météorologiques plus fortes apparaissent, notamment en été et les sécheresses du sol pourraient devenir extrêmes (par comparaison au climat actuel) sur la majeure partie du territoire. La durée de ces sécheresses extrêmes (plusieurs années ou décennies) relève de typologie de phénomène totalement inconnu dans le climat actuel. Il convient de noter que ce sont les régions connaissant les sols les plus humides en moyenne aujourd'hui (Nord et Nord Est notamment) qui pourraient connaître les évolutions les plus fortes par rapport au climat actuel. Ce résultat est essentiel pour l'adaptation et montre à quel point l'impact du changement climatique sur la ressource en eau concerne l'ensemble de notre pays. Ces travaux montrent également que la prise en compte des précipitations comme seule variable explicative des sécheresses s'avère tout à fait inadaptée pour décrire l'évolution des déficits hydriques, passés (voir année 2003) et bien sûr à venir. Il est particulièrement notable que*

⁶ Fustec (2015)

⁷ Prudhomme (2015)

⁸ Soubeyroux et al. 2011

l'assèchement des sols sous l'effet de la hausse de l'évaporation sera un élément essentiel de l'évolution du cycle hydrologique au cours du XXI^e siècle. »



Quatre cartes reprises du dernier rapport du Giec. Elles représentent les variations de précipitations de 1986-2005 à 2081-2100 avec des forçages radiatifs allant de 2,6 à 8,5 W/m² en 2100. Les chiffres en haut à droite des cartes indiquent le nombre de modèles indépendants utilisés pour produire les données. Les zones hachurées sont celles pour lesquelles, il y a des divergences importantes entre les modèles, notamment sur le sens d'évolution des précipitations. À l'inverse, les zones en pointillés sont celles sur lesquelles il y a une forte convergence des modèles qui indiquent notamment presque tous le même sens d'évolution des précipitations

2.2 Conséquences sur les débits des cours d'eau et sur les nappes

L'hydrologie des nappes et des cours d'eau dépend bien sûr en premier lieu des apports pluviaux et niveaux. Mais elle dépend aussi des prélèvements (agricoles, débits retenus dans les réservoirs, notamment en vue de production hydroélectrique différée), des apports (débits relâchés par les réservoirs), ainsi que des caractéristiques du ruissellement, qui sont fortement influencés par les états de surface et le couvert végétal. Les observations hydrologiques qui vont suivre sont ainsi dépendantes des options prises pour la gestion de l'eau. Les études prospectives sur les évolutions des débits reposent sur des hypothèses sur les usages en même temps que sur les scénarios hydroclimatiques.

Les débits des cours d'eau diminuent, surtout l'été

Il n'y a pas de doute sur le fait que le débit moyen annuel des cours d'eau sur le pourtour méditerranéen va baisser, même si, en raison des incertitudes sur les modèles hydrologiques⁹, des incertitudes demeurent sur la quantification exacte de cette baisse. À l'échelle saisonnière, Les

⁹ Incertitudes sur le transfert pluie-débit et sur l'évapotranspiration.

débits moyens pourraient être plus élevés en hiver, mais bien plus faibles **au printemps et en été** (-20 à -50 % en France selon les scénarios et les bassins hydrologiques¹⁰), qui sont les périodes sur lesquelles le besoin en eau agricole est le plus important. Comme la superficie enneigée et englacée en montagnes va se réduire, de nombreux cours d'eau issus de ces dernières évolueront d'un régime nival (alimentation par la fonte des neiges et de la glace au printemps et en été) à un régime pluvial (alimentation par les pluies).

Les conséquences du changement climatique auront aussi une influence sur la **fréquence des basses eaux** en Europe du Sud et Méditerranée¹¹, avec des situations d'étiages plus fréquentes, toutes saisons confondues, tendance amplifiée au sud et à l'est de la Méditerranée.

Prenons quelques exemples en zone tempérée : en 2050, le pic de débit annuel naturel (hors gestion des barrages) de la Seine à Paris, en mars-avril, pourrait être plus important de 20 à 30 %, tandis que le débit d'étiage d'été, d'août à octobre, pourrait être plus bas de 30 à 40 %¹². Dans le canton de Vaud, en Suisse, les bassins hydrographiques du Jura et des Alpes verraient d'ici 2080 leurs débits réduits de 30 à 40 % en été¹³.

Les nappes en surexploitation.

Conséquence de la diminution de la pluviométrie, de l'augmentation des prélèvements et de l'évolution de la couverture du sol, l'alimentation des nappes d'eau souterraines renouvelables se trouve déjà réduite. Des nappes se trouvent surexploitées et leur niveau baisse.

Au Maroc, la plaine du Haouz de Marrakech, s'étendant sur une superficie d'environ 6 000 km², est irriguée depuis l'antiquité par des galeries drainantes (qanâts ou khattaras). Ces galeries exploitent par écoulement gravitaire la nappe phréatique alimentée essentiellement par l'infiltration des eaux de pluie, par la percolation des eaux superficielles contenues dans plusieurs oueds drainant le versant nord de la chaîne du Haut Atlas et par le retour des eaux d'irrigation des périmètres irrigués du N' Fis et de la Tessaout amont. Elle a vu le débit de ces galeries réduit d'un facteur 6 depuis 1975. Le niveau de la nappe qui les alimente a baissé de 18 m en 24 ans¹⁴. Les nappes du bassin de Saiss (superficielle et profonde qui s'étendent sur une superficie d'environ 2 100 km²) situées au nord du Maroc connaissent un état de surexploitation inquiétant (bilan déficitaire d'environ 100 hm³/an), se traduisant par une baisse très importante des niveaux piézométriques, notamment ceux de la nappe profonde qui circule dans des calcaires et dolomies liasiques, baisse qui a atteint 70 m en 25 ans, soit une baisse moyenne de 2,8 m/an.

En Espagne, l'un des aquifères les plus atteints par la surexploitation est celui de Carche-Salinas (province d'Alicante) : son niveau a baissé de 250 m (de 60 à 310 m de profondeur) entre 1979 et 2005. Un autre exemple instructif est celui du Jucar, en Espagne, et de l'aquifère de La Mancha qui est associé à son bassin. Depuis le Moyen Âge, l'eau du Jucar était utilisée pour des irrigations dans la partie aval du bassin, en zone côtière. Le développement de l'agriculture irriguée dans le bassin supérieur (zone aride) a conduit depuis quelques décennies à multiplier à l'extrême les prélèvements sur ce fleuve ; des réglementations ont alors été mises en œuvre pour

¹⁰ G. Dayon (2015)

¹¹ Prudhomme (2015)

¹² Dorcies & al. (2015). Voir aussi l'étude Explore 2070 (de Lacaze, 2013)

¹³ Milano & al (2015).

¹⁴ idem

supprimer une partie des droits d'eau ancien (de 1 000 à 350 hm³/an, d'où il est résulté une multiplication des prélèvements non contrôlés dans l'aquifère. Depuis 1985, ces prélèvements sont devenus supérieurs aux apports.¹⁵

Un autre constat est celui de l'exploitation de ressources en eau non renouvelables, nappes profondes ou nappes fossiles. Une fois épuisées, ces ressources ne seront plus disponibles pour les générations à venir.

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) est une nappe qui lie l'Algérie, la Tunisie et la Lybie, à plusieurs centaines voire milliers de mètres de profondeur, et a permis le développement de ces pays¹⁶. Avec un volume de plus de 30 000 km³ d'eau, accumulé au cours des périodes humides qui se sont succédées depuis 1 million d'années, cette nappe constitue l'une des plus grandes réserves d'eau douce du monde. Elle présente un caractère fossile, mais est également alimentée par de nombreux apports, pour environ 1,4 km³ par an en moyenne. Les prélèvements, liés aux diverses activités économiques, sont passés de 0,5 km³ par an en 1960 à 2,75 km³ par an en 2010, excédant largement les apports, et mettant en danger la pérennité de la ressource.

La baisse du niveau piézométrique atteint 25 à 50 m selon les endroits. De nombreux puits artésiens et sources naturelles, autour desquels se sont développées les oasis, se sont d'ores et déjà taris.

2.3 Conséquences environnementales

Dégradation de la qualité des eaux et de la biodiversité

La surexploitation des nappes s'accompagne déjà dans certains pays, comme par exemple le Maroc et l'Algérie, d'une baisse de la qualité de leur eau¹⁷. Dans certaines zones, comme la côte méditerranéenne de l'Espagne, la plaine du Souss-Massa dans la région d'Agadir, les nappes côtières du Maroc (méditerranéennes et atlantiques), ou la bande de Gaza, les nappes littorales se trouvent fragilisées au regard des intrusions salines. Ces intrusions salines peuvent mettre en péril des secteurs socio-économiques clef (agriculture de la plaine du Souss) et aller jusqu'à compromettre la survie de populations particulièrement vulnérables.

Par exemple, dans la bande de Gaza, en 2014, 90 % de l'eau distribuée par les réseaux était impropre à la consommation humaine du fait de son taux de salinité et ne pouvait être utilisée que pour la toilette, l'entretien domestique et le lavage du linge. Les quatre cinquièmes des habitants en étaient réduits à acheter de l'eau douce, malheureusement le plus souvent contaminée par des polluants, à des vendeurs privés pratiquant des tarifs totalement libres, une charge très lourde pouvant représenter le tiers des ressources des familles les plus modestes.¹⁸

Par ailleurs, dans les cours d'eau, les basses eaux d'été devenant plus sévères et plus fréquentes, la qualité des habitats aquatiques sera dégradée, et le respect des débits réservés sera plus difficile.

¹⁵ Cabrera & Arregui (2010)

¹⁶ <http://www.notre-planete.info/actualites/3823-Sahara-eau>, d'après les données de

l'Observatoire du Sahara et du Sahel

¹⁷ Haouchine & al. (2015)

¹⁸ Source : UNICEF Fact Sheet on Desalination in Gaza (20 March 2014)

Exemple : l'étude prospective Garonne 2050 conclut qu'aucun des trois scénarios d'adaptation au changement climatique ne peut être exempt d'impacts environnementaux négatifs et que celui visant à maintenir, en 2050, les débits d'étiage minimaux actuels sur le bassin de la Garonne serait très coûteux, nécessiterait de prélever 500 hm³ sur les réserves hydroélectriques existantes et imposerait de construire de nouvelles retenues spécifiques d'un volume total de 360 hm³.¹⁹

Menaces sur les zones humides

La baisse du niveau des nappes, des réductions des eaux de ruissellement, pourraient mettre en danger l'alimentation de certaines zones humides, qui jouent un rôle important de réservoir de biodiversité, et qui constituent souvent des bassins naturels d'écêtement des crues.

C'est le cas des lacs naturels du Moyen Atlas et de la Merja Zarqa du Maroc, dont le niveau a beaucoup baissé ces dernières décennies en raison de la forte baisse de l'enneigement et des précipitations.

2.4 Menaces sur les usages de l'eau

Tension accrue sur l'eau au Sud de la Méditerranée

Les ressources en eau sont réparties de façon très inégale autour de la Méditerranée, que celles-ci soient rapportées à la superficie des bassins versants ou au nombre d'habitants. Ainsi, en 2014, les ressources internes annuelles renouvelables en eaux superficielles et souterraines (eaux bleues), de 3 000 m³ par habitant en France, n'étaient que de 855 m³ par habitant au Maroc et de 112 m³ par habitant en Libye. Or une alimentation équilibrée requiert pour sa production la consommation annuelle de 1 000 m³ à 2 000 m³ d'eau par habitant selon le type de régime alimentaire. Ces chiffres ne peuvent être directement comparés à ceux des ressources en eau bleue car ils incluent la consommation d'eau verte²⁰, très largement majoritaire en France mais faible en climat semi-aride et nulle en climat désertique. Quoi qu'il en soit, du fait d'un manque de ressources en eau, les pratiques agricoles d'aucun pays du sud de la Méditerranée ne permettent actuellement de couvrir la totalité de l'alimentation glucidique de base des populations. La sécurité alimentaire de ces pays est assurée par des importations massives de produits agricoles, notamment de blé, pour lesquels il est nécessaire de disposer d'une monnaie d'échange.

Le sud de la Méditerranée risque de ne pas avoir les moyens de pallier au manque d'eau pour sa sécurité alimentaire, par manque de ressources financières pour importer les aliments que l'agriculture ne pourra plus fournir. Mais la question n'est pas seulement de survenir aux besoins alimentaires, mais aussi de maintenir les emplois locaux. Dans les régions en situation de pénurie,

¹⁹ Agence de l'eau Adour-Garonne. *Garonne 2050. Rapport final.*

²⁰ L'eau verte est l'eau évapotranspirée sur les continents, essentiellement par des couverts végétaux (naturels, forestiers, agricoles), et ne participant pas aux écoulements superficiels ou souterrains. La plus grande partie de l'eau verte est adsorbée par les sols avant d'être évapotranspirée. Les eaux vertes consomment environ 60 % des précipitations en France comme à l'échelle mondiale.

des paysans abandonnent déjà leurs terres, et ce phénomène peut être cause de flux migratoires importants.

Cette situation se présente déjà, par exemple dans le Sahel tunisien : des paysans abandonnent les terres qu'ils ne peuvent plus cultiver pour se diriger vers les zones touristiques, qu'ils espèrent constituer pour eux des bassins d'emplois²¹.

L'hydroélectricité

Les objectifs européens de développement des énergies renouvelables font appel pour l'essentiel à l'énergie solaire, à l'énergie éolienne, et à l'hydroélectricité.

L'hydroélectricité, première source d'énergie électrique renouvelable dans le monde (71 % de la production renouvelable mondiale en 2015), contribue à double titre à ce développement. En premier lieu, par son énergie qui contribue en tant que telle aux objectifs de production d'énergie renouvelable. En second lieu, par son caractère flexible et la capacité de stockage d'eau et donc d'énergie dans les réservoirs des barrages, elle est un complément stratégique au développement des énergies intermittentes comme les énergies solaire et surtout éolienne²². Ce besoin pousse vers une plus grande flexibilité de la production hydroélectrique. Cette flexibilité se traduit en pratique par des éclusées (augmentations rapides du débit turbiné), dont les conséquences sur l'environnement aquatique peuvent être importantes.

Les autres aspects environnementaux liés à l'hydroélectricité²³ sont les suivants :

- la continuité sédimentaire, les retenues des barrages constituent naturellement des pièges à sédiments ; sauf à gérer ces sédiments que ce soit à la conception (piège, dérivation) ou en exploitation (curages, chasses synchrones avec les crues), les retenues peuvent voir leur volume utile se réduire progressivement, jusqu'à fonctionner au fil de l'eau ;
- la continuité piscicole, les barrages constituant des obstacles aux migrations des poissons, et le passage des poissons dans les turbines étant associé à une importante mortalité. Des ouvrages de franchissement piscicole (passe, ascenseur, toboggan...) adaptées aux espèces locales permettent aujourd'hui de rétablir les migrations. Sous certaines conditions de chute et de débit, des nouvelles turbines dites « ichtyophiles » permettent également de réduire la mortalité des poissons lors de la dévalaison (migration descendante).

Le défi de lever la contradiction entre l'objectif de développer les énergies renouvelables et le souci de préserver les milieux aquatiques est rendu plus difficile en présence d'une pénurie d'eau en période d'été.

²¹ Gafsi (2015)

²² Pour compenser l'intermittence des énergies éoliennes et solaire, les deux technologies matures qui sont utilisables à ce jour à grande échelle sont : l'hydroélectricité à partir de retenues d'eau, y compris les stations de pompage hydrauliques (STEP, dont le rendement sur un cycle avoisine 80 %), et les turbines à combustion, émettrice de gaz à effet de serre. Les batteries sont utilisables à plus petite échelle (problèmes de coût, de rendement, de recyclage). À moyen terme, la gestion active de la demande et le développement d'usages conçus pour absorber les excédents de production intermittente pourront aussi contribuer à la gestion de l'intermittence.

²³ Barillier & al., « Hydroélectricité et Environnement », 2016.

En situation de tension sur l'eau, les arbitrages entre usages risquent de réduire la production d'énergie hydraulique.

Le Maroc a déjà vu une réduction considérable de sa production hydroélectrique depuis 1970²⁴. Sur le Rhône, il y a une perspective de réduction de 10 à 20 % de la production hydroélectrique d'ici 2050 ; cette réduction devrait être concentrée entre avril et novembre²⁵. Sur la Durance, la contribution de l'hydroélectricité à la flexibilité de la production sera réduite²⁶.

Les activités de montagne

La pratique des activités de loisir en saison hivernale a déjà été impactée par la remontée en altitude de la limite pluie-neige, un faible manteau neigeux en début de saison et la fonte anticipée du manteau neigeux au printemps. Ces phénomènes ne vont aller qu'en s'amplifiant avec le réchauffement du climat, réduisant la durée de la saison hivernale et remettant en cause la viabilité des stations de basse altitude. La solution technologique de la neige artificielle et du développement de retenues d'altitude ne pourra pas être la seule réponse, pour des raisons économiques et environnementales (cf. débit réservé). Certaines stations devront réfléchir à une reconversion partielle de leur activité, non liée à la neige.

3. La boîte à outils des solutions d'adaptation utilisables

L'adaptation est une notion complexe à différents points de vue. Elle renvoie à plusieurs échelles géographiques : locale (difficultés des modélisations à des échelles petites), nationale, internationale. Elle requiert des recherches et approches interdisciplinaires : physiques, économiques, sociologiques (connaissances des savoirs et savoir-faire traditionnels). Elle concerne des échelles de temps différentes avec des impacts à moyen terme et à long terme, non linéaires. Elle renvoie aux notions de vulnérabilité et résilience souvent imprécisées selon les géographies, les territoires et les secteurs, et elle porte en elle de fortes notions de risques et d'incertitudes.

Ces éléments reflètent les difficultés à identifier, concevoir, chiffrer, et mettre en œuvre les stratégies et les programmes/projets relevant de l'adaptation proprement dite (se différenciant des programmes/projets de développement), et en particulier la caractérisation des situations de référence (*baseline*) des programmes/projets dits d'adaptation.

Pour les PED et notamment pour les PMA, le développement durable passe par l'adaptation : l'eau et l'agriculture sont des secteurs où les enjeux de l'adaptation sont très prégnants.

Les typologies différentes (essentiellement sectorielles) de classement des projets/programmes des pays et des bailleurs de fonds pour communiquer sur leurs activités en matière d'adaptation illustrent bien l'imprécision à caractériser les projets d'adaptation.

En conséquence, une approche flexible et évolutive pourrait être privilégiée : des évaluations par les pairs des projets/programmes dits d'adaptation pourraient être faites pour rectifier si besoin,

²⁴ Hasnaoui (2015)

²⁵ Graff & al. (2015)

²⁶ Sauquet & al. (2015)

pour éviter la mal-adaptation et pour construire un corpus partagé du concept. Le consensus actuel est de travailler sur des approches qualitatives de l'adaptation liées aux notions de vulnérabilité et de résilience sans trop chercher des corrélations déterministes, difficiles, voire impossible à établir avec des paramètres climatiques des changements constatés, tant les facteurs non climatiques sont prépondérants (démographie, politiques publiques ou privées sectorielles, macro ou micro économiques, catastrophes naturelles...).

Presque toutes les mesures d'adaptation techniques ont un coût : investissement, exploitation et maintenance. Leur mise en œuvre sous-entend un consentement à payer de la part des utilisateurs, ce qui ne va pas forcément de soi lorsque l'eau a été longtemps considérée comme « gratuite ». Par ailleurs, elles ont généralement des implications environnementales. Plusieurs de ces solutions font l'objet de controverses.

3.1 Augmentation et transferts de la ressource en eau

Développement de la capacité de stockage grâce aux réservoirs

L'intérêt des barrages-réservoirs au regard de l'adaptation aux tensions sur l'eau est de permettre le soutien des étiages grâce à l'eau stockée en période de hautes eaux. Les plus grands réservoirs permettent par ailleurs de lisser la variabilité interannuelle de la ressource. Le maintien de la capacité utile des réservoirs nécessite de maîtriser la sédimentation dans les lacs de barrages, comme on l'a vu plus haut (contrôle au niveau du bassin amont, chasses synchrones avec les crues).

L'Èbre, par exemple, voit son débit régularisé grâce aux barrages réservoirs existant sur son cours supérieur²⁷. Au Maroc, il y a 139 barrages importants ; ce pays envisage de nouveaux schémas de barrages équipés d'amont en aval, pour réduire les menaces de sédimentation²⁸.

Lorsque l'évolution prévisible des ressources hydrauliques le permet, le stockage est donc l'une des solutions pour l'adaptation mais, comme pour les autres techniques, elle ne peut pas être l'unique solution.

Par exemple, en 2050, pour compenser le déficit hydrologique des bassins versants français, il faudrait plusieurs milliards de m³ de stockage.

Beaucoup de réservoirs sont multi-usages : accumulation d'énergie potentielle pour l'hydroélectricité, pouvant être turbinée au moment où il y en a besoin, réservoirs des stations de pompage et turbinage hydroélectriques permettant de stocker l'énergie (STEP), réservoirs pour l'irrigation, l'eau potable, le tourisme, soutien des étiages, recharge artificielle de nappes.

Un exemple de ce dernier usage est celui du barrage Aoulouz réalisé exclusivement pour la recharge artificielle de la nappe phréatique (4 000 km² environ) de Souss-Massa située dans la région d'Agadir.

La gestion de l'eau doit tenir compte des intérêts souvent contradictoires de toutes ces parties, ce qui pose la question de la gouvernance de l'eau.

²⁷ Fabre (2015)

²⁸ Hasnaoui (2015)

L'exemple de la Durance est significatif d'un bassin soumis à de nombreuses contraintes économiques (produire de l'énergie autant que possible, tout en utilisant l'eau aussi pour l'agriculture et le tourisme), et environnementales (maintenir la capacité de pêcher, maintenir des débits écologiques et soutenir les étiages). Une communauté de gestion du bassin de la Durance a été constituée : les acteurs locaux se réunissent régulièrement, sur une longue période de temps, partageant une évaluation des rapports de force et motivées par l'obtention d'un compromis, sous la présidence d'un médiateur.

Ces usages peuvent évoluer avec le temps : des barrages réservoirs peuvent être construits pour un ou plusieurs usages donnés et se retrouver retravaillés socialement et politiquement après leur construction.

Le réservoir de Dinorwig au Royaume-Uni, par exemple, a été aménagé en vue de constituer le réservoir supérieur d'une station de transfert d'énergie (STEP), pour accompagner le développement des grandes centrales qui était alors envisagé dans ce pays. Depuis, le développement de l'énergie éolienne a profondément transformé le besoin au RU, et la STEP de Dinorwig est aujourd'hui utilisée comme fournisseur de services de flexibilité pour le réseau britannique, avec un grand nombre de cycles quotidiens.

Enfin, outre la question du partage de l'eau contenue dans les réservoirs, se pose aussi celle de la capacité effective à mener à bien des projets de nouveaux ouvrages, comme le suggèrent les controverses et les conflits suscités par exemple par les projets d'ouvrages de stockage à des fins de soutien d'étiage dans le sud-ouest de la France depuis près de 40 ans.

Transferts d'eau entre bassins

Les transferts entre bassins sont potentiellement porteurs de valeur ajoutée lorsque la zone qui reçoit l'eau est mieux adaptée aux usages (agricoles notamment) que le bassin « donneur ». Ils peuvent permettre à des zones affectées par un grave stress hydrique (la Jordanie par exemple) d'avoir accès à une ressource vitale pour la production des ressources et le maintien des emplois. Les inconvénients peuvent être d'ordre économique, environnemental, ou social, puisque le transfert se fait par définition au détriment du bassin « donneur ». Le contexte politique propre à chaque projet va profondément influencer sur sa perception et sur les poids donnés aux différents facteurs.

Un cas exemplaire est celui de la Société du canal de Provence, créée en 1957 pour alimenter en eau brute la région provençale à partir des eaux du Verdon, affluent de la Durance. Grâce à son réseau de canaux allant de Marseille à Fréjus, cette société d'économie mixte peut transférer 660 hm³/an du bassin du Rhône vers ceux des bassins côtiers de l'Huveaune, du Gapeau, de l'Argens et du Reyran. Ce transfert permet l'alimentation en eau potable de deux millions de personnes (40 % de la population de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur) et l'irrigation de 70 000 ha (la moitié de la surface irrigable de la même région). Sans cet aménagement, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur n'aurait pu connaître son important développement des cinquante dernières années.

Au Maroc, le canal de Rocade permet de transférer 300 hm³/an entre le bassin de Oum Er Rbiaa (barrage Sidi Driss sur l'oued Lakhdar) vers le bassin du Tensift (barrage Lalla Takerkoust sur l'oued N'Fis) sur une longueur d'environ 46 km. Ces eaux sont utilisées pour le

renforcement de l'alimentation en eau potable de l'agglomération de Marrakech et pour l'irrigation du périmètre du N'Fis situé au centre de la plaine du Haouz de Marrakech.

Les projets de transferts en Espagne sont aussi des exemples intéressants. L'un des plus importants transferts européens entre bassins versants a été réalisé de 1966 à 1979 entre les bassins du Tage, fleuve international débouchant dans l'Atlantique à Lisbonne, et le Segura, fleuve côtier méditerranéen arrosant Murcie et sa région à fort potentiel agricole. L'aqueduc de près de 242 km de long a une capacité de 33 m³/s et transfère une moyenne de 770 hm³/a.²⁹ Il prélève les eaux du Tage dans la Mer de Castille, ensemble de retenues d'une capacité de 2 474 hm³ servant également à l'irrigation et à l'alimentation en eau de l'agglomération de Madrid. L'aménagement a modifié fortement les écosystèmes locaux et a pénalisé les Portugais. Il n'a pourtant suscité aucune opposition majeure, probablement parce qu'en Espagne, il était fortement soutenu par le général Franco et que la dictature salazariste finissante du Portugal avait d'autres urgences à gérer que la préservation de droits nationaux sur les eaux du Tage. En 2001, le parlement espagnol a voté un plan hydrologique national (PHN) prévoyant, outre la construction de nombreux barrages, le transfert d'eau de l'Èbre, fleuve puissant du nord du pays, jusqu'à l'Andalousie. Ce nouveau projet de transfert a suscité des réactions très vives dans une opinion publique pouvant maintenant s'exprimer librement et une forte opposition entre le gouvernement central de Madrid et les Autonomies d'Aragon et de Catalogne. La multiplication de manifestations massives dans les grandes villes du pays a conduit le parlement espagnol à réviser en 2004 le PHN, remplaçant le transfert d'eau de l'Èbre vers le Sud par un ambitieux programme de dessalement d'eau de mer. Le changement du contexte politique, l'évolution des mentalités et l'émergence des nouvelles possibilités techniques ont donc conduit à abandonner l'aménagement.

Un exemple atypique de transfert : le projet mer Rouge – mer Morte.

À 429 mètres au-dessous du niveau des mers, la Mer Morte alimentée par le Jourdain est la plus basse du monde. Les prélèvements³⁰ se traduisent par une baisse constante du niveau de – 750 mm/a entre 1979 et 1991, puis de – 850 mm/a entre 1992 et 2009. Ce qui constitue une menace pour les activités économiques. Son taux de salinité, 247 grammes par litre contre seulement 39 à 41 pour la Méditerranée en fait une attraction pour la balnéothérapie et surtout pour l'industrie agroalimentaire, cosmétique et de la potasse, qui en extrait chaque année 600 000 tonnes de sel. L'idée d'un canal reliant la Mer Rouge à la Mer Morte est ancienne (plus de 50 ans). Depuis plus de 10 ans Israël et la Jordanie ont décidé de coopérer sur ce projet dont l'enjeu économique est primordial pour la région.

Repris en 2005 le projet vise à

- alimenter la Mer Morte à partir de transfert depuis la Mer Rouge par une canalisation de 180 km,*
- utiliser le dénivelé de 425 m pour produire de l'électricité,*

²⁹ Gobierno de España, Le système espagnol de gouvernance de l'eau

³⁰ Outre les prélèvements dans la Mer Morte elle-même, il convient de mentionner les prélèvements dans le Jourdain en amont du lac de Tibériade qui fait que peu d'eau est disponible dans ce fleuve lorsqu'il quitte le lac de Tibériade.

Source : [note de présentation RDS – AFD 2016](#)

- *dessaler l'eau de mer comme une nouvelle source d'eau potable pour la région : la Jordanie a besoin de cette ressource vitale pour sa population, qui augmente brutalement depuis quatre ans sous l'afflux d'un million et demi de réfugié en provenance de Syrie,*
- *promouvoir la coopération régionale.*

Il permettra ainsi la poursuite des activités industrielles ainsi que la production d'eau potable par dessalement utilisant l'énergie de la chute d'eau. Il bénéficiera aux parties concernées : Jordanie, Israël et Territoires palestiniens/ Cisjordanie. L'étude de faisabilité a été confiée à la Banque mondiale en 2005 qui a mobilisé les bailleurs de fonds pour financer les études qui ont été réalisées entre 2009 et 2013.

Vis-à-vis des risques et des impacts les dispositions suivantes ont été envisagées.

La profondeur de la prise d'eau est prévue à 150 m pour éviter les impacts sur les larves coralligènes en Mer Rouge, sa localisation est prévue en Est du golfe pour éviter le risques sismique et d'inondation (crues éclairs) et l'oléoduc à l'Ouest.

Le transfert est prévu en 3 lignes pour plus de flexibilité et réduire le risque opérationnel ; il est prévu un système de drainage pour éviter la contamination des aquifères en cas de fuite d'eau de mer.

Les rejets en Mer Morte seront limités à moins de 400 millions de m³ pour éviter les risques de bloom d'algues et de cristaux de gypse et des négociations avec les industriels de la potasse seront à engager pour limiter leurs émissions.

Cependant des ONG ont pointé les incertitudes sur l'impact du déversement brutal d'une telle quantité d'eau de mer dans la Mer Morte, qui pourrait entraîner le développement d'algues rouges et de cristaux de gypse. Selon ces ONG sauver la Mer Morte permettra à Israël d'éviter une renégociation des accords de partage des eaux du Jourdain, qui sont très favorables à son agriculture car le canal devrait permettre aux agriculteurs locaux de continuer à puiser dans le fleuve.

Malgré ces réserves, les parties ont convenu d'engager une première phase avec la construction d'un pipeline de 180 km pour relier la Mer Rouge à la Mer Morte, ainsi qu'une usine de dessalement pour apporter de l'eau douce à toute la région. Cette usine devra pouvoir traiter à terme 85 millions de m³ par an, ce qui en fera la plus importante au monde, et 300 millions de m³ d'eau seront déversés dans le pipeline à partir du captage en Mer Rouge.

Cette première phase est estimée à un milliard de dollars, tandis que la totalité du projet se monterait à terme à 10 milliards de dollars.

Dessalement de l'eau de mer

La technologie qui progresse actuellement est celle de l'osmose inverse, avec à ce jour environ 50 % du marché. À l'échelle mondiale, les développements techniques liés au dessalement ont permis de réduire significativement ses coûts énergétiques : le coût marginal de l'eau dessalée se situe aujourd'hui entre 0,40 \$/m³ et 0,80 \$/m³ et la consommation d'énergie est passée de plus de 8 kWh/m³ à moins de 4 entre 1990 et 2006 pour l'osmose inverse. Cette pratique s'est largement étendue : elle ne se limite plus aux pays pétroliers du Golfe (en particulier l'Arabie Saoudite et les Émirats Arabes Unis) et aux îles touristiques telles que Malte ou les Canaries, mais concerne aujourd'hui de nombreux territoires en Méditerranée, en Australie, aux USA, en Amérique Latine et en Asie.

Le dessalement est consommateur d'électricité. Le coût de l'eau douce produite dépend donc du prix de l'électricité. Une question essentielle est évidemment l'origine de l'électricité utilisée comme source d'énergie : émettrice de gaz à effet de serre ou pas, renouvelable ou pas ? Si l'énergie provient de la combustion de combustibles fossiles, le processus de dessalement est

directement générateur de gaz à effet de serre. Cette énergie peut être apportée par de l'énergie solaire ou éolienne, par des sources conventionnelles, ou éventuellement des petits réacteurs nucléaires dérivés des réacteurs utilisés pour la propulsion nautique et fonctionnant en régime continu ("option" proposée par une compagnie chinoise). Pour ce qui est de l'énergie éolienne ou de l'énergie solaire, énergies intermittentes, la question se pose de savoir si le fonctionnement des unités la nuit ou en l'absence de vent sera interrompue, rendant plus difficile l'amortissement de l'investissement.

La question de l'impact environnemental des rejets de saumure doit par ailleurs être étudiée au cas par cas, tenant compte de ce que la saumure rejetée en mer a tendance à stratifier à proximité du fond, mettant en péril des espèces importantes pour la biodiversité, et notamment les posidonies.

L'Algérie a commencé de déployer à grande échelle des centrales de dessalement après la crise hydrique de 2001 ; elle est maintenant dotée d'une trentaine de stations de dessalement, totalisant une capacité de plus de 2 millions de m³/j ; 12 de ces stations ont une capacité comprise entre 100 000 et 500 000 m³/j³¹.

Au Maroc cette option est à l'étude pour alimenter les plaines côtières, mais elle n'est pas encore intéressante d'un point de vue technico-économique sauf quelques cas particuliers : la capacité de production d'eau dessalée au Maroc a atteint environ 30 000 m³/j servant à l'alimentation en eau potable des villes de Laâyoune, de Boujdour et d'Akhfennir (sud du Maroc). De même, de nouvelles stations de dessalement sont programmées pour l'alimentation en eau potable des villes d'Agadir (100 000 m³/j), de Sidi Ifni et de Tantan (10 000 m³/j)³². La station prévue à Agadir, utilisera de l'énergie solaire, et fera l'objet d'un partenariat public-privé, garantissant sa pérennité économique³³.

En Espagne, le dessalement a commencé à se développer pour alimenter les îles Canaries disposant de ressources en eau douce très limitées et aléatoires. La première usine, construite en 1964 sur l'île de Lanzarote, produisait 2 500 m³/j. En 2012 et malgré un fort développement du tourisme, 338 usines couvraient la totalité des besoins de l'archipel en produisant 588 000 m³/j d'eau douce à partir de l'eau de l'océan.³⁴ Le Sud de la côte méditerranéenne espagnole (Andalousie, Murcie et Malaga) est partiellement alimenté par de l'eau de mer dessalée. Six usines y produisaient 310 hm³/an avant 2014, production devant être accrue de 100 hm³/a par la mise en service prochaine de six autres usines, dans le cadre du programme AGUA. La plus grande partie de cette eau dessalée sert à l'alimentation de réseaux d'eau potable, une partie plus faible contribuant à l'irrigation de cultures à haute valeur ajoutée et à pallier les réductions du transfert depuis la Mer de Castille les années de faible hydraulité (voir supra)³⁵ Il peut être intéressant de remarquer que certaines stations, dans les provinces d'Alicante, d'Almeria et de Murcie, semblent utilisées majoritairement pour l'agriculture : ce seraient ainsi plus de 200 hm³/an d'eau dessalée qui seraient affectées à l'agriculture sur la côte méditerranéenne de l'Espagne³⁶.

³¹ Haouchine (2015) et communication personnelle

³² D'après la 3ème communication nationale du Maroc (2016)

³³ Hasnaoui (2015)

³⁴ Gobierno de España, Le système espagnol de gouvernance de l'eau, 2014

³⁵ AcuaMed, 2014 & Gobierno de España, La desalación en España, 2014.

³⁶ Garcia-Rubio & Guardiola (2012)

3.2 Réduction de la demande et optimisation de la ressource en eau

Réduction des pertes

Les mesures de lutte contre le gaspillage de l'eau sont multiples : fuites des réseaux, surconsommations agricoles, urbaines et des procédés industriels. Parmi les causes de pertes de l'eau agricole, il y a les fuites des réseaux, l'évaporation, l'infiltration dans le sol.

Traitement et recyclage des eaux usées

Cette solution a été retenue dans de nombreuses villes et est partie prenante de presque tous les plans d'adaptation. Dans plusieurs villes, le recyclage des eaux usées est maintenant mis en place.

Windhoek, capitale de la Namibie, parvient à satisfaire le quart des besoins de la ville grâce à la réutilisation de l'eau. Alors que la demande en eau (liée à la croissance de la population) est passée de 6 à 27 hm³ entre 1967 et 2012, elle a mis en place, dès 1970, deux boucles de réutilisation des eaux usées. L'une dédiée à l'arrosage des espaces verts à partir d'eaux usées traitées, et la seconde à l'alimentation en eau potable à partir d'eaux usées (et eaux de surface) traitées. Le surplus des années humides est alors injecté dans l'aquifère situé sous une partie de la ville, ce qui permet d'assurer une réserve pour les années sèches³⁷.

Adaptation de l'agriculture

La réduction des débits d'étiage et du niveau des nappes va renforcer l'intérêt de développer des pratiques agricoles plus économes en eau, qui permettent en même temps de maintenir l'emploi local. De nombreuses voies ont été ouvertes en ce sens, allant de l'agriculture de conservation à l'agro-écologie en passant par l'agriculture de précision et bien d'autres. Toutes intègrent une gestion raisonnée de l'eau, et font tomber les frontières entre agriculture irriguée et agriculture pluviale.

Une technique pour accroître le volume d'eau disponible pour les cultures sans avoir recours à l'irrigation consiste à modifier la structure du sol pour augmenter son indice de vide ou sa microporosité, le premier en favorisant une forte colonisation par des vers de terre et le second par des micro-organismes (champignons, bactéries, etc.). La plantation d'arbres sur des parcelles de cultures annuelles (agroforesterie) permet également de favoriser le stockage d'eau dans le sol et de diminuer les prélèvements dans les couches du sol explorées par les racines des cultures annuelles par mobilisation de l'eau des couches profondes par les racines des arbres.

Compte tenu de la grande variabilité de la ressource d'une année sur l'autre, une meilleure valorisation des ressources en eau pourrait se faire au travers d'une adaptation des choix des spéculations agricoles annuelles à la pluviométrie observée pendant les mois précédents les semis. Cela se pratique déjà à la marge, notamment pour la sélection de la précocité des variétés mais aussi pour des changements de spéculations (maïs - blé dur dans la vallée de la Garonne par exemple). Cependant, le développement de telles pratiques vertueuses se heurte à la rigidité et à la très faible élasticité des marchés des productions agricoles. Une adaptation flexible des

³⁷ Lafforgue (2015)

productions à grande échelle ne peut donc se concevoir sans une modification profonde des filières de valorisation, ce qui nécessitera très probablement des politiques volontaristes à base de subventions, de contraintes, de prix garantis et de constitution d'importants stocks.

Optimisation de la gestion des barrages

Les barrages réservoirs existant vont être pris entre de multiples contraintes : soutenir les étiages pour maintenir certains usages en aval, et maintenir la qualité de l'habitat aquatique, produire de l'électricité, écrêter les crues... L'arbitrage optimal entre ces contraintes demandera des systèmes d'exploitation intelligents, qui devront être alimentés par des réseaux plus denses de mesures hydrologiques, ainsi que par des modèles de prévision à court terme.

L'Ain, par exemple, est une rivière équipée en son cours amont du barrage-réservoir de Vouglans. Outre la production hydroélectrique, son eau est utilisée pour des usages agricoles dans la basse vallée et pour des activités récréatives, et son cours supérieur comme sa basse vallée hébergent des habitats piscicoles importants et variés. En juillet 2015, une crise a pu être prévue et anticipée grâce à un système de prévisions et de modélisation avancés, en effectuant une « écluse écologique » à partir du barrage amont³⁸.

3.3 La gouvernance et les outils économiques

La gouvernance de l'eau peut être définie comme la mise en œuvre d'un ensemble de dispositifs ou d'outils (règles, normes, standards protocoles, conventions, contrats...) pour assurer une meilleure coordination des acteurs du secteur, chacun détenant une parcelle de pouvoir, afin de prendre des décisions consensuelles et de lancer des actions concertées.

Les outils de gouvernance de l'eau sont multiples : la tarification, les subventions publiques, les lois et règlements, les normes officielles, les standards industriels, les moyens et organismes de concertation y compris de transparence des informations mis en place au niveau d'un bassin donné.

Dès lors que l'eau est considérée comme un bien commun, la définition des orientations de sa gouvernance impose de sortir du strict domaine de l'eau et d'immerger des questions proprement hydrauliques dans une vision politique plus globale avec des exigences de régulation incluant la production et la sécurité alimentaires, la production énergétique et la préservation des milieux.

L'ampleur des évolutions globales autour de la Méditerranée imposera des modifications majeures dans les modes de gestion de l'eau, pouvant se traduire par des changements institutionnels importants, ainsi que par des bouleversements des relations entre les différents porteurs d'enjeux. Cela concerne les arbitrages entre usages au niveau local ou des territoires, mais aussi au niveau de plusieurs pays. Les nappes souterraines transfrontalières ou des grands bassins transfrontaliers sont de bons exemples. Et les organismes de gestion collectifs internationaux peuvent être des réponses adaptées.

³⁸ Poirel (2015)

Pour que des modifications puissent être acceptées et donner leur plein effet, il faut qu'elles soient porteuses d'un sens bien perçu et largement accepté par toutes les parties concernées. Si ce sens est nouveau (gestion de la demande, adaptation de l'agriculture, procédures d'exception en période de crise, etc.), cette acceptation requerra un processus de compréhension et d'appropriation nécessitant du temps. Ce processus nécessitera :

- (i) des connaissances et des données les plus fiables et transparentes possibles (*open data*) sur les systèmes hydrologiques et hydrauliques,
- (ii) une éducation à la compréhension des problèmes et des contraintes,
- (iii) un développement des capacités des acteurs engagés dans la gestion ou l'utilisation de la ressource pour imaginer d'autres modes de vivre ensemble en partageant un bien commun,
- (iv) une communication appropriée avec une bonne perception de toutes les facettes des problèmes.

Compte tenu de la diversité des situations physiques, économiques, sociales, culturelles et géopolitiques, ceci suppose d'aborder les situations cas par cas.

L'ampleur du processus de mise en place de gouvernances susceptibles d'éviter durablement des conflits majeurs liés à l'eau dans le bassin méditerranéen impose d'anticiper les crises en gestation en dépit des difficultés qu'il y a à le faire, et qui ont été évoquées plus haut. On rejoint ici le concept d'hydro-diplomatie pour mettre en œuvre ces gestions concertées. L'expérience de nombreux bassins montre que, même en situation de conflits dépassant largement les problèmes de l'eau en quantité et en qualité et de son usage, les acteurs du secteur de l'eau se parlent plus facilement que ceux des autres secteurs.

Enfin, il ne faut pas négliger que la gouvernance de l'eau et les instruments économiques qui en découlent requièrent un minimum de quantification des situations de références et des besoins futurs selon différents scénarios de chaque territoire, pays, région. Force est de constater que les données de base et les systèmes d'information sont insuffisants, voire défectueux dans nombre de pays de la rive sud de la Méditerranée.

La situation en Afrique est particulièrement critique. Selon l'étude basée sur les données du SIREM (Système d'informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation) on observe une chute brutale des données hydrométriques collectées (nombre de débits journaliers et/ou mensuels par année) pour l'Afrique. La disponibilité actuelle est redevenue équivalente à celle des années 1950, très inférieure à celle bien meilleure de la fin des années 1970³⁹. « Cette baisse de la quantité de données disponibles s'accompagne aussi d'une forte diminution de leur qualité, ce qui complique leur exploitation ».

En situation de rareté, la quantification des impacts des pollutions des rivières et des nappes est indissociable des politiques de développement retenues et revêt un caractère particulier. Une bonne gouvernance devrait permettre d'améliorer, non seulement les méthodes et outils de mesure pour disposer de données fiables, mais aussi les concepts et principes (dont celui de pollueur-payeur ou de précaution) associés à cette démarche et les normes à établir. Beaucoup d'études et des travaux ont déjà été réalisées au niveau général ou global, mais les applications régionales, locales sont encore limitées et mitigées. Poursuivre cette quantification implique

³⁹ cf. Etude « Mieux connaître pour mieux gérer – Eau, climat et développement - » produite par PFE 2016/ Programmes WHYCOS et HYCOS sous la direction de l'IRD/HSM, N°1 Collection Expertise

l'approfondissement et la transparence de recherches et actions spécifiques croisant les apports entre sciences physiques, économiques et sociales, dans le domaine de l'eau.

4. Un avenir incertain, des décisions à prendre

Des menaces sont à ce jour patentes. Des incertitudes importantes pèsent sur leur quantification, notamment en raison des interactions complexes qui existent entre les conséquences climatiques, et les actions anthropiques : déplacements de population, modèles de développement, actions anthropiques sur les prélèvements et la gestion des sols.

Le pire serait sans doute, de l'opinion des auteurs, de saisir le prétexte des incertitudes pour ne pas prendre de décisions. Des outils d'adaptation, évoqués plus haut, existent. Cas par cas, les avantages et inconvénients de leur utilisation devraient être analysés, et, selon le cas, des mesures de compensation prises. Des politiques devraient être mises en place, que ce soient en termes agricoles, énergétiques, que d'aide aux pays du Sud, principales victimes du changement climatique.

4.1 Des décisions à prendre

Quelles politiques agricoles ?

Quels modèles de développement agricole ? Quel ratio entre production pour la consommation locale, l'exportation, l'importation ?

Quelle place de l'hydroélectricité dans les politiques énergétiques ?

Pour fournir la flexibilité de production dont ont besoin les systèmes électriques, faut-il privilégier l'hydroélectricité par éclusées ou par stations de pompes, développer les turbines à combustible fossile, et/ou développer le pilotage de la demande ?

Comment arbitrer entre la production hydroélectrique, en base ou flexible, et ses conséquences environnementales (effets des éclusées sur la biodiversité, gestion des sédiments). Faut-il rechercher aux controverses touchant à l'hydroélectricité et à l'environnement des solutions négociées, comme le « protocole pour rendre l'hydroélectricité durable » négocié il y a quelques années par l'International Hydropower Association avec des ONG ?

Quels outils mettre en place pour lutter contre les déficits en eau, notamment en période estivale ?

Faut-il développer les réservoirs ? Faut-il continuer à développer le dessalement ? Le recyclage de l'eau urbaine ?

Dans une perspective de baisse du coût de l'eau dessalée, comment arbitrer entre l'utilisation de l'eau dessalée et les prélèvements dans les eaux de surface ou les eaux souterraines, notamment pour les usages agricoles ? Le dessalement est-il, pour les zones côtières, une solution à encourager pour limiter l'épuisement des aquifères ?

4.2 Le développement et le maintien de l'emploi dans les pays du Sud

La question de la sécurité alimentaire des pays du sud peut être réglée par des aides à l'importation de produits agricoles, au détriment du maintien de l'agriculture dans les pays du Sud - et donc au détriment des **emplois agricoles**. Or, 100 millions de personnes, approximativement, vivent de l'agriculture au Proche Orient et en Afrique du nord⁴⁰, régions de forte démographie par ailleurs.

Le manque d'eau pourrait par ailleurs entraîner une plus grande difficulté, voire une **impossibilité, de développer des activités économiques dans des régions** actuellement **peu développées** et qui souhaiteraient se doter d'activités industrielles, notamment en Afrique du nord.

Les choix sur les ressources en eau auront donc des conséquences en termes d'emplois, industriels et agricoles. Les choix les plus aigus étant sans doute relatifs au maintien des paysans des pays du Sud sur leurs terres, dans le contexte que l'on sait de diminution de la ressource.

Se pose aussi bien sûr la question des modèles de développement : les pays du Sud devront-ils innover pour ne pas suivre les modèles économiques développés dans le Nord, surconsommateurs en eau et en énergie? Les innovations devront-elles venir exclusivement des pays du Nord, là encore au détriment des emplois dans les pays du Sud ? Il convient sans doute de penser aussi à la maintenance des systèmes innovants, et de veiller à la capacité d'assurer localement les activités de maintenance, là encore pour préserver les emplois et assurer la durabilité des solutions.

5. Conclusions

Les solutions techniques qui peuvent être déployées, comme par exemple le dessalement et les barrages réservoirs, sont l'objet de controverses et souvent de conflits. Avec ces controverses et ces conflits, ce qui se joue, entre autres, c'est la possibilité de rediscuter d'opinions dominantes, de pratiques et de choix politiques qui cadrent le bienfondé d'une solution technique donnée. D'autres choix ou pratiques peuvent être envisagés. Quelle agriculture voulons-nous ? Pourquoi ? Pour quelle demande alimentaire et à quelle échelle ? Quelle production d'énergie, pourquoi et comment ? Pour quelle demande en énergie ? Quelles solutions de stockage, de gestion ou de production d'eau développer? Quel débit voulons-nous dans les rivières ? Pourquoi ? Est-ce que le débit est la seule variable qui compte pour qualifier et gérer les rivières ?

Le futur est incertain pas seulement parce que nous ne savons pas comment la société se comportera en fonction d'un facteur donné mais surtout parce que la signification de ce facteur dans le futur pour la société est aussi incertaine. Notre compréhension de l'environnement est façonnée par des modèles et des indicateurs. Pour prendre du recul par rapport à la situation présente, il semble important d'analyser comment des représentations dominantes ont été

⁴⁰ Selon le découpage des Nations unies, le Moyen-Orient comprend tous les pays arabes et l'Iran
Source : FAO Statistical Yearbook 2014. Near East and North Africa Food and Agriculture.

produites et promues dans des situations situées spatialement et historiquement. C'est ce qui peut ouvrir la pensée à des visions du futur ainsi qu'à des stratégies d'adaptation qui soient plurielles.

Les déclenchements de crise sont souvent multifactoriels et résultent généralement d'une combinaison de facteurs physiques, démographiques, économiques et sociaux. La combinaison entre ces diverses composantes est complexe et ses possibles trajectoires d'évolution difficiles à prédire précisément. De plus, le seuil de tolérance des tensions est difficile à estimer parce qu'éminemment variable au sein d'une même société. Il est donc difficile d'anticiper l'imminence d'une rupture majeure et d'événements violents.

Les moyens d'éviter des crises majeures peuvent impliquer des changements radicaux ou la mobilisation de moyens importants, il est donc très tentant d'en imaginer l'échéance lointaine et de surseoir à la mise en place de solutions pourtant considérées comme inéluctables. Il est donc fréquent que ce soit l'occurrence d'une situation intenable qui pousse à agir rapidement avec des solutions de court terme alors que des décisions prises dans un contexte moins conflictuel auraient pu être mieux réfléchies et avoir une meilleure efficacité à long terme.

Dans ces conditions les réflexions et contributions des sciences physiques, biologiques, humaines et sociales, y compris la reconnaissance de leurs limites et incertitudes, prennent toute leur signification.

C'est le but de nos associations de contribuer à la construction de problématiques et de débats sereins relatifs à l'eau au sens large avec une vision prospective. C'est aussi leur vocation de s'efforcer d'assurer leur compréhension par la société civile et les élus, en France dans le contexte de la transition écologique et dans les autres pays du bassin méditerranéen, dans un langage le plus rigoureux et clair possible.

Ce n'est donc pas parce que l'avenir est incertain pour ce qui est de l'amplitude des tensions à venir sur l'eau, qu'il ne faut pas prendre de décisions. Le capitaine du Titanic en a fait l'amère expérience, entraînant dans le naufrage toute une population avec lui.

Références

Précédentes synthèses sur les Tensions sur l'Eau :

Sara Fernandez, Marc-Antoine Martin, Billy Troy, Jean Verdier, Pierre-Louis Viollet,
Prospective et tensions sur l'eau. Des crises de l'eau en 2050 ? Note de synthèse, Janvier 2014,
Publié par SHF, AFEID et Académie de l'Eau, Janvier 2014

http://www.shf-hydro.org/124-synthese_prospectives_et_tensions_sur_l_eau-7.html

<http://www.academie-eau.org/fr/conferences-6.html>

Verdier J., Viollet P.L. , « Les tensions sur l'eau en Europe et dans le bassin méditerranéen. Des crises de l'eau d'ici 2050 ». *La Houille Blanche*, n°6, 2015, p. 102-107

Documents de référence de trois exercices de prospective réalisées sur le périmètre France

- Aqua 2030

Nathalie Etahiri, *Eau, milieux aquatiques et territoires durables 2030*. Études & documents, n° 91, Août 2013, Commissariat Général au Développement Durable.

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ED91.pdf>

- Explore 2070

Xavier de Lacaze, *Synthèse du projet Explore 2070, Intégration, Analyse systémique et stratégies d'adaptation*. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2013.

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Evaluation-des-strategies-d.html>

- Garonne 2050

- Françoise Carpy-Goular, *La Garonne du futur, les futurs de la Garonne*. Présentation au séminaire Prospectives et Tensions sur l'eau, 30 mai 2013.

Agence de l'eau Adour-Garonne.

- Agence de l'eau Adour-Garonne *Garonne 2050. Étude prospective sur les besoins et les ressources en eau à l'échelle du bassin de la Garonne. Rapport final*. Septembre 2014.

Quelques communications au colloque « Tensions sur l'Eau en Europe et dans le bassin Méditerranéen, Oct 2015 », organisé par SHF, AFEID, Académie de l'Eau, UISF, publié par SHF, 25 rue des Favorites, 75015 Paris.

Bernard Barraque, *EAU&3^E, European Urban Water Crisis: The management dimension*.

F. Cabezas, E. Cabrera, I. Morell, *The water maze of southeast Spain*

D. Dorchies, G. Thirel, C. Perrin, J.-C. Bader, R. Thépot, Jean-Louis Rizzoli, C. Jost, S.

Demerliac *Climate change impact on water resources and reservoir management in the Seine River basin (France)*

J. Fabre, D. Ruelland, A. Dezetter, B. Grouillet, *Reducing the gap between water demand and availability under climate and water use changes: assessing the effectiveness and robustness of adaptation*.

Klervi Fustec, *From domestic water to agricultural water: how do donors contribute to the water crises in the occupied Palestinian territories?*

Fadia Gafsi, *Analyse rétrospective de la tension sur l'eau dans le Sahel Tunisien*.

Benjamin Graff, Christophe Moretton, Sabrina Celié, *Impact du changement climatique sur la production hydroélectrique du Rhône*

Abdelhamid Haouchine, Fatima Zohra. Bouchareb-Haouchine, Brahiachid Chibane & R. Nedjai, *Assessment of risks related to coastal aquifers management in Algeria*

Moulay Driss Hasnaoui, *Quelle Stratégie de Développement Durable des Ressources en Eau*

pour le Maroc au-delà de 2030?

Africa de la Herera, Juan Maria Fornes, Emilio Custodio, Manuel Ramon Llomas, Andrès Sahuguilla, *Water crisis in Spain since 1950: past and present, challenges and opportunities*

Michel Lafforgue, *Supplying water to a water stressed city: lessons from Windhoek*

Ludovic Lhuissier, Véronique Lamblin, Eric Sauquet, Yannick Arama, Françoise Goulard, Pierre Strosser, *Garonne 2050, A prospective Study*

M. Milano, E. Reynard, N. Köplin, R. Weingartner, *In light of seasonal climatic and anthropogenic changes, is the Vaud canton (Switzerland) vulnerable to water stress by the medium-term?*

Alain Poirel, David Cheminet, Bruno Landru, Vincent Wawrzyniak, Marie Noëlle FAYE.... *The passage of summer crises in the Ain River (France) : contributions of forecasting and lessons learned from the period 1994-2014*

Christel Prudhomme, *Impact of climate change on river flow s: global and European assessment for the 2080s time horizon*

Thierry Ruf, *Tensions climatiques, tensions politiques dans l'histoire contemporaine de l'eau au Nord et au Sud de la Méditerranée : une approche en termes de cycles institutionnels*

Mohamed Sinan, Abdelaziz Belhouji, *Impact of Climate Change On Water Resources in Morocco in the years 2020, 2050 and 2080 And Adaptation Measures*

Eric Sauquet & al, *Water allocation and uses in the Durance River basin in the 2050s - Towards new management rules for the main reservoirs?*

WMO and UNEP Intergovernmental Panel on Climate Change - Fifth Assessment Report (AR5)
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/>

Autres sources:

AcuaMed, « Construimos el futuro del agua en la cuenca mediterránea », Folleto corporativo, 2014

Cabrera E., Arrugui F., “Engineering and water management over time”, dans *Water Engineering and Management through Time*, CRC Press, 2010

Dayon, G. , « Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies », thèse, Université de Toulouse, Novembre 2015

Garcia-Rubio A., Guardiola J., « Dessalination in Spain: a growing alternative for water supply », *Int. J. of Water Resources Development*, 28:1, 171-186, Jan 2012

Ginocchio R., Viollet P.L., *L'Energie Hydraulique*, Eyrolles, 2012

Gobierno de España, « Le système espagnol de gouvernance de l'eau », *Imprenta Nacional*, 2014

Gobierno de España, « La desalación en España / Desalination in Spain », *Imprenta Nacional*, Juillet 2014

Jimenez M. S. “Water and Agriculture. Current situation and future trends”, dans *Water Engineering and Management through Time*, CRC Press, 2010

Lemperriere F., « Stockage d'énergie par pompage d'eau de mer », *Les Techniques de l'Ingénieur*, 2013

Ouaatou H., Telouati Kh., *Impact de la turbidité des eaux du canal de la Rcade sur le projet de reconversion du système d'irrigation dans le périmètre du N'Fis (région de Marrakech-Tensift-Al Haouz, Maroc)*. Mémoire Licence es Sciences et Technique Eau et environnement Univ. Caddi Ayyad. Marrakech. 2011

Sinan M. *Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par intégration des SIG, de la Géophysique et de la Géostatistique. Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc)*. Doctorat d'Etat en Hydrogéologie. Ecole Mohammadia d'Ingénieurs. Rabat. Maroc. 2000. DOI: 10.13140/RG.2.1.3954.1843.

- Sistenich H.P., Thoni H.R., “Pumped storage plants – Status and perspectives”. VGB Powertech Report, 4/2011
- Soubeyroux J.M., Vidal J.-P. Najac J., Kitova N., Blanchard M., Dandin P, Martin E., Pagé C., Habets F., « Projet ClimSec : impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du solé, Rapport Météo-France, DCLIM, mai 2011, 72p.
- Ursat X., Jacquet-Francillon H., Rafai I., “Expérience d'EDF dans l'exploitation des STEP françaises”, *La Houille Blanche*, n°3, 2012, p. 32-36
- Viollet P. L., *L'Hydraulique dans les civilisations anciennes*, Presses de l'Ecole des Ponts et Chaussées, 2000
- Viollet P.L., “Stockage d'énergie par pompage hydraulique”, *Les Techniques de l'Ingénieur*, 2014
- Viollet P.L., *Histoire de l'Energie Hydraulique*, Presses de l'Ecole des Ponts et Chaussées, 2005
- Renaudin, V. (IUT Nancy Brabois, *Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres*, nov. 2003).
- Brin, A., « Océan et Energie, Editions TECHNIP, 1979).
- Barillier A., Caignaert G., Gouraud V., Ramos M.H., Roult D., Viollet P.L., « Hydroélectricité et environnement », synthèse de la conférence internationale organisée par la SHF les 16 et 17 mars 2016 à Grenoble, <http://www.shf-hydro.org/documentation-8.html>

Sites internet consultés (février-mars 2027)

- Donées issues de l'observatoire du Sahara et du Sahel : www.notre-planete.info/actualites/3823-Sahara-eau
- Agence du Bassin Hydraulique du Sebou (Maroc) : www.abhsebou.ma
- Agence du Bassin Hydraulique du Souss-Massa (Maroc) : www.abhsm.ma
- Ministère Délégué Chargé de l'Eau (Maroc) : www.water.gov.ma