



What Science
Can Tell Us

L'Eau pour les Forêts et les Hommes en Région Méditerranéenne :

un équilibre à trouver

Yves Birot, Carlos Gracia et Marc Palahí (éditeurs)



What Science Can Tell Us

Marc Palahí, Editor-In-Chief
Minna Korhonen, Managing Editor
The editorial office can be contacted at publications@efi.int

Traduction: Catherine Amette
Layout: Kopijyvä Oy / Janne Kuivalainen
Printing: Kopijyvä Oy

Disclaimer: This volume has been developed with the support of the SylvaMED Project “Mediterranean forests for all”, with the financial contribution of the European Union through its European Regional Development Fund and the Programme MED. The views expressed are those of the authors and do not necessarily represent those of the European Forest Institute or the European Union.

ISBN: 978-952-5453-81-2 (printed)
ISBN: 978-952-5453-82-9 (pdf)



EUROPEAN FOREST INSTITUTE

What Science
Can Tell Us

L'Eau pour les Forêts et les Hommes en Région Méditerranéenne :

un équilibre à trouver

Yves Birot, Carlos Gracia et Marc Palahí (éditeurs)



Projet cofinancé par le Fonds Européen
de Développement Régional

Project cofinanced by the European
Regional Development Fund



Sommaire

Auteurs ayant contribué à cet ouvrage et comité de rédaction	7
Préface	9
Introduction	II
<i>Yves Birot et Carlos Gracia</i>	
1. Ce qu'il faut savoir	15
1.1. Le cycle hydrologique en un coup d'oeil : eau bleue, eau verte.....	17
<i>Yves Birot et Carlos Gracia</i>	
1.2. Ressources en eau, ressources forestières, et populations dans la région méditerranéenne aujourd'hui	22
<i>Gaëlle Thivet et Mohammed Blinda</i>	
1.3. Les zones forestières influencent-elles le régime des pluies ?.....	33
<i>Giorgio Matteucci, Jerry Vanclay et Javier Martin-Vide</i>	
1.4. Les flux d'eau dans les forêts	39
<i>Jorge S. David, Juan Bellot, Yves Birot et Teresa S. David</i>	
1.5. Le rôle de la forêt méditerranéenne dans la conservation de l'eau et du sol.....	46
<i>Jean Albergel, Jean Collinet, Patrick Zante et Hedi Hamrouni</i>	
2. L'eau bleue	57
2.1. Hydrologie des écosystèmes méditerranéens	59
<i>Francesc Gallart et Pedro Berliner</i>	
2.2. Les ressources en eau dépendent du couvert végétal et de l'usage des terres	64
<i>Mark Robinson et Claude Cosandey</i>	
3. L'eau verte	71
3.1. L'eau verte, élément indispensable des processus intervenant dans les écosystèmes forestiers, et de leurs fonctions	73
<i>Yves Birot et Ramon Vallejo</i>	
3.2. Fonctionnement hydrique des arbres : transpiration et photosynthèse.....	79
<i>Santiago Sabaté et Carlos A. Gracia</i>	
3.3. Comment les espèces végétales s'adaptent au stress hydrique.....	84
<i>Oliver Brendel et Hervé Cochard</i>	

4. Eau bleue et/ou eau verte, quel compromis possible ?	91
4.1. Assurer la fourniture d'eau aux arbres et aux personnes : les voies possibles	93
<i>Carlos Gracia, Jerry Vanclay, Hamed Daly, Santi Sabaté, et Javier Gyenge</i>	
4.2. Équilibrer la répartition de l'eau entre les écosystèmes, les biens et services, et les hommes	104
<i>Robert Mavsar</i>	
4.3. Gestion intégrée de l'eau à l'échelle du paysage : la science au service du développement, l'exemple de la Tunisie.....	110
<i>Jean Albergel, Jean Collinet, Patrick Zante et Hedi Hamrouni</i>	
4.4. Vers une gestion écologique, socio-économique et hydrologique intégrée	118
<i>Bart Muys, Paolo Ceci, Thomas Hofer, et Claudia Veith</i>	
4.5. L'empreinte "eau" de notre vie quotidienne : combien d'eau utilisons-nous ?	128
<i>Yves Birot</i>	
4.6. Leçons du passé : une perspective historique sur l'hydrologie forestière et la conservation des sols au nord et au sud du Bassin Méditerranéen...	135
<i>Pietro Piussi, Yves Birot, Éric Roose et Mohamed Sabir</i>	
5. Quelques défis majeurs	143
5.1. Les implications du changement climatique sur les forêts et l'hydrologie	145
<i>Javier Martin-Vide, Francesc Gallart et Joan-Albert Lopez-Bustins</i>	
5.2. Faire face aux changements d'occupation des sols et à la croissance démographique	152
<i>Gaëlle Thivet</i>	
5.3. Le reboisement pour combattre la désertification dans les zones arides : une entreprise à raisonner	161
<i>Orna Riesman-Berman, Leopoldo Rojo et Pedro Berliner</i>	
5.4. Maintenir en bon état les écosystèmes ripicoles et aquatiques : défis et solutions grâce à la gestion des ripisylves	168
<i>Francesc Sabater et Susana Bernal</i>	
5.5. L'économie de l'eau et des forêts : enjeux et recommandations pour fonder une politique	174
<i>Lelia Croitoru et Mike Young</i>	
Messages clés	181
Glossaire	193

Auteurs ayant contribué à cet ouvrage et comité de rédaction

Auteurs

Jean Albergel, IRD, Nairobi, Kenya
Juan Bellot, Université d'Alicante, Espagne
Pedro Berliner, Université Ben Gurion, Institut Blaustein pour la recherche sur le désert, Israël
Susana Bernal, Université de Barcelone, Espagne
Yves Birot, EFIMED, Avignon, France
Mohamed Blinda, Plan Bleu - UNEP, Sophia-Antipolis, France
Oliver Brendel, INRA, Nancy, France
Paolo Ceci, FAO, Rome, Italie
Hervé Cochard, INRA, Clermont-Ferrand, France
Jean Collinet, IRD, France
Claude Cosandey, CNRS, Paris, France
Lelia Croitoru, The World Bank, Washington DC, Etats-Unis
Hamed Daly, INRGREF, Tunis, Tunisie
Frances Gallart, CSIC, Barcelone, Espagne
Carlos Gracia, CREA-UB, Barcelone, Espagne
Javier Gyengé, INTA, Bariloche, Argentine
Hedi Hamrouni, Ministère de l'Agriculture, des Ressources en eau et de la pêche, Tunisie
Thomas Hofer, FAO, Rome, Italie
Joan A. Lopez-Bustins, Université de Barcelone, Espagne
Javier Martin-Vidé, Université de Barcelone, Espagne
Giorgio Matteucci, CNR- ISAFOM & IBAF, Rende, Italie
Robert Mavsar, CTFC/EFIMED, Barcelone, Espagne
Pietro Piussi, Université de Florence, Italie
Orna Reisman-Berman, Université Ben Gurion, Institut Blaustein pour la recherche sur le désert, Israël
Mark Robinson, CEH, Wallingford, Royaume Uni
Leopoldo Rojo, Ministère de l'Environnement et du développement rural et marin, Espagne
Eric Roose, IRD, Montpellier, France
Santiago Sabaté, CREA-UB, Barcelone, Espagne
Francesc Sabater, Université de Barcelone, Espagne

Mohamed Sabir, ENFI, Rabat, Maroc
Jorge Soares David, ISA, Lisbonne, Portugal
Teresa Soares David, INRB, Oeiras, Portugal
Gaëlle Thivet, Plan Bleu-UNEP, Sophia-Antipolis, France
Ramon Vallejo, Université de Barcelone, Espagne
Jerry Vanclay, Southern Cross University, Lismore, NSW, Australie
Claudia Veith, FAO, Rome, Italie
Mike Young, Université d'Adelaïde, Australie
Patrick Zante, IRD, Rabat, Maroc

Comité de rédaction

Javier Albarracin, IE-Med, Barcelone, Espagne
Pedro Berliner, Université Ben Gurion, Institut Blaustein pour la recherche sur le désert, Israël
Yves Birot, coordinateur, EFIMED, Avignon, France
Michael Bredemeyer, Université de Göttingen, Allemagne
Francesc Gallart, CSIC, Barcelone, Espagne
Carlos Gracia, coordinateur, CREA-UB, Barcelone, Espagne
Thomas Hofer, FAO, Rome, Italie
Federico Magnani, Université de Bologne, Italie
Javier Martin-Vidé, UB, Barcelone, Espagne
Marc Palahi, coordinateur, EFIMED, Barcelone, Espagne
Irina Prokovieva, CTFC, Barcelone, Espagne
Pere Riera, UAB, Barcelone, Espagne
Gaëlle Thivet, Plan Bleu-UNEP, Sophia-Antipolis, France
Jerry Vanclay, Southern Cross University, Lismore, NSW, Australie

Préface

La question de l'eau et de la forêt est depuis longtemps considérée par les forestiers et les décideurs comme un thème clé lié à la gestion des ressources naturelles, prenant en compte à la fois les besoins de la société et les préoccupations environnementales. Ce sujet mobilise aujourd'hui une attention renouvelée, comme le traduit la série de manifestations internationales qui lui ont été consacrées (voir Encadré 1) au cours des dernières années.

En dépit de progrès considérables dans la compréhension scientifique des interactions entre Eau et Forêt, l'incertitude, voire dans certains cas la confusion, persiste du fait de la complexité des questions soulevées et des limites de l'extrapolation des résultats des travaux de recherche à différents contextes : régions et pays, échelles géographiques, types de forêts et situation géomorphologique. De surcroît, on a pu observer un

Encadré 1. Un élan international concernant l'agenda de l'Eau et de la Forêt

Le thème des interactions des Forêts et de l'Eau a reçu une attention croissante au niveau international avec une accélération au cours de ces toutes dernières années. Des événements marquants ont jalonné cette évolution:

- Réunion internationale d'experts sur les Forêts et l'Eau, novembre 2002, Shiga, Japon
- Année internationale de l'eau douce 2003
- Adoption de la Résolution 2 de Varsovie « Forêts et Eau » lors de la Conférence Ministérielle sur la Protection des Forêts en Europe (Forest Europe), novembre 2007, Varsovie, Pologne
- 26e session du Groupe de travail de la Commission Européenne des Forêts sur la gestion des bassins versants de montagne, août 2008, Oulu, Finlande
- IIIe Conférence internationale – Forêts et Eau – septembre 2008, Mragowo, Pologne
- Séance plénière sur les Forêts et l'Eau tenue lors de la Semaine Européenne des Forêts, octobre 2008, Rome, Italie
- Conférence internationale « Eau et Forêts : une vérité qui convient ? », Octobre 2008, Barcelone, Espagne
- Atelier de travail sur les Forêts et l'Eau, mai 2009, Antalya, Turquie
- Sessions sur les Forêts et l'Eau et Événement parallèle au XIIIe Congrès mondial des Forêts, octobre 2009, Buenos-Aires, Argentine
- Session sur Les Forêts et l'Eau lors de la 35e Session de la Commission Européenne des Forêts, avril 2010, Lisbonne, Portugal
- Séance plénière sur les Forêts et l'Eau lors de la 20e Session du Comité des Forêts (COFO), octobre 2010, Rome, Italie

manque d'efficacité dans la communication des avancées scientifiques les plus récentes aux décideurs et gestionnaires, et la remise en question d'idées reçues.

Il est donc nécessaire de fournir une connaissance plus complète aux décideurs politiques sur l'interface forêt/eau dans le contexte de différentes initiatives au niveau des politiques (par exemple, la Directive-Cadre Européenne sur l'Eau, les Infrastructures vertes, et Forest Europe). Cette nécessité est urgente dans la région méditerranéenne, qui est en permanence confrontée à la pénurie en eau, facteur principal de limitation de la vie et ressource la plus stratégique pour garantir la durabilité de la région.

Dans ce contexte, EFIMED – Le bureau régional méditerranéen de l'EFI – a pris des mesures visant à améliorer le dialogue science/politiques concernant la question essentielle de l'eau, de la forêt et des sociétés en concevant et publiant un ouvrage intitulé : **L'eau pour les Forêts et les hommes en région méditerranéenne : un équilibre à trouver.**

L'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) a contribué à cette initiative par son apport technique et son soutien financier. La FAO joue un rôle de leader sur les questions liées aux forêts et à l'eau depuis de nombreuses années et a progressivement construit, au cours du temps, un cadre conceptuel et opérationnel reliant l'hydrologie forestière à la gestion du bassin versant, au développement durable des montagnes, à la gestion des catastrophes et risques naturels et à l'atténuation du - et l'adaptation au - changement climatique. L'accent très fort mis sur les thèmes de l'eau et des forêts par le travail de la FAO est d'une grande importance pour les zones arides et semi arides comme le Bassin méditerranéen.

Deux autres partenaires, le CREAM et le CTFC (en relation avec SYLVAMED), ont contribué financièrement au soutien de l'initiative d'EFIMED, en particulier pour permettre la traduction du livre et le rendre accessible à des lecteurs non anglophones.

Le présent ouvrage, publié dans la collection d'EFI, « *ce que peut nous dire la science* », constitue une véritable expertise scientifique collective internationale, fondée sur les contributions d'une quarantaine de chercheurs réputés, mettant ainsi à disposition les connaissances les plus récentes sur les interactions, les compromis et les enjeux émergents du trinôme eau-sociétés-forêts.



Marc Palahi
Directeur d'EFIMED



Moujahed Achouri
Chef de Service
Service pour la Conservation des Forêts
Division de l'évaluation, de la gestion et
de la conservation des forêts
Département des Forêts FAO



Figure 1. Lac artificiel de La Môle, à l'aval d'un bassin versant entièrement boisé - majoritairement de chêne liège - approvisionnant en eau la ville touristique de Saint-Tropez (Var, France) *Crédit: C. Birot*

Introduction

Yves Birot et Carlos Gracia

L'eau est le fondement de toute vie biologique sur Terre, et l'un des liens fondamentaux entre la biosphère et l'atmosphère. Elle est essentielle à l'Homme et à la Nature: "elle hydrate notre corps, fait pousser notre nourriture, fait fonctionner notre industrie et nourrit nos écosystèmes terrestres et aquatiques" (M.K. Tolba). Le cycle de l'eau unit les sociétés humaines aux écosystèmes. L'eau forme l'un des sous-systèmes de la Nature.

L'histoire de la région méditerranéenne, en tant que berceau de la civilisation, est ancienne et dominée par les interactions et coévolutions entre l'homme et son environnement naturel, au travers du développement de l'agriculture – y compris l'agriculture irriguée – l'élevage et l'émergence de l'habitat urbain. Cette évolution continue aujourd'hui sous différentes formes. La rive nord du Bassin méditerranéen a connu depuis des millénaires une forte diminution de la forêt et de la végétation due à la pression anthropique. Néanmoins, ce processus a été inversé au cours des dernières décennies, du fait de l'abandon des zones rurales et de l'urbanisation croissante, conduisant à des dynamiques de recolonisation végétale naturelle. En revanche, les écosystèmes forestiers des rives de l'est et du sud du Bassin subissent une forte pression des populations humaines, se traduisant par une surexploitation, un surpâturage et une dégradation biologique. Une telle situation s'explique par une importante croissance démographique, la faiblesse des revenus per capita et une densité marquée de la population rurale. L'évolution de l'usage des sols, aussi bien au nord qu'au sud du bassin continue d'affecter les processus biologiques et biogéochimiques, le cycle hydrologique et les ressources en eau aussi bien quantitativement que qualitativement.

60% des populations pauvres en eau (moins de 1.000 m³/habitant/an) vivent dans des pays méditerranéens. En 2025, on prévoit que 63 millions d'habitants de la région méditerranéenne seront en manque d'eau (moins de 500 m³/habitant/an).

La région méditerranéenne est une région qui, de façon récurrente ou permanente, se trouve confrontée au manque d'eau à cause de ses facteurs climatiques : précipitations irrégulières ou limitées – forte densité de précipitations en automne/hiver avec pour conséquence un ruissellement important et une érosion des sols – demande évaporative élevée, et d'importants facteurs sociaux, tels les changements d'usage des sols (tout spécialement le besoin en agriculture irriguée) pour faire face à une démographie croissante en particulier dans les zones urbaines... **Le changement climatique** vient aggraver cette situation car il a (et aura) pour conséquence, d'une part une augmentation du manque d'eau (moins de précipitations et donc moins de ruissellement) et d'autre part une réduction des ressources en eau. Il aura également un impact sur la vitalité, la résilience voire même la survie des arbres et des écosystèmes, du fait d'une plus grande fréquence d'évènements extrêmes (vagues de chaleur, périodes de sécheresse) et d'une plus grande aridité. Ces phénomènes entraîneront à leur tour une perte en biens et services, qui sont fournis aux sociétés humaines par les écosystèmes; il est donc nécessaire que la question du cycle de l'eau et du bilan en eau soit traitée de manière intégrée, en prenant en compte **l'eau bleue** (l'eau qui a une forme liquide et est utilisée pour les besoins humains, ou qui rejoint les océans) mais également **l'eau verte** (l'eau sous forme de vapeur, résultat des processus d'évaporation et de transpiration). Une telle approche des flux d'eau pose bien évidemment de nombreux défis scientifiques.

Les forêts, surfaces boisées, garrigues et maquis ne sont pas les seuls composants des paysages ruraux méditerranéens; ils sont adjacents à d'autres écosystèmes, plus ou moins influencés par l'homme comme les terres consacrées aux cultures pluviales ou irriguées, les parcours boisés, les écosystèmes aquatiques, etc. Néanmoins les forêts et les espaces boisés peuvent couvrir d'importantes surfaces, souvent dans la partie haute des bassins versants des zones de collines ou de montagne, où leur rôle est crucial pour la protection des sols. En conséquence, elles peuvent influencer sur le régime de l'eau. Les interactions entre la couverture forestière et l'eau sont très complexes concernant des variables telles que le débit d'étiage, le débit de crue, le rendement et la qualité de l'eau. Elles dépendent de nombreux paramètres, dont certains ont un caractère local, c'est d'ailleurs la raison pour laquelle des résultats contradictoires apparaissent dans la littérature scientifique. Il n'y a pas de solution toute faite ou 'passe-partout'. En outre, bien souvent la relation entre les forêts et l'eau est caractérisée par de nombreuses idées reçues, décrites par Hamilton (1985) comme les quatre M¹: Malentendu, Mythe, Mauvaise interprétation, Mauvaise information. Il s'avère donc nécessaire de combler le fossé entre science et perception du grand public.

¹ * N.d.T: four M: misunderstanding, myth, misinterpretation and misinformation

L'eau, la forêt et les hommes constituent les trois sommets d'une relation triangulaire qui doit être analysée par couple et dans son ensemble.

De nombreux processus naturels relatifs à l'eau à l'échelle du territoire ne font ni partie de l'agenda des décideurs ni de celui des politiciens, ni encore de celui du grand public. Ils ont en effet, tous tendance à considérer que cette question appartient seulement au domaine des experts. La question de l'eau a, de plus, été presque toujours uniquement traitée sous l'angle de l'eau bleue. Le temps est venu de lancer des politiques et des stratégies innovantes visant à équilibrer la relation entre l'eau, l'homme et la nature au travers d'une approche socio-éco-hydrologique fondée sur une gestion intégrée de l'écosystème, de l'eau et des terres. Cela demandera à la communauté scientifique de redoubler ses efforts, de structurer et d'organiser les connaissances disponibles au travers d'une approche conjointe entre hydrologistes et écologistes/forestiers, et de mener à bien de nouvelles recherches scientifiques.

Avec cet ouvrage, EFIMED, bureau régional méditerranéen de l'Institut Forestier Européen, souhaite œuvrer en tant que catalyseur au sein du dialogue entre la science d'une part, et les politiques et la société d'autre part, et proposer de solides pistes de réflexion

Ce qu'il faut savoir

L'eau, les écosystèmes et les sociétés sont depuis longtemps considérés comme des systèmes différents et séparés. Le moment est donc venu pour une approche holistique, intégrant ces éléments au sein d'un même système, qui combine les dimensions hydrologique, écologique et sociologique. La prise en compte de ce système hydro-socio-écologique complexe devrait permettre d'éviter une tendance à la simplification et aux opinions manichéennes, et de mieux comprendre le contexte scientifique qui le fonde. Ce chapitre, divisé en cinq sections, a pour objectif de présenter les fondamentaux que tout le monde devrait connaître.

- 1.1 Le cycle hydrologique en un coup d'œil: eau bleue, eau verte
- 1.2 Ressources en eau, ressources forestières, et populations dans la région méditerranéenne aujourd'hui
- 1.3 Les zones forestières influencent-elles le régime des précipitations ?
- 1.4 Les flux d'eau dans les forêts
- 1.5 Rôle des forêts méditerranéennes dans la conservation de l'eau et du sol

Figure 2. Recherche sur le cycle hydrologique planétaire: moyenne des précipitations en avril de 1985 à 2005 – *Crédit: NASA*

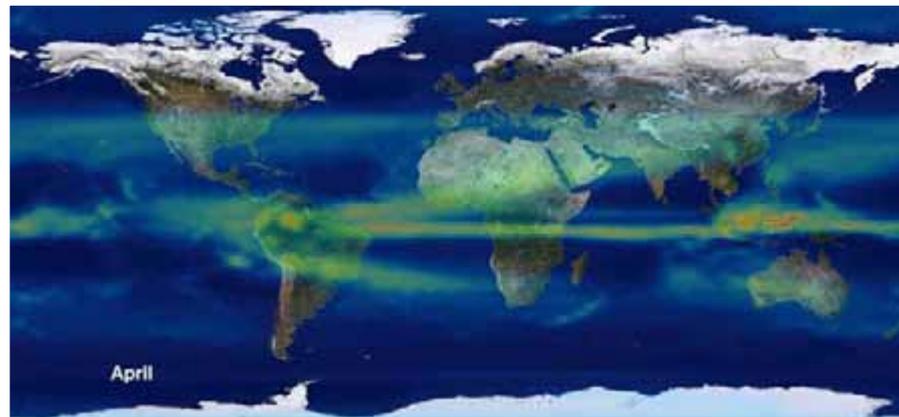


Figure 3. Reboisement sur terrasses en courbe de niveau après incendie (Allègre-Les Fumades-30-France) – *Crédit C. Birot*

Le cycle hydrologique en un coup d'oeil : eau bleue, eau verte

Yves Birot et Carlos Gracia

À l'échelle mondiale et depuis les origines de notre planète, le même stock d'eau a circulé au travers de flux selon les processus et les voies du cycle hydrologique. Ce cycle relie la biosphère à l'atmosphère, les écosystèmes entre eux, y compris les systèmes anthropisés.

En tant qu'élément ou ressource d'un cycle, l'eau et son état peuvent être caractérisés par des stocks et des flux. Le stock d'eau total du système terrestre est resté inchangé depuis son origine : l'eau n'est ni détruite, ni créée. La réserve totale est composée de plusieurs réservoirs : les océans (qui constituent de loin le réservoir le plus important), la glace (régions polaires et hautes montagnes), l'atmosphère, les rivières et les lacs, les permafrosts, l'humidité des sols, les nappes souterraines et l'eau incluse dans les organismes vivants et en particulier dans la végétation. Le stock de chacun de ces réservoirs est influencé par des entrées et des sorties de flux d'eau :

- i) précipitations sur les terres et les océans (trois fois plus sur ces derniers);
- ii) retour de l'eau aux océans après ruissellement et percolation au travers des écoulements de surface et des flux des nappes souterraines ;
- iii) eau émise depuis les océans vers l'atmosphère par évaporation puis condensation, eau émise par évaporation des rivières et des lacs, et évapotranspiration de la couverture végétale ;
- iv) une partie de la vapeur d'eau est transportée de l'océan vers les terres mais contrairement à l'opinion courante, il ne s'agit là que de 10% de l'évaporation totale des océans et d'un tiers des précipitations au-dessus des terres (Figure 4). Le cycle de l'eau est alimenté par l'énergie du soleil et consomme 25% de l'énergie solaire totale annuelle atteignant la terre.

Le parcours de l'eau dans les écosystèmes terrestres commence quand la pluie tombe. L'eau suit alors des routes (voies), qui se divisent à des carrefours appelés points de partage, décrits dans la Figure 5. Le premier point de partage (PP) est situé au niveau du couvert végétal qui intercepte une partie des précipitations, l'eau étant réémise ensuite par évaporation directe. Au deuxième point de partage, les précipitations sont divisées

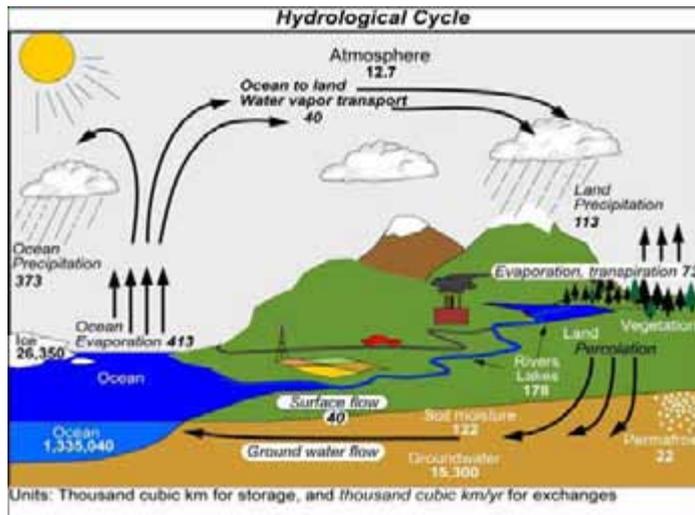


Figure 4. Le cycle hydrologique planétaire. Estimation des principaux stocks d'eau, indiquée en lettres normales en 10^3 km^3 et du flux d'eau au travers du système, indiqué en italique $10^3 \text{ km}^3/\text{an}$, équivalent en Exagrammes (10^{18} g) par an. (Trenberth et al. 2007)

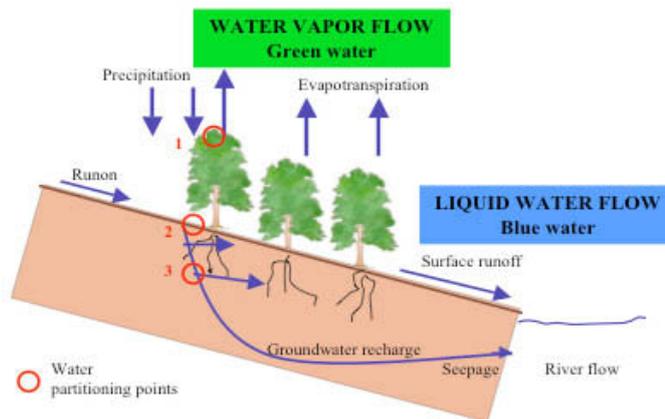


Figure 5. Le cycle hydrologique d'un écosystème : partition des précipitations (selon Falkenmark and Rockström 2005)

entre le ruissellement de surface et l'infiltration. Au troisième point de partage, l'humidité est divisée entre évaporation du sol, transpiration des plantes et percolation profonde. L'évaporation et la transpiration constituent l'**eau verte** alors que le ruissellement en surface et la percolation profonde forment l'**eau bleue**. La partition des flux d'eau dans le cycle hydrologique est déterminée par des facteurs biophysiques (par ex. la capacité de rétention en eau du sol, l'intensité de la pluie, la demande évaporative atmosphérique, etc.), biologiques (voies de la photosynthèse), et humains (par ex. l'utilisation des sols, la gestion forestière, compaction des sols, etc.).

La vitesse du mouvement de l'eau le long des différentes voies et entre les réservoirs du cycle hydrologique peut grandement varier. Le temps de parcours de la percolation profonde rechargeant les nappes souterraines peut être très lent. En revanche, le débit de pointe du ruissellement à la suite de précipitations intenses est pratiquement immédiat. Dans ce cas néanmoins, de récentes études fondées sur la composition isotopique de l'eau, ont montré que l'eau prélevée en aval d'un bassin versant, contient des molécules d'eau de la pluie incidente actuelle en plus de celles stockées antérieurement dans le sol. Le renouvellement de l'eau dans les océans et dans les nappes souterraines peut prendre plusieurs milliers d'années, alors qu'une molécule d'eau reste en moyenne

Tableau 1. Moyenne des temps de séjour selon les réservoirs (selon Pidwirmy 2006)

Réservoirs	Moyenne du temps de séjour	Réservoirs	Moyenne du temps de séjour
Antarctique	20.000 ans	Nappe souterraine (profonde)	10.000 ans
Océans	3.200 ans	Lacs	50-100 ans
Glaciers	20-100 ans	Rivières	2-6 mois
Couverture neigeuse saisonnière	2-6 mois	Marais terres humides	5 ans
Humidité du sol	1-2 ans	Eau incluse dans les plantes	Plusieurs heures
Nappe souterraine (peu profonde)	10-200 ans		

seulement huit jours dans l'atmosphère et seulement quelques heures dans les plantes. Le tableau 1 présente des données sur le temps de séjour dans certains compartiments du cycle de l'eau.

Une gestion rigoureuse des ressources en eau à diverses échelles géographiques est fondée sur une analyse approfondie du bilan en eau. Il s'agit d'une méthode comptable qui requiert la mesure de nombreuses données hydrologiques concernant les stocks d'eau et les flux d'entrée et de sortie.

Comment évaluer les volumes d'eau en jeu dans le cycle de l'eau émise depuis l'atmosphère, à travers la surface des terres, puis dans les sols, les plantes, les océans, et retournant vers l'atmosphère au travers des processus d'évaporation et de condensation ? La méthode la plus courante est le bilan en eau. Il s'agit d'une méthode pratique de

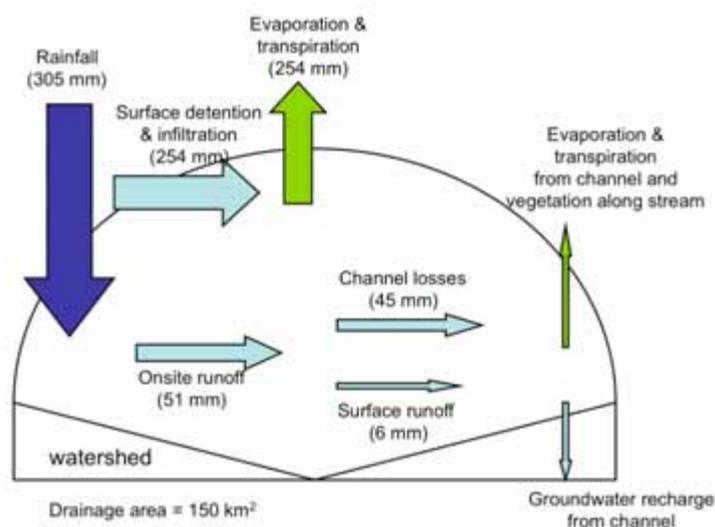


Figure 6. Bilan en eau illustrant la comptabilisation de l'eau dans le bassin versant expérimental du Walnut Gulch, compris dans le grand bassin versant de San Pedro (Arizona). Source Renard et al. 1993

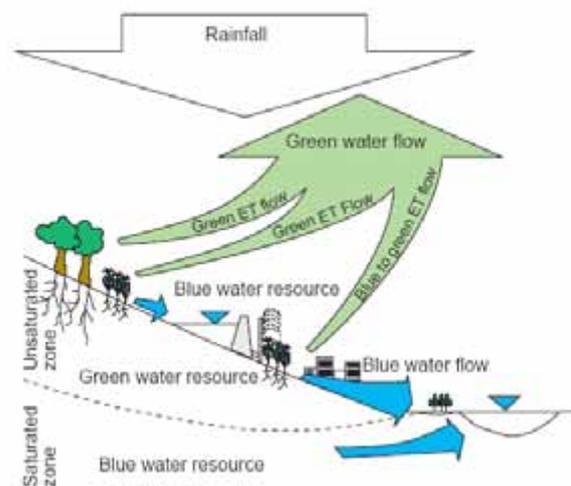


Figure 7. Eau bleue et eau verte (Falkenmark and Rockström, 2005). ET = Evapotranspiration

comptabilisation, qui fournit un cadre de référence pour comprendre les processus hydrologiques. Il peut être réalisé à différentes échelles : au niveau de la parcelle, du bassin versant petit ou grand (Figure 6) ou même au niveau planétaire. Il est important de comprendre ce bilan afin de pouvoir assurer durablement cette ressource en eau et ses relations environnementales et humaines dans la zone en question : par exemple le bassin versant. Dans sa forme la plus simple, l'analyse d'un bilan en eau est basée sur une seule équation qui équilibre les entrées et sorties d'eau, tout en calculant le changement au niveau des stocks.

L'analyse du bilan en eau requiert la mesure des données hydrologiques suivantes : précipitations, interception, évaporation, évapotranspiration, percolation et infiltration, ruissellement (de surface et souterrain), stockage (en surface et nappe souterraine), utilisation de l'eau, etc. De telles données ne sont pas toujours disponibles, mais cette difficulté peut être contournée par l'utilisation de modèles hydrologiques de simulation (empiriques et mécanistes). **Néanmoins, des données réelles sur le long terme provenant de bassins versants instrumentés sont toujours nécessaires.**

La notion d'eau bleue et d'eau verte fournit un cadre conceptuel d'une grande valeur pour la gestion de l'eau à différentes échelles. Les précipitations génèrent deux types de ressources en eau : l'eau verte dans le sol, consommée par la croissance et la production des plantes et retournant à l'atmosphère sous la forme de vapeur d'eau, et l'eau bleue dans les rivières et les aquifères, pour l'usage des hommes qui inclut l'irrigation (au travers de laquelle l'eau bleue est transformée en eau verte). Ce cadre (Figure 7) nous offre une approche intéressante concernant l'analyse des différentes questions suivantes :

- Le rapprochement entre protection écologique et processus hydrologiques
- La production alimentaire par une agriculture pluviale et/ou irriguée
- La gestion intégrée de l'eau prenant en compte le mouvement de l'eau dans le paysage en relation avec l'usage des terres
- Une répartition équilibrée de l'eau entre l'Homme et la Nature
- La compréhension du concept d'**éco-socio-hydrologie**

L'utilisation du concept d'eau verte a suscité un grand intérêt ces dernières années, en particulier pour les régions sèches où l'eau verte domine le cycle hydrologique. Néanmoins, il est clair que cette approche rencontre des limites dans sa capacité à délivrer des informations pertinentes concernant la gestion et la planification des ressources en eau.

Ces limites sont liées à une trop grande simplification du cycle hydrologique dans les études fondées sur l'eau verte, au manque d'échelles temporelles et spatiales adéquates concernant les débits d'étiage, à l'incertitude concernant la réserve de l'eau dans le profil du sol, et à la génération des flux d'eau venant de sols saturés et insaturés. Il convient donc de porter notre attention sur les liens hydrologiques entre l'eau bleue et verte et leur représentation au niveau de la gestion des ressources en eau, plutôt que de nous focaliser sur ces flux en tant que tels.

Pour en savoir plus

- Falkenmark, M. and Rockström, J. 2005. Balancing water for humans and nature; the new approach in Ecohydrology. Earthscan. 247 p.
- Jewitt, G. 2006. Integrating blue and green water flows for water resources management and planning. *Physics and Chemistry of the Earth* 31(15-16): 753-762.
- Pidwirny, M. 2006. The Hydrologic Cycle. *Fundamentals of Physical Geography*, 2nd Edition. Accessed 01/03/2010. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8b.html>
- Trenberth, K. E., Smith, L., Qian, T.T., Dai, A.G. and Fasullo, J. 2007. Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *J. Hydrometeor.* 8:758-769

1.2.

Ressources en eau, ressources forestières, et populations dans la région méditerranéenne aujourd'hui

Gaëlle Thivet et Mohammed Blinda

Avec ses 470 millions d'habitants, la diversité de ses territoires situés au carrefour de trois continents, son patrimoine naturel et culturel et son climat, une mer partagée (« mare nostrum ») entre pays, la région méditerranéenne est le théâtre d'importants enjeux d'environnement et de développement. L'économie de cette éco-région est largement dépendante de ses ressources naturelles, en particulier dans le Sud. La nécessité de subvenir aux besoins d'une population croissante, dans une région dont le climat est incertain et où les crises énergétiques couvent, soulève de nombreuses questions : disponibilité et renouvellement des ressources en eau, fertilité du sol, survie des forêts, équilibres naturels et développement des territoires.

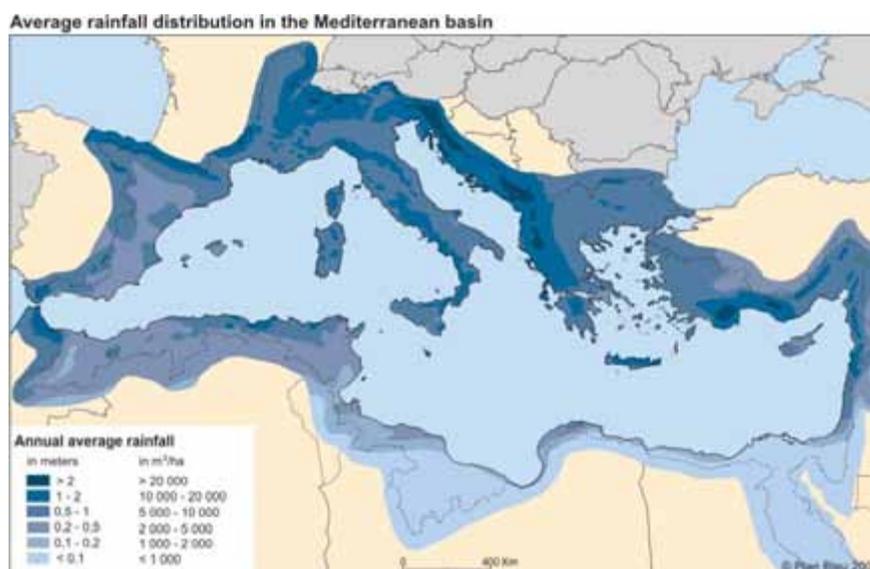


Figure 8. Moyenne de la distribution des précipitations dans le bassin méditerranéen
Source: Plan Bleu, Margat

La croissance démographique est extrêmement forte dans l'est et le sud, et particulièrement élevée dans les zones urbaines et côtières avec une croissance annuelle de 4,1 millions d'habitants et un flux de 175 millions de touristes par an.

La croissance démographique de cette région a connu une hausse spectaculaire au cours des 40 dernières années, passant de 280 millions en 1970 à 468 millions en 2008. C'est le cas en particulier des pays de l'est et du sud de la méditerranée (SEMC)¹ pour lesquels la croissance a atteint un record historique de 2,22% par an entre 1970 et 2008, avec une augmentation annuelle de 4,1 millions d'habitants. Cela représente 5 fois la croissance de la population des pays méditerranéens du nord sur la même période (0,5% par an).

Bien que le taux de croissance soit supérieur à celui des pays méditerranéens du nord, le taux de fertilité dans les SEMC a diminué de moitié et est descendu à 3% par an au cours des vingt dernières années. Il est néanmoins prévu que cette croissance démographique continue jusqu'en 2025 et au-delà (voir section 5.2).

Les zones urbaines et côtières sont particulièrement touchées par ce phénomène. En effet, un tiers de la population est concentrée sur les côtes, ne couvrant que 13% du total de la surface disponible. En 2000 les côtes méditerranéennes comptaient 70 millions d'habitants urbains, plus de 580 villes côtières et 175 millions de visiteurs.

L'irrégularité spatio-temporelle des pluies rend nécessaire la construction de systèmes de stockage d'une capacité correspondante à une proportion élevée des eaux de surface (>90% en Syrie, >80% au Maroc et en Tunisie).

La croissance de la population a par ailleurs accru la pression sur les ressources en eau, déjà très vulnérables, de par la nature fragile, irrégulière et rare de l'eau ; le climat méditerranéen étant en effet caractérisé, entre autres, par une très forte irrégularité des pluies tant au niveau temporel que spatial (Figure 8).

Les estimations montrent que la quantité moyenne des ressources renouvelables en eau douce souterraine ou de surface dans la région méditerranéenne, est d'environ 1080 km³/an, dont 2/3 sont concentrés dans les pays du nord. A l'est et au sud, les pays bénéficient respectivement d'1/4 et d'1/10 de ces ressources alors que seulement 1% de la quantité totale est disponible pour les 6 pays et territoires les plus défavorisés (Chypre, Israël, Lybie, Malte, Territoires palestiniens et Tunisie). Par ailleurs, 16% de ces ressources sont à cheval sur les frontières et donc partagées par plusieurs pays, méditerranéens ou non. Les taux de dépendance des ressources externes sont particulièrement élevés en Egypte (98%), Israël (59%), Croatie (47%) et Syrie (43%).

À cette irrégularité des ressources en eau dans l'espace vient se greffer leur irrégularité au niveau temporel (intra et inter année). L'irrégularité intra année est caractérisée par des précipitations concentrées sur plusieurs mois (50-100 jours en moyenne

¹ Y compris tous les pays riverains du Maroc à la Turquie

Tableau 2. Ressources renouvelables en eau naturelle dans la région méditerranéenne

		Sous-régions (par pays)			Total
		Nord (Europe)	Est (Proche-Orient)	Sud (Afrique du Nord)	
Ressources naturelles renouvelables (eau bleue) (moyenne annuelle) (a)	Total (km ³ /yr)	740	247	95	1.083
	Total (%)	68	23	9	100
	Per capita (m ³ /yr)	3.915	2.371	631	2.441
Indice de compétition	Habitants/hm ³ /yr	255	422	1.584	410
Ressources naturelles renouvelables exploitables (moyenne annuelle) (b)	Total (km ³ /yr)	359	133	81	572
	Total (%)	63	23	14	100
	Per capita (m ³ /yr)	1.899	1.279	536	1.289
Estimation de l'eau verte (moyenne annuelle) (c)	Total (km ³ /yr)	300	100	70	470
	Total (%)	64	21	15	100

Source : Plan Bleu, 2007

(a) Ressources internes et externes calculées par sous-région, excluant ainsi la double comptabilisation due aux échanges entre pays riverains

(b) Suivant les critères par pays individuel

(c) Eau de pluie utilisée et consommée (évapotranspiration) par les cultures irriguées et les parcours

par an) et par des sécheresses qui ont lieu en été, saison pendant laquelle les besoins en eau sont les plus élevés (irrigation, tourisme). La variabilité inter-annuelle par rapport aux moyennes annuelles, est caractérisée par de fréquents déficits dus à des précipitations inefficaces en hiver et au printemps, dont les conséquences sont essentiellement hydrologiques. Elle peut être également due à des sécheresses estivales, aggravées par leur durée et leur importance, avec des impacts immédiats sur les sols et la couverture végétale, et des effets hydrologiques différés.

Encadré 1. faits et chiffres

En 2008, les 22 pays et territoires des bords de la Méditerranée représentaient :

- 5,7% des terres émergées du monde incluant de nombreux déserts et montagnes
- 7% de la population mondiale (pourcentage stable) avec environ 468 millions d'habitants
- 31% du tourisme international avec 175 millions de visiteurs
- 3% des ressources planétaires en eau
- 60% de la population mondiale vivant dans des pays pauvres en eau²
- 12% du PIB mondial (en baisse) et 8% des émissions de CO₂ (en hausse)
- Pays où les ressources en eau naturelle renouvelable per capita (bien qu'elles ne soient pas toutes exploitables) sont de 1.000 m³/capita /an

² Pays où les ressources en eau naturelle renouvelable per capita (bien qu'elles ne soient pas toutes exploitables) sont de 1.000 m³/capita /an

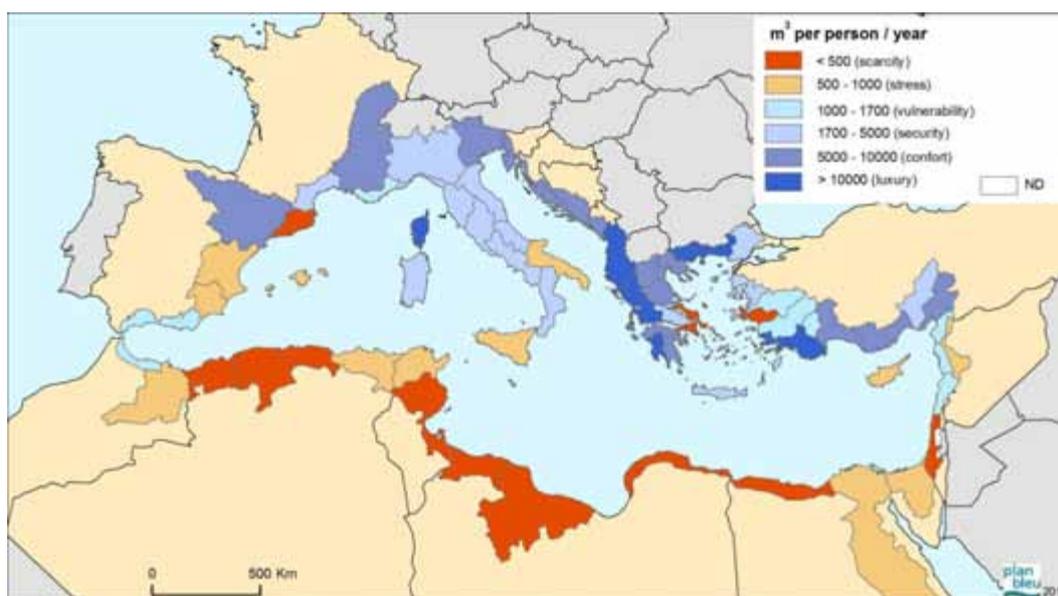


Figure 9. Ressources renouvelables en eau naturelle per capita dans les bassins versants élémentaires (1995-2005) Source : Plan Bleu, sources nationales

Une telle irrégularité entrave considérablement l'utilisation des ressources en eau de surface et a entraîné la construction d'infrastructures pour le stockage, afin de mieux pourvoir à la régulation des stocks intra et inter-année. Le taux de régulation par rétention des eaux de surface est donc élevé dans certains pays: 90% en Syrie, 80% au Maroc et en Tunisie, 70% à Chypre et 40% en Israël.

Les ressources ne doivent néanmoins pas seulement être limitées à l'eau bleue des flux de surface et souterrains mais également inclure "l'eau verte", c'est à dire l'eau de pluie évapotranspirée par les écosystèmes terrestres. Dans les pays méditerranéens, le flux annuel moyen d'eau verte se situe entre 400 et 500 km³, mais reste très irrégulièrement distribué : 65% dans le nord, 20% dans l'est et 15% dans le sud (Tableau 1), ce qui explique la forte demande en eau d'irrigation de tous les pays de l'est et du sud.

Les impacts régionaux du changement climatique sur le cycle de l'eau, bien que difficiles à quantifier, vont très certainement appauvrir les ressources en eau des pays méditerranéens, accentuer leur variabilité et donc compromettre leur exploitabilité, en particulier dans les pays pauvres en eau. Plusieurs pays du sud ont récemment revu à la baisse le chiffre estimé de leurs ressources en eau dans leur plan de développement, soit comme mesure d'anticipation, soit pour prendre en compte les années de sécheresse qui ont été fréquentes au cours de la dernière décennie et ont fait baisser les moyennes annuelles de 20% en Algérie et de 25% au Maroc.

L'expression de ressource moyenne en eau « naturelle » per capita est le premier indicateur servant à caractériser des situations de « tension » ou « pauvreté en eau » (entre 500 et 1.000 m³ per capita/an) et de « pénurie structurelle » (moins de 500 m³ per capita/an). Cet indicateur sert également à illustrer les différences entre pays ou régions ou entre des bassins versants (Figure 9).

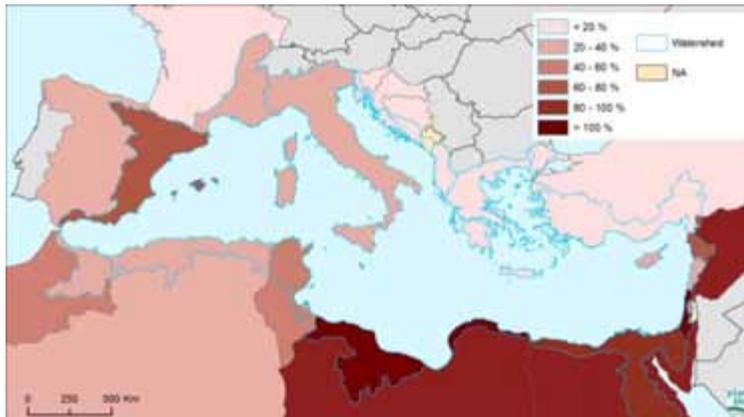


Figure 10. Index d'exploitation des ressources renouvelables en eau par pays individuels et dans les zones de grands bassins versants, 2005.
Source : Plan Bleu

Note: Les indices proches de ou supérieurs à 80% indiquent de fortes pressions sur les ressources en eau. Les ratios compris entre 60% et 80% signalent un risque élevé de pressions structurelles à moyen terme, alors que les ratios situés entre 20% et 60% indiquent une pression conjoncturelle ou locale.

En 2005, près de 180 millions d'habitants de la région méditerranéenne étaient pauvres en eau et 60 millions confrontés à la pénurie d'eau.

Le besoin en eau s'accroît énormément dans le sud et l'est de la région méditerranéenne, et l'on y répond de plus en plus par une production d'eau non durable.

Les **demandes en eau**, c'est-à-dire les quantités prélevées (95% du total) et les processus non conventionnels de production (désalinisation, réutilisation des eaux usées traitées), y compris les pertes pendant le transport et l'utilisation (estimé à près de 40% du besoin total en eau), **ont doublé dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle et atteint, en 2007, un total de 280 km³/an pour tous les pays riverains. L'agriculture est le premier consommateur** avec 180 km³/an destinés à l'irrigation de 26 millions d'hectares et représentant 64% de la demande totale: 45% dans le nord, 82% dans le sud et l'est, et un pourcentage marginal dans les régions adriatiques de l'est.

À l'échelle méditerranéenne, la pression exercée sur les ressources et exprimée par l'index d'exploitation des ressources renouvelables en eau naturelle³, révèle de forts contrastes géographiques (Figure 10). Dans des pays comme l'Égypte, Israël, la Libye, Malte et la Syrie, ainsi que dans la bande de Gaza, la consommation actuelle approche et dépasse parfois même la disponibilité en ressources renouvelables. La situation est encore plus alarmante lorsque l'index est utilisé, non pas à l'échelle des pays individuels, mais à l'échelle des bassins versants débouchant sur la Méditerranée. Les pressions sur les ressources semblent plus importantes lorsque seules les ressources exploitables sont

³ Définition du ratio: volume du prélèvement annuel sur les ressources renouvelables en eau naturelle / volume moyen annuel des ressources renouvelables en eau naturelle, exprimé en pourcentage.

prises en compte, elles représentent, en effet, la moitié ou le tiers des ressources renouvelables en eau naturelle.

Une partie croissante des besoins est couverte par la production non durable d'eau et estimée à 16 km³/an, dont 66% provenant du prélèvement d'eau fossile et 34% de la surexploitation des ressources renouvelables. L'indice de production en eau non durable⁴ est particulièrement élevé en Lybie (86%), bande de Gaza (40%), Tunisie (29%), Algérie (29%) et Espagne (25%).

Par ailleurs, les pressions sur les ressources en eau naturelle se trouvent compliquées par la dégradation et la pollution engendrées par les activités humaines qui modifient le régime et la qualité de l'eau, limitant de ce fait les possibilités d'utilisation. Il en résulte une aggravation de la vulnérabilité de l'approvisionnement due à l'augmentation des coûts (en particulier le coût du traitement des eaux), ainsi que des risques pour la santé publique et conflits entre consommateurs, secteurs concernés (ex. agriculture, industries, usage domestique), régions et pays.

Les politiques de l'eau sont encore trop axées sur l'offre induisant de ce fait des risques à long terme.

Pour répondre au besoin croissant en eau, les stratégies nationales se concentrent sur l'augmentation de l'offre en eau, au travers de la construction d'infrastructures hydrologiques à grande échelle, du développement de transferts interrégionaux et internationaux, de l'exploitation 'minière' des réserves en eau souterraine non renouvelable, (dans les zones de captage du Sahara) ou encore au travers de ressources non conventionnelles telles que la réutilisation des eaux usées traitées (Espagne, Israël, Chypre, Égypte, Tunisie), eau agricole de drainage (Égypte), désalinisation de l'eau de mer ou saumâtre (de plus en plus pratiquée à Malte, en Espagne, Algérie et Israël).

La poursuite de telles stratégies axées sur l'augmentation de l'offre et du prélèvement de l'eau, en exploitant et détériorant les ressources naturelles entraîne des risques sur le long terme, tels que la diminution des ressources fossiles, la destruction des aquifères côtiers par l'intrusion de l'eau de mer, la dégradation de la qualité des écosystèmes aquatiques, la réduction des ruissellements et la régression des écosystèmes de zones humides. Les politiques fondées sur l'approvisionnement sont en train d'atteindre leurs limites physiques, socio-économiques et environnementales, comme le montre l'état de nombreux barrages dans les pays du sud et de l'est où l'envasement a largement réduit la capacité des réserves en eau.

Les écosystèmes forestiers ou boisés et leurs dynamiques montrent des variations régionales malgré des traits communs. Sur les deux rives de la Méditerranée les forêts, souvent situées dans des zones montagneuses fonctionnent comme des « châteaux d'eau » et constituent des zones d'accueil majeures de biodiversité; leur interaction avec l'eau en amont des zones de bassins versants, est donc cruciale.

⁴ Correspond au volume total du prélèvement d'eau dans des aquifères non durables et à la surexploitation des aquifères exprimées en tant que pourcentage du volume total de captage.



Note: Dans le nord, les forêts couvrent actuellement près de 50 millions d'hectares dont 20 à 25 millions d'hectares de forêt typiquement méditerranéenne, auxquels viennent s'ajouter 20 millions d'hectares composés par d'autres surfaces boisées (maquis, garrigue, matorrals). Dans le sud et l'est, les forêts représentent approximativement 13 millions d'hectares et les autres surfaces boisées 15 millions, dont 2/3 se trouvent en Turquie.

Figure 11. Évolution des surfaces forestières (en milliers d'hectares) Source : FAO

Pendant des siècles, les activités humaines telles l'exploitation des bois, le défrichement et le pâturage ont soumis les écosystèmes⁵ naturels méditerranéens à de fortes pressions. L'intensité de telles pratiques a parfois excédé la capacité naturelle de renouvellement des forêts, avec pour conséquence la dégradation de la couverture des terres, l'érosion voire la désertification. Dans des périodes de pression moins forte, la résilience des écosystèmes a donné lieu à une régénération naturelle plus ou moins rapide, et les forêts sont réapparues sur les terres qui avaient auparavant été cultivées ou utilisées pour les pâturages.

La situation sur les deux rives méditerranéennes est actuellement très contrastée (Figure 11). Dans le nord, à la suite d'une utilisation intensive des terres au 18^{ème} et 19^{ème} siècles et la régression qui s'en est suivie, un processus de régénération de la forêt est observé presque partout, du fait de l'abandon progressif des pratiques agricoles et de pâturage sur les surfaces les plus marginales, rendues moins profitables par le développement des conditions du marché agricole. L'augmentation des surfaces boisées a été par ailleurs renforcée par les initiatives de reforestation.

En revanche, la pression exercée par cette surexploitation est encore forte pour les surfaces boisées du sud où les surfaces marginales sont défrichées pour l'agriculture, le surpâturage ou le bois de chauffage. Au fur et à mesure que les peuplements végétaux des massifs subissent une dégradation, la surface des zones boisées naturelles régresse, et bien

⁵ Les écosystèmes des terres naturelles et semi naturelles méditerranéennes qui nous occupent ici sont composés de forêts (territoires où la couverture de la canopée composée de grands arbres dépassent 10%), de différents autres types de terres boisées (formations buissonnantes, matorrals, steppes boisées) et de zones de pâturage naturel (pâturages de montagne, steppes hautes, steppes pré désertiques, steppes à Alfa). Les zones d'agriculture intensive ou encore les écosystèmes aquatiques ne sont pas inclus. Alors que les statistiques nationales fournissent des informations utiles sur les changements dans les forêts, celles concernant les autres types de surfaces boisées et leurs ressources en pâturages sont beaucoup moins spécifiques..

que de nombreuses forêts d'altitude se transforment en formations arbustives (maquis et garrigues), ou en formations plus claires consécutives à une extension des défrichements, elles restent classées statistiquement en tant que « forêts ». Néanmoins, des améliorations, voire des progrès, ont pu être observés au cours de ces dernières années grâce à l'effort de reforestation. La situation demeure intermédiaire dans les pays méditerranéens de l'est.

Les demandes de la société vis-à-vis des forêts ont évolué vers une multifonctionnalité accrue, allant de la production de bois, à l'usage social et/ou aux préoccupations environnementales.

Dans les sociétés rurales méditerranéennes, les surfaces boisées et les parcours ont toujours été cruciaux pour l'économie locale et régionale, fournissant du bois de chauffage, du bois pour la construction et pour les bateaux, de multiples produits pour les activités de chasse et de récolte, des ressources vitales en pâturage. La situation a changé en majeure partie dans le nord, dans le sud cependant ces pratiques continuent de jouer un rôle essentiel, en particulier le bois de chauffage et les pâturages. Néanmoins, en raison d'une croissance ligneuse lente, de productions hétérogènes et de difficultés d'exploitation, l'industrie moderne du bois n'a que très rarement montré de l'intérêt pour les forêts méditerranéennes.

De nouvelles pratiques sont apparues avec l'ère industrielle et urbaine, et aussi bien résidents que touristes ont commencé à utiliser les espaces boisés en tant que paysages, pour leurs loisirs ainsi que pour l'écotourisme et les sports de plein air. Ces activités et services environnementaux, bien souvent non-marchands, prédominent dans le nord et commencent à prendre de l'importance dans le sud, bien que les activités de prélèvement de produits y soient encore prédominantes.

Enfin, la fonction protectrice de ces écosystèmes est bien connue depuis longtemps, mais le développement durable met aujourd'hui l'accent sur leur valeur capitale en tant que producteurs de biens publics au niveau local et planétaire, pour la protection en sols et en eau, la lutte contre l'érosion et la désertification, l'absorption des gaz à effet de serre et la conservation de la biodiversité de la faune et la flore. Ce dernier aspect est d'autant plus important que la région méditerranéenne est, au niveau mondial, une des zones sensibles de biodiversité.

Les méthodes traditionnelles de la gestion forestière sont bien adaptées à la production de bois, si elles respectent la conservation du sol et la régénération des forêts. Néanmoins les nouveaux usages sociaux et les préoccupations actuelles concernant la préservation de la biodiversité et la lutte contre le changement climatique exigent des innovations majeures pour la gestion des forêts.

Le futur des forêts méditerranéennes est menacé par l'augmentation des risques d'incendie induits par la sécheresse.

Les feux de forêts sont fréquents durant l'été et détruisent de vastes surfaces (près de 500.000 ha ont été détruits en 2007, dans les seules régions méditerranéennes du nord). Dans le Nord, le nombre de déclenchements des feux s'accroît lentement, mais le problème majeur reste lié aux grands feux de forêt générateurs de dégâts très importants

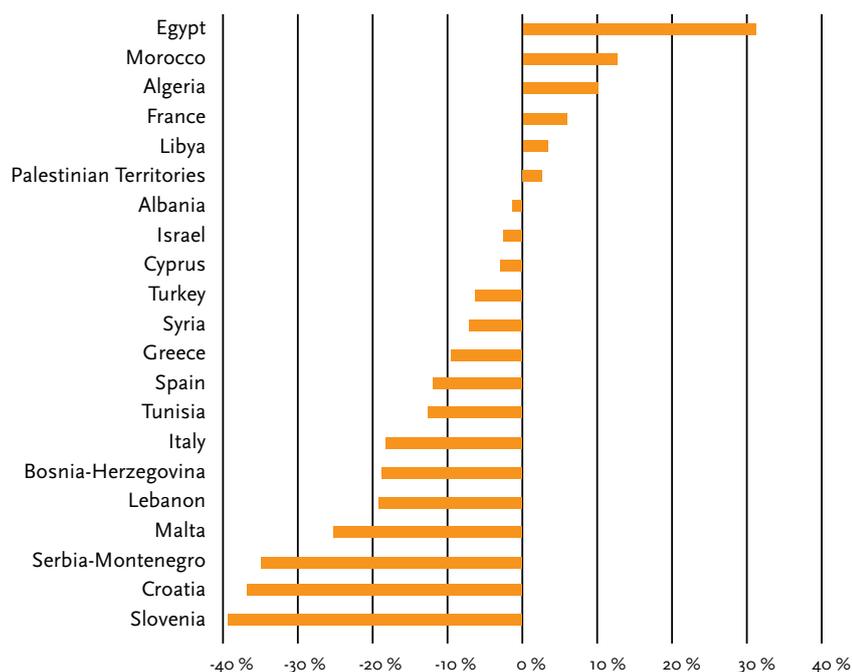


Figure 12. Perte nette des terres arables entre 1980 et 2005 (%) Source: FAO, Plan Bleu computation

en termes de surfaces affectées et de coûts. Les politiques se sont plus focalisées sur l'exclusion du feu que sur sa gestion, ce qui a entraîné l'accumulation du combustible végétal. L'abandon rural a également conduit à une colonisation de la végétation sur de vastes zones uniformes contribuant à l'accroissement du risque de feu. Une autre conséquence de cette accumulation de la biomasse est l'augmentation de la consommation en eau, provoquant une concurrence croissante entre forêts, villes et irrigation. Dans les pays du Sud et de l'Est, les feux sont moins destructifs (61.000 ha en 2005) bien que marqués par de nouveaux déclenchements dans l'Est, avec près de 80.000 ha brûlés en 2007 (Chypre, Slovénie, Croatie, Turquie). Les surfaces boisées et pâturées sont moins propices au déclenchement de feux, car le pâturage permet d'éviter l'embroussaillage et réduit les risques. Cependant, une réduction des surfaces boisées pâturées, pourrait aggraver ces risques. En outre, le changement climatique, responsable de l'accroissement de la durée et gravité des sécheresses, au nord comme au sud, pourrait considérablement augmenter le risque de feu.

Les territoires méditerranéens sont sujets à des processus de désertification lents mais continus, liés à une dégradation marquée du sol, elle-même due à la gestion inadéquate des terres de parcours ou d'agriculture irriguée et pluviale spécialement dans le sud et l'est de la Méditerranée.

Les estimations sur l'amplitude et le degré d'irréversibilité de la désertification sont souvent contradictoires et hautement controversées. Néanmoins, la gravité de ce phénomène

est aujourd'hui largement reconnue pour cette région. Selon des estimations datant du début des années 1990, 80% des terres arides, semi-arides ou sèches sont soumises à la désertification⁶ dans le sud et l'est. Dans ces zones, l'impact le plus important porte sur les pâturages et les terres arables d'agriculture pluviale, ainsi que sur les terres irriguées, en raison principalement de la salinisation. La désertification a également un impact sur 2/3 des terres sèches ou arides de l'Europe méditerranéenne (Italie, Grèce et Italie).

Bien que les données nationales quant au degré de dégradation du sol, restent fragmentaires et relativement peu fiables, elles confirment néanmoins la gravité et l'amplitude de ce phénomène, en partie causé par l'érosion hydrique et éolienne. Les principales causes de la dégradation du sol sont la déforestation, les pratiques agricoles intensives, le surpâturage, la surexploitation de la biomasse, les activités industrielles et enfin les travaux publics.

La Figure 5 montre que dans la plupart des pays méditerranéens, les terres arables ont diminué au cours des dernières 20 années, du fait de l'érosion, de la perte de fertilité, de l'urbanisation, etc. Les valeurs exprimées sont nettes et masquent donc les phénomènes opposés. Dans le cas de l'Egypte, l'image globalement positive masque, d'une part les surfaces reconquises par le désert, et d'autre part la perte des terres dites anciennes due à l'urbanisation, la désertification et la salinisation. Dans la région méditerranéenne, les surfaces arables per capita ont donc diminué de 50% au cours de ces dernières 40 années.

Le rôle du sol est fondamental pour réguler les ruissellements, protéger la biodiversité, structurer les paysages et absorber le CO₂. La qualité du sol et les questions environnementales qui y sont liées dépendent de la manière dont le sol est utilisé. En Italie, par exemple, la réduction progressive du total des zones cultivées au cours des dernières années (-16.5% de 1982 à 2003), a été essentiellement limitée aux prairies et parcours (-26%). Près des centres urbains (en particulier dans les plaines zones côtières et vallées), l'agriculture est au contraire soumise aux très fortes pressions des développements immobiliers, qui ont conduit au remplacement des terres les plus fertiles au profit d'usages non agricoles entraînant des conséquences néfastes et souvent irréversibles.

Dans de nombreuses régions agricoles, et en particulier dans les zones côtières où l'agriculture est spécialisée, les risques de pollution et contamination des sols sont beaucoup plus élevés. Les excès en phosphore libérés par les engrais organiques et minéraux sont responsables de l'altération de l'équilibre structurel et organique des sols.

Les risques d'érosion du sol par l'eau, et du fait de la réduction de la teneur en matière organique des sols, sont les plus élevés en zone montagneuse, sauf sous forêt. En Italie, la perte moyenne en sol est estimée à plus de 3 tonnes par hectare et par an, et peut, dans certains cas, comme dans celui des régions du sud, être encore plus importante, voire critique. Enfin, les risques d'érosion hydrique et de feux ont augmenté du fait de l'arrêt des activités pastorales et sylvicoles et de la gestion non durable des forêts.

⁶ La "désertification" doit être comprise en tant que « dégradation de la terre en zones subhumides, semi-arides et arides dû à différents facteurs incluant les variations du climat et les activités humaines. ». La désertification est donc un processus qui conduit à la perte graduelle de la productivité des sols et à la réduction de leur couverture, attribuable essentiellement aux activités humaines dans les zones sèches. Comme la couverture des sols est de moins en moins grande, ils sont de plus en plus sensibles à l'érosion par l'eau et le vent conduisant à une destruction graduelle. Les conséquences de ce processus, la baisse de la fertilité et la dégradation des cycles de l'eau, ont des effets dévastateurs sur la végétation et la production.

Des politiques plus rigoureuses et des pratiques de gestion durable pour les ressources en eau, les forêts et les surfaces boisées, et pour la préservation du sol, sont nécessaires.

Les régions méditerranéennes sont très vulnérables du fait de leurs handicaps, de la spécificité de leurs paysages et de leur climat, et de la faiblesse de leurs ressources en eau et en terres, inégalement distribuées dans le Bassin. Les nombreuses civilisations ont travaillé sans relâche à la domestication de ces ressources et à la conquête des terres. Les deux rives de la Méditerranée sont aujourd'hui confrontées à des difficultés ayant trait à la sauvegarde et au renouvellement des ressources naturelles (qualitativement et quantitativement), et à la croissance démographique, malgré les mesures mises en œuvre pour optimiser les pratiques de gestion et limiter leur impact sur l'environnement. La croissance démographique et les impacts du changement climatique appellent à des politiques plus rigoureuses et à des pratiques de gestion durable des ressources en eau, des forêts et surfaces boisées, ainsi que de préservation des sols.

Pour en savoir plus

- Benoît, G. and Comeau, A. 2005. A sustainable future for the Mediterranean: the Blue Plan's environment and development outlook. London, Earthscan Publishers. www.planbleu.org
- Blinda, M. and Thivet, G. 2009. Ressources et demandes en eau en Méditerranée, situation et perspectives. In: Science et changements planétaires Sécheresse vol. 20(1). Montrouge, John Libbey Eurotext. http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/agro_biotech/sec/e-docs/00/04/49/C6/article.phtml
- Hervieu, B. and Thibault, H.L. 2009. Mediterra 2009: Rethinking rural development in the Mediterranean. Paris, Presses de Sciences Po; CIHEAM.
- Thibault, H.L. 2009. State of the Environment and Development in the Mediterranean. Athens, UNEP-MAP-Plan Bleu. www.planbleu.org

Les zones forestières influencent-elles le régime des pluies ?

Giorgio Matteucci, Jerry Vanclay et Javier Martin-Vide

Le rôle des forêts et de leur influence sur les conditions microclimatiques, la régulation des flux d'eau, la disponibilité en eau à l'aval et la prévention de l'érosion, est généralement bien établi tant à l'échelle régionale qu'à l'échelle des paysages. Les populations vivant dans les zones où la couverture forestière est importante ou partielle sont convaincues que les forêts influencent le régime des précipitations locales. A l'échelle planétaire, les précipitations annuelles sur les terres émergées sont approximativement de 110.000 km^3 , ou $110 \times 10^{15} \text{ kg}$ d'eau, alors que les processus d'évaporation et de transpiration génèrent environ $70 \times 10^{15} \text{ kg}$ d'eau. Les plantes terrestres ajoutent annuellement $32 \times 10^{15} \text{ kg}$ de vapeur d'eau à l'atmosphère, approximativement deux fois le contenu en eau de l'atmosphère. Cet énorme flux de vapeur d'eau passe au travers de microscopiques pores à la surface des feuilles (stomates), et constitue un service essentiel fourni par l'écosystème, contribuant ainsi au cycle planétaire de l'eau et à la régulation du climat par la formation des nuages (voir également sections 1.1, 1.4 et 1.5).

Les forêts alimentent donc le cycle hydrologique grâce à l'évapotranspiration, qui refroidit le climat au travers de rétroactions avec nuages et précipitations. Des simulations par modélisation à grande échelle ont régulièrement montré que la régulation bio-géophysique du climat est faite par la végétation au travers de l'albédo (réflectivité), des flux turbulents et des effets sur le cycle hydrologique.

La déforestation tropicale à grande échelle a un impact sur les pluies et peut créer un climat plus chaud et plus sec.

Lorsque l'on étudie le rôle joué par les forêts sur le régime des pluies, le recyclage de l'eau par transpiration est un processus crucial, voire même le plus important. En Amazonie, 25% à 30% de la pluviométrie est issue du recyclage des pluies. A cet égard, des études fondées sur la modélisation et l'observation, indiquent que la déforestation tropicale au travers des changements de l'évapotranspiration, de l'albédo et de la rugosité aérodynamique (favorisant les mouvements turbulents d'humidité et d'air) a, à des degrés différents, un impact sur les précipitations, et que la transformation à grande échelle de la forêt en pâturage crée un climat plus chaud et plus sec. Néanmoins, les interactions forêt/atmosphère sont complexes, et il est même possible qu'une déforestation à petite échelle résultant en un couvert forestier hétérogène, puisse à un moment donné, générer des circulations à méso-échelle augmentant ainsi les nuages convectifs et les précipitations.

Les forêts « brouillards » de montagne captent réellement l'eau des nuages mus par le vent ou par convection.

Les forêts-brouillards de montagne sont l'un des écosystèmes où le rôle actif des forêts sur le cycle hydrologique est le plus visible. En plus des précipitations normales, ces forêts récupèrent directement l'eau des nuages poussés par le vent (phénomène advectif) ou s'élevant par convection. Ces écosystèmes sont fréquents dans les chaînes intérieures de montagne, particulièrement - mais pas exclusivement - sous les tropiques. Des forêts de montagne sont présentes dans les chaînes côtières de pays méditerranéens et dans quelques petites îles océaniques. L'interception de l'eau des nuages et du brouillard affecte, de façon significative, la disponibilité en eau pour la forêt mais également plus en aval. A cet égard, la déforestation des forêts de montagne peut sérieusement influencer le cycle hydrologique du paysage environnant, car aucune autre végétation ne possède la structure adéquate pour intercepter l'humidité des nuages et du brouillard. Dans ces conditions, la reforestation des pentes et des sommets de montagne peut rétablir ce cycle hydrologique particulier. D'autre part, la modélisation montre que la déforestation des zones de basse altitude peut provoquer une élévation des nuages orographiques conduisant à des changements dans la capture de l'eau des nuages par la végétation montagnarde.

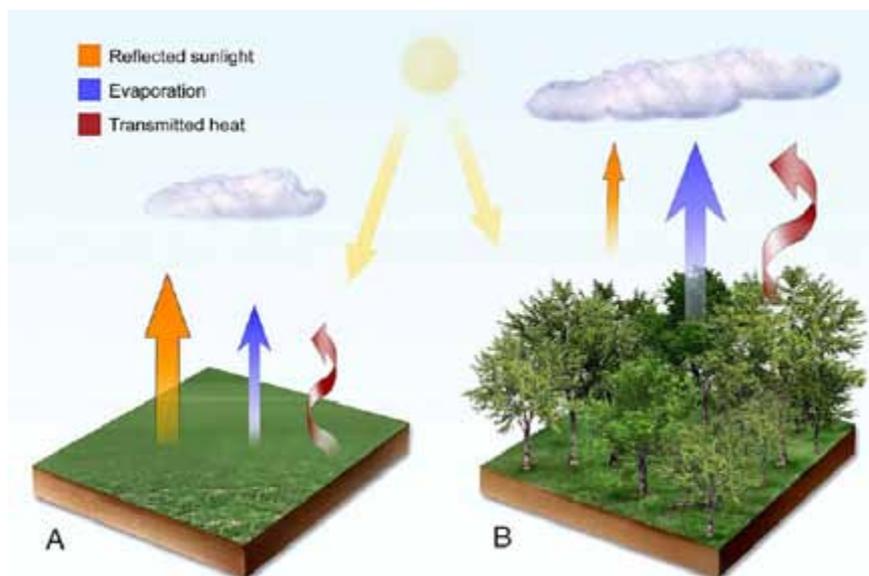


Figure 13. « Exemples de différents facteurs biophysiques pour une prairie ou terre arable (A) et une forêt (B). Les prairies et terres arables ont une plus réflectivité plus élevée (albédo) que celle de la forêt, et donc reflètent plus intensément le rayonnement solaire, refroidissant les températures de l'air en surface relativement plus. En revanche, la forêt évapore souvent plus d'eau et transmet plus de chaleur à l'atmosphère (respectivement chaleur latente et sensible), la refroidissant localement, par comparaison avec des prairies ou des terres arables non irriguées. Une plus grande quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère peut conduire à un plus grand nombre de nuages à une hauteur plus élevée, ainsi qu'à un accroissement des précipitations convectives. La forêt a, en outre, un couvert (rugosité de surface) inégal qui accroît le mélange et l'ascension de l'air » (Jackson et al, 2008).

Des résultats convergents, découlant d'observations et de modélisation, suggèrent que les forêts affectent les schémas climatologiques et météorologiques locaux au travers de changements dans l'albédo, l'indice foliaire (LAI), la structure du couvert (rugosité) et l'évapotranspiration.

Dans les climats tempérés, les effets du couvert végétal sur les précipitations et autres paramètres biophysiques sont plus incertains. Par exemple, durant les saisons chaudes, dans les zones où les pluies convectives sont courantes, on peut s'attendre à des changements dans les pluies en fonction des changements de la couverture végétale, du fait que les flux de surface, d'humidité, de chaleur et de transpiration changent également. Cependant les effets sur les précipitations de saison froide sont beaucoup moins clairs. Un certain nombre d'études sur les modèles climatiques suggère que les forêts tempérées refroidissent l'air, comparativement aux prairies et aux terres arables tandis que d'autres études indiquent le contraire. Le refroidissement local par la forêt est induit par une évapotranspiration plus importante qui contribue à l'accroissement des précipitations et du refroidissement dans les zones voisines. Dans d'autres régions où la disponibilité en eau est relativement rare, comme dans c'est le cas du sud ouest des Etats Unis, les plantations forestières peuvent réchauffer le climat régional, en absorbant davantage les radiations solaires, (baisse de l'albédo) sans qu'il y ait une augmentation substantielle d'évapotranspiration (voir section 2.2).

Les effets climatiques de l'usage des terres et du couvert végétal sur le long terme ont été simulés aux Etats Unis pour trois types de couvert végétal: forêts primaires (= vierges) (1700), déforestation maximum (1910) et conditions actuelles (1990). Les modélisateurs ont trouvé que les changements dans les modes d'utilisation des terres et de couverture végétale peuvent conduire à un réchauffement/ refroidissement de plusieurs degrés, accompagné de changements significatifs dans les modèles des précipitations. Il est néanmoins difficile de détecter dans les régions tempérées l'effet des changements de la couverture forestière sur les précipitations, du fait de la fréquence naturellement élevée, des systèmes météorologiques (par exemple, dépressions frontales) et des modèles de précipitations à grande échelle, de la variabilité des paysages régionaux, des changements non linéaires dans le couvert forestier et des effets liés de l'urbanisation, de la charge en polluant et de la circulation régionale.



Figure 14. Pompe biotique d'humidité atmosphérique: les flux de transpiration régulés par les forêts naturelles dépassent les flux d'évaporation océanique jusqu'à ce que les flux d'air humide de l'océan vers le continent deviennent suffisamment importants pour compenser les pertes d'eau par ruissellement et écoulement du bassin versant tout entier vers l'océan (Sheil et Murdiyarso, 2009).

Les changements de couvert végétal peuvent déclencher des changements hydrologiques également à l'échelle locale. Au Sahel par exemple, une sécheresse probablement causée par des changements dans la circulation de l'air venant de l'océan et/ou d'usage des sols, a entraîné une réduction importante de la couverture végétale. En conséquence, et du fait de la régression de la végétation, l'albédo a augmenté, l'évapotranspiration a diminué, et on a assisté à une réduction de la convection et des pluies de mousson qui y sont associées. Les rétroactions positives des écosystèmes contribuent donc apparemment à l'importance et à l'extension de la sécheresse. La désertification est largement répandue dans les régions arides du monde, à cause des impacts climatiques et du changement dans l'utilisation des terres. Dans quelle mesure ces influences des pratiques humaines contribuent-elles à accroître la sécheresse ? A contrario, le reboisement peut-il permettre une évolution vers des sécheresses continues ? L'importance des effets rétroactifs des écosystèmes sur le cycle hydrologique suggère que des options de gestion peuvent être mises en œuvre qui pourraient potentiellement réduire la probabilité de sécheresses prolongées (voir également section 5.3).

La transformation des prairies ou des terres arables en forêts entraîne une diminution de l'albédo et une augmentation de l'indice foliaire (*LAI*)*, de la rugosité du couvert et de la profondeur d'enracinement. Les changements de ces paramètres peuvent modifier les flux d'énergie de surface qui, à leur tour, influencent la température et l'humidité. A cet égard, les mesures et les études de modélisation aboutissent au même résultat : le boisement ou le reboisement diminuent généralement la température de surface et augmentent l'évapotranspiration, alors que les impacts sur les précipitations ne sont pas aussi nets, car dépendant en effet de la localisation géographique, de la taille de la surface plantée, et d'autres caractéristiques régionales (voir section 2.2). Des modélisations réalisées au Sahel montrent que les précipitations actuelles augmentent pour un scénario de boisement/reboisement par rapport à la couverture végétale actuelle, du fait des changements de structure de la végétation, des modèles d'humidité et de l'évapotranspiration. Dans le sud ouest de l'Australie, le changement du couvert arboré en prairies et terres arables au cours des 250 dernières années pourrait expliquer en partie la diminution des précipitations hivernales; toutefois, une reforestation à grande échelle pourrait provoquer, sur le long terme, un accroissement des précipitations (voir sections 2.2 et 5.3). A contrario, un exercice couplant un scénario de boisement à un modèle climatique aux Etats Unis, a montré que les changements des précipitations estivales étaient marginaux et dépendaient de la situation géographique.

Plusieurs facteurs influençant la façon dont l'eau est utilisée par les plantations forestières peuvent être contrôlés par une gestion adéquate. Il semble possible en effet, au travers de l'aménagement et de la gestion des plantations forestières, d'obtenir une plus grande efficacité de l'utilisation de l'eau. La conception et la disposition des plantations (haies, pare-feu, profilage aérodynamique, utilisation d'espèces en mélange) peuvent modifier le couplage atmosphérique des plantations forestières, et donc avoir un impact sur leur consommation en eau. En outre, une gestion adéquate des forêts qu'elles soient naturelles ou plantées, devrait pouvoir influencer de manière pertinente sur l'eau, qui pourrait alors être disponible en aval pour l'agriculture ou les besoins publics (voir sections 4.1, 4.3 et 4.4).

L'ensemble des preuves fournies par les observations et les études de modélisation, montre donc que les forêts affectent les schémas climatologiques et météorologiques par les changements de l'albédo, d'indice foliaire, de la structure du couvert (rugosité) et de l'évapotranspiration.

Une découverte récente, appelée théorie de la « pompe biotique » active, suggère que sur des surfaces dont le couvert forestier naturel est continu et étendu, l'humidité atmosphérique est transportée à l'intérieur des terres depuis l'océan vers les forêts.

L'influence des forêts sur les précipitations est-elle un processus « actif » ? Récemment, analysant les données de végétation le long de transects terrestres du Programme International Géosphère- Biosphère (PIGB) et des champs des précipitations, des chercheurs russes ont conclu que les précipitations sur les surfaces couvertes par de vastes forêts naturelles (telles que celles d'Amazonie ou du Bassin de l'Ienisseï en Sibérie et ou encore d'Afrique équatoriale) ne diminuent pas en fonction de l'augmentation de la distance à l'océan, alors que ce n'est pas le cas pour les surfaces non forestières. Ils ont alors émis l'hypothèse de l'existence d'une « pompe biotique » active qui transporterait l'humidité atmosphérique à l'intérieur des terres depuis l'océan vers la forêt, et qui serait régulée par la continuité du couvert forestier (voir figure 14). Du fait de leurs caractéristiques décrites ci-dessus, les forêts naturelles maintiennent des flux d'évaporation élevés, qui entretiennent le mouvement ascendant de l'air au dessus de la forêt et « aspirent » l'air humide venant de l'océan. Les auteurs de cette étude affirment que le remplacement du couvert de la forêt naturelle par un autre type de couverture végétale peut conduire à une importante réduction de la moyenne des précipitations continentales. Selon eux, il est donc nécessaire de restaurer des forêts naturelles et durables à l'échelle des continents si l'on veut assurer sur le long terme la stabilité du cycle hydrologique terrestre.

Toutefois, la « force évaporatoire » sur laquelle se fonde la théorie de la « pompe biotique » a été critiquée par des micro-météorologues et hydrologues, alléguant qu'elle n'est pas fondée sur des principes physiques de base. Néanmoins d'autres chercheurs ont souligné la pertinence de cette théorie qui propose de nouvelles lignes de recherche en écologie du paysage, hydrologie, restauration de la forêt, paléoclimats; si cette théorie est valide, elle transformera notre vision de la perte de couvert forestier, du changement climatique, de l'hydrologie et des services environnementaux.

Nous devons combler les lacunes et imprécisions dans la compréhension et la modélisation des réponses climatiques – y compris les régimes des précipitations - au changement de la couverture végétale.

Même si la théorie des forêts en tant que pompe biotique n'a pas jusqu'à présent reçu une validation suffisante, devons-nous écarter les questions soulevées par les auteurs de cette théorie ? Non, en aucune façon ! Tous les chercheurs travaillant sur le rôle de la forêt et de la végétation sur le climat sont d'accord sur le fait que l'on doit réduire les lacunes et imprécisions quant à la modélisation des réponses climatiques – y compris le régime des précipitations - au changement de la couverture forestière. Nous devons souligner à ce sujet que les changements d'utilisation des terres/changement du couvert forestier ne sont toujours pas reconnus comme ayant une influence sur les précipitations, dans les évaluations climatiques internationales. Néanmoins, leurs rôles sont au moins aussi importants que celui des effets radiatifs des gaz à effet de serre émis

par l'homme: en effet, les forêts peuvent amplifier ou diminuer le changement climatique lié aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre via l'albédo, l'évapotranspiration, le cycle du carbone et d'autres processus (voir également sections 5.1, 5.2 et 5.5).

« Les conséquences biophysiques du changement de couvert forestier et d'autres effets collatéraux sont importantes à l'échelle régionale, et peuvent parfois réduire, voire même annuler, les bénéfices de la séquestration du carbone. Les interactions biophysiques devraient donc être prises en compte dans la stratégie de mitigation du climat au moins de deux façons différentes : concevoir des projets de séquestration du carbone de façon à en tirer les meilleurs bénéfices pour le climat, et comparer les coûts et bénéfices de la séquestration terrestre du carbone avec ceux des activités d'atténuation du changement climatique. » (Jackson et. al, 2008).

Pour en savoir plus

- Andréassian, V. 2004. Water and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology* 291: 1–27.
- Bonan, G.B. 2008. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science* 320: 1444–1449 DOI: 10.1126/science.1155121
- Hamilton, L.S. (ed.) 2008. Forests and water. FAO Forestry Paper n. 155. Rome, Italy. Pp.1–78.
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G. and Li, B.-L. 2009. Precipitation on land versus distance from the ocean: Evidence for a forest pump of atmospheric moisture. *Ecological complexity* 6: 302–307.
- Meesters, A.G.C.A., Dolman, A.J. and Bruijnzeel, L.A. 2009. Comment on “Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land” by Makarieva, A.M. and Gorshkov, V.G. 2007. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11: 1013–1033. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13: 1299–1305.
- Pielke R.A., Adegoke J., Beltran-Przekurat A., Hiemstra C.A., Lin J., Nair U.S., Niyogi D. And Nobis T.E. 2007. An overview of regional land-use and land-cover impacts on rainfall. *Tellus* 59B: 587–601.
- Sheil D and Murdiyarso D. 2009. How forests attract rain: an examination of a new hypothesis. *Bioscience* 59: 341–347.

Les flux d'eau dans les forêts¹

Jorge S. David, Juan Bellot, Yves Birot et Teresa S. David

Les flux d'entrée et de sortie d'eau des forêts peuvent être observés à des échelles spatiales et temporelles différentes. Au niveau du bassin versant (première échelle spatiale à prendre en compte), ils sont généralement faciles à identifier et suivent une équation simple de bilan de masse en eau.

Le bilan simplifié de masse en eau (bilan en eau) des bassins versants forestiers peut s'écrire comme suit : $P = E + Q + IF + \Delta S$ (1) où P est la pluviométrie, E l'évapotranspiration, Q est le débit du cours d'eau à l'émissaire, IF l'infiltration profonde et ΔS la variation de la réserve (sol et eaux souterraines). L'infiltration profonde (IF) constitue généralement une faible sortie d'eau, très difficile à mesurer et à estimer; dans le cas d'une géologie imperméable, sa valeur est nulle (voir Figure 15 et Chapitre 2). ΔS est le plus souvent, négligeable sur une base annuelle, ce qui simplifie l'équation (1) pour cette échelle temporelle. P est le flux d'entrée d'eau dans le bassin versant, et E et Q sont les principaux flux de sortie. Ceci signifie que lorsque la pluie tombe dans le bassin versant, une partie de celle-ci retourne vers l'atmosphère par évaporation, et la fraction restante de l'eau s'écoule hors du bassin versant dans le lit du cours d'eau. Comme le montre l'équation (1), si l'entrée est plus importante que les sorties, la variation de la réserve est positive (recharge). Si l'entrée est plus faible que les sorties alors la variation de la réserve est négative (diminution). L'équation du bilan en eau (1) peut être appliquée à n'importe quelle échelle d'intervalle temporel. Pour simplifier notre approche, l'analyse débutera à une échelle annuelle, la plus simple, et continuera à des échelles de temps plus fines, pour permettre d'identifier des processus qui, sur une base annuelle, sont difficiles à évaluer et à interpréter. Les éléments principaux de l'équation du bilan de masse en eau (1) seront analysés de façon plus approfondie ci-dessous.

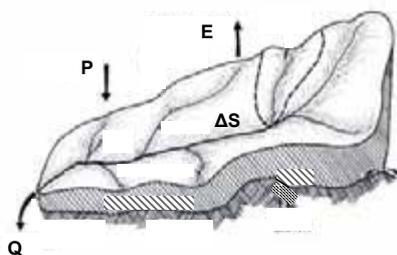


Figure 15. Les flux du bilan en eau au niveau du bassin versant dans le cas d'une géologie imperméable :

P : Précipitations - E : Évapotranspiration

Q : Écoulement de l'émissaire - ΔS :
Variation de stock

¹ Voir également les sections 1.5, 2.1, 2.2, et 4.1

Les éléments principaux de l'équation du bilan de masse en eau (1) seront analysés de façon plus approfondie ci-dessous.

Les précipitations sont généralement le seul flux d'entrée d'eau dans le bassin versant. Dans les climats de type méditerranéen, les précipitations ont une variabilité interannuelle élevée et une forte saisonnalité, avec des pluies de forte intensité pendant la saison pluvieuse.

Les pluies sont concentrées principalement en automne, en hiver et au début du printemps alors que la fin du printemps et l'été sont généralement chauds et secs (sécheresse estivale saisonnière). La sévérité des sécheresses estivales saisonnières dans la région méditerranéenne a néanmoins une variabilité interannuelle qui est liée à l'irrégularité de la distribution temporelle des pluies. Les scénarios du changement climatique pour la région méditerranéenne prévoient une aggravation au niveau de la durée et de la sévérité de la sécheresse estivale ainsi que des périodes continues de sécheresse.

Lorsque la pluie tombe sur une surface végétalisée, une partie est interceptée par le couvert et évaporée directement dans l'atmosphère (perte par interception,) et le restant atteint le sol, soit à travers les trouées du couvert (égouttement), soit en s'écoulant le long des principaux troncs (écoulement sur le tronc) (voir Figure 16). L'ampleur de la perte par interception et par évaporation dépend de la distribution, de la durée et de l'intensité de la pluie, de la capacité de stockage du couvert (généralement de ~2-5 mm) et du taux d'évaporation du couvert humide. Une fois la capacité de stockage du couvert saturée, l'eau ruisselle et coule au sol. De fréquentes et légères précipitations mouillant le couvert offriront une plus grande chance d'avoir des pertes par interception élevées. En revanche, un régime de précipitations dominé par de fortes pluies au cours de quelques orages violents fait que le couvert n'est seulement que rarement mouillé ; ainsi, presque toute l'eau de pluie d'orage passe à travers le couvert pour atteindre le sol.

Encadré 2. Définitions importantes

- **L'évapotranspiration** d'un bassin versant forestier est la somme de tous les flux d'évaporation d'eau sortants du bassin. Les flux d'évaporation issus de la surface d'échange que représente la strate forestière, et qui constituent l'eau verte, peuvent suivre différentes voies : perte par interception, transpiration et évaporation du sol, chacune d'elles étant une composante de l'évapotranspiration totale.
- **La perte par interception** est l'évaporation directe des surfaces d'eau libre retenues sur les feuilles pendant et immédiatement après les épisodes pluvieux lorsque le couvert est mouillé. Pour les écosystèmes forestiers méditerranéens, elle peut atteindre jusqu'à 25% de l'évapotranspiration annuelle.
- **La transpiration** est la voie principale des flux d'eau verte dans les forêts méditerranéennes. L'eau est prélevée dans le sol ou l'eau souterraine par les racines, et transportée par le xylème des tiges et des branches pour être finalement réémise dans l'atmosphère à travers les stomates des feuilles (voir Figure 17). Dans les écosystèmes méditerranéens, elle peut atteindre 75% de l'évapotranspiration totale.
- **L'évaporation du sol** est l'évaporation directe de l'eau depuis la surface et les horizons supérieurs du sol vers l'atmosphère.

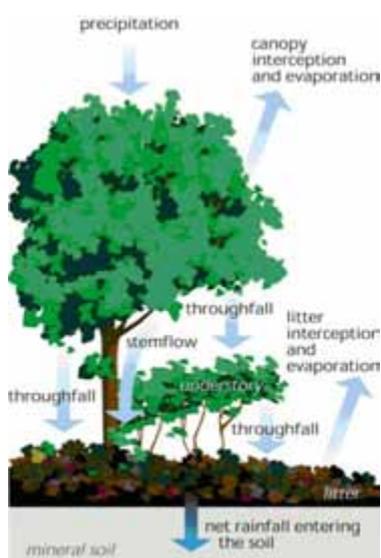


Figure 16. Processus d'interception de la pluie. Source : www.fairfaxcounty.gov/.../urbanforest.htm

La radiation étant faible pendant les pluies, le taux d'évaporation se trouve, de ce fait, principalement déterminé par la rugosité aérodynamique de la surface (conductance aérodynamique). Comme le couvert forestier (éléments hauts et irréguliers) est aérodynamiquement plus rugueux que celui de la végétation basse (prairie), et génère des tourbillons turbulents essentiels au transport vertical de l'eau, les taux d'évaporation des couverts humides sont de 3 à 5 fois plus élevés pour les forêts que pour les prairies, pour des conditions météorologiques identiques.

La transpiration des forêts méditerranéennes peut atteindre 75% de l'évapotranspiration réelle totale, tandis que les pertes par interception représentent environ 25%.

Dans une perspective mondiale, les pertes d'interception sont plus élevées dans les climats où de petits orages sont fréquents (climats tempérés par exemple) que dans les climats où les orages sont moins nombreux mais plus violents (climats méditerranéens). La perte en eau par interception des forêts peut, à l'échelle mondiale varier de 8 à 60% des précipitations et de 25 à 75% de l'évapotranspiration totale des forêts. Les valeurs citées pour les forêts méditerranéennes se situent dans la gamme la plus basse de ces intervalles.

Bien que les déterminants atmosphériques de la transpiration et des pertes d'interception soient les mêmes (radiation et déficit de la pression de vapeur), la transpiration est un processus contrôlé physiologiquement (ouverture stomatique), tandis que la perte par interception est un processus d'évaporation à déterminisme strictement physique.

Du fait des caractéristiques du climat méditerranéen (faible fréquence des précipitations), la transpiration est nettement plus élevée que les pertes par interception, dans un bilan en eau à long terme des forêts méditerranéennes. Les valeurs rapportées dans la littérature scientifique montrent que sur une base annuelle, la transpiration des forêts méditerranéennes peut atteindre approximativement $\frac{3}{4}$ de l'évaporation totale de la forêt.

L'alimentation en eau du flux de transpiration repose entièrement sur l'eau infiltrée, stockée en surface et en profondeur dans les sols, à portée des racines. Les espèces forestières adaptées au climat méditerranéen doivent survivre à la sécheresse estivale saisonnière. Pour ce faire, leur système racinaire doit être bien développé, horizontalement et en profondeur, et apte à exploiter un grand réservoir d'eau stockée. Les espèces méditerranéennes sempervirentes réussissent à survivre à la sécheresse estivale par des stratégies, soit de tolérance à la sécheresse (fermeture stomatique et chute des feuilles), soit d'évitement de la sécheresse (enracinement profond) (voir section 3.3). Lorsque les nappes phréatiques sont peu profondes, les racines profondes peuvent directement prélever l'eau de ces réservoirs souterrains. Ces caractères

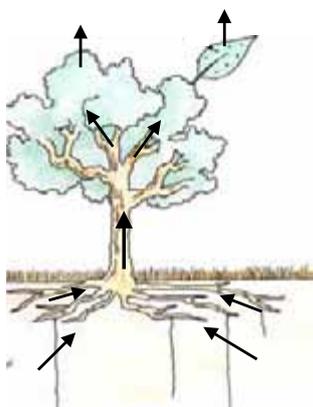


Figure 17. Le processus de transpiration : l'eau est absorbée par les racines, suit une voie ascendante dans le xylème de l'aubier et est réémise par les stomates des feuilles.

Encadré 3. Modèles d'évaporation du sol dans les zones arides

Les études sur l'humidité du sol et les échanges gazeux, menées pour des écosystèmes semi-arides dans le sud de l'Espagne et en Israël, montrent que l'évaporation du sol peut être dans certains cas, beaucoup plus élevée que ce que l'on pensait. La confirmation en a été apportée par une étude récente réalisée en Israël sur une forêt claire de pin en condition semi-aride, où l'évaporation du sol a été mesurée grâce à des chambres d'échange gazeux : les taux d'évaporation directe étaient beaucoup plus élevés pour les sols exposés au soleil que pour les sols ombragés. L'évaporation annuelle du sol était d'approximativement 36% précipitations incidentes. Ce taux élevé d'évaporation a été attribué au régime des précipitations locales, caractérisé par de petites pluies qui re-mouillaient fréquemment la partie supérieure exposée du sol.

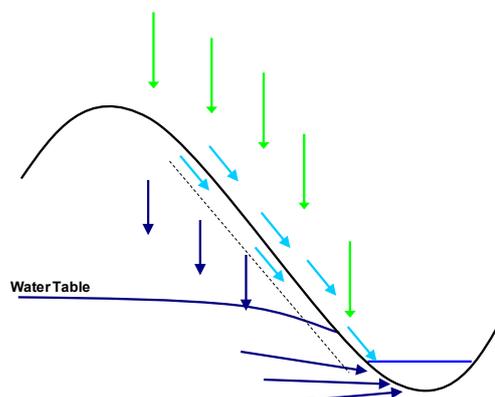
sont courants pour les arbres des environnements semi-arides. La transpiration à long terme des forêts est toujours plus élevée que celle des formations arbustives buissonnantes ou des plantes herbacées, du fait de leur système racinaire plus développé et de la plus grande rugosité de leur couvert.

La transpiration et la perte par interception des forêts dépendent toutes deux largement de l'*indice foliaire (LAI)** (le ratio entre la somme de la surface supérieure de toutes les feuilles des arbres et la surface du sol d'une parcelle de forêt donnée) et donc de la densité du peuplement. Les forêts à faible densité (qui peut être une autre forme d'adaptation à la sécheresse) ont une transpiration et perte par interception plus faibles que celles à forte densité.

L'évaporation directe des sols humides peu profonds est fréquemment considérée comme négligeable pour les surfaces végétalisées (forêts et surfaces arbustives buissonnantes ou prairies). Cette hypothèse repose sur deux raisons principales : (1) le couvert végétal protège la surface du sol des déterminants atmosphériques de l'évaporation (radiation et vent); (2) la profondeur de l'humidité du sol est faible. Néanmoins, il y a des exceptions dans des conditions arides (voir explications dans l'encadré 3).

En général, l'évaporation directe des sols peut probablement être considérée comme négligeable, pour la plupart des zones forestières, sauf pour certaines forêts ouvertes en conditions semi-arides, soumises à de petites et fréquentes pluies.

Figure 18. Les processus de génération de l'écoulement
Les flèches vertes indiquent la pluie ; les flèches bleu clair l'écoulement à temps de réponse rapide (écoulement surfacique et sub-surfacique) et les flèches bleu foncé l'écoulement lent à temps de réponse différé (drainage profond suivi d'écoulement souterrain).



Bien que n'étant qu'une petite composante du bilan en eau annuel des bassins versants méditerranéens, l'écoulement d'eau à l'exutoire du bassin, c'est-à-dire l'eau bleue, joue un rôle capital dans l'alimentation en eau en aval des populations, de l'industrie et de l'agriculture irriguée.

Outre l'évapotranspiration, l'écoulement du cours d'eau issu du bassin versant est la principale autre sortie qui doit être prise en compte pour les bassins versants forestiers (voir équation (1)). Dans les conditions climatiques méditerranéennes, la hauteur de pluie annuelle est généralement plus faible que la demande évaporative atmosphérique (fréquemment estimée par l'évapotranspiration potentielle, ETP). Dans ces circonstances, l'écoulement du cours d'eau devrait être très faible, comparé à l'évaporation annuelle totale. Ce fait est confirmé par les données collectées tant à l'échelle des bassins versants que des parcelles, qui montrent que l'écoulement annuel du cours d'eau représente normalement moins de 5% des précipitations pour les zones forestières. Dans les zones plus sèches et/ou lors d'années plus sèches, l'écoulement annuel du cours d'eau peut être nul. Cela peut être également valable pour d'autres types de végétation car l'évapotranspiration potentielle annuelle dans la région méditerranéenne est de toutes façons plus élevée que les précipitations annuelles.

Si les précipitations annuelles étaient réparties de façon égale dans le temps, il n'y aurait absolument aucun écoulement des cours d'eau issus des bassins versants méditerranéens, car le bilan annuel en eau est toujours négatif ($P < ETP$). Pour comprendre les raisons fondamentales de l'apparition d'un certain degré d'écoulement des cours d'eau, il convient de considérer des échelles de temps plus courtes, au cours desquelles le bilan de l'eau est temporairement positif ($P > ETP$), comme c'est le cas en saison pluvieuse pour la région méditerranéenne. Durant cette période il y a généralement une entrée



Figure 19. Tour à flux pour mesurer les échanges gazeux (vapeur d'eau, CO_2) entre une forêt de *Pinus pinaster* et l'atmosphère au Portugal. Photo : J. Soares David.

nette d'eau dans le sol et, lorsque la réserve en eau du sol est saturée, l'eau percole plus profondément et recharge les aquifères souterrains. Il faut compter en général quelques mois entre la recharge du sol et celle de l'aquifère : la recharge du sol commence au début des pluies d'automne alors que celle des aquifères a lieu plus tard, pendant l'hiver. L'eau stockée dans les réservoirs souterrains peut être utilisée au printemps et à l'été suivants, soit pour approvisionner les racines profondes des arbres (si l'aquifère est peu profond), soit pour migrer lentement vers le lit du cours d'eau principal (si la géologie est imperméable), soit rester stockée, ou encore migrer plus en profondeur hors des limites du bassin versant (si la roche mère est perméable et l'aquifère, profond). Le drainage vers les nappes souterraines (voir Figure 18) et certains écoulements sub-surface lents sont les raisons les plus classiques pour expliquer que l'écoulement total comporte un élément à temps de réponse différée, pouvant maintenir de l'eau dans le lit du cours d'eau pendant la saison sèche méditerranéenne. Du fait de leur évapotranspiration élevée, les forêts diminuent généralement le drainage profond et l'écoulement à réponse différée. Lors de périodes de pluies à forte intensité, des écoulements à temps de réponse rapide aux précipitations peuvent avoir lieu, principalement lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol, générant ainsi un ruissellement de surface (voir section 1.5). En plus du ruissellement de surface, d'autres voies sont possibles pour générer des ruissellements à réponse rapide, tels que l'écoulement sub-surface et l'écoulement de surface après saturation du sol sur des surfaces humides accrues le long du cours d'eau (voir Figure 18). Des ruissellements à réponse rapide peuvent entraîner des inondations et générer l'érosion des sols. Le ruissellement de surface ne se produit que dans les sols à faible capacité d'infiltration superficielle. En conséquence, le ruissellement de surface n'apparaît pas habituellement sur une surface continue, mais par taches. La litière de la forêt et la matière organique contribuant à accroître l'infiltration du sol, le ruissellement de surface est donc très peu fréquent dans les forêts et apparaît principalement sur des sols exposés ou dégradés. On considère que les forêts préviennent, dans une certaine mesure, le processus de génération d'écoulement rapide (principalement le ruissellement de surface). Néanmoins les forêts semblent avoir un effet plus efficace sur l'atténuation des petites et moyennes crues que sur les grandes crues ou les crues extrêmes.

Les deux composantes des écoulements : rapides et retardés, convergent toutes deux vers le lit du cours d'eau principal formant l'écoulement en sortie du bassin versant.

Le type et la densité de la végétation peuvent affecter la distribution en temps et en quantité de l'écoulement du cours d'eau par leur action sur l'évaporation et l'infiltration à travers la surface du sol. La manipulation de la végétation dans les bassins versants boisés méditerranéens peut donc jouer un rôle important dans l'obtention d'un équilibre adéquat et optimisé entre les flux du bilan en eau. Il est donc nécessaire de porter une attention particulière à la multiplicité des objectifs de gestion, du fait des contradictions et des compromis qui sont impliqués.

Sur une base annuelle, le type de végétation peut jouer un rôle sur le niveau de l'évapotranspiration et par conséquent sur l'écoulement du cours d'eau : les types de végétation ayant une évapotranspiration plus élevée (tels que les forêts) auront un écoulement plus faible, et vice et versa (voir équation (1)). L'impact des changements du couvert forestier sur l'hydrologie, liés à des perturbations majeures (feux de forêt) ou des actions de gestion forestière délibérées (coupes à blanc, coupes d'éclaircie) sera traité dans les sections 2.1 et 2.2.

Pour en savoir plus

- Bellot, J., Bonet, A., Sanchez, J.R. and Chirino, E. 2001. Likely effects of land use changes on the runoff and aquifer recharge in a semiarid landscape using a hydrological model. *Landscape and Urban Planning* 55: 41–53.
- Bellot, J. and Ortiz de Urbina, J.M. 2008. Soil water content at the catchment level and plant water status relationships in a Mediterranean *Quercus ilex* forest. *Journal of Hydrology* 357: 67–75.
- Chirino, E., Bonet, A., Bellot, J. and Sánchez, J.R. 2006. Effects of 30-year-old Aleppo pine plantations on runoff, soil erosion, and plant diversity in a semi-arid landscape in south eastern Spain. *Catena* 65: 19–29.
- David, J.S., Valente, F. and Gash, J.H.C. 2005. Evaporation of intercepted rainfall. In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Anderson, M.G. (Ed.). Volume 1, Chapter 43. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester. Pp. 627–634.
- Jewitt, G. 2005. Water and Forests. In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Anderson, M.G. (Ed.). Volume 5, Chapter 186. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester. Pp. 2895–2909.
- Pereira, J.S., David, J.S., David, T.S., Caldeira, M.C. and Chaves, M.M. 2004. Carbon and water fluxes in Mediterranean-type ecosystems. Constraints and adaptations. In: *Progress in Botany*, Vol. 65. Esser, K., Luttge, U., Beyschlag, W. and Murata, J. (Eds.). Springer-Verlag, Heidelberg. Pp. 467–498.

Le rôle de la forêt méditerranéenne dans la conservation de l'eau et du sol

Jean Albergel, Jean Collinet, Patrick Zante et Hedi Hamrouni

Dans la région méditerranéenne, les sols constituent une composante fragile des écosystèmes terrestres. Ils sont sensibles aux risques d'érosion, car exposés à de fortes et intenses précipitations, provoquant un phénomène de ruissellement marqué, accéléré par une topographie vallonnée ou montagneuse. Les questions de l'eau et des sols sont donc indissociables.

Comme indiqué précédemment (voir section 1.4), le régime des précipitations dans la Région Méditerranéenne est caractérisé par des événements météorologiques intenses, avec une fraction importante des précipitations annuelles tombant en l'espace de quelques jours. Ces caractéristiques, alliées à un usage intensif et destructeur des terres (défrichement, surpâturage et feux) depuis des millénaires, ont induit une forte évolution écologique régressive de l'écosystème terrestre, en particulier du fait d'un phénomène d'érosion prononcée. L'érosion des sols est encore aujourd'hui un phénomène majeur (voir Figures 1, 6 et 7).

Dans la péninsule ibérique et au Maghreb, par exemple, au sein de deux régions climatiques, de vastes zones sont caractérisées par le développement de sols sur roche mère calcaire et marneuse datant des ères crétacée et tertiaire. La région **semi-aride** est caractérisée par des pluies de 300 à 600mm, une variabilité interannuelle de 25-30% et 4 à 7 mois secs. Les conditions climatiques, qui ont été plus humides qu'elles ne le sont actuellement, ont permis la différenciation des sols *isohumiques**, des sols *fersiallitiques** rouges plus ou moins incrustés sur les roches calcaires ou, dans des conditions de drainage plus faible ou encore sur des marnes, des sols *vertiques** et engorgés. Dans cette zone, on trouve des formations climax telles que: les forêts arbustives à oléastre, forêts de pin d'Alep, cèdre, genévrier, cyprès. La **région subhumide** reçoit 600 à 800 mm annuellement avec une variabilité de 10 à 25% et 3 à 5 mois secs. Une humidité constante a produit un brunissement du sol. Les sols rouges sont formés sur des roches dures carbonatées. Cependant il n'est pas rare d'observer, sur des roches calcaires dures, des sols avec des teintes marron; ce brunissement du sol affecte en partie ou totalement le pro-

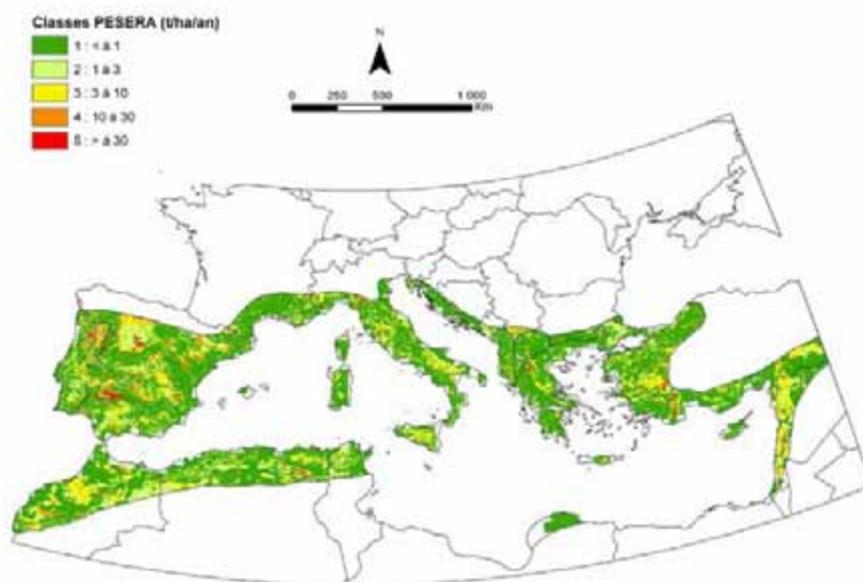


Figure 20. Carte actualisée de l'érosion des sols dans le Bassin méditerranéen (simulation PESERA) Source : Y. Le Bissonnais et al. 2010

fil¹ du sol. Le brunissement du sol *fersiallitique* apporte une amélioration des caractéristiques physiques essentielles: porosité, réserve utile et résistance des agrégats à l'érosion. Aux formations climaciques précédentes, on peut ajouter les chênes sclérophylles : chêne vert (*Q. ilex*), chêne-liège (*Q. suber*), et le chêne kermès (*Q. coccifera*).

Les couverts végétaux originels ont plus ou moins disparu du fait de climats plus chauds et de cycles géologiques d'érosion concomitants. L'exploitation du bois depuis l'ère phénicienne (1000BC) et la croissance de l'agriculture depuis l'ère romaine (200BC) ont intensifié l'érosion anthropogénique, laissant un paysage où les roches, régolites et incrustations calcaires fragmentées ou continues sont mises à nu. Dans ces paysages, la végétation climacique s'est détériorée et transformée en maquis (sols acides) et garrigues (sols calcaires), mais certaines forêts, que l'on trouve généralement en amont des bassins versants de plus de 50 km² où prédomine l'élevage ovin, ont été sauvegardées.

Les modèles de bilan prennent généralement en compte les divers flux entre le couvert forestier et l'atmosphère : le carbone atmosphérique est fixé dans la végétation par la photosynthèse, il est stocké dans les feuilles, le bois et les racines, et le sol qui reçoit les débris et héberge une activité biologique plus ou moins forte. Ce carbone est réémis lors de la respiration de la plante ou de la décomposition de la matière organique. Les arbres, d'un autre côté, réémettent par évaporation l'eau de pluie interceptée par les feuilles, ou l'eau prélevée dans le sol par la transpiration. Enfin, les forêts et les sols reflètent une partie de la radiation solaire infrarouge. Ces différents flux sont quantifiés principalement dans le cas de couvert forestier continu, donc dans des zones plus humides que celles de la région méditerranéenne. Avec une biomasse plus faible, des dy-

¹ Le brunissement des sols fersiallitiques (à distinguer du brunissement par la matière organique) est possible lorsque les conditions climatiques et celles du couvert végétal sont intermédiaires (climat subhumide), cependant il existe une catégorie de sol fersiallitique brun saturé en calcium (sous-groupe des sols fersiallitiques).

namiques de croissance et des intensités de flux différentes de celles des forêts tempérées et même plus humides, les forêts méditerranéennes devraient toutefois continuer de jouer un rôle important, dans un contexte de survie précaire des communautés adjacentes et de la difficile gestion et conservation de l'eau et du sol, même si les situations sont différentes du nord au sud et de l'est à l'ouest de « l'aire de l'olivier ». Des indicateurs des stocks et des flux des composants minéraux, organiques et hydriques permettent, dans certaines limites, d'évaluer la fragilité et la résilience du binôme sol-végétation.

L'énergie cinétique des gouttes de pluie ayant un impact sur le sol peut être réduite par la végétation, si le taux de couvert du sol excède 20 à 30% avec de légères différences entre les plantes, formations arbustives buissonnantes et arborées.

Les processus de l'érosion liés à l'eau sont les suivants :

- a) impact de l'énergie cinétique des gouttes d'eau qui, en frappant le sol, fragmentent les agrégats en particules plus fines (érosion de type « splash »).
- b) rôle du ruissellement comme agent transporteur de ces particules.
- c) rôle du ruissellement comme agent actif de l'érosion (érosion en nappe et/ou en ravine).

Ces mécanismes sont, à leur tour, liés aux caractéristiques du couvert végétal, car le feuillage intercepte une partie de la pluie, réduisant l'effet de rejaillissement (« effet splash ») et contribue à la réémission de l'eau vers l'atmosphère par évaporation (voir 1.4), tandis que les systèmes racinaires limitent la mobilité des particules du sol. L'érosion et le ruissellement sont bien entendu aussi liés aux propriétés du sol, en particulier la stabilité structurale et les caractéristiques hydrodynamiques.

Lors d'un épisode pluvieux, les effets d'une forêt commencent avec l'interception de l'eau de pluie avant qu'elle n'atteigne le sol. En fonction des conditions écologiques locales, nous pouvons trouver différents types de plantes et d'organisations structurales qui interfèrent fortement avec l'effet « splash » des pluies et la genèse du ruissellement, et donc avec la mobilisation de terres érodables. La part de l'interception dans l'équation du bilan en eau a été exposée dans la section 1.4. Nous mettrons donc l'accent ci-après sur **la structure des strates de végétation et son rôle dans le contrôle de l'énergie des gouttes d'eau de pluie**. L'importance de ce facteur a été prise en compte dans le développement de nouveaux modèles de prévision de l'érosion hydrique, à travers la quantification de l'énergie d'interception des pluies par diverses structures végétales, allant de strates arborées à des strates herbacées. La Figure 21 illustre les valeurs du taux de couvert du sol et de l'index C de gestion lié à différents types de couvert végétal, correspondant à différentes combinaisons de hauteur et de densité de canopée et de couverture du sol. Nous pouvons conclure que les différences entre les types de couvert végétal sont limitées, au dessus d'un seuil de taux de couverture du sol supérieur à 20 ou 30%. C'est à dire que la végétation arbustive peut être aussi efficace (voire plus) que la forêt quant au contrôle de l'effet « splash ». En termes de bilan en eau, la végétation arbustive consomme en général moins d'eau que la forêt.

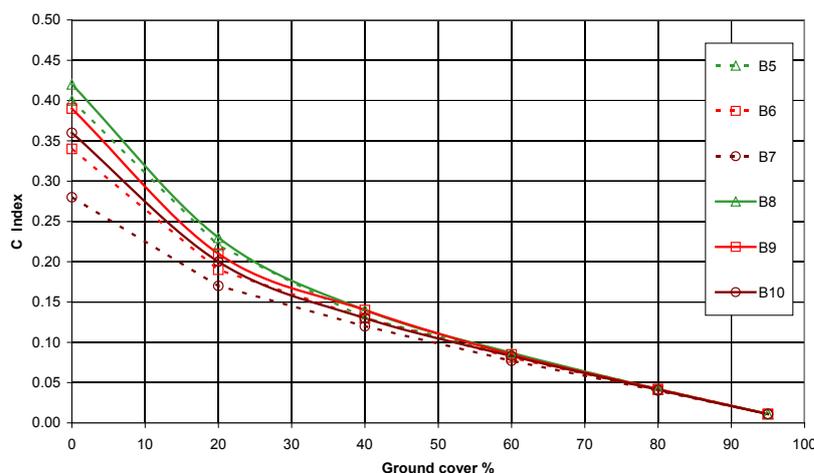


Figure 21. Rôle de la couverture végétale dans la réduction de l'énergie des gouttes de pluie : C, index pour différentes couvertures de sol du type canopées (C = 1 dans le cas d'absence totale d'interception sur une jachère continue labourée, situation présentant une vulnérabilité maximum).

- B5 : 25% de strate arbustive avec des gouttes de pluie tombant de 2m + couvert herbacé du sol avec larges feuilles
- B6 : 50% de strate arbustive avec des gouttes de pluie tombant de 2m + couvert herbacé du sol avec larges feuilles
- B7 : 75% de strate arbustive avec des gouttes de pluie tombant de 2m + couvert herbacé du sol avec larges feuilles
- B8 : 25% de strate forestière avec des gouttes de pluie tombant de 4m + couvert herbacé du sol avec larges feuilles
- B9 : 50% de strate forestière avec des gouttes de pluie tombant de 4m + couvert herbacé du sol avec larges feuilles
- B10 : 75% de strate forestière avec des gouttes de pluie tombant de 4m + couvert herbacé du sol avec larges feuilles

Les sols forestiers ont un avantage, comparativement aux autres types de sols, quant à la porosité et à la conductivité hydraulique, et une moindre sensibilité à l'effet « splash » de la pluie.

Lorsque l'eau d'écoulement le long des troncs et d'égouttement, et les gouttes de pluie atteignent le sol, plusieurs processus peuvent avoir lieu. **La recharge en eau** des horizons du sol commence, suivie de l'**infiltration** à des niveaux plus ou moins profonds, généralement avant l'apparition du **ruissellement**. Les caractéristiques du sol jouent un rôle important dans la part relative et l'intensité de ces processus. Elles sont liées dans une large mesure, au type d'écosystème influençant les transformations **physiques et biochimiques des horizons supérieurs** du sol qui facilitent la recharge en eau du sol et le drainage profond par infiltration. Plusieurs études forestières ont montré que :

- dans les forêts feuillues, on observe des changements structurels des horizons de surface, liés à la polymérisation des composants humiques, stabilisant la structure des horizons initiaux. Néanmoins cette action est limitée dans les forêts de pins et de tecks, et pratiquement inexistante dans les forêts d'eucalyptus, dont la litière secrète des substances antibiotiques, limitant sa propre minéralisation et humification.

- l'activité biologique animale et microbienne favorise la porosité. Les vers de terre émettent 3 t/ha de turricules dans les forêts vs. 0,5 t/ha pour des types de sols moins actifs biologiquement. Cette activité contrecarre le développement des croûtes de surface et favorise énormément la conductivité hydraulique en surface, mais aussi malheureusement la mobilisation et l'érosion des sols minces de montagne.
- la protection accrue des couches supérieures du sol par la litière ou une strate herbacée agit comme un « mulch » dissipant l'énergie incidente dans les proportions indiquées en Figure 21.
- une porosité profonde est favorisée par le développement des racines, mais dépend néanmoins de la structure du système racinaire et de la taille des racines (chevelu racinaire, système racine-pivot, etc.) et de son état de santé.

La genèse du ruissellement dépend de l'état de la surface de sol, de sa teneur initiale en eau et bien sûr de l'intensité de la pluie. Le couvert forestier influe sur le ruissellement, mais seulement en retardant son déclenchement et en ralentissant l'établissement d'un régime de fort ruissellement.

Les études sur l'origine de l'écoulement de l'eau (ruissellement) et la mobilisation des terres (érosion) ont connu un développement important fondé sur le succès de l'utilisation des techniques de simulation de pluie, au Maghreb pour des matériaux pédoplasmiques de différentes épaisseurs, et pour les zones sèches et humides de l'Afrique subsaharienne. Plus que la différenciation des caractéristiques de ces sols, c'est leur état de surface (SS) qui contrôle nombre de leurs propriétés hydriques de surface. Le ruissellement apparaît lorsque l'intensité de la pluie excède la conductivité hydraulique saturée, comme indiqué dans l'Encadré 4. Le processus d'infiltration est également lié à la porosité des sols et à la rugosité de leur surface.

Les pertes en sol sous forme de charges en sédiments dans l'eau de ruissellement, et leurs dynamiques durant les épisodes pluvieux, dépendent également de l'état de la surface de sol. Sous couvert forestier, comparé aux autres types de couverts végétaux, la limitation de l'érosion est liée au retard du déclenchement du ruissellement et de la lenteur de l'instauration du régime de fort ruissellement comme indiqué ci-dessus.

Les techniques de simulation des pluies sont également très performantes pour évaluer l'évolution des charges en sédiments liées aux intensités croissantes du ruissellement pour différents états de surface (SS). L'encadré 5 résume la genèse de l'érosion et les dynamiques de la charge en sédiment en relation avec les paramètres de la surface de sol et de l'écoulement.

Encadré 4. Pluies, infiltration et ruissellement

Dans des conditions de pluie simulée, on a observé que l'intensité d'infiltration minimum F_n (mm / h), ou que l'intensité maximum du ruissellement R_x (mm / h), varie avec l'intensité de la pluie (I mm / h). Cette relation qui peut paraître surprenante, résulte de la variabilité latérale de la conductivité hydraulique saturée (mm / h) qui, sous une pluie d'intensité constante, correspond à F_n (mm / h). Cette propriété fondamentale est expliquée dans la Figure 22.

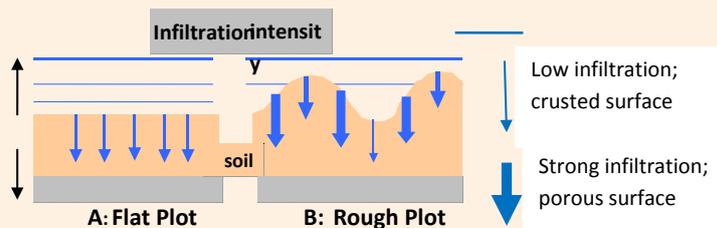


Figure 22. Relation entre la rugosité du sol et la conductivité hydraulique saturée, K_{sat} . (mm / h).

Situation A, terrain plat : Sur un terrain plat, le sol est couvert d'une croûte homogène ; K_{sat} a la même valeur partout. Dès que l'intensité de la pluie (I) excède K_{sat} , le ruissellement apparaît. L'écoulement dépend seulement de l'intensité de la pluie et de la pente du sol.

Situation B, terrain accidenté : les croûtes limoneuses sont plus importantes dans la partie inférieure de la parcelle. Elles sont encadrées par des mottes de terre plus perméables, et de monticules plus ou moins perméables à leur sommet. Le K_{sat} varie d'un point à un autre, le nombre d'endroits où $I > K_{sat}$, augmente avec la hauteur de la nappe d'eau qui s'écoule. C'est le cas des surfaces de terrains accidentés, des terres cultivées, des terres ayant un taux d'activité biologique élevé, avec un couvert végétal dense, donc de toutes les surfaces « rugueuses », qui sont en conséquence l'objet d'une submersion irrégulière, avec une nappe de ruissellement de hauteur variant avec l'intensité de la pluie. L'illustration de ces comportements en Figure 23 montre la relation entre un régime stable de ruissellement de surface (R_x) et les intensités de pluie (I).

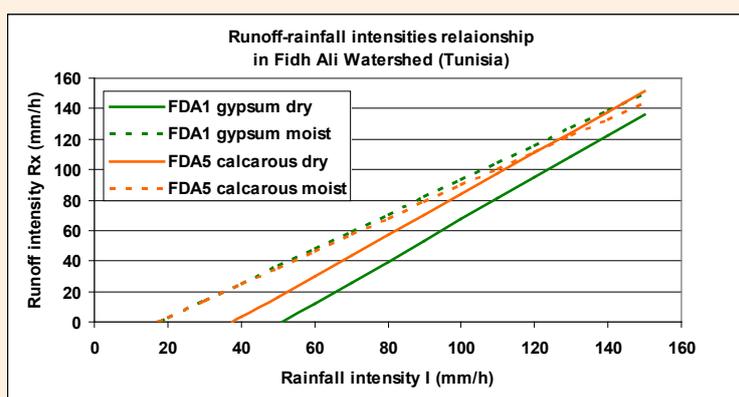


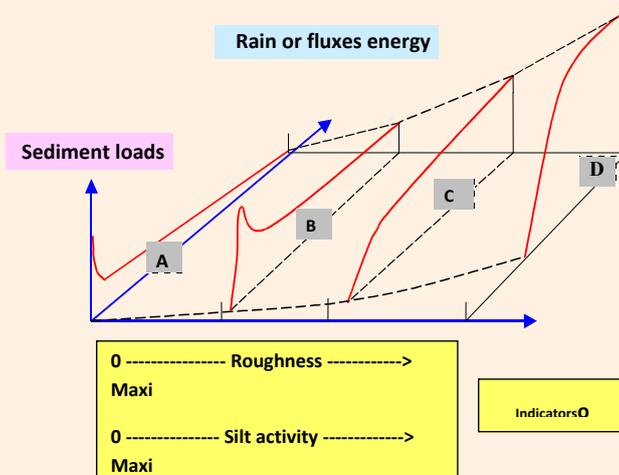
Figure 23. Relation entre l'intensité maximum du ruissellement (I) pour les sols gypseux (FDA 1) et calcaires (FDA 5) avec deux teneurs initiales en eau du sol. On remarquera que l'intersection des lignes de régression avec l'abscisse détermine la plus forte intensité de pluie (I_{lim} Mm/h) qui provoque l'écoulement initial. Cette valeur peut être obtenue expérimentalement en réduisant graduellement l'intensité de la pluie simulée. FDA 1 est un sol dérivé du gypse limoneux, les surfaces sont irrégulières, avec des agrégats bien formés mais instables. Avec l'accumulation de la pluie, ils se dispersent en un matériau limono-argileux. FDA 5 est dérivé du calcaire. Les surfaces sont rapidement lissées en une fine couche limono-sableuse à faible infiltration. Sur un sol initialement sec, les comportements sont parallèles avec des limites d'intensité de pluies différentes : 51mm/h pour FDA 1 et 37 mm/h pour FDA 5. Sur un sol initialement humide, les comportements sont identiques pour les surfaces lissées et colmatées (I_{lim} #18,5mm/h).

Encadré 5. Genèse de l'érosion et dynamique de la charge en sédiment en relation avec les paramètres de la surface de sol et de l'écoulement

La Figure 24 illustre le comportement de quatre types de sols contrastés par rapport à la charge en sédiment en relation avec l'énergie de la pluie et de l'écoulement. La courbe A reflète le comportement du sol ayant une stabilité structurale très faible. La réduction des agrégats, par dissipation de l'énergie de l'eau, lisse la surface et forme une couche faiblement perméable. L'épaisseur de l'écoulement d'eau intercepte l'énergie coulant sur la surface. L'écoulement reste laminaire et donc moins abrasif ; nous observons ensuite une réduction progressive des particules exportables. L'accroissement de la charge en sédiments est principalement lié à une forte augmentation du ruissellement. La courbe D reflète le comportement d'un sol ayant une stabilité structurale plus élevée. La destruction des agrégats par dissipation de l'énergie de la pluie est beaucoup plus graduelle. Le retard dans le déclenchement du ruissellement est également expliqué par l'existence de pores ouverts à la surface du sol. Il n'y a aucune formation de couche, à part une couche structurale poreuse et fragile. Il n'y a pas de lissage de la surface excepté lors de chutes de pluies majeures. La hauteur d'eau s'écoulant est faible et le ruissellement n'affecte donc pas la surface entière. Il y a peu d'interception d'énergie en surface, l'effet « splash » reste donc stable. La surface étant accidentée, le flux devient turbulent, et donc abrasif. En conséquence, il y a un accroissement rapide de l'érosion, ce qui peut sembler contradictoire puisque c'est la stabilité structurale qui est à l'origine de ce processus. Ici, les limitations de l'érosion sont seulement liées au retard dans le déclenchement du ruissellement et à la lente instauration de forts régimes de ruissellement : c'est la première chose que les 'conservationnistes' des terres cultivées ou les forestiers doivent prendre en compte.

Figure 24. Charges en sédiment en relation avec les paramètres d'écoulement et d'état de surface

Les situations illustrées par les courbes B et C, sont faciles à interpréter, car intermédiaires avec les cas A et mentionnés ci-dessus. Les changements dans les charges en sédiment sont également associés à différentes conditions d'irrégularité, d'activité des argiles minéralogiques (gonflement/retrait), structuration ou désintégration des charges en sel, croûtes, dispersion des éléments grossiers... qui agissent comme d'excellents indicateurs comportementaux.



L'implication du couvert des forêts méditerranéennes dans la conservation de l'eau et des sols est bien différente des clichés trop souvent évoqués et acceptés, qui considèrent les forêts comme offrant une protection totale contre les processus d'érosion.



Figure 25. Formation de badlands sur roche mère marno-calcaire résultant de la disparition d'un matorral, bassin versant de Tleta – Barrage Ibn Batouta - versant ouest du Rif – Maroc. Crédit P.Zante



Figure 26. Érosion en ravine sur des marnes ; rive droite du bassin versant de Kamech dans la région de Tazoghane, Cap Bon, Tunisie – Crédit P. Zante

Les bassins-versants boisés expérimentaux permettant des études conjointes d'hydrologie et d'érosion du sol ne sont pas si nombreux dans la zone méditerranéenne, et peu d'études de simulation de pluie ont été conduites en conditions forestières. Néanmoins, les résultats de ces études peuvent être complétés par des hypothèses raisonnables fondées sur les résultats de sites d'études intensives dans des conditions agricoles, choisis pour refléter les conditions de sols forestiers. C'est ainsi que les données issues des études de simulation de pluie en Tunisie dans un contexte agricole, mais pour des sols dont l'état de surface est comparable à celui de sols forestiers, ont été regroupées : couvert végétal bas sur horizon de surface structuré avec agrégats, sol nu avec colmatage, sol nu grossier avec mottes et horizon de surface structuré, sol parsemé d'éléments grossiers. Ces données sont présentées dans le Tableau 3.

Dans les zones calcaires de la Méditerranée, la localisation et l'extension des forêts, et la profondeur des sols qui les portent, dépendent souvent de la taille du bassin versant.

Dans les petits bassins versants qui sont strictement calcaires (<10 km²), les sols forestiers en amont sont érodés jusqu'au régolite, ainsi que le reste du bassin excepté

Tableau 1 : Études par simulation de pluies dans la région de Siliana (Tunisie) : précipitations moyennes (30 ans) = 430 mm ; force érosive des pluies : 57-130 mégajoules.mm/ ha.h par an
 Résultats du ruissellement et de l'érosion en relation avec l'état de surface du sol (SS) des parcelles dont le comportement est supposé comparable à ceux de sols forestiers méditerranéens.

Sol et profondeur approximative	Sites	Topo	Pente	C + S	Usage des terres	SSF					Ruissellement		Érosion
						7	8	9	10	11	12		
						Croûte de battance	Croûte structurale	Fissures	Graviers	Rx (l) r^2	I lim	Chargement (R) r^2	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Brun sur calcaire ou marne calcaire (30cm)	SM1	amont	19	52	non labouré	45	45	4	0	0	1,061-10,1	9,5	$0,008R^2 - 0,086R + 11,97$
	SM2	mi-pente	12	50	jachère	78	18	0	1	1	1,031-11,9	11,6	$0,006R^2 - 0,033R + 13,26$
	SM3	aval	10	45	blé+ mauvaises herbes	59	23	0,5	0	0	1,051-24,4	23,3	$0,275R+3,63$ $0,95$
Brun calcaire concrétionné sur colluvium (70cm)	SML3	amont	8	54	blé	54	24	4	2	2	0,951-15,6	15,7	$0,004R^2 - 0,352R + 25,44$ $0,79$
	SML2	milieu	10	50	labour récent	16	54	6	0	0	Rx non atteint	> 42	C.max.4.4g/l to l = 120mm/h
	SML1	aval	13	48	jachère nue	72	16	5	5	5	1,001-6,4	6,4	$-0,004R^2 + 1,392R - 2,7$ $0,87$
Affleurements dispersés de croûtes calcaires fragmentées (ocm)	SMA1	milieu	12	49	jachère nue	44	20	0	34	34	0,951-2,1	2,2	$0,002R^2 - 0,125R+9,99$
	SMA3	milieu	9	62	jachère + chaume	28	9	0	12	12	1,091-23,3	21,2	$0,016R + 0,82$ $0,82$
	SMA4	milieu	15	63	labour récent	33	12	1	7	7	0,911-11,1	12,1	$0,001R^2 + 0,015R + 2,35$

Légende:

- 1 Classification des sols (CPCS), roche mère et profondeur du sol meuble
- 2 Sites des parcelles expérimentales de simulation de pluies, en différents points de la toposéquence, dans la région de Siliana (Tunisie)
- 3,4 Position topographique sur des pentes de 300 à 1000m de longueur et pente en %
- 5 Texture du sol : argile (<2µ) + limon fin (2-20) + limon grossier (20-50) en % de sols sans graviers
- 6 Usage agricole des sols pendant les tests
- 7, 8, 9, 10 Caractéristiques du sol en surface : croûte de battance, croûte structurale (mottes de terre et agrégats plus ou moins détruits, entourés du matériau de dispersion de ces structures), dessiccation smectique partielle, fissures dans les sols argileux, taux de gravier (2 à 20mm) et de caillou (>20 mm) à la surface du sol.
- 11,12 Relation entre intensité du ruissellement à une vitesse constante et intensité de la pluie, intensité minimum limite l
- 13 Relation entre charge solide en sédiment contenue dans le ruissellement et intensité du ruissellement R, détection de l'érosion aréolaire ou linéaire

au pied de la pente où les sols plus épais peuvent être développés sur des colluviums. En amont, les forêts sont situées sur des roches ou des croûtes calcaires où les réserves utiles en eau n'existent seulement qu'en fonction des craquelures de ces matériaux. Au niveau du sol, cela implique une succession d'états de surface dépendant de la période, comme indiqué ci-dessous :

- Reprise des pluies de septembre-octobre sur sol nu grossier, aucune pousse, quelques chaumes, on est proche du cas SMA₁ avec ruissellement apparaissant rapidement, mais léger, durant les pluies de plus forte intensité.
- Début de la saison des pluies avec une baisse plus ou moins significative des pluies jusqu'en avril, et des orages en mai, pousse d'un couvert herbacé sur SMA₃ avec des ruissellement légèrement chargés en sédiment, de plus en plus retardés au fur et à mesure que le couvert herbacé devient dense et continu.

Dans les bassins versants de plus grande taille (> 50 km²) il n'est pas rare de trouver en amont des reliques de sol profond fersiallitique rouge foncé, sur des nodules calcaires, qui n'ont pas été affectés par les cycles de l'érosion, mais peuvent être situés près d'affleurements rocheux. Les forêts situées sur des matériaux structurés ont été maintenues dans ces zones grâce aux oxydes de fer et composés humiques polymérisés. Ces sols ont une bonne conductivité hydraulique et de bonnes réserves d'eau, et la végétation y pousse donc rapidement d'octobre à mai. Au cours de cette période, ce type de sol forestier passe successivement par les situations suivantes : SM₁, SM₂ et SM₃, avec des ruissellements légèrement chargés en sédiments, et une intensité-limite des pluies décroissant graduellement, permettant ainsi le remplissage des réserves d'eau utilisable.

- Dans ces bassins versants, les marnes sont parfois coincées entre des couches calcaires et conduisent à un paysage de « badlands ». L'érosion aréolaire sur la roche calcaire (<5t/ha/yr) devient linéaire avec des pics d'environ 50t/ha/an. Il n'y a pas de forêt mais une végétation arbustive buissonnante basse, avec peu d'herbe et des surfaces nues, sans réserves en eau, et l'abrasion continue empêche la germination. Les comportements sont similaires à ceux des sites SML₂ puis SML₁ où la destruction des structures produit des charges lourdes en sédiment pour le ruissellement, tout d'abord retard, puis augmentant rapidement après.

Une étude plus approfondie s'avère nécessaire pour développer un corpus de connaissances sur la conservation de l'eau et du sol en conditions forestières méditerranéennes. Un programme concerté de recherche pourrait offrir des perspectives intéressantes.

Les exemples d'études fines analysant conjointement les facteurs qui affectent le comportement du binôme forêt-sol ne sont pas nombreux. Les approches expérimentales doivent précéder la modélisation, elles sont en effet nécessaires à l'amélioration de la calibration des modèles et à leur validation *pro parte*. Un exemple d'expérience de terrain pouvant être rapidement et facilement mise en œuvre, est celui de la simulation des pluies sur des parcelles représentatives des caractéristiques de types de sol, couverture et surface de sol, et dont les données peuvent être facilement couplées avec des

occurrences de pluies naturelles. De telles approches impliquent le respect des stades phénologiques de la forêt (étage principal et sous-étage) et la prise en compte des changements d'énergie liés à l'interception de la pluie.

Pour en savoir plus

- Bellot, J. and Escarre, A. 1991. Chemical characteristics and temporal variations of nutrients in throughfall and stemflow of three species in Mediterranean holm oak forest. *Forest Ecology and Management* 41: 125-135.
- Casali, J., Lopez, J. and Giraldez, J.V. 1999. Ephemeral gully erosion in Southern Navarra (Spain). *Catena* 36: 65-84.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G. and Valentin, C., 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50: 91-133.

2.

L'eau bleue

L'eau bleue, forme liquide de l'eau, est vitale pour les sociétés humaines. C'est pourquoi, et dans la perspective de la domestication des ressources en eau, elle a été au centre de la gestion et de l'aménagement des territoires. Il est donc essentiel de comprendre comment l'eau bleue est générée à travers les processus hydrologiques complexes et variés, qui ont lieu dans les bassins versants avant, pendant et après les épisodes pluvieux. La pluie tombe sur des écosystèmes terrestres dont le comportement hydrologique est variable. Dans la région méditerranéenne et dans d'autres régions, les forêts se trouvent en amont de bassins versants souvent situés dans des régions montagneuses, et constituent une sorte de 'châteaux d'eau' pour la région. Il est donc crucial de mieux comprendre les traits hydrologiques spécifiques à ces écosystèmes.

Les relations et interactions entre les forêts et l'eau bleue constituent l'un des thèmes les plus controversés aujourd'hui. Malgré les découvertes scientifiques issues d'études hydrologiques, il y a encore beaucoup d'idées reçues et de croyances dogmatiques, fondées sur une base scientifique limitée ou inexistante. Il est donc absolument nécessaire d'essayer de combler le fossé entre les acquis de la science et ce que perçoit l'opinion publique.

Ce chapitre, divisé en deux sections, vise à fournir une vue d'ensemble sur ce que la science peut nous dire sur ces questions importantes.

2.1 Hydrologie des écosystèmes méditerranéens

2.2 Les ressources en eau dépendent du couvert végétal et de l'usage des terres

Figure 27. Déversoir pour la mesure de débit -
Copyright - Hubbard Brook Experimental Forest
- Crédit USDA {www.hubbardbrook.org}



Figure 28. Les gorges de l'Ardèche dans un paysage à dominante de chêne vert (France). Crédit : C. Birot

Hydrologie des écosystèmes méditerranéens¹

Francesc Gallart et Pedro Berliner

La plupart des ressources en eau de la région méditerranéenne sont produites dans les montagnes humides, tandis que les zones de basse altitude et côtières sont des consommatrices d'eau.

Le Bassin méditerranéen, du fait de son histoire géologique, est entouré de nombreuses chaînes de montagnes. Les précipitations plus élevées et les températures plus basses dans ces zones se traduisent par un bilan d'eau excédentaire, et sont donc à l'origine des cours d'eau principaux ou des zones de *recharge** des eaux souterraines.

Les forêts forment le couvert végétal le plus naturel des montagnes méditerranéennes où l'abondance de l'eau permet leur croissance. Néanmoins, les pentes ensoleillées et plus douces des montagnes de moyenne altitude ont été généralement utilisées pour l'agriculture. Mais la plupart des zones d'altitude plus humides ont été déboisées et transformées en de vastes pâturages pour nourrir le bétail durant l'été.

Les zones méditerranéennes de basse altitude présentent typiquement des bilans en eau défavorables du fait de précipitations moins abondantes et de températures plus élevées. Dans la plupart des dépressions internes et des plaines littorales, la demande en eau pour l'irrigation et l'usage urbain est forte et en croissance. Cette eau provient généralement de ressources produites loin de leur lieu d'utilisation.

Les ressources en eau souterraine ont une importance capitale dans la plupart des zones méditerranéennes. Dans le cas particulier des zones à roches mères perméables, comme les calcaires (zones karstiques), on observe en altitude des gouffres et des vallées sèches, et sur les piémonts ou dans les dépressions, on trouve des sources, des cours d'eau et des milieux humides permanents.

Les importants prélèvements d'eau souterraine ont conduit à un assèchement des sources et des milieux humides, ainsi qu'à la perturbation du régime des cours d'eau.

¹ Voir sections 1.4, 1.5, 2.2, 4.1 et 5.3

Les flux des cours d'eau varient fortement en région méditerranéenne. Les petits bassins alimentent de petits cours d'eau typiquement sporadiques ou éphémères (ramblas, oueds), qui laissent la place à des crues soudaines. Les grands bassins versants ont des cours d'eau saisonniers ou permanents dont les étiages sont alimentés par les eaux souterraines.

A propos des écoulements dans les cours d'eau, les hydrologistes font généralement la distinction entre flux d'orage et flux de base. Le premier correspond à la réponse rapide à un épisode pluvieux donné, alors que le second est dû au déstockage différé des réserves en eau souterraine ; ces flux connaissent généralement une fluctuation saisonnière.

Dans les zones sèches et en particulier dans les petits bassins versants, les flux de base peuvent être absents du fait de l'absence ou de la déconnexion des eaux souterraines ; la réponse du cours d'eau aux orages prend la forme de *crues soudaines** dont le volume décroît en aval à cause des *pertes de transmission**.

Les bassins versants de plus grande dimension montrent en général un régime saisonnier avec des débits mensuels ou trimestriels élevés durant l'hiver ou les équinoxes, et des débits faibles ou nuls en été. Néanmoins, le régime peut être différent si les sources principales d'eau proviennent de la fonte des neiges hors zone méditerranéenne, ou sont régulées par des barrages.

Encadré 6. Des crues soudaines causées par des pluies très abondantes et intenses dans la région méditerranée peuvent provoquer des catastrophes comme dans le cas de Vaison-la-Romaine, France, 1992.

Le climat de la partie montagneuse de l'arrière pays méditerranéen, allant des Pyrénées au sud ouest des Alpes sèches, est caractérisé par un régime de précipitations à prédominance automnale et hivernale. Des événements extrêmes en termes de hauteur et d'intensité des précipitations, et des crues soudaines catastrophiques ont été fréquemment relevés. Le 22 septembre 1992, de très fortes pluies ont frappé les départements de la Drôme et du Vaucluse (Alpes sèches du sud ouest) avec des précipitations atteignant 200 à 300 mm en 4-5 heures, à comparer à la moyenne de 80mm pour tout le mois de septembre. La plupart des précipitations sont tombées ce jour-là en moins de 2 heures, avec des pics d'intensité de 200 mm/h. Ces pluies affectèrent une partie du bassin versant de l'Ouvèze et produisirent une crue soudaine et violente, culminant quelques heures seulement après le début des pluies. En amont de Vaison-la-Romaine, le bassin versant de 587 km², collecta 66 millions m³ d'eau. Au pic de la crue, le débit était aux alentours de 1000m³/s au pont romain de Vaison-la-Romaine et la rivière charriait des objets divers à une vitesse de 4 m/s, soit 14 km/h (Source : Cemagref-Lyon). Le flot et le débordement de la rivière provoquèrent d'énormes dommages en termes de vies humaines (40 morts) et d'infrastructures : routes, ponts et plus de 100 maisons détruites. Le montant des pertes fut estimé à 100 millions d'euros.

www.languedoc-roussillon.ecologie.gouv.fr/meteocdrom/Evenements_memo-rables/doc/19920922_vaison.htm



Figure 29. Crue à Vaison-la-Romaine le 22/09/1992. Le pont (1er s. ap. J.C.) sur la rivière Ouvèze a résisté au flot, alors que des ponts et constructions plus récents ont été détruits. Photo : M. J. Tricart.

Les principaux processus de génération des ressources en eau en région méditerranéenne (comme dans les climats plus humides) sont liés à la percolation de l'eau à des niveaux plus profonds, une fois que la capacité en rétention d'eau du sol est atteinte. Mais dans les climats plus secs, ces processus sont en général aussi liés à des pluies dont le niveau excède la capacité d'infiltration de la partie supérieure du sol, ce qui entraîne le ruissellement provoquant l'érosion et des risques d'inondation.

Il y a deux principaux processus de génération des ressources en eau. D'une part, les processus de **saturation**, les plus courants en zones humides, qui adviennent lorsque les pluies ou la fonte des neiges dépassent la demande de l'évapotranspiration durant une période suffisante pour permettre l'humectation de l'ensemble du profil du sol au delà de la capacité de rétention en eau : l'excès d'eau coule alors au travers et au-dessus du sol, alimente les cours d'eau et percole profondément pour recharger les réserves souterraines. D'autre part, l'**excès de pluie**, fréquent dans les climats secs, a lieu lorsque le niveau de précipitation dépasse celui de l'infiltration de la partie supérieure du sol : l'eau tombée en excès coule sur le sol, alimente le cours d'eau avec des crues soudaines, provoque l'érosion des sols et peut recharger les ressources souterraines principalement à travers les *pertes de transmission* *(voir Encadré 6).

Une des caractéristiques principales du climat méditerranéen est sa forte saisonnalité et de faibles précipitations estivales. Cela signifie que, même dans les zones humides ou sub-humides où les processus de saturation sont les plus courants, la teneur en eau des sols diminue fortement pendant l'été provoquant l'interruption des processus de saturation. Inversement, des périodes humides avec processus de saturation peuvent avoir lieu de façon saisonnière ou occasionnelle dans les climats semi-arides.

Les caractéristiques de la couverture du sol et de son état de surface jouent un rôle important, bien que complexe, dans les processus hydrologiques et érosifs.

Un faible couvert ou une absence de protection favorisent en général le ruissellement et l'érosion des sols, tandis qu'un couvert herbacé épais provoque un ruissellement intermédiaire et une érosion limitée, et un couvert forestier dense entraîne les niveaux de ruissellement et d'érosion les plus faibles. Ceci est vrai dans ces deux derniers cas seulement si la hauteur et l'intensité de la pluie restent en dessous de certains seuils.

La capacité d'infiltration du sol dépend plus de l'état de l'horizon supérieur du sol que de la qualité du profil du sol dans son entier. L'impact des gouttes de pluie sur la surface d'un sol non protégé peut conduire à la formation d'une croûte presque imperméable en surface, limitant l'infiltration et favorisant l'écoulement de surface de la pluie en excès. D'un autre côté, l'activité biologique (racines, vers de terre) ou le labour fissurent la croûte du sol et augmentent sa capacité d'infiltration.

Pour des milieux humides ou d'humidité intermédiaire, la teneur en eau des sols est plus faible sous le couvert forestier que dans les clairières, à cause d'une évapotranspiration plus élevée. Pour les milieux secs, lorsque le contenu en eau du sol est trop bas pour être drainé par gravité, la teneur en eau du sol peut être plus élevée sous couvert forestier ou arbustif à cause de l'effet d'ombrage du couvert.

Il existe donc des interactions complexes entre des mécanismes ; elles doivent conduire à des compromis dans la gestion des territoires pour des conditions climatiques et de sol données. Un couvert forestier augmentera l'infiltration et réduira le ruissellement et l'érosion des sols, mais le bilan total en eau et la recharge des aquifères seront réduits du fait d'une évapotranspiration réelle plus élevée. D'un autre côté, un sol nu induira des valeurs plus élevées de ruissellement et d'érosion, mais le bilan en eau sera plus favorable du fait de valeurs plus basses de l'évapotranspiration réelle, et d'une recharge probablement plus importante des aquifères, suite aux *pertes de transmission** dans les cours d'eau.

Dans les zones sèches, des techniques traditionnelles de *collecte des eaux de pluie** (tels que le 'meskat' et 'tabia' en Tunisie) consistent à maintenir des surfaces nues (sans végétation), de la taille d'un champ, pour produire un ruissellement servant à irriguer des arbres isolés ou de petites parcelles cultivées.

La préservation de la qualité écologique des cours d'eau méditerranéens requiert la protection du régime hydrologique, de la qualité de l'eau, de la morphologie du cours d'eau, de la ripisylve et du transport de sédiments.

Les prélèvements d'eau excessifs, la régularisation des rivières ou les effluents des stations d'épuration des eaux usées, peuvent gravement modifier le régime naturel des cours d'eau. Une modification typique pour les grandes rivières est l'augmentation de la régularité du débit, qui favorise la propagation d'espèces invasives, diminuant le rôle fertilisant des crues pour la mer et mettant en danger le transport de sédiments. Les sédiments font partie du système fluvial. Une érosion accélérée, causée par une mauvaise utilisation des terres, peut provoquer une augmentation excessive des charges en sédiments, mais le piégeage de sédiments par les barrages met également en danger la durabilité des plaines alluviales, des deltas et des plages. Le maintien d'une ripisylve en bon état peut se traduire par une certaine perte en eau, mais il sera aussi bénéfique pour la température et la valeur nutritive de l'eau (voir section 5.4).

Pour en savoir plus

- Calder, I. R., 1998. Water-resource and land-use issues. SWIM Paper 3. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/SWIM_Papers/PDFs/SWIM03.PDF
- Gallart, F., Amaxidis, Y., Botti, P., Cane, G., Castillo, V., Chapman, P., Froebrich, J., Garcia-Pintado, J., Latron, J., Llorens, P., Lo Porto, A., Morais M., Neves R., Ninov P., Perrin JI., Ribarova I., Skoulikidis, N. and Tournoud, Mg. 2008.
- Investigating hydrological regimes and processes in a set of catchments with temporary waters in Mediterranean Europe. *Hydrological Sciences Journal* 53: 618–628.
- Latron, J., Llorens, P. and Gallart, F. 2009. The hydrology of Mediterranean mountain areas. *Geography Compass* 36: 2045–2064.
- Leblanc, M.J. et al. 2008. Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change*, 61(3-4): 135–150.
- Nasri, S., Albergel, J., Cudennec, C. and Berndtsson, R. 2004. Hydrological processes in macrocatchment water harvesting in the arid region of Tunisia: the traditional system of tabias. *Hydrological Sciences Journal* 49(2): 261–272.

Les ressources en eau dépendent du couvert végétal et de l'usage des terres¹

Mark Robinson et Claude Cosandey

Au fil des siècles, le développement de l'humanité a conduit au remplacement de nombreuses forêts naturelles par des prairies et des champs pour ce qui concerne l'agriculture, ainsi que par des plantations forestières à finalité économique. De tels changements peuvent avoir – et ont effectivement – un impact important sur le cycle hydrologique local et sur les ressources hydriques de régions plus vastes. Plus récemment, la déprise agricole dans les zones marginales a partiellement inversé ce processus.

Le couvert végétal et sa gestion peuvent avoir un impact marqué sur la partition de l'eau et de l'énergie.

La grande majorité des études de bassins versants ont conclu à des écoulements dans les cours d'eau plus faibles pour les zones boisées que pour les cultures basses. Ce résultat a été conforté par des études sur les mécanismes impliqués, tels que la mesure du dessèchement du sol et des flux d'évaporation. Il est désormais généralement admis que la forêt conduit presque inévitablement à une plus grande évaporation : dans les zones où les précipitations sont plus importantes et durant la saison humide, cela est dû à de plus grandes pertes par interception de l'eau de pluie retenue sur la canopée. Dans des conditions plus sèches, cette perte est due à une transpiration plus élevée résultant directement des systèmes racinaires des arbres, plus développés et plus profonds, leur donnant ainsi, par comparaison avec une végétation plus basse, un meilleur accès aux réserves en eau du sol.

Les pertes d'interception par évaporation sont le premier terme de la partition de l'eau. Contrairement aux pertes d'interception élevées des forêts océaniques tempérées exposées à des précipitations fréquentes, de courte durée et de faible intensité, les forêts méditerranéennes connaissent en général des épisodes pluvieux de forte intensité et de courte durée, et perdent par interception proportionnellement beaucoup moins.

L'effet du couvert végétal sur le niveau de la transpiration sera régulé par la disponibilité en eau du sol. Pour les zones dont la capacité de stockage est limitée (les sols

¹ Voir également sections 1.4, 1.5, 2.1 et 4.1

minces par exemple), toute augmentation de la transpiration sera limitée, alors que dans les zones proches d'un cours d'eau permanent, le niveau de l'évaporation locale (transpiration) peut être largement augmenté, avec en conséquence des réductions des flux d'eau disponible pour les usagers en aval.

Dans certains cas, comme dans celui de plantations d'eucalyptus à enracinement profond et à croissance rapide, la consommation d'eau peut excéder la valeur de la recharge en eau du sol, conduisant à une exploitation non durable sur le long terme des réserves d'eau souterraines.

L'impact sur le débit d'étiage en particulier peut se trouver masqué temporairement lorsqu'il y a une capacité importante de stockage de l'eau : plusieurs années peuvent s'écouler après la coupe des arbres pour obtenir un réapprovisionnement suffisant des réserves en eau souterraine puis observer une augmentation des débits d'étiage.

Bien que les augmentations *en valeur absolue* d'évaporation (et les réductions des écoulements annuels des cours d'eau) soient les plus importantes dans les zones à plus forte pluviosité, les plus grandes réductions *en valeur relative* concernent les étiages lorsqu'il y a moins d'eau disponible.

Quelques mythes sur la forêt et l'eau :

Les effets bénéfiques des forêts ont parfois été exagérés par les « écologistes » soucieux de protéger les zones naturelles, et par les forestiers « productivistes » désireux de justifier de nouvelles plantations.

Les forêts peuvent parfois accroître les débits d'étiage, mais, en général, il est plus probable qu'elles les réduisent.

La capacité des forêts à réguler les inondations est souvent beaucoup plus faible qu'on ne l'affirme souvent ; elle se limite aux orages pas trop intenses et aux bassins versants de taille réduite.

Les impacts des forêts sur les étiages sont en général très spécifiques des conditions locales. Les forêts peuvent évaporer plus d'eau ; en particulier, une transpiration plus élevée pendant la saison sèche augmentera les déficits hydriques du sol et réduira les débits d'étiage. Néanmoins, dans les situations où les propriétés d'infiltration du sol sont très faibles, la présence d'arbres peut être bénéfique. Ils protègent le sol contre l'effet « splash » et l'érosion, fournissent une litière de feuilles, et leurs racines ouvrent le sol, facilitant des voies d'écoulement d'eau vers des horizons plus profonds, entraînant ainsi un accroissement de la recharge en eau et des débits d'étiage plus importants (voir également section 1.5).

En termes de conservation du sol et de recharge en eau souterraine, l'impact des activités forestières dépend de la partition entre infiltration et ruissellement de surface. Un exemple extrême est celui d'un terrain surpâturé, avec perte de la structure de sol et formation de croûte superficielle dans des conditions de pluie de forte intensité, conduisant au ruissellement, et à une infiltration et une recharge minimums. Il peut en résulter un processus en boucle, avec une perte de végétation conduisant à une perte en sol qui, à son tour, entrainera une nouvelle perte de végétation et une augmentation de l'érosion.



Figure 30. Les bassins versants de Draix dans les Préalpes françaises (Provence-Alpes-Côte d'Azur) sont des bassins aux fortes pentes établis sur des sols marneux friables. La région de Draix était autrefois couverte par la forêt, mais il y a plus de 200 ans, les parcours ont remplacé les arbres. Le surpâturage d'un milieu fragile a alors conduit à une très forte érosion. En aval, les sols des terres arables en sont bons, et il est possible qu'ils se soient développés sur des matériaux charriés depuis ces montagnes. Ce paysage de badlands occupe une surface d'environ 2000 km² dans les Préalpes. La restauration de la forêt pour contrôler l'érosion a commencé dans certaines parties de cette zone dans les années 1870. Les bassins versants de recherche de Draix sont instrumentés depuis début 1983 (d'après Lavabre et Andreassian, 2000).

On peut s'attendre à ce que les forêts (surtout les forêts naturelles) aient une érosion plus faible que les terres agricoles et les prairies. Les forêts protègent le sol de l'érosion par leur couvert et leur litière, en abritant le sol de l'impact direct des gouttes de pluie; leur réseau racinaire assurant la cohésion du sol, ce qui est particulièrement important sur de fortes pentes.

L'érosion sous forêts naturelles est probablement plus faible que sous d'autres couverts végétaux, mais ce n'est pas nécessairement le cas pour les plantations forestières où les routes, le système de drainage, l'exploitation forestière et l'enlèvement du sous-étage peuvent provoquer des niveaux d'érosion plus élevés que ceux observés pour des champs ou des prairies bien gérés.

Il est important de prendre en compte un fait bien établi : l'impact du traitement n'est pas stable au cours du temps. L'effet du reboisement se révèle à *long terme* alors que celui du déboisement est à *plus court terme*. Une forêt naturelle abritant un mélange d'arbres d'espèces et d'âge différent utilisera l'eau de façon assez constante dans le temps, alors qu'une monoculture équienne peut montrer au contraire des changements prononcés d'utilisation de l'eau au cours du cycle de vie de la plantation. Dans le cas de l'eucalyptus, ceci peut commencer par une période de décroissance du rendement en eau durant les deux premières décennies suivant la plantation, le temps que les arbres s'installent et poussent. S'ensuit une période plus longue où l'impact sur le rendement en eau décroît lentement, puis ce rendement augmente faiblement, au fur et au fur que la forêt vieillit et que sa croissance ralentit, si bien qu'à la fin, le rendement en eau initial est partiellement recouvert. Plusieurs études sur des forêts d'eucalyptus ont confir-

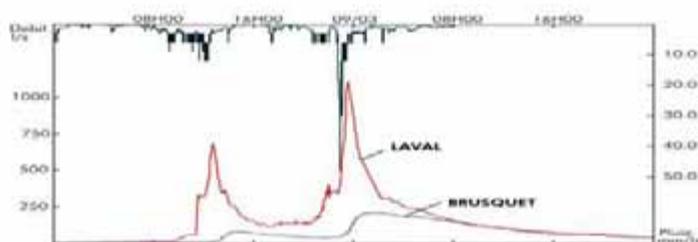


Figure 31. Réponse de l'écoulement (débit en m^3/s) de deux bassins versants érodé (Laval) et boisé (Brusquet) à un épisode pluvieux intense (max. 50 mm/h) les 8-9 mars 1991 (d'après Lavabre et Andreassian, 2000).

mé ce résultat, que l'on attribue à un pic de transpiration dans les peuplements d'eucalyptus vers l'âge de 10-20 ans environ. Il semble donc probable, bien que l'on ne dispose pas d'informations aussi documentées, qu'un modèle de diminution de la consommation en eau avec l'âge puisse également être appliqué à d'autres espèces forestières.

L'impact de la coupe d'une forêt peut entraîner une augmentation à court terme du rendement en eau, mais cela dépend néanmoins fortement du nouveau couvert végétal qui lui succédera. Les prairies peuvent avoir un rendement en eau plus élevé, alors que si la régénération de la forêt est faite avec des espèces à croissance rapide, l'utilisation en eau par ce jeune peuplement peut être à peu près égale (voire dépasser) celle d'une forêt âgée. En revanche, si le terrain après la coupe est surpâturé, l'absence de protection du sol, sa vulnérabilité à l'érosion et à la perte de réserve en eau du sol, peuvent conduire à une augmentation du rendement en eau, mais aussi à beaucoup plus d'écoulements extrêmes.

L'impact des forêts sur les débits de base est bien établi : les débits d'étiage sont réduits par la forêt et accrus par le déboisement. Néanmoins, il y a ici aussi des exceptions. Des observations dans les bassins versants du Draix indiquent que le reboisement de badlands fortement érodés peut conduire à une stabilisation et à un épaissement progressifs des horizons du sol, entraînant, avec le temps, une augmentation de la valeur des débits d'étiage (Figures 30 et 31).

L'impact de la végétation sur les ressources en eau est aujourd'hui mieux compris et les observations, bien que parfois contradictoires, peuvent être désormais expliquées scientifiquement. Les études sur le déboisement montrent une augmentation immédiate du rendement en eau, mais qui peut être seulement de courte durée, tout particulièrement si la nouvelle végétation est jeune et à croissance rapide. Potentiellement, les forêts transpirent plus que la végétation basse, mais il faut pour cela que la profondeur du sol soit suffisante. Sinon, la différence entre l'évaporation de la forêt et celle d'une prairie se limitera aux différences de leurs pertes par interception. Le climat est un facteur important et corrélé : si l'eau est toujours abondante, alors les différences d'évaporation dépendront largement de la plus grande rugosité et de l'albédo plus élevée du couvert forestier, en particulier là où les pluies sont fréquentes et le couvert souvent mouillé. Par contre, si la variation saisonnière de disponibilité en eau des sols est élevée, la capacité des arbres plus profondément enracinés à exploiter des réserves en eau plus profondes, conduira à des pertes par évaporation plus élevées.

L'impact des forêts sur les crues a depuis longtemps été source de controverse. Dans de nombreuses études anciennes, la gestion forestière était très critique vis-à-vis de

Encadré 7. Sols forestiers, qualité et quantité de l'eau : une synthèse américaine d'une forêt « naturelle » idéale.

« Les sources d'eau douce, les plus durables et de meilleure qualité, naissent, partout dans le monde, au sein des écosystèmes forestiers. Les caractéristiques biologiques, chimiques et physiques des sols forestiers sont particulièrement bien adaptées pour fournir de l'eau de haute qualité aux cours d'eau, réguler leur hydrologie, et alimenter un habitat aquatique diversifié. Les sols forestiers sont caractérisés par des litières et une teneur élevée en matières organiques, permettant d'héberger une micro et macro faune abondante et diverse. Les systèmes racinaires sous forêt sont très développés et relativement profonds, par comparaison avec ceux des terres agricoles et des prairies. Toutes ces conditions biologiques réunies donnent naissance à des sols à forte macroporosité, faible densité apparente, fortes conductivités hydrauliques saturées, et à capacité d'infiltration élevée. En conséquence, le ruissellement de surface est rare dans les milieux forestiers, et la plus grande part de la pluie gagne les cours d'eau par les voies d'écoulement sub-surfacique, où les processus de prélèvement des nutriments et de sorption des contaminants sont rapides. Du fait de la prévalence de ces mécanismes, les pics de crue sont modérés et les flux de base sont prolongés. La conversion des forêts en cultures sarclées, pâturages ou pelouses a presque toujours comme conséquence la détérioration de la qualité de l'eau. En Amérique du Nord, la majorité des communes dépend désormais des bassins versants boisés pour l'approvisionnement de leurs collectivités en eau de haute qualité et en quantités adéquates. Cela s'avère tout particulièrement vrai pour les régions ouest et est du continent où les populations sont nombreuses ou en expansion rapide. Les sols forestiers fournissent les conditions parfaites pour la fourniture d'une eau de grande qualité. »

Neary D.G. et al Linkages between forest soils and water quality and quantity. Forest Ecol. Manage. (2009), doi:10.1016/j.foreco.2009.05.027

vastes coupes rases réalisées avec des équipements lourds, causant d'importants dommages de compaction au sol, et entraînant souvent un accroissement important et immédiat des débits de pointe. Les pratiques de gestion forestière plus récentes cherchent à protéger le sol de la compaction et ont en conséquence un effet beaucoup moins prononcé sur les crues. Ceci montre donc qu'une grande partie de l'effet apparent de la forêt était, en fait, dû aux opérations de coupe dommageables au sol et à la construction de routes pour l'exploitation forestière. Par ailleurs, de nombreuses études ont été menées seulement sur le court terme, et n'ont donc pu inclure des orages plus rares mais plus violents. Les acquis disponibles montrent que, l'assertion selon laquelle les forêts réduisent les crues, est vraie dans son ensemble pour les hydrogrammes de crues petites et moyennes, mais pas pour les événements de plus grande ampleur qui sont potentiellement les plus dommageables.

Le type de sol est d'une importance cruciale : lorsqu'il est perméable et profond, l'impact des coupes sur les débits de pointe est probablement beaucoup moins évident que lorsqu'il est imperméable et superficiel. De même, lorsque le sol est friable et facilement érodé, c'est l'enlèvement du couvert forestier protecteur qui peut conduire à une augmentation importante des débits de crue, du fait de la perte d'épaisseur du sol qui en résulte, plutôt que des différences entre la forêt et d'autres types de végétation.

La non-stationnarité d'un couvert végétal apparemment « stable » peut conduire à remettre en question la validité de l'utilisation d'un bassin versant comme site de référence pour les études sur le changement climatique, ou comme témoin valable avec qui comparer un changement de couvert végétal sur un bassin versant expérimental proche. Il est donc clair qu'un bassin versant de référence doit être choisi avec précaution.

Le couvert et les sols forestiers ont en général un effet bénéfique sur la qualité des eaux souterraines et de surface générées dans le bassin versant.

Comme le couvert forestier limite les processus d'érosion du sol, les propriétés physiques de l'eau de surface générée dans un bassin versant boisé, telles que la charge en particules de sol et la turbidité, sont généralement faibles, par comparaison avec d'autres types de couvert. Quelques exceptions néanmoins peuvent être observées dans le cas de pluies intenses ou d'opérations forestières drastiques (construction de route, coupe rase).

Les propriétés chimiques de l'eau dépendent essentiellement des types de sol, des essences, de la composition chimique des pluies et des dépôts atmosphériques sur la canopée, mais également des processus du sol, dont l'altération de la roche mère. On observe communément qu'une activité biologique intense contribue, pour la plupart des sols forestiers, au processus de dénitrification. Cependant, les coupes à blanc peuvent induire, tout au moins temporairement, une augmentation de la teneur en nitrate des eaux de surface. L'acidité de l'eau est seulement un problème pour les sols développés sur des roches mères acides (granite, grès, roches métamorphiques). Elle peut être aggravée par les dépôts acides sur la canopée, et l'exportation minérale excessive (Ca, Mg) liée à la récolte du bois. Dans ce cas, le pH de l'eau peut être très bas.

Pour en savoir plus

- Calder, I. R. 2007. Forests and water – Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management* 251: 110–120.
- Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J-F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N. and Richard, D. 2005. The hydrological impact of the Mediterranean forest: a review of French research. *Journal of Hydrology* 301(1–4): 235–249.
- Cosandey, C. and Robinson M., 2000. *Hydrologie Continentale*. Armand Colin, Paris. 360 p.
- Lavabre, J. and V. Andréassian, 2000. *Eaux et forêts. La forêt : un outil de gestion des eaux?* [Waters and Forests. Can forest be a water management tool?]. Cemagref, Antony. 147 p.
- Neary, D.G. Ice, .G.G and Jackson, C.R 2009 Linkages between forest soils and water quality and quantity. *Forest Ecology and Management*. doi:10.1016/j.foreco.2009.05.027

3.

L'eau verte

« C'est l'eau verte qui alimente les écosystèmes terrestres et les cultures pluviales à partir de la tranche humide du sol, et c'est elle qui s'évapore dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau depuis les plantes et à partir des surfaces d'eau libre » (UNESCO, 2006). Cette définition, largement admise, contient l'essence hydrologique de ce phénomène naturel. Elle met également en évidence les liens aux autres systèmes naturels de la biosphère comme les paysages modifiés naturellement et par l'homme, et les écosystèmes terrestres.

Les flux liés à l'interception de la pluie et à l'évaporation du sol ont été précédemment décrits dans la section 1.4, ce chapitre se concentrera donc sur les aspects de l'eau verte associés aux relations hydriques dans les arbres et les écosystèmes forestiers, et la manière dont ces processus influent sur les fonctions des écosystèmes et les services qui en sont dérivés. Ce chapitre est divisé en trois sections :

- 3.1 L'eau verte, élément indispensable des processus intervenant dans les écosystèmes forestiers et de leurs fonctions
- 3.2 Fonctionnement hydrique des arbres: transpiration et photosynthèse
- 3.3 Comment les espèces végétales font face au stress hydrique



Figure 32. Ces nuages visibles au-dessus de la forêt amazonienne une après-midi de saison sèche sont attribués à une transpiration accrue. (19Août 2009) Crédit: NASA Les nuages ont sans doute été formés par la vapeur d'eau relâchée dans l'atmosphère par les arbres et les autres plantes par l'intermédiaire de la transpiration, liée à la photosynthèse, tout au long de la journée. Pendant la saison sèche, la forêt dense tropicale reçoit davantage de lumière du soleil. Les plantes se développent vigoureusement, faisant pousser de nouvelles feuilles et augmentant la photosynthèse. Pendant la chaleur du jour, l'air monte et finit par se condenser en nuages, comme ceux visibles sur cette photo. On remarquera qu'il n'y a pas de nuages formés au-dessus du fleuve, alors qu'ils sont bien répartis au-dessus de la forêt. Ceci s'explique par le fait que la terre se réchauffe en général plus rapidement que l'eau, et émet plus de chaleur durant la journée. L'air chaud, transportant de la vapeur d'eau évapotranspirée, monte depuis la terre. L'air se refroidit en montant et la vapeur d'eau se condense en de petits nuages comme on peut le voir ici. Mais ce qui monte doit redescendre. Dans le cas présent, la masse d'air descend au-dessus des fleuves quand les températures sont plus fraîches. En descendant, l'air se réchauffe empêchant la vapeur d'eau de se condenser en nuages. (Légende, d'après Holli Riebek)

Pour en savoir plus

- Agaponova ,O. 2007. Exploring the Concept of Green Water. Bridging Science and Water Resources Management M.Sc. Thesis - Lund University. 48 p. Accessed: <http://www.lumes.lu.se>

L'eau verte, élément indispensable des processus intervenant dans les écosystèmes forestiers, et de leurs fonctions

Yves Birot et Ramon Vallejo

L'eau verte est nécessaire, non seulement comme fondement de la biologie et de la vie des arbres, mais aussi pour permettre le fonctionnement de toutes les composantes de la biodiversité forestière (micro-organismes, insectes, animaux, plantes) impliquées dans les processus écosystémiques de base. Bien que la photosynthèse consomme très peu d'eau, les plantes terrestres ont besoin d'une circulation d'importantes quantités d'eau pour permettre la fixation du CO₂. L'eau est aussi essentielle à la circulation de nombreux éléments à travers l'écosystème.

Derrière la beauté du décor d'un paysage forestier, la dynamique de l'écosystème est active à travers une série de processus interdépendants et continus liés à : i) l'apport d'énergie ; ii) la circulation des éléments essentiels à la vie (azote, carbone, éléments minéraux, etc.) ; iii) la circulation de l'eau (cycle de l'eau). Bien que les arbres constituent la composante englobante ou la clef de voûte des surfaces boisées, de nombreuses autres communautés et populations (vivant en surface et dans le sol) : animaux, plantes et microorganismes, font partie intégrante de cet écosystème, et interagissent entre elles et avec leur environnement physique. Pour maintenir leurs fonctions vitales et leur croissance, tous les organismes vivants ont besoin d'apport d'énergie. Contrairement aux éléments qui sont recyclés (cycle biogéochimique), l'énergie doit être renouvelée en permanence. Le seul point d'entrée d'énergie dans l'écosystème est les plantes. Dans les plantes, la **photosynthèse** transforme environ 3% de la lumière incidente –le reste (97%) est dissipé sous forme de chaleur - et est à l'origine de la formation de la biomasse (voir section 3.3). On qualifie les plantes de **producteurs** ou d'**autotrophes**. Les plantes peuvent être ensuite consommées, directement ou indirectement, par les animaux, les insectes et les micro-organismes (Figure 33) appelés **consommateurs** ou **hétérotrophes**. A l'extrémité de la chaîne alimentaire, on trouve les **décomposeurs**, c'est à dire les micro-organismes qui fragmentent, digèrent et métabolisent les déchets organiques, tels que les fruits tombés au sol, le bois mort, la litière et les animaux morts. Ces trois groupes, **producteurs, consommateurs et décomposeurs ont besoin d'eau**, élément constitutif de

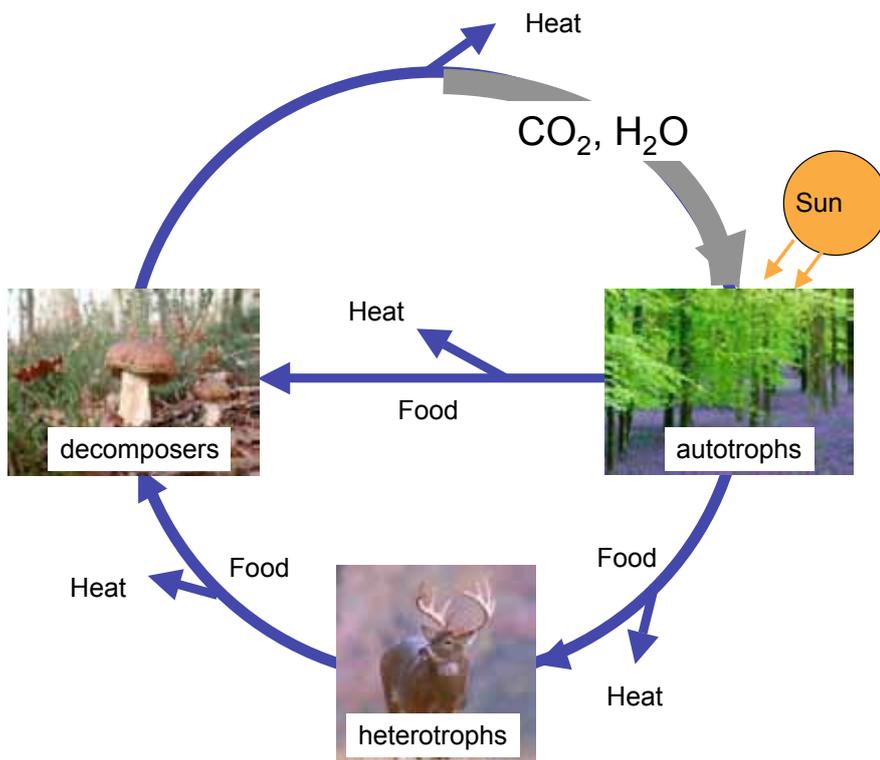


Figure 33. Principes de base du fonctionnement des écosystèmes forestiers.
(Canadian Forest Service)

<http://ecosys.cfl.scf.rncan.gc.ca/dynamique-dynamic/dynamique-dynamic-eng.asp>

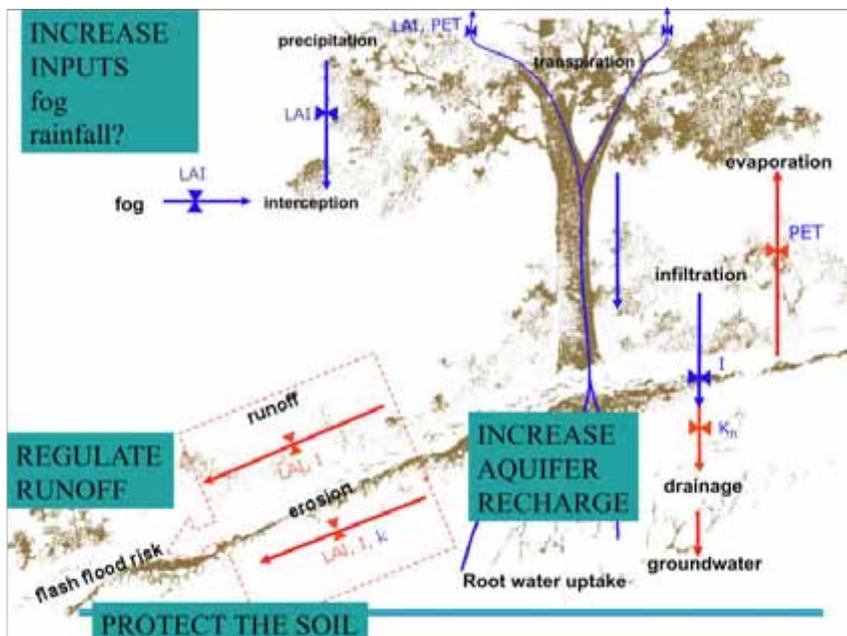


Figure 34. Rôle du couvert forestier dans la régulation de l'eau.

LAI : indice foliaire ;

PET : évapotranspiration potentielle ;

I : infiltration ;

k : coefficient de perméabilité

leurs tissus (70 à 90%), indispensable à leur dynamique et à la photosynthèse (producteurs). Chaque organisme vivant au sein d'un écosystème dépend entièrement du processus photosynthétique mis en oeuvre par les plantes, et donc de l'eau. La vigueur des plantes se retrouve dans le dynamisme de l'écosystème qui les hébergent.

En général, la quantité d'eau stockée dans les organismes est une petite partie, bien qu'essentielle, de la quantité d'eau qui circule dans l'écosystème et permet les processus vitaux, en particulier la photosynthèse. Lors d'une journée chaude et ensoleillée, une feuille peut renouveler la totalité de son eau en une heure. Une plante transpire environ 100 fois son poids frais au cours de sa durée de vie. Bien qu'un faible pourcentage d'eau transpirée par les plantes soit directement utilisé pour le processus photosynthétique, les plantes doivent consommer d'énormes quantités d'eau en réponse à la demande atmosphérique pour permettre l'inévitable compromis entre fixation de CO₂ et transpiration d'eau à travers les stomates. L'eau stockée dans les arbres de la forêt peut représenter plusieurs centaines de tonnes par hectare, soit quelques dizaines de mm.

Tableau 4. Classification des fonctions écosystémiques, biens et services (de Groot et al. 2002); en gras : relation directe avec l'eau; italique : relation indirecte avec l'eau

<p>1. Fonctions de régulation et services écosystémiques qui y sont liés. Ce groupe de fonctions est lié à la capacité des écosystèmes à réguler des processus écologiques et des systèmes vitaux essentiels grâce aux cycles biogéochimiques et autres processus biosphériques. En plus du maintien de la santé des écosystèmes (et de la biosphère), ces fonctions de régulation dispensent de nombreux services ayant des bénéfices directs et indirects pour les sociétés humaines (air pur, eau et sol, et services de lutte biologique).</p>	<p>1.1. Régulation gazeuse (fixation du C) 1.2. <i>Régulation du climat</i> 1.3. Filtrage de la pollution de l'air 1.4. <i>Prévention des perturbations</i> 1.5. Régulation de l'eau 1.6. Fourniture d'eau 1.7. Conservation du sol 1.8. Formation du sol 1.9. Cycle des éléments minéraux 1.10. Traitement des déchets 1.11. Pollinisation 1.12. Contrôle biologique</p>
<p>2. Fonctions d'habitat et services écosystémiques liés. Les écosystèmes fournissent un refuge et un habitat pour la reproduction pour les plantes et animaux sauvages, et contribuent donc à la conservation (in situ) de la diversité biologique et génétique et aux processus évolutifs.</p>	<p>2.1. Fonction de refuge 2.2. Fonction « pépinière »</p>
<p>3. Fonctions de production et biens et services écosystémiques qui y sont liés. La photosynthèse et le prélèvement de nutriments par les « autotrophes » convertissent l'énergie, le dioxyde de carbone, l'eau et les éléments minéraux en une grande variété de structures biochimiques, qui sont ensuite utilisées par les « consommateurs » pour créer une variété encore plus importante de biomasse vivante. Cette large diversité des structures biochimiques fournit de nombreux biens écosystémiques pour les besoins humains, allant de la nourriture et des matières premières aux ressources énergétiques et au matériel génétique.</p>	<p>3.1. <i>Nourriture</i> 3.2. <i>Matières premières</i> 3.3. <i>Ressources génétiques</i> 3.4. <i>Ressources médicinales</i> 3.5. Ressources ornementales</p>
<p>4. Fonctions d'information et biens et services écosystémiques qui y sont liés. Alors que les sociétés modernes sont de plus en plus urbaines, les écosystèmes proches de la nature offrent une « fonction de référencement » ; essentielle ; ils contribuent au maintien de la santé et au bien-être des hommes en procurant des occasions de réflexion, d'enrichissement spirituel, de développement cognitif, de récréation et d'expérience esthétique.</p>	<p>4.1. Information esthétique 4.2. Récréation et (éco) tourisme 4.3. Inspiration culturelle et artistique 4.4. Information spirituelle et historique 4.5. Information scientifique et éducative</p>

Par exemple pour le pin d'Alep, dans l'une des zones forestières les plus sèches d'Europe (climat semi-aride, précipitation annuelle de 270mm), on a estimé à environ 15 mm l'eau contenue dans la biomasse, contre 50 mm dans le sol (moyennes annuelles). L'eau stockée dans les arbres fluctue légèrement au cours de l'année, et l'eau contenue dans l'aubier peut alimenter la transpiration lors de brèves périodes de sécheresse, jusqu'à plusieurs jours, en particulier chez les conifères. Dans les conditions arides, la teneur en eau de la plante peut être relativement importante : cactus, arbre « fontaine » (El Hierro, Iles Canaries) ; ces plantes peuvent même fournir un peu de cette eau rare aux organismes vivants et même à l'homme.

L'eau est également, tout au long du cycle hydrique, **un transporteur principal d'éléments chimiques et minéraux** dans l'écosystème : c'est à la fois un vecteur et un solvant. Les nutriments se rapportent aux substances minérales ou organiques (éléments ou composés chimiques) dont les plantes et les animaux ont besoin pour leur croissance et un fonctionnement normal. Les plantes et les arbres obtiennent ces éléments minéraux principalement à partir du sol en les absorbant par leurs racines, en symbiose souvent avec des champignons mycorhiziens.

La composition chimique de l'eau de pluie est influencée par des facteurs naturels (par exemple, les vents de poussière trans-méditerranéens en provenance du Sahara), et anthropiques (agriculture, industrie, transport) dont certains exemples sont bien connus (pluies acides, dépôts azotés, etc.). D'autres modifications chimiques de l'eau de pluie peuvent ensuite survenir lors de son écoulement le long des troncs et l'égouttement. La chimie de l'eau est influencée, lors de son transfert à travers le sol, par les caractéristiques minérales et organiques de ce dernier. Le flux hydrique est une voie majeure pour le cycle des nutriments en forêt, bien que les valeurs des flux de nutriments par rapport au flux hydrique dépendent beaucoup des caractéristiques spécifiques de chaque élément minéral, en termes de mécanismes de son prélèvement par les racines et de son interaction avec la matrice du sol. L'écoulement de l'eau dans les sols est également un facteur déterminant de l'altération de la roche mère et de la formation du sol, tout spécialement pour les sols forestiers où les fortes activités biochimiques et microbiennes augmentent l'efficacité de l'altération par l'eau. La qualité de l'eau (eau bleue) est également liée à ces processus.

L'étude des processus naturels de l'écosystème, qui dépendent en grande mesure de l'eau, permet de comprendre leur influence sur les fonctions écosystémiques et sur les services qui y sont liés. L'eau est très souvent un facteur limitant dans les écosystèmes forestiers méditerranéens. Le manque d'eau peut entraîner une altération prononcée des fonctions écosystémiques, et avoir un impact négatif sur la fourniture de biens et services pour les sociétés humaines.

La fonction de l'écosystème est la capacité de ses éléments structurels et des processus naturels à fournir des biens et services qui satisfassent –directement et indirectement – les besoins des hommes. Selon cette définition, les fonctions écosystémiques peuvent être considérées comme un sous-ensemble des processus écologiques et de structures de l'écosystème. Chaque fonction est le résultat de processus naturels dans l'ensemble du

sous-système écologique dont elle fait partie. Les processus naturels, à leur tour, sont le résultat d'interactions complexes entre les composantes biotiques (organismes vivants) et abiotiques (chimiques et physiques) des écosystèmes, soumises aux déterminants de l'énergie et de la matière. Les fonctions de l'écosystème peuvent être classées (Tableau 4) en quatre groupes : i) fonctions de régulation, ii) fonctions d'habitat, iii) fonctions de production, iv) fonctions d'information. Ce classement, valide pour tous les écosystèmes, est particulièrement pertinent pour les forêts. Le Tableau 4 nous donne un aperçu de la façon dont la disponibilité en eau peut influencer sur les fonctions écosystémiques, les biens et les services.

L'approche fondée sur la fonction écosystémique apporte une vue holistique des biens et services issus de la forêt. Mettre l'accent sur les services fournis par les écosystèmes permet de mieux les relier aux caractéristiques mêmes de ces écosystèmes. Dans le cas des écosystèmes forestiers méditerranéens, déjà soumis à un déficit en eau récurrent, cette approche permet d'entrevoir **l'impact potentiel sur les sociétés, d'une partition imprudente de l'eau, favorisant excessivement l'eau bleue au détriment de l'eau verte, qui entraînerait une altération des biens et services assurés par les écosystèmes.**

L'eau verte apporte un service majeur à travers le rôle des forêts dans la capture de l'eau bleue, la régulation des flux et la circulation de l'eau (Figure 34). Ce mécanisme biologique est essentiel dans la régulation du cycle hydrique et dans l'utilisation de l'eau pour la production biologique. En effet, le cheminement de l'eau dans les arbres et la forêt génère une productivité, contrairement à un cheminement d'eau « inorganique » (en cas de déboisement ou de désertification). Ce dernier favorise l'érosion, la dégradation des terres, les crues et des dommages pour les communautés humaines et les écosystèmes, dans de nombreux cas, et en particulier dans les régions arides et méditerranéennes. L'eau s'évaporant d'un sol nu ne contribue pas à la production biologique, mais seulement aux processus physiques à la surface du sol.

La croissance de la forêt, assurée par l'eau verte, est l'un des mécanismes reconnus comme pertinents pour atténuer l'effet du changement climatique par la fixation du carbone atmosphérique (*Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques* UNFCCC). Ce service pourrait être amélioré par la réduction de la déforestation (en particulier pour les forêts denses tropicales), par l'augmentation des surfaces reboisées, et par des pratiques de gestion forestière durable, sous réserve toutefois de la disponibilité en eau.

L'eau verte est nécessaire pour alimenter et maintenir les processus au sein des écosystèmes, ainsi que les fonctions, biens et services dispensés par ces écosystèmes.

Les écosystèmes et les hommes dépendent de la même eau. Comment fournir assez d'eau verte pour alimenter et maintenir les écosystèmes, et en même temps fournir de l'eau bleue à la société ? C'est l'objet du chapitre 4.

Pour en savoir plus

- Groot De R. S., Wilson M.A. and Boumans R.M.J. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Special issue: The Dynamics and Value of Ecosystem Services: Integrating Economic and Ecological Perspectives. *Ecological Economics* 41: 393 – 408
- Nabuurs, G.-J., Thürig, E., Heidema, N., Armolaitis, K., Biber, P., Cienciala, E., Kaufman, E., Mäkipää, R., Nilsen, P., Petrisch, R., Pristova, R., Rock, J., Schelhaas, M.J., Sievanen, R., Somoogyi, Z. and Vallet, P. 2008. Hotspots of the European forest carbon cycle. *Forest Ecology and Management* 256: 194–200.
- Rockström, J., Gordon, L., Folke, C., Falkenmark, M. and M. Engwall. 1999. Linkages among water vapour flows, food production and terrestrial ecosystem services. *Conservation Ecology* 3(2): 5. <http://www.consecol.org/vol3/iss2/art5/>

Fonctionnement hydrique des arbres : transpiration et photosynthèse

Santiago Sabaté et Carlos A. Gracia

Les plantes prélèvent l'eau par leurs racines fines, la stockent dans différents compartiments de la biomasse, et perdent de la vapeur d'eau (transpiration) à travers leurs stomates. Lorsque les stomates sont ouverts et la transpiration a lieu, les plantes prélèvent dans l'atmosphère le dioxyde de carbone qui sera utilisé dans la photosynthèse. Le rapport entre le carbone prélevé et la perte d'eau par transpiration à travers les stomates de la plante, est utilisé comme mesure de l'efficacité de l'utilisation de l'eau. Cette valeur peut être instantanée lorsqu'elle est obtenue par des mesures d'échanges gazeux, ou intégrée sur des périodes plus longues grâce au cumul de ces mesures et estimée par des analyses isotopiques ou d'autres méthodes indirectes.

Le carbone constitue le composant principal du squelette de la biomasse de la plante, environ la moitié de la masse de la plante. Le carbone a une longue durée de vie dans les tissus de la plante, contrairement à l'eau. L'eau, en effet, a une courte durée de vie car elle ne fait que passer, pratiquement dans sa totalité, à travers la plante, du sol à l'atmosphère, par le processus de transpiration. La quantité d'eau stockée dans les tissus de la plante et impliquée dans les processus de photosynthèse et de respiration est très faible, comparativement à celle impliquée dans la transpiration. La fixation de carbone est donc un processus « cher » en termes de besoins en eau. La Figure 1 montre la relation entre l'efficacité instantanée de l'utilisation de l'eau et la quantité d'eau transpirée (kg = litre) par poids (kg) de carbone fixé par photosynthèse. L'efficacité instantanée de l'utilisation de l'eau est aisément obtenue par des mesures d'échanges gazeux.

L'énorme quantité d'eau transpirée pour fixer le carbone est à souligner. Dans le cas du chêne vert (*Quercus ilex*), des valeurs d'environ 3-5 (mmols CO₂ /mol of H₂O) sont classiques. Une fois décompté, le carbone réémis dans l'atmosphère par la respiration, la fixation de 1g de carbone peut entraîner un coût en eau 1.000 à 1.500 fois supérieur.

Des valeurs classiques obtenues par la mesure de l'efficacité instantanée de l'utilisation de l'eau par les plantes se situent souvent dans la fourchette 2 à 8 (mmols CO₂ /mol of H₂O). Dans le cas de *Quercus ilex*, des valeurs de l'ordre de 3 à 5 (mmols CO₂ /mol of H₂O) sont typiques, ce qui signifie que de 300 à 500 kg d'eau sont transpirés par kg de

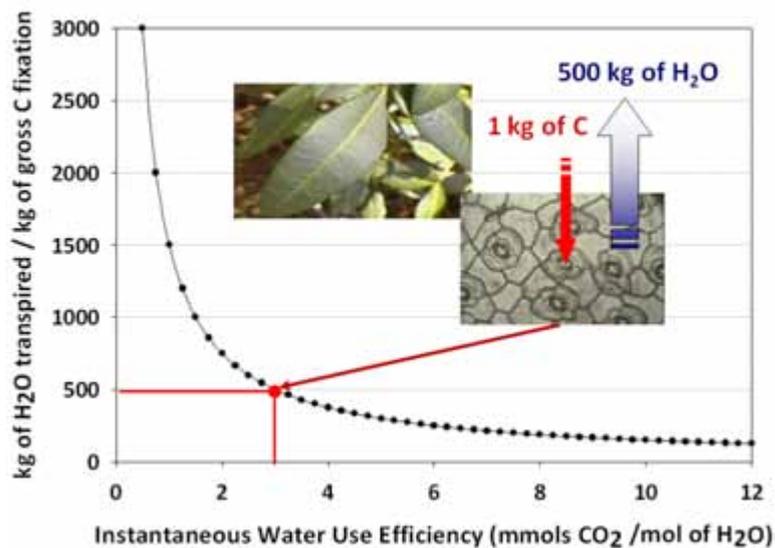


Figure 35 Utilisation de l'eau par les plantes dans la transpiration en fonction de l'efficacité instantanée de l'utilisation de l'eau (WUE). La plupart des plantes méditerranéennes ont une WUE proche de 3 mmols CO₂/mol H₂O, (point rouge). Dans ces conditions le coût en eau du prélèvement d'un 1g de carbone est de 500g. Une fois décompté le carbone réémis dans l'atmosphère par la respiration, 1 gramme de carbone stocké dans les plantes (c'est-à-dire la production primaire nette NPP), peut avoir un coût en eau résultant d'environ 1.000 à 1.500g.

carbone fixé par la photosynthèse. Une importante fraction de ce carbone (approximativement 60%) est re-émise dans l'atmosphère par la respiration, pouvant ainsi réduire jusqu'à 1/3 tiers l'efficacité de l'utilisation de l'eau si l'on considère la fixation nette de carbone. Les pertes en vapeur d'eau à travers les stomates de la plante sont généralement très supérieures à 1.000 fois le gain net de carbone.

La fixation du carbone est étroitement liée à la transpiration, en particulier pour les plantes en C₃. Mais quelle quantité d'eau la transpiration peut-elle émettre ? La quantité totale d'eau transpirée par les forêts est liée à deux contraintes environnementales importantes. La première est bien sûr la quantité d'eau disponible pour les plantes. La seconde est la quantité totale de l'énergie disponible pour l'évaporation, qui détermine la transpiration potentielle depuis les surfaces des feuilles des arbres. Plus la quantité d'eau disponible est importante plus il y aura d'eau transpirée, mais jusqu'à une limite supérieure imposée par la demande évaporative de l'air, c'est à dire l'énergie disponible pour l'évaporation.

En fonction de leur localisation, on peut trouver des forêts limitées en énergie et des forêts limitées en eau. En outre, des limitations en énergie et en eau, peuvent également coexister dans les mêmes forêts selon la saison. Dans la région méditerranéenne, par exemple, il est clair que les forêts sont principalement limitées en eau pendant les saisons estivales et limitées en énergie pendant les périodes hivernales, alors que l'on observe de meilleures conditions de croissance au printemps et en automne. La réserve du sol en eau joue un rôle important pour tamponner et surmonter les limitations estivales en eau pour les plantes. La Figure 36 montre le modèle d'évolution annuelle de l'eau dans le sol, de l'évapotranspiration et des précipitations dans une forêt de *Quercus ilex* (chêne vert/ liège) à Prades (NE Espagne). La quantité d'eau dans le sol de cette forêt varie de 96 à 0,2mm, selon la profondeur du sol et la saison dans l'année.

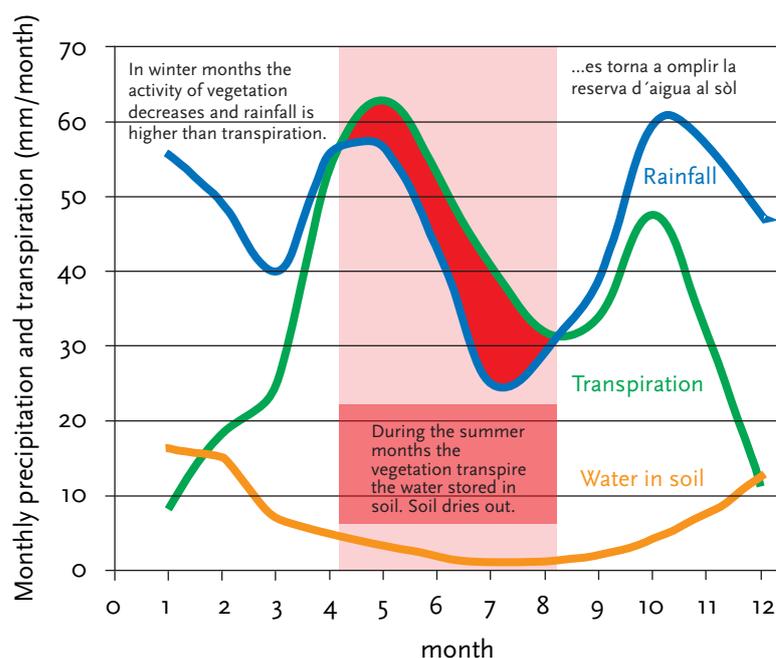


Figure 36. Modèle d'évolution annuelle de l'eau dans le sol, de l'évapotranspiration et de la pluviométrie dans une forêt de *Quercus ilex* (chêne vert) à Prades. L'estimation de la quantité d'eau du sol de cette forêt va de 96 à 0,2mm selon la profondeur du sol et la saison dans l'année.

Dans la région méditerranéenne, il est clair que les forêts sont de façon prédominante limitées en eau pendant les périodes d'été et limitées en énergie pendant les périodes d'hiver.

Lorsque les plantes sont soumises à la sécheresse, elles contrôlent les pertes en eau par différents mécanismes. La réponse la plus rapide est la fermeture des stomates qui réduit la conductance stomatique pour l'eau, mais en même temps réduit la fixation du carbone. En faisant cela, et à court terme, la plante résout le problème de la déshydratation continue des tissus. En outre, le rôle des aquaporines dans le contrôle des pertes en eau a été aussi souligné, en réponse aux variations de la disponibilité en eau dans le sol. Les aquaporines sont des protéines qui influencent le transport de l'eau dans la membrane cytoplasmique; les conduits dans la membrane cytoplasmique peuvent être fermés, quand la sécheresse s'installe, montrant ainsi l'importance de ce mécanisme cellulaire en réponse à la fourniture d'eau par le sol.

Le mouvement de l'eau à travers les membranes cellulaires est facilité par des protéines appelées aquaporines. Ces protéines appartiennent à une famille protéinique essentielle, dont les membres existent dans pratiquement tous les organismes vivants.

La réduction de la photosynthèse cause des problèmes aux plantes si les réserves carbonées stockées ne sont pas suffisamment disponibles pour subvenir aux besoins de la respiration de la plante. Par ailleurs, le manque d'eau peut limiter la fonction du transport du phloème (liber) et la translocation du carbone sur une longue distance à l'intérieur des arbres. D'autres problèmes peuvent surgir, comme une température excessive de la feuille, favorisée par une réduction de la transpiration, ou une radiation excessive pouvant endommager les photosystèmes du chloroplaste. Lorsque la limitation en eau est prolongée, la plante répond à moyen terme, par exemple par la chute des feuilles. D'autres réponses interviennent à long terme, telles que l'ajustement de la forme des individus ou des caractéristiques de leurs tissus.

La réponse la plus rapide des plantes pour contrôler les pertes en eau est la fermeture des stomates, ce qui réduit la conductance stomatique pour l'eau, mais en même temps réduit leur gain en carbone.

Étant donné la plasticité d'une espèce végétale donnée, on peut trouver des variations au niveau individuel pour différents caractères, par exemple liés aux structures du bois et de la feuille, ainsi que pour les ratios racine/partie aérienne. Différentes espèces peuvent, d'autre part, montrer des capacités de réponse et des stratégies différentes pour faire face à la sécheresse.

Une classification générale des catégories de réponse des plantes à la disponibilité de l'eau dans le sol est fondée sur la façon dont l'hydratation des tissus de la plante est maintenue stable dans des conditions environnementales fluctuantes. L'isohydrie est attribuée à un fort contrôle stomatique du niveau de transpiration, ce qui conduit à observer une similarité du potentiel hydrique foliaire en milieu de journée pour des plantes soumises à la sécheresse comme pour des plantes bien arrosées. Les plantes anisohydriques montrent typiquement moins de sensibilité stomatique à la demande évaporative et à l'humidité du sol, permettant de grandes fluctuations dans leur potentiel hydrique en milieu de journée. Un troisième type de réponse est observé pour les plantes iso-hydrodynamiques ; il montre un fort contrôle stomatique, maintenant relativement constant les gradients de potentiel hydrique, mais en même temps permettant au potentiel hydrique foliaire en milieu de journée de varier largement sur une base saisonnière en synchronie avec le potentiel en eau du sol.

Comme il a été indiqué précédemment, la quantité d'eau stockée dans les plantes ainsi que celle utilisée par la photosynthèse est de très loin plus faible que la quantité d'eau transpirée. Par exemple, dans le cas d'une forêt de chêne vert (*Quercus ilex*) à Prades (NE Catalogne) cité plus haut, la quantité d'eau transpirée a été estimée à 463mm/ an en moyenne, alors que l'eau libre dans les tissus frais se situe entre 11 et 17mm. En outre, dans la même forêt, et sur la base de la production primaire brute et de la respiration de la plante, la quantité d'eau utilisée par la photosynthèse comme donneur d'électron pour réduire le carbone, est estimée à environ 2,3mm/ an et l'eau produite par la respiration de la plante, à environ 1,2 mm/an. Ces valeurs illustrent bien les différences d'ordre de grandeur dans les quantités d'eau utilisées en forêt méditerranéenne par les différents mécanismes, et soulignent l'importance de la transpiration.

Pour en savoir plus

- Adams, H.D., Guardiola-Claramonte, M., Barron-Gafford, B.A., Villegasa, J.C., Breshearsa, D.B., Zoug, C.B., Troch, P.A. and Huxman, T.E. 2009. Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global change-type drought. *Proc Natl Acad Sci USA* 106: 7063–7066.
- Franks, P., Drake, P.L. and Froend, R.H. 2007. Anisohydric but isohydrodynamic: seasonally constant plant water potential gradient explained by a stomatal control mechanism incorporating variable plant hydraulic conductance. *Plant Cell and Environment* 30: 19–30.
- Heinen, R.B., Ye Q. and Chaumont, F. 2009. Role of aquaporins in leaf physiology. *Journal of Experimental Botany* 60(11): 2971–2985.
- Jackson, R.B., Sperry J.S. and Dawson T.E. 2000. Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions. *Trends in Plant Science* Vol. 5(11): 482–488.
- Lawlor, D.W. and Cornic, G. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell and Environment* 25: 275–294.

Comment les espèces végétales s'adaptent au stress hydrique¹

Oliver Brendel et Hervé Cochard

Le manque d'eau provoque des conditions stressantes pour les plantes. Nous examinerons dans cette section leurs différentes adaptations au déficit hydrique dans le sol. Un minimum d'eau dans les sols est nécessaire à la survie des plantes car il permet de maintenir un flux depuis les racines jusqu'aux feuilles assurant une turgescence cellulaire suffisante pour la croissance, le turnover des nutriments et l'ouverture des stomates permettant les échanges gazeux.

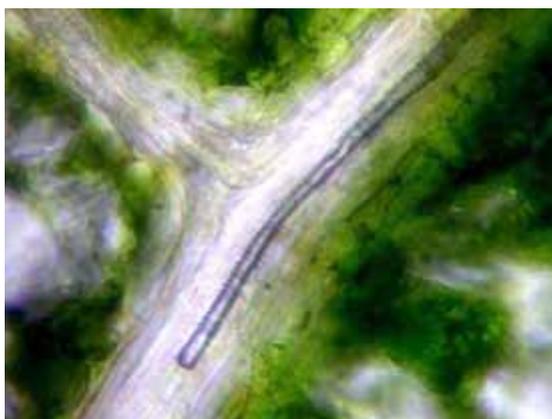
Les plantes ont développé des stratégies diverses, à différentes échelles temporelles, pour gérer la disponibilité réduite en eau du sol : ajustements phénologiques, contrôle du statut de l'eau et caractères morphologiques et anatomiques qui peuvent varier entre les espèces et à l'intérieur de celles-ci.

Les plantes herbacées peuvent **échapper** à certaines périodes du cycle annuel pendant lesquelles l'eau est peu disponible en bouclant leur cycle : croissance / floraison / production des graines avant le début d'une période de sécheresse. Les plantes pérennes et vivaces, telles que les arbres forestiers, ne peuvent pas totalement échapper aux périodes de sécheresse, néanmoins l'ajustement du débourrement, le développement de la feuille et la chute des feuilles induite par la sécheresse, peuvent limiter l'impact de la sécheresse sur le cycle de croissance, comme cela a été mis en évidence dans le cas de différentes espèces méditerranéennes de chênes caducs et sempervirents.

La résistance à la sécheresse chez les arbres forestiers est donc principalement une question de survie et de compétition au sein d'un écosystème. Cependant, le maintien de la croissance est important aussi à prendre en compte pour une forêt de production. Les stratégies de résistance à la sécheresse peuvent être classées en deux groupes : les mécanismes **d'évitement** et les mécanismes **de tolérance**, ces derniers pouvant à leur tour être scindés en deux : **évitement de la déshydratation** et **tolérance à la déshydratation**. Le maintien d'une hydratation suffisante des tissus est une des stratégies utilisées pour éviter le stress hydrique. Cela peut être mesuré par le potentiel hydrique des tissus. La fermeture des stomates dès l'apparition de la sécheresse conserve l'eau dans la plante

¹ Voir aussi section 3.2

Figure 37. Une bulle d'air emprisonnée dans un vaisseau du xylème d'une veine de feuille d'arbre. Lors d'un stress hydrique, la tension dans la sève du xylème augmente et la cavitation peut avoir lieu. Cela provoque une entrée d'air dans les vaisseaux du xylème qui interrompt l'alimentation en eau des feuilles et peut conduire à la mort de la plante par dessiccation. Les espèces méditerranéennes sont beaucoup plus résistantes à la cavitation que d'autres espèces ce qui, en partie, peut expliquer pourquoi elles peuvent mieux faire face à un stress hydrique intense. (Photo : H. Cochard)



(mesurée par le potentiel hydrique), la plante est ainsi protégée, mais sa productivité diminue car moins de carbone peut y pénétrer.

Une autre stratégie de la plante consiste à **tolérer** la diminution du potentiel hydrique des tissus ; les stomates sont maintenus ouverts et la productivité ne diminue pas. Ce processus peut être réalisé par deux voies : i) soit par l'augmentation de la **tolérance à la déshydratation** par un ajustement osmotique des cellules, les propriétés anatomiques des éléments conducteurs d'eau (perte de la conductivité) permettant une tension plus élevée sur la colonne de l'eau ; ii) soit par l'augmentation des mesures **d'évitement de la déshydratation**, par exemple en réduisant la surface foliaire, la densité stomatique, en augmentant l'épaisseur des feuilles, leur épaisseur cuticulaire et leur sclérophylie, en augmentant la masse de la partie souterraine (ratio racine/partie aérienne) et la profondeur d'enracinement.

Certaines de ces stratégies demandent du temps pour se mettre en place, en particulier les ajustements morphologiques et anatomiques, alors que d'autres stratégies incluent des réponses rapides. La fermeture stomatique et les ajustements osmotiques sont les deux réponses physiologiques les plus rapides chez les plantes pour s'adapter à un déficit en eau du sol. Suivent ensuite les **ajustements morphologiques** tels qu'une augmentation de la croissance racinaire, et des changements continus pour les plants en croissance de la morphologie de la tige et de la feuille. La recherche (par les racines) d'eau disponible dans le sol est particulièrement cruciale pour les plantes méditerranéennes, et on observe à cet égard d'importantes différences entre les espèces. Il a été par exemple établi que *Quercus ilex* a un système d'enracinement plus profond que celui de *Q. suber*, et que sa croissance racinaire se poursuit pendant les périodes de sécheresse, contrairement à celles du *Q. cerris* et du *Q. frainetto*. Des différences significatives de biomasse racinaire ont été observées pour quatre espèces méditerranéennes de pin présentant des degrés divers de tolérance à la sécheresse. Cependant, ces différences n'existent pas seulement entre espèces, mais également au sein d'une espèce donnée chez laquelle la variabilité génétique conduit à une diversité de réponses. C'est ainsi que des différences significatives ont été constatées pour l'allocation de la biomasse vers les racines vs les parties aériennes entre des familles de *Pinus pinaster*, et des provenances de *Cedrus libani*, pour qui les provenances de zones sèches ont en système racinaire plus développé. Dans ce qui suit, nous tenterons de faire la lumière sur deux caractères particulièrement intéressants : les différences entre espèces pour l'embolie des vaisseaux conducteurs d'eau lors d'un stress hydrique et la diversité intra-spécifique de leur efficacité d'utilisation de l'eau.

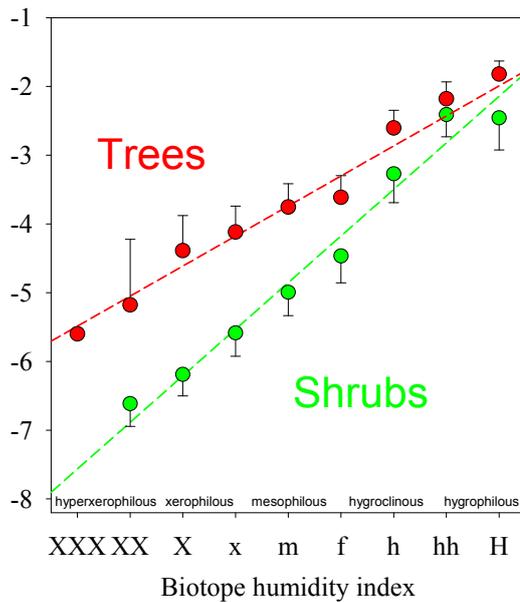


Figure 38. Corrélation entre la vulnérabilité du xylème à la cavitation d'une centaine d'espèces ligneuses de la flore française et l'index d'humidité de leur habitat. La résistance des espèces à la cavitation est estimée par la pression du xylème provoquant 50% de cavitation (P_{50} , MPa). L'index d'humidité du biotope est tiré de Rameau et al. (1989, 1993, 2008). Les espèces d'habitat sec sont clairement plus résistantes à la cavitation. Pour un même habitat, les arbustes sont plus résistants à la cavitation que les arbres, ce qui reflète un système racinaire plus superficiel pour les premiers.

Lors d'un stress hydrique prononcé, **une embolie des vaisseaux conducteurs** (empêchant la sève de monter du sol vers les feuilles) peut avoir lieu et conduire à la dessiccation et la mortalité de des branches et de l'arbre. Les seuils de la pression critique du xylème liés à l'embolie sont fortement variables entre les espèces, les espèces méditerranéennes étant parmi les plus résistantes à la sécheresse.

Comme il est indiqué ci-dessus, la sève dans les vaisseaux du xylème subit une forte pression négative (= tension). Soumise à cet effet, l'eau est physiquement métastable et peut passer à une phase gazeuse plus stable par **cavitation**. La cavitation provoque l'**embolie**, c'est-à-dire qu'elle rompt l'intégrité des colonnes d'eau dans les vaisseaux du xylème (Figure 37) et affecte donc les mécanismes permettant l'ascension de la sève depuis le sol jusqu'aux feuilles. Les conséquences physiologiques de la cavitation sont d'une importance capitale car elles peuvent conduire à la mortalité de la pousse ou de l'arbre par dessiccation. Cela explique pourquoi de nombreux efforts de recherche ont été consacrés au cours des trois dernières décennies à la caractérisation et à la compréhension de la cavitation des arbres. Au vu de ces études, il est clair que la cavitation ne se développe seulement que lorsque la pression du xylème tombe au-dessous d'une valeur critique: P_{cav} . Cette valeur est extrêmement variable selon les espèces d'arbres ; c'est probablement l'un des paramètres physiologiques les plus variables.

Les espèces les plus vulnérables (telles que *Salix* ou *Populus*) ont des valeurs de P_{cav} qui peuvent aller jusqu'à -1.5MPa. En revanche, les espèces les plus résistantes à la cavitation (comme *Cupressus* ou *Callitris*) ont des valeurs de P_{cav} inférieures à -10MPa. Une telle amplitude a des implications profondes sur les relations hydriques chez les espèces et sur leurs réponses au stress hydrique. Les vaisseaux du xylème des espèces dont le P_{cav} est élevé sont par nature incapables de supporter un fort niveau de stress hydrique.

Encadré 8. Recherches sur les caractères liés à l'adaptation à la sécheresse : quelques résultats

Les caractères liés à l'adaptation à la sécheresse ont été étudiés dans des tests de provenance ou de population pour les espèces forestières méditerranéennes les plus importantes (*Pinus halepensis*, *Pinus brutia*, *Pinus pinaster*, *Pinus nigra*, *Pinus canariensis*, *Pinus pinea*, *Juglans regia*, *Castanea sativa*, *Quercus suber*, *Quercus coccifera*, *Quercus ilex*, *Cedrus libani*). Ces caractères sont essentiellement : la survie, la croissance, la biomasse des différents compartiments, l'anatomie du bois liée aux éléments conducteurs de l'eau, l'efficacité de l'utilisation de l'eau, la conductance et la densité stomatiques, l'assimilation du CO₂, le statut hydrique de la plante, l'ajustement osmotique de la feuille, l'anatomie de la feuille, l'état antioxydant, la conductivité hydraulique et la perte de conductivité. Les mesures d'un caractère pour une condition environnementale sont parfois insuffisantes pour caractériser des différences entre populations, mais lorsqu'un index de plasticité est calculé pour différents environnements, ces différences peuvent alors être déterminées. Tel est le cas pour *Pinus halepensis* pour lequel de jeunes arbres d'une garrigue ont montré une plasticité très supérieure à celle d'arbres poussant sur des zones rocheuses, mais rien de n'a été observé pour *Quercus coccifera*.

La variabilité génétique a été également étudiée en utilisant des marqueurs génétiques neutres : pour *Castanea sativa*, on a détecté un modèle géographique lié aux précipitations, pour *Pinus pinaster*, *P. nigra* and *P. uncinata*, la diversité génétique intra-population était liée aux précipitations estivales.

Ces espèces doivent donc fermer très tôt leurs stomates lors de la sécheresse pour éviter le développement d'embolies dommageables, on les qualifie donc d'espèces « **évitant la sécheresse** ». En revanche, les espèces dont le P_{cav} est bas, peuvent tolérer un stress hydrique plus intense et ont tendance à être plus **tolérantes à la sécheresse**. Dans les deux cas, l'on observe une remarquable coordination entre le xylème et les fonctions stomatiques : les stomates se ferment pour contrôler la pression du xylème et conserver ainsi sa valeur un peu au-dessus de P_{cav} .

Le haut niveau de résistance à la sécheresse des espèces forestières méditerranéennes se paie au prix d'une forte densité du bois et d'une faible croissance.

Le comportement de nombreuses espèces méditerranéennes est assez surprenant à première vue. En règle générale, elles sont très résistantes à la cavitation (Figure 38) et ont tendance à présenter les valeurs de P_{cav} les plus négatives jamais mesurées. Cependant, le comportement de leurs stomates ne diffère pas énormément de celui d'espèces dont les valeurs de P_{cav} sont plus élevées. En d'autres termes, les stomates se ferment bien avant que les pressions du xylème atteignent des valeurs de P_{cav} critiques. Elles sont donc à la fois « évitantes » en termes de perte d'eau, et « tolérantes » en termes de fonctionnement du xylème. En conséquence, la marge de la sécurité hydraulique des espèces méditerranéennes est supérieure à celle des espèces tempérées. Cette stratégie explique largement pourquoi les espèces méditerranéennes sont très résistantes au stress hydrique. Cependant, il y a des coûts associés à ce comportement. Tout d'abord, les stomates ne peuvent rester ouverts que durant une petite partie de la saison de végétation, c'est-à-

Encadré 9. Une approche génétique de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE)

Quelques études seulement ont analysé en détail la diversité de la WUE des arbres des forêts méditerranéennes. Cela a été réalisé au travers de croisements contrôlés, afin soit d'évaluer l'héritabilité soit de décomposer la variabilité observée au sein d'une famille de pleins frères en des composantes à hérité mendélienne, c'est à dire la détection de loci liés à un caractère quantitatif (QTL). Le premier QTL indiquant un déterminisme génétique pour la WUE des espèces forestières méditerranéennes a été observé pour *Pinus pinaster*. Une autre étude a détecté 17 QTL pour la WUE du *Castanea sativa*, ce qui explique une proportion de variance phénotypique totale d'un niveau faible à modéré. Les QTL étaient distribués dans tout le génome. Cependant lorsque l'on a comparé ces QTL avec les QTL pour la WUE de *Quercus robur*, pour lequel un contrôle oligogénique avait été mis en évidence (avec peu de QTL, mais majeurs), aucun QTL n'a été co-localisé entre les deux espèces. Des cartes génétiques existent également pour les familles de *Pinus halepensis* et *Juglans regia*, néanmoins aucune étude sur la détection de QTL n'a été encore publiée. Pour *Pinus pinaster*, des QTL ont également été détectés pour la croissance et les propriétés du bois. Les études de détection des QTL évoquées ci-dessus sont fondées sur des conditions optimales de croissance ou des peuplements naturels, il n'y a, à ce jour, aucun résultat publié sur la détection de QTL dans des conditions de sécheresse. De tels QTL sont un préalable pour caractériser les candidats fonctionnels et les gènes candidats. Ce n'est qu'ensuite que les gènes liés au stress hydrique pourront être utilisés pour des études de génétique des populations, et élucider les schémas de sélection naturelle et d'adaptation, qui constituent la ressource majeure pour une sylviculture durable et adaptative.

dire lorsque l'eau est disponible. Cela peut impliquer que ces espèces doivent maximiser leur gain en carbone durant cette période, au prix d'une faible efficacité de l'utilisation de l'eau. Le deuxième inconvénient est le prix élevé à payer pour la construction des vaisseaux du xylème avec un faible P_{cav} : en effet, les parois des vaisseaux doivent être mécaniquement renforcées pour faire face aux hautes tensions du xylème, demandant de ce fait encore plus de ressources en carbone.

Les caractères adaptatifs à la sécheresse augmentent les chances de survie des plantes soumises à un déficit hydrique du sol. Les variations entre espèces et au sein des espèces (entre populations) permettent la sélection de sources de graines mieux adaptées pour la plantation.

Tous ces caractères mentionnés ci-dessus peuvent être qualifiés d'« adaptatifs » à la sécheresse s'ils augmentent les chances de survie des plantes soumises à un déficit en eau du sol. Les différences inter-spécifiques pour ces caractères adaptatifs sont un des facteurs qui expliquent la répartition géographique observée des espèces, par exemple le long de gradients environnementaux allant de milieux mésiques à des milieux plus xériques. Néanmoins, la diversité peut également exister au sein d'une même espèce, du fait de différences de constitution génétique. Cette diversité génétique est la base même de l'adaptation des populations (c'est-à-dire des plantes poussant dans un environnement commun) à leurs conditions environnementales locales. L'origine génétique de chaque individu est appelée « génotype ». L'adaptation est un processus par lequel, au fil des générations, la composition des différents génotypes au sein d'une même po-

pulation se transforme sous l'effet de la sélection naturelle, et par conséquent crée des différences entre populations. L'observation des arbres issus de graines provenant de différentes populations, plantés dans un ou plusieurs milieux communs (tests de provenance) est un outil de détection de telles différences. Elle permet d'identifier les populations qui sont mieux adaptées à certains environnements que d'autres. Cela permet donc de préconiser des stratégies pour le classement des sources de graines et leur utilisation en plantation.

Une diversité au sein des espèces végétales méditerranéennes a été observée dans leur capacité d'accumuler la biomasse par la photosynthèse pour une quantité donnée d'eau utilisée, appelée **efficience de l'utilisation de l'eau (WUE)**. Cela ouvre la voie à des applications potentielles dans les domaines de l'amélioration génétique et de la sylviculture.

L'efficience de l'utilisation de l'eau (WUE), le ratio de la biomasse accumulée pour une quantité donnée d'eau utilisée, peut être estimée sur un grand nombre d'échantillons en mesurant la composition isotopique du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) de matériel végétal (feuilles, bois, cellulose extraite du bois). Les différences existantes dans la WUE au sein des populations ont été observées pour *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Juglans regia*, *Castanea sativa*, *Quercus ilex*, et *Cedrus libani*. Ces différences entre de nombreuses espèces montrent que la WUE est un trait qui a été sélectionné dans des environnements spécifiques, et qui est donc probablement important pour l'adaptabilité et la survie. Néanmoins, la WUE n'est pas nécessairement un trait directement lié à la résistance au stress hydrique ; il faut l'interpréter dans le cadre de situations environnementales spécifiques. Des exemples classiques existent pour *Pinus pinaster* et le *Castanea sativa*, pour lesquels des arbres issus de provenances plus sèches, montrent une efficience de l'eau plus faible. WUE est donc un trait composite dont la compréhension d'ensemble nécessite une exploration plus approfondie, en particulier par des études génétiques (voir Encadré 9).

Pour en savoir plus

- Baquedano, F. J., Valladares, F. and Castillo, F.J. 2008. Phenotypic plasticity blurs ecotypic divergence in the response of *Quercus coccifera* and *Pinus halepensis* to water stress. *European Journal of Forest Research* 127: 495–506.
- Casasoli, M., Derory, J., Morera-Dutrey, C., Brendel, O., Porth, I., Guehl, J., Villani, F. and Kremer A. 2006.
- Comparison of quantitative trait loci for adaptive traits between oak and chestnut based on an expressed sequence tag consensus map. *Genetics* 172: 533–546.
- Cochard, H. 2006. Cavitation in trees. *CR Physique* 7:1018–1126.
- Correia, I., Almeida, M., Aguiar, A., Alia, R., David, T. and Pereira, J. 2008. Variations in growth, survival and carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) among *Pinus pinaster* populations of different geographic origins. *Tree Physiology* 28: 1545–1552.
- Eveno, E., Collada, C., Guevara, M.A., Leger, V., Soto, A., Diaz, L., Leger, P., Gonzalez-Martinez, S.C., Cervera, M.T., Plomion, C. and Garnier-Gere, P.H. 2008. Contrasting patterns of selection at *Pinus Pinaster* Ait. drought stress candidate genes as revealed by genetic differentiation analyses. *Molecular Biology and Evolution* 25: 417–437.

4.

Eau bleue et/ou eau verte, quel compromis possible ?

La pluie est la seule eau incidente naturelle dans un bassin versant, elle a une quantité variable mais finie. La partition de l'eau incidente en flux d'eau bleue et d'eau verte dépend dans une large mesure de processus naturels pour lesquels les types de végétation et d'utilisation des terres jouent un rôle important. Le développement des sociétés humaines a été fondé sur la domestication des ressources biologiques (plantes, animaux) et physiques (sol, eau), et sur l'émergence de l'urbanisation et des industries, comme cela s'est produit, il y a plusieurs millénaires, dans la partie orientale du Bassin Méditerranéen. Ce développement a consisté essentiellement en un changement du couvert végétal, et en une **redistribution** partielle des flux d'eau, des écosystèmes naturels vers les écosystèmes artificiels, des cours d'eau vers les villes, et donc de la nature aux hommes.

Aujourd'hui, alors que les ressources en eau deviennent rares dans la région méditerranéenne, il s'avère essentiel de reconnaître la compétition inévitable, voire les conflits entre les objectifs contradictoires pour l'utilisation de l'eau. Comment développer des stratégies raisonnées et fondées scientifiquement qui intègrent la gestion de l'eau avec

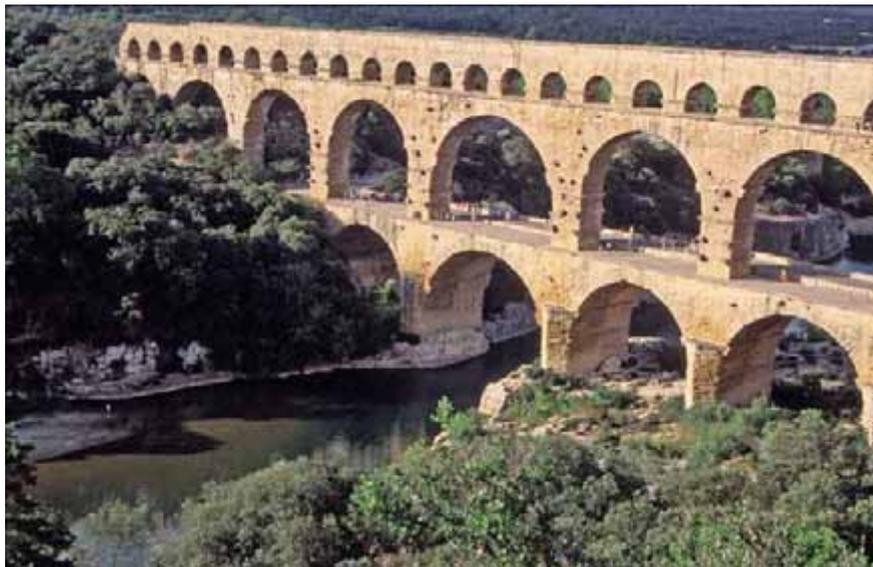


Figure 39. Un exemple de génie civil romain pour approvisionner en eau bleue la ville de Nîmes (France) : le célèbre Aqueduc du Gard (2000 BC) au-dessus de la rivière de Gardon. Photo : C. Birot).

les besoins de l'environnement et des hommes ? Ce chapitre présente différents aspects des voies possibles de redistribution des flux d'eau, grâce à une 'ingénierie' physique et biologique, entre les composantes des écosystèmes, entre l'amont et l'aval, entre la nature et les sociétés. Ce chapitre pose aussi la question de l'empreinte en eau dans notre vie quotidienne, et fait le bilan, dans une perspective historique, de programmes de grande envergure entrepris en matière d'hydrologie forestière et de conservation des sols.

Assurer la fourniture d'eau aux arbres et aux personnes : les voies possibles

Carlos Gracia, Jerry Vanclay, Hamed Daly, Santi Sabaté, et Javier Gyenge

Dans un contexte de rareté en eau, de menaces sur les forêts dans les zones plus sèches, et donc d'un inévitable compromis à trouver entre l'homme et la nature pour l'utilisation de l'eau, cette section traite de trois questions importantes pour les responsables forestiers et les gestionnaires de l'espace.

- a) les techniques de gestion de la végétation (étage principal et sous-étage) peuvent-elles réduire le stress hydrique des écosystèmes forestiers existants ?
- b) La gestion de la végétation et l'aménagement du territoire peuvent-ils accroître la disponibilité en eau bleue, et en eau verte pour d'autres usages que ceux de la forêt ?
- c) Dans quelle mesure et dans quelles conditions l'eau verte peut-elle être dirigée vers des plantations d'arbres ?

Nous avons besoin des forêts pour assurer la fourniture en biens et services divers pour les sociétés. La protection de la qualité du sol et de l'eau sont deux services cruciaux étroitement liés à la structure du couvert végétal. Cependant les sécheresses récurrentes et les températures croissantes menacent la survie de certaines forêts arides et semi-arides sur toute la planète. La canopée et les racines fines sont, physiologiquement parlant, les parties les plus actives des arbres. Tout régime de gestion des écosystèmes forestiers doit donc être fondé sur une compréhension détaillée du fonctionnement de ces deux composantes et de leurs réponses aux différents traitements sylvicoles. L'aubier s'avère également essentiel car il relie les racines au couvert, sa surface dépend aussi fortement de la sylviculture.

La structure des forêts méditerranéennes montre, dans la plupart des cas, une population dense d'arbres de diamètre faible à modéré. L'exploitation a, depuis des siècles, laissé derrière elle des tiges rabougries qui ont, dans certains cas, une forte aptitude à rejeter. Dans des environnements critiques, ce phénomène est à l'origine de populations très denses constituées de petits arbres ayant une faible croissance en raison de : 1) un manque de disponibilité en eau associé à un potentiel élevé d'évapotranspiration, caractéristiques du climat méditerranéen, 2) des niveaux de respiration par unité de biomasse ou unité de volume de bois plus élevés pour les taillis que pour des structures comportant des populations plus « mûres ».

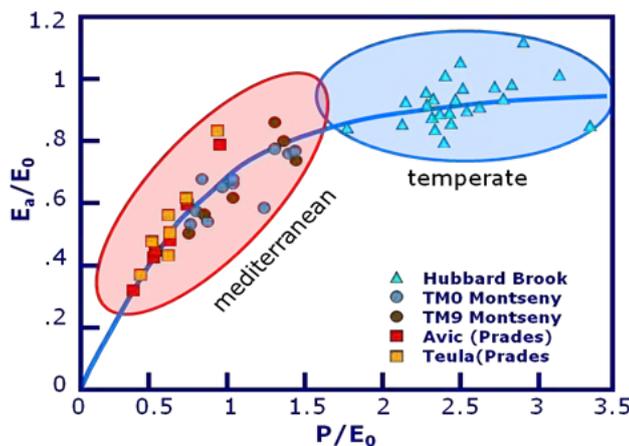


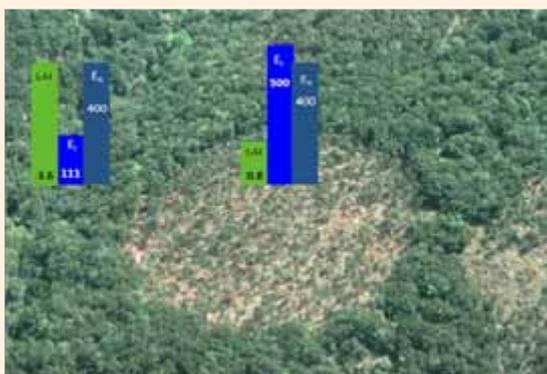
Figure 40. Dans les forêts méditerranéennes où les précipitations effectives sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle, l'évapotranspiration réelle ne représente qu'une fraction de l'évapotranspiration potentielle ou, en d'autres termes, les forêts se développent dans des conditions de limitation hydrique. Dans les forêts tempérées ou boréales où les précipitations sont plus élevées que l'évapotranspiration potentielle, l'évaporation réelle est égale ou très proche de l'évapotranspiration potentielle. Ces caractéristiques environnementales sont à la base des importantes différences dans les réponses écophysologiques des forêts limitées ou non limitées en eau (Source : Piñol et al. 1999).

Par ailleurs, il est aujourd'hui communément admis (voir sections 2.1 et 2.2) que les forêts sont des consommatrices nettes en eau. La plupart des travaux expérimentaux ont montré des niveaux élevés de transpiration des écosystèmes forestiers, et des effets directs des forêts sur la réduction du rendement en eau et des écoulements des cours d'eau. Dans les forêts limitées en énergie et dont le couvert est continu – forêts pour lesquelles la disponibilité en eau est supérieure à l'évapotranspiration potentielle (ETP) – la transpiration annuelle est très proche de cette ETP, alors que dans les forêts limitées en eau, comme c'est le cas de la plupart des forêts méditerranéennes, la transpiration annuelle peut représenter une fraction élevée de la pluviométrie annuelle. On a relevé jusqu'à 90% pour le *Quercus ilex*.

Deux questions se posent donc : 1) une gestion forestière et des techniques d'aménagement adéquates peuvent-elles réduire le stress hydrique des arbres et contribuer, au moins, à la survie des peuplements forestiers ? et 2) une gestion forestière et des techniques d'aménagements adéquates peuvent-elles être utilisées pour réduire l'utilisation en eau des forêts et / ou augmenter l'efficacité de l'utilisation en eau (moins d'eau utilisée pour produire de la biomasse) ? La réponse à ces questions n'est pas tâche facile. On doit comprendre les besoins en eau des arbres indispensables pour assurer différentes fonctions et la manière dont les limitations hydriques peuvent affecter ces fonctions. Il est bien connu que la quantité d'eau directement impliquée dans la photosynthèse est presque négligeable et que la plupart de l'eau est transpirée à travers les stomates au niveau de la feuille. Néanmoins le rôle de cette transpiration est crucial pour l'arbre. L'eau transpirée est le véhicule qui transporte les nutriments depuis le sol, et la perte de cette eau à travers les stomates est le mécanisme de prélèvement du carbone par les feuilles, entre autres rôles physiologiques importants.

Dans la plupart des forêts méditerranéennes, l'évapotranspiration potentielle est beaucoup plus élevée que les précipitations, les arbres ne peuvent donc pas atteindre les niveaux potentiels de transpiration à cause du manque d'eau (Figure 40). Dans ces conditions, la réduction de l'indice foliaire LAI (par ex. en enlevant certains arbres), ne conduit pas à une réduction proportionnelle de la transpiration. Les arbres restants peuvent en effet utiliser une grande partie de l'eau laissée disponible par les arbres qui ont été cou-

Encadré 10. Manipulation expérimentale dans une forêt de *Quercus ilex* à Prades (Espagne). La forêt a une structure de taillis à forte densité de rejets. La densité des rejets a été réduite par éclaircie à différents niveaux sur des parcelles expérimentales avec répétitions (Gracia et al. 1999).



La figure de gauche montre l'effet de l'application d'une de ces modalités d'éclaircies sur les valeurs de transpiration (les valeurs sont la moyenne de trois répétitions) : l'indice foliaire, LAI, a été réduit de 3,6 pour les parcelles témoin et à 0,8 pour la parcelle éclaircie. La transpiration rapportée à la surface foliaire (EL) a augmenté de 111 litres/m² de feuille/an à une valeur de 500 litres/m² de feuille/an. Cependant, la transpiration rapportée à la surface du sol (EG) est restée constante à une valeur de 400 l/m² de surface/an, représentant 84% du total des précipitations cette année-là. Deux ans plus tard, une période très sèche de 11 mois avec moins de 300mm de précipitations cumulées, a provoqué la mortalité d'une fraction importante des arbres de la parcelle témoin. Les arbres des parcelles éclaircies (figure de droite) ont transpiré au total la même quantité d'eau ; mais cette eau a profité à un nombre réduit d'arbres, leur conférant un meilleur potentiel hydrique que les arbres des parcelles témoin, et aucune mortalité n'a été observée malgré le retour presque complet aux valeurs précédentes du LAI (voir également Encadré 11).

pés (voir encadré 10). Cependant, malgré le manque apparent de réponse pour la quantité d'eau transpirée, des effets indirects positifs sont observés, car l'éclaircie améliore la survie des arbres restants.

Dans les conditions méditerranéennes, la réduction du LAI (par éclaircies) ne réduit pas la transpiration totale car les arbres restants utilisent une grande partie de l'eau rendue disponible par les arbres coupés. En conséquence, ils ont un meilleur taux de survie.

Si une population moins dense transpire la même quantité d'eau, chaque arbre transpire une proportion plus élevée d'eau, ce qui induit pour eux un stress hydrique moindre en cas de sécheresse extrême. Le problème peut être abordé par une analyse coûts-bénéfices entre la réduction de la densité des arbres et l'augmentation de la capacité de survie des arbres restants dans des conditions futures de grave sécheresse. Pour faire cor-

Encadré 11. Eau utilisée par un arbre de *Quercus ilex*

Le tableau ci-dessous résume l'utilisation en eau pour la parcelle éclaircie (Encadré 1) 4 ans après l'intervention. La densité est de 2.000 arbres/ha. Le LAI (3,10) initial a été pratiquement retrouvé (voir photo de droite dans l'Encadré 1). Dans ces conditions, les arbres ont transpiré 84% du total des précipitations annuelles (580mm), soit 490mm ou encore 2.450 litres d'eau par arbre en moyenne. Le tableau compare le coût du maintien et de la formation des compartiments : feuilles, racines fines, bois, écorce, branches, tronc et grosses racines, à la fois en termes de carbone et en termes de transpiration nécessaire à la fixation de ce carbone. Pour l'année, la forêt a transpiré 301 litres d'eau pour chaque gramme de carbone fixé.

	Biomasse kg/arbre	Production annuelle kg/arbre/an	Respiration annuelle (gC/arbre)		
			Maintien	Formation	Coût total
			grammes de Carbone /arbre/an		
Feuilles	2,72	1,13	3.536	833	4.369
Écorce et Bois*	91,00	2,10	739	1.544	2.283
Racines fines	0,40	1,30	514	956	1.469
ARBRE			4.789	3.332	8.121
			litres d'eau/arbre/an		
Feuilles			1.065	251	1.316
Écorce et Bois*			223	465	688
Racines fines			155	288	442
ARBRE			1.442	1.004	2.446

L'arbre moyen (résumé dans le tableau) doit transpirer 1.316 litres d'eau pour fixer 4.369 grammes de carbone pour conserver et former ses feuilles, faisant du feuillage le compartiment de l'arbre le plus « cher » en eau. L'écorce et le bois demandent 688 litres d'eau et les racines fines renouvelées plusieurs fois par an, 442 litres. Au total, l'arbre moyen transpire 2.446 litres par an. Le coût en eau par arbre du seul maintien représente 1.442 litres, soit au total 288mm. Étant donné que la transpiration représente 84% des précipitations annuelles, 288 mm de transpiration représentent 343 mm de pluie, soit 64% du total des précipitations annuelles.

rectement cette analyse, on doit connaître la quantité d'eau utilisée par un arbre d'une espèce donnée pour sa survie et comment il utilise cette eau.

On peut comprendre plus facilement le ratio entre l'eau utilisée et la biomasse réelle ou nouvelle produite à travers un exemple pris sur une forêt (voir les figures de l'Encadré 10). Quatre ans après l'éclaircie, la densité des arbres sur la parcelle expérimentale était de 2000/ha avec une surface terrière de 36,4 m²/ha. Les arbres ont transpiré 490 mm des 580mm de précipitations annuelles, soit 84% de celles-ci. L'arbre moyen de ce peuplement a transpiré 2.450 litres d'eau. L'Encadré 11 résume la quantité de carbone nécessaire au maintien des feuilles de la canopée, du bois et de l'écorce des troncs, des grosses racines, des branches et racines fines. Ce maintien demande une certaine quantité de carbone, qui est respirée pour fournir l'énergie nécessaire à la réparation ou au remplacement des molécules des différents composés indispensables à la conservation de la fonctionnalité des feuilles, racines fines, cellules vivantes dans les autres tissus de l'arbre.

Encadré 12. Eau utilisée par un arbre de *Pinus sylvestris*

Le tableau ci-dessous résume l'utilisation de l'eau par le pin moyen pour d'un peuplement dont la densité est de 800 arbres/ha, avec une surface terrière de 36 m²/ha et un LAI de 1,4 (inférieur à celui de *Q. ilex* dans l'Encadré 2). Dans ces conditions, les arbres transpirent 68% des précipitations totales (634 mm) soit 430mm ou, en moyenne, 5,378 litres d'eau par arbre (le diamètre à 1,30 m de l'arbre moyen est, dans ce cas 24 cm, plus grand que celui du chêne vert dans l'encadré 2). Le tableau compare le coût du maintien et de la formation des compartiments : feuilles, racines fines, bois et écorce des branches, tronc et grosses racines en termes de carbone et de transpiration nécessaires à la fixation du carbone. Pour l'année, la forêt transpire 350 litres d'eau pour chaque gramme de carbone fixé.

	Biomasse kg/arbre	Production annuelle kg/arbre/an	Respiration annuelle (gC/arbre)		
			Maintien	Formation	Coût total
			Grammes de Carbone /arbre/an		
Feuilles	3,25	1,06	2.600	781	3.381
Écorce et Bois *	326	2,90	9.403	2.131	11.534
Racines fines	0,13	0,45	104	328	432
ARBRE			12.107	3.240	15.347
			Litres d'eau /arbre/an		
Feuilles			911	274	1.185
Écorce et Bois *			3.295	747	4042
Racines fines			36	115	151
ARBRE			4.243	1.136	5.378

*(y compris les grosses racines)

L'arbre moyen, dont les données sont résumées dans le tableau ci-dessus, a besoin pour conserver et former ses feuilles de 1.185 litres d'eau pour fixer 3,381 grammes de carbone. L'écorce et le bois sont les compartiments de l'arbre les plus « chers » en eau du fait d'une proportion plus importante d'aubier, par comparaison avec le chêne vert ; ces tissus demandent 4.042 litres d'eau. Les racines fines, qui sont renouvelées 3,4 fois par an, demandent 151 litres d'eau. Ceci représente au total 4.243 litres d'eau par arbre équivalent à 339mm. Comme la transpiration représente 68% des précipitations annuelles, les 339 mm de transpiration représentent 498 mm de pluie soit 78% des précipitations annuelles.

En outre, de nouvelles feuilles et racines fines doivent se former pour remplacer les pertes et doivent pousser. Le carbone fixé par la photosynthèse (représentant 50% du poids sec de la plante) est impliqué dans la formation de nouveaux tissus et du maintien des tissus déjà formés ; il est fixé au prix d'une énorme quantité d'eau transpirée (voir section 3.2). Les données présentées dans l'Encadré 11 montrent la quantité de carbone nécessaire à l'arbre moyen pour maintenir et former les différentes composantes de sa structure, ainsi que l'eau nécessaire à la fixation de ce carbone. On a mis en évidence que 1442 litres d'eau (soit 68% des précipitations annuelles) sont nécessaires au seul maintien des tissus présents dans l'arbre, et que ce maintien ne compense pas les pertes en feuilles et racines fines qui devront être remplacées par de nouvelles.

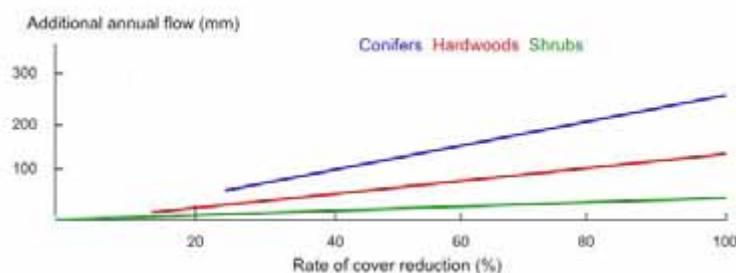


Figure 41. Impact de la réduction du couvert forestier (%) sur l'écoulement additionnel annuel (mm) au cours des cinq ans suivant la coupe. Source : Bosch et Hewlett, 1982.

Le maintien des arbres en vie, même sans augmentation de la biomasse, peut avoir un coût énorme en eau, en particulier pour les espèces sempervirentes, communes dans la région méditerranéenne.

Ces résultats ne peuvent pas être généralisés. L'efficacité de l'utilisation de l'eau peut varier selon les essences (voir section 3.3) ; la modification des structures et des densités des peuplements par l'élagage, l'éclaircie ou d'autres pratiques sylvicoles peut influencer sur les valeurs résultantes. Néanmoins, ces exemples (voir Encadrés 11 et 12) montrent l'énorme quantité d'eau impliquée dans le fonctionnement d'une forêt. Il met aussi en évidence que la forte baisse des précipitations prévue par la plupart des Modèles de Circulation Générale dans le Sud de l'Europe, le Nord de l'Afrique et d'autres zones dans le monde, représente une menace pour la survie de certaines forêts, tout au moins avec leur structure actuelle. Cette menace est particulièrement grave pour les forêts situées dans des conditions environnementales où les précipitations annuelles sont inférieures à l'ETP, comme cela a été dit plus haut à propos des forêts méditerranéennes. Dans des conditions limitantes pour l'eau, et tout particulièrement dans les zones où les modèles climatiques prévoient des baisses marquées des précipitations, il est essentiel d'analyser le coût en eau de la forêt et d'évaluer les bénéfices physiologiques de la réduction de la densité des peuplements forestiers par la sylviculture. Cette tâche est particulièrement urgente pour les espèces méditerranéennes présentant une forte densité de rejets. Des observations récentes ont mis en évidence la mortalité de plusieurs espèces d'arbres dans certaines forêts méditerranéennes à la suite de trois années consécutives de sécheresse avec des précipitations très inférieures à la moyenne.

Néanmoins d'autres possibilités existent pour atténuer la perte en eau des forêts, notamment par les pratiques sylvicoles bien qu'il y ait encore grand besoin de recherche dans ce domaine. Quelques exemples d'applications potentielles issus des résultats de nouvelles recherches en la matière sont présentés ci-dessous.

Les schémas d'utilisation de l'eau dans des forêts naturelles d'eucalyptus dont la structure du couvert varie grandement entre forêt primaire irrégulière (avec des arbres « brise-vent ») et forêt équienne de seconde génération (sans brise-vent), suggèrent que l'utilisation de l'eau peut être réduite en modifiant la structure du couvert. Il semble ainsi possible que des arbres « brise-vent » à l'intérieur d'une plantation puissent conduire à la création d'une forêt plus économe en eau à la manière d'une forêt primaire. Le nombre et la disposition des arbres brise-vent à l'intérieur d'une plantation de deuxième génération, nécessaires pour contribuer à « étancher la soif » des jeunes arbres demeure une question

intéressante pour la recherche. Une sélection méticuleuse des espèces peut s'avérer nécessaire pour garantir les économies en eau obtenues avec des brise-vent internes et s'assurer ainsi que l'on ne remplace pas un problème par un autre. Les espèces diffèrent très largement dans leur aptitude à contrôler les stomates, certaines espèces maintiennent un équilibre très économe en eau alors que d'autres demeurent à la merci des éléments.

Une façon de modifier l'utilisation de l'eau par les arbres, en agissant sur la structure de la canopée peut se faire à travers la couche limite qui influence la façon dont l'air, à proximité des arbres, se mélange avec l'atmosphère au-dessus. Les plantations équiennes ont une couche limite très différente de celle des plantations d'espèces mélangées et des forêts primaires, ce qui se traduit dans leur utilisation de l'eau. La texture de la canopée est importante car elle affecte l'aérodynamique, tout particulièrement la turbulence et la couche limite. Heureusement il est relativement facile pour les gestionnaires forestiers de manipuler la texture de la canopée par la sélection des espèces et des régimes d'éclaircies. Cependant beaucoup de plantations sont relativement de petites tailles et les effets de lisière y sont importants. Il est clair qu'une transpiration « improductive » peut être réduite en profilant les lisières de la plantation par l'élagage et l'éclaircie, évitant ainsi des discontinuités inutiles dans le couvert, et éventuellement avec des haies pour créer des lisières plus aérodynamiques.

Encadré 13. Négocier un projet de reboisement en Tunisie

En 1998, lors d'un exercice d'approche participative en Tunisie dans les régions montagneuses de la province de Zaghuan frappées par la pauvreté, les participants des 34 douars (villages) environnants ont exprimé de sérieuses préoccupations concernant les restrictions imposées par un projet de reboisement mécanisé couvrant le sommet des collines de la forêt de Sidi Salem (410 ha.). Avant le projet, les communautés locales considéraient la forêt publique comme leur zone gratuite de parcours, où ils ramassaient également le bois de chauffage et cueillaient des herbes médicinales. Le projet de reboisement impliquait l'utilisation de bulldozers et la plantation de pins d'Alep sur la totalité de la forêt avec des parcelles clôturées. Le projet prévoyait l'interdiction des usages traditionnels des produits de la forêt jusqu'à ce que le bois commercial soit vendu à des commerçants extérieurs après une rotation de neuf ans. Les communautés locales ont donc perçu ce projet comme une menace vis-à-vis de leurs droits coutumiers.

Pour traiter ce problème, l'équipe du projet s'est réunie avec les représentants locaux et les Services forestiers et de Conservation du sol. L'objectif était d'identifier les mesures possibles, techniquement et économiquement compatibles avec la stratégie des administrations, tout en répondant aux besoins des populations locales. La proposition conjointe finale incluait les mesures suivantes : i), sur les faible pentes, remplacer le pin d'Alep par des arbres fourragers et mellifères à croissance rapide pour réduire la durée de mise en défens; ii) étendre le réseau de pare-feux pour que la partie supérieure de la forêt soit accessible au bétail ; iii) réserver les zones à pente plus marquée au pin d'Alep et planter d'espèces fourragères les parcelles restantes.

L'accord a également mobilisé la participation des communautés à la mise en œuvre du projet aux travers d'initiatives telles que : i) des contrats avec des acteurs locaux intéressés pour préparer et entretenir les plantations ; ii) l'établissement de parcelles pilotes pour tester l'introduction d'espèces fourragères locales ; iii) la création d'associations de foresterie locale responsables de la gestion forestière, conformément à la loi tunisienne ; iv) la fourniture de micro-crédits pour acheter des fourneaux améliorés consommant moins de bois.

Suite aux discussions et négociations sur le partage des coûts et les obligations réciproques, toutes les activités ont été intégrées dans les plans d'action des douars concernés et des administrations techniques, sans coût additionnel pour le projet.

Source : FAO, 1997.

Encadré 14. Exemple de paiement pour services environnementaux dans un bassin versant tunisien.

Un exemple illustrant le potentiel du PES est tiré de la gestion du bassin versant de Barbara au nord-ouest de la Tunisie. La plupart des terres sont privées et cultivées en céréales. Afin de protéger l'infrastructure hydrologique d'aval, le gouvernement accorde d'importantes subventions (80% des coûts d'investissement) pour la protection des ravines par la plantation d'acacias et/ou la construction de petits ouvrages anti-érosifs. Mais ces subventions ne sont pas conditionnelles et les propriétaires ne reçoivent pas de compensation pour leurs dépenses et la perte de revenus associée à la perte de pâturage. En conséquence, la survie des acacias est très faible. L'analyse économique de différentes alternatives d'usage des terres a montré que toutes les mesures de protection apportent moins de profit aux agriculteurs que la seule production de céréales, et une seule option : la culture des céréales avec plantation d'acacias sur les ravines semble être profitable à l'échelle nationale. Afin d'encourager la plantation d'acacias dans les ravines, les agriculteurs devraient recevoir une compensation pour la perte de revenu encourue (100TND/ha). Cette compensation pourrait être couverte par un coût réduit de la sédimentation dans les barrages (200 TND/ha). Le paiement réalisé par les usagers bénéficiaires de l'eau pourrait augmenter le budget disponible pour la conservation, contribuer à une utilisation plus efficace de l'eau, et accroître la survie des acacias puisque les agriculteurs seraient payés au pro rata de la réussite des plantations.

On a mis en évidence que des plantations d'espèces mélangées offrent, entre autres, des bénéfices hydrologiques. Certaines études ont rapporté une efficacité de production plus importante (ratio de la transpiration/assimilation) dans les plantations d'espèces mélangées comparée à celle des peuplements purs. Des mélanges d'*Acacia mearnsii* et d'*Eucalyptus globulus* se sont révélés être deux fois plus productifs que des monocultures de l'une ou l'autre espèce. Ces mélanges ont montré également une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau en raison d'un accroissement de l'efficacité d'utilisation de l'eau pour *E. globulus* (1,69 kg de biomasse aérienne par m³ d'eau transpirée contre 0,94 en monoculture). Bien que ces mélanges soient plus « efficaces » pour l'eau, ils consomment en réalité davantage d'eau ; c'est en fait la transpiration qui est plus faible que l'augmentation proportionnelle de croissance. Il semble probable que les différents profils de ces deux espèces ont contribué à créer cet effet, l'eucalyptus a tendance à être haut et étroit alors que l'acacia est plus petit et plus large, ce qui a conduit à un bénéfice mutuel. Ce bénéfice peut s'expliquer par le fait que les eucalyptus sont plus hauts et fournissent un abri pour les acacias, et que les acacias, espèces légumineuses, fournissent de l'azote aux eucalyptus.

Dans l'environnement méditerranéen limitant en eau, seuls des changements drastiques du couvert forestier, au-delà de l'intensité des éclaircies classiques, peuvent conduire à un accroissement significatif de la production d'eau bleue.

Comme indiqué précédemment, les forêts sont généralement des écosystèmes consommateurs nets d'eau et influencent donc négativement le rendement en eau annuel, même si leur couvert peut avoir un impact bénéfique sur les saisonnalités des écoulements. Les études hydrologiques ont montré que les grands bassins versants ne sont pas

adaptés à l'évaluation des relations entre l'occupation des sols et le rendement en eau, de même que les bassins expérimentaux appariés car l'interprétation des résultats soulève de nombreux problèmes. Les connaissances disponibles sont fondées sur des expériences, planifiées ou subies, pour des bassins versants de petite dimension. Les manipulations du couvert forestier du bassin versant se font par la coupe à blanc ou partielle (éclaircie), le boisement de sol nu, ou le feu (expérimental ou accidentel). Une synthèse bibliographique portant sur 94 bassins versants a montré que l'écoulement additionnel résultant de la réduction du taux de couvert peut être notable, mais seulement au-dessus d'un seuil d'environ 20-30% ; cet écoulement additionnel allait de quelques pour cent à 20% des précipitations annuelles (voir Figure 41). Le volume de cet écoulement additionnel était également proportionnel à la pluviométrie. L'augmentation relative de l'écoulement par rapport aux précipitations annuelles pour différents types de couvert était le suivant : conifères, feuillus et chaparrals se situaient respectivement dans une fourchette de 10-20%, 0-20% et 5% (après l'enlèvement du chaparral). Pour les chaparrals dont l'occurrence est située dans des zones sèches (généralement au dessous de 600mm), l'accroissement de l'écoulement représenterait seulement 30mm, même à la suite d'une modification drastique (enlèvement du couvert végétal).

Ces données suggèrent que l'impact des traitements sylvicoles classiques, tels que les éclaircies moyennes ou modérées, sur l'accroissement du rendement en eau, est faible ou nul. Ces résultats sont également cohérents avec ceux mentionnés ci-dessus, montrant que le surplus d'eau générée par l'éclaircie dans un taillis de chêne vert est entièrement consommé par les arbres restants. Nous pouvons donc conclure que seules les modifications drastiques du couvert forestier, telles que sa conversion partielle ou totale à d'autres usages du sol peuvent conduire à une augmentation significative du rendement en eau.

La question d'un changement drastique du couvert forestier, et donc de l'occupation des sols, dans le but d'accroître la production d'eau bleue en aval mérite une grande attention et doit également intégrer tous les biens et services liés au couvert végétal initial. L'érosion du sol est une menace majeure, *inter alia*, en région méditerranéenne (voir section 1.5) ; elle ne doit pas être sous-estimée. Changer partiellement ou totalement le couvert peut-être également envisagé. Cela revient à rediriger le flux d'eau verte des arbres vers d'autres couverts végétaux : espèces fourragères dans les parcours, cultures dans les champs, systèmes agro-forestiers, etc. Cela demande également une évaluation rigoureuse des avantages et inconvénients.

Les plantations d'arbres dans un contexte de pénurie générale en eau devraient tenir compte, non seulement de la multitude des biens et services, marchands et non marchands, qui pourraient être fournis, mais également du nombre important de parties prenantes au niveau local et national pouvant être affectées, et dont les perceptions vis à vis de ces plantations et de l'utilisation des ressources naturelles diffèrent et parfois divergent (voir Encadré 13).

Alors que l'administration publique est plus concernée par la protection des ressources en sol et en eau et par le développement économique, les propriétaires privés, eux, sont intéressés par les bénéfices à court terme des plantations. Les populations locales vivant dans les zones forestières, en particulier dans les pays de l'Est et du Sud de la Méditerranée, aimeraient maximiser leur propre revenu par l'utilisation à court terme de ressources naturelles. Une autre distinction est également à faire entre les usagers d'amont et d'aval. Les usagers d'amont peuvent bénéficier des utilisations directes des plantations forestières, tandis que les usagers d'aval, utilisateurs des ressources en eau,

sont affectés par les conséquences du changement dans la gestion des sols en amont sur la quantité et la qualité de l'eau atteignant les réservoirs. La nature mixte des services rendus par la forêt, et le fait qu'ils concernent des échelles de temps et d'espace différents, soulignent l'importance d'un compromis entre la protection du bassin versant et les bénéfices pour les propriétaires forestiers ou les usagers locaux. Cette situation est d'autant plus complexe que certains changements dans l'occupation des sols peuvent avoir des effets irréversibles, au moins à court terme, sur le développement des forêts.

Dans ce contexte de conflits et controverses, les effets du changement dans l'usage des terres sur les ressources en eau et leur distribution entre les parties prenantes devraient être analysés lors de l'établissement d'une stratégie de plantation dans un milieu limité en eau. Par exemple, avant de convertir des formations arbustives en plantations forestières, une comparaison des situations avec ou sans intervention devraient porter sur les questions suivantes : quels seront les effets de l'intervention, localement et à long terme, sur les utilisations directes (bois, fourrage, fruits, etc.), mais également quels seront les effets externes sur les flux d'eau, la recharge des nappes souterraines, les sédiments, la qualité de l'eau ? Quels seront les revenus nets pour le propriétaire forestier, les usagers locaux, mais également quels sont les bénéfices nets dans une perspective sociétale ? Qui gagne ou perd du fait de ce changement de l'occupation des sols ? La plantation devrait être mise en œuvre seulement si cela est économiquement souhaitable dans une perspective sociale, c'est à dire dans le cas où les bénéfices nets de la plantation sont supérieurs à ceux de la situation sans intervention, et si cela est viable financièrement. L'analyse doit considérer également les effets prévus du changement climatique qui, dans certains cas, réduiront gravement la disponibilité en eau. Il est donc nécessaire de compenser la perte potentielle de revenu, si des améliorations de la fertilité du sol et de la conservation de l'eau étaient entreprises. Les bénéfices non-marchands et les effets sur l'aval ne sont généralement pas pris en compte, car l'évaluation des effets de l'utilisation des terres sur l'érosion des sols et les ressources en eau, en particulier pour les grands bassins versants, demeure difficile. L'intervention publique, par le biais de subventions, aides et compensations pour la perte de revenu potentiel, est généralement nécessaire pour combler le fossé entre profitabilité privée et utilité publique. Outre ces instruments traditionnels, d'autres instruments fondés sur le marché ont vu le jour ; ils sont basés sur le paiement par les bénéficiaires de l'aval pour les services fournis. Principalement appliqués aux services de fourniture en eau, ces instruments ont été mis en œuvre par l'intermédiaire de schémas de PES (Paiements pour Services Environnementaux), c'est-à-dire au travers de négociations directes entre usagers de l'eau et propriétaires fonciers (voir Encadré 14). Il s'agit par exemple de la vente de « crédits » entre entreprises et propriétaires fonciers en cas de dépassement des quotas de consommation d'eau, ou des paiements publics aux agriculteurs et/ou propriétaires forestiers pour leurs pratiques de gestion respectueuses de la qualité de l'eau.

Les investissements pour les plantations forestières induisent des revenus directs plus faibles par comparaison avec le scénario « business as usual », mais pourraient générer des bénéfices plus importants pour la société si les externalités à l'échelle locale et nationale (augmentation de la fertilité des sols et de la conservation de l'eau), et les externalités à l'échelle planétaire (protection de la biodiversité, séquestration du carbone) étaient incluses.

Pour en savoir plus

- Achouri, M. 2002. Forests and Water: Towards Effective Watershed Management. International Expert Meeting on forests and water. 20–22 November 2002, Shiga, Japan.
- Cossalter, C. and Pye-Smith, C. 2005. Fast-wood forestry: myths and realities. CIFOR, Bogor, Indonesia.
- Croitoru, L. and Daly-Hassen, H. 2010. Using Payments for Environmental Services to Improve Conservation in a Tunisian Watershed. Mountain Forum Bulletin, January 2010.
- Daly-Hassen, H., Pettenella, D. and Jemal, Ahmed T. 2010. Economic instruments for the sustainable management of Mediterranean watersheds. *Forest systems* 19(2).
- Lavabre, J. and V. Andréassian, 2000. Eaux et forêts. La forêt : un outil de gestion des eaux ? [Waters and Forests. Can forest be a water management tool?] Cemagref, Antony. 147 p.
- Perrot-Maitre, D. and Davis, P. 2001. Case studies: Developing markets for water services from forests. *Forest Trends*, Washington D.C. (www.forest-trends.org).
- Roda, F., Retana, J., Gracia, C. and Bellot, J. (Eds.) 1999. Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. *Ecological Studies* 137: 368.

4.2.

Équilibrer la répartition de l'eau entre les écosystèmes, les biens et services, et les hommes

Robert Mavsar

Les biens comme les services fournis par l'eau et les écosystèmes sont fondamentaux pour notre existence.

L'eau douce est sans aucun doute essentielle à la survie de toute vie non marine, et dans la plupart des cas, il n'y a rien pour la remplacer. L'eau n'est donc pas seulement une ressource commerciale, mais un élément fondamental du maintien de la vie.

L'eau douce est également un élément unique pour les activités humaines, sans remplacement possible pour la plupart de ces utilisations. L'importance de l'eau est en général principalement vue sous l'angle du prélèvement et de l'utilisation de l'eau bleue, comme par exemple pour l'agriculture irriguée, la production industrielle et l'usage domestique. Néanmoins, cette utilisation directe de l'eau n'est pas suffisante pour garantir notre existence. L'eau est également nécessaire pour maintenir les biens et services multiples des écosystèmes dont nous dépendons fortement. Ces biens et services représentent les bénéfices que les hommes tirent directement ou indirectement des éco-

Tableau 5. Les biens et services fournis par les écosystèmes

Fourniture	Régulation	Culture
Aliments Fibres Ressources génétiques Composés biochimiques Médecines naturelles Composés pharmaceutiques Eau douce	Régulation de la qualité de l'air Régulation du climat Régulation de l'eau Régulation de l'érosion Purification de l'eau et traitement des déchets Régulation des maladies Régulation des ravageurs Pollinisation Régulation des risques naturels	Diversité culturelle Valeurs spirituelles et religieuses Systèmes de connaissance Valeurs éducatives Inspiration Valeurs esthétiques Relations sociales Appartenance Valeurs culturelles patrimoniales Récréation et écotourisme
Service d'auto-entretien des écosystèmes		
Formation des sols, photosynthèse, production primaire, cycles des éléments minéraux et de l'eau		

Source : Millenium Assessment Report, 2005.

systèmes (terrestres et aquatiques). Comme déjà brièvement mentionné dans la section 3.1, ces écosystèmes offrent une large gamme de différents biens et services qui peuvent être divisés en quatre catégories principales (voir Tableau 5).

Les services de fourniture correspondent aux produits que les hommes obtiennent des écosystèmes tels que la nourriture, le combustible, l'eau douce. **Les services de régulation** sont les bénéfices que nous obtenons grâce à la régulation des mécanismes au sein des écosystèmes, relatifs au maintien de la qualité de l'air, à la régulation du climat, au contrôle de l'érosion et de la purification de l'eau. **Les services culturels** sont les bénéfices immatériels procurés par l'enrichissement spirituel, les activités récréatives et l'appréciation de valeurs esthétiques. **Les services d'auto-entretien** sont les services nécessaires à la production de tous les autres services écosystémiques, ils comprennent la production primaire, la pollinisation, la production d'oxygène et la formation du sol. Ils diffèrent des services de fourniture et de régulation, et des services culturels car leurs impacts sur les populations humaines sont indirects.

L'eau bleue et l'eau verte sont indispensables à la garantie du fonctionnement des écosystèmes et à la production durable de leurs biens et services.

L'eau bleue et l'eau verte sont nécessaires à la fourniture des biens et services dont nous avons besoin.

Lorsque l'on évalue l'importance de l'eau, l'utilisation directe et indirecte de l'eau bleue et l'eau verte doit être prise en compte. « L'utilisation directe de l'eau » renvoie au prélèvement de l'eau ou à l'usage dont les sociétés bénéficient directement. En revanche, « l'utilisation indirecte de l'eau » est liée aux fonctions de l'eau dont les sociétés bénéficient indirectement, comme les flux d'eau verte qui permettent le développement des habitats pour la flore et la faune.

En considérant la pluie comme la source fondamentale de l'eau douce, on peut la diviser en quatre flux d'eau principaux (voir Figure 42). **L'utilisation directe de l'eau bleue** est relative au prélèvement direct de l'eau bleue pour la production alimentaire en culture irriguée, pour la production industrielle, l'usage domestique (par ex. boisson, cuisine et lavage) et l'usage des collectivités locales. **L'utilisation indirecte de l'eau bleue** est relative à la fourniture de biens et services par les milieux humides et les écosystèmes aquatiques

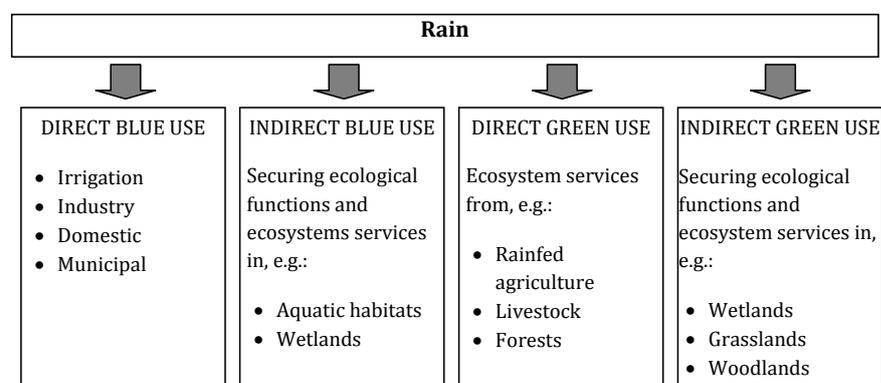


Figure 42. Séparation de l'eau de pluie en eau bleue et verte pour l'utilisation directe et indirecte Source : Falkenmark and Rockström, 2004.

Tableau 6. Pourcentage de l'eau de pluie nécessaire aux activités humaines dépendantes de l'eau, au niveau planétaire.

Eau	% de pluie	Catégorie de l'eau		Utilisation	% de pluie
Bleue	38%	Disponible	Utilisée	Alimentation (agriculture irriguée)	2%
				Usage domestique et industriel	1%
			Inutilisée	Écoulement stable (ex. rivières)	8%
		Non disponible	Écoulement de crue (non utilisable)	27%	
Verte	62%	Directe		Alimentation (agriculture pluviale)	4%
		Indirecte		Prairies permanentes	18%
				Prairies	11%
				Forêts et surfaces boisées	17%
				Terres arides	5%
				Milieus humides	1%
				Évaporation des lacs	1%
Eau verte non comptabilisée	5%				

Source : Rockström et al. 1999

d'eau douce (lacs, cours d'eau). **L'utilisation directe de l'eau verte** garantit des biens et services directement consommables (par ex. aliments, fibres, bois, combustible), et qui sont fournis par l'agriculture pluviale et l'élevage, les forêts et les autres écosystèmes. Enfin, **l'utilisation indirecte de l'eau verte** est liée aux biens et services écosystémiques fournis par les milieux humides, prairies, forêts, etc. dont les sociétés bénéficient indirectement (par ex. séquestration du carbone, biodiversité, pollinisation).

Dans la nature, la majorité de l'eau de pluie est utilisée par les écosystèmes, fournisseurs de biens et de services.

À l'échelle planétaire, l'utilisation traditionnelle de l'eau douce (prélèvement direct de l'eau bleue) se monte à seulement 3% des précipitations annuelles (voir Tableau 6), ce qui représente approximativement un tiers de l'eau bleue disponible.

Dans le passé, on considérait, en ne se référant qu'à l'eau bleue, que la production alimentaire (agriculture) était le principal consommateur en eau. Avec le mode de comptabilisation actuel, qui se base sur l'eau de pluie, la production alimentaire en agriculture irriguée ne représente en moyenne que 2% des précipitations annuelles. Néanmoins, il ne s'agit que d'une partie de la production alimentaire, car, pour presque 70%, elle provient de l'agriculture pluviale.

D'autre part, la majorité de l'eau disponible est utilisée pour le maintien des principaux écosystèmes et la fourniture de leurs biens et services (usage indirect de l'eau bleue et verte). En d'autres termes presque 90% de l'eau verte, au niveau mondial, est destinée au maintien des biens et services écosystémiques des principaux types de biomes. Une réduction drastique de la surface forestière pourrait accroître la disponibilité en eau mais influencerait négativement la fourniture des biens et services écosystémiques.

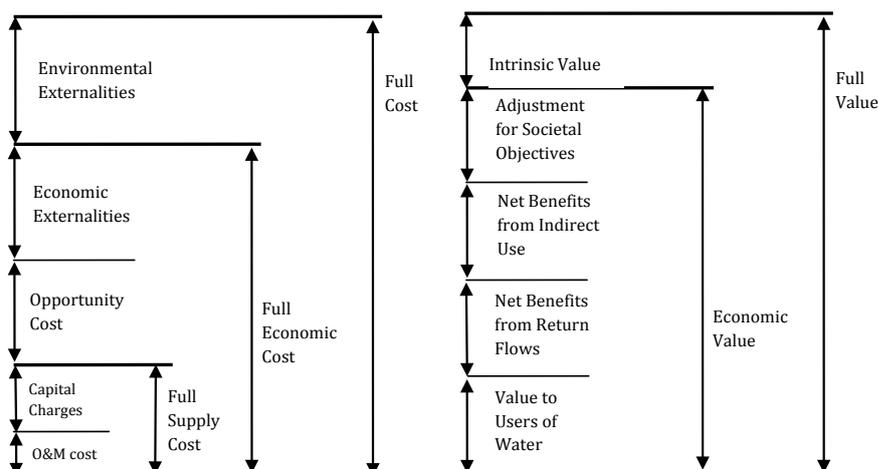


Figure 43. Composantes générales du coût et de la valeur de l'eau (Rogers et al. 2002)

Comme indiqué en section 4.1, les forêts ont besoin d'eau pour leur existence et ont donc généralement un impact négatif sur le rendement annuel en eau. Néanmoins, l'eau consommée par les forêts est également nécessaire au maintien de leur capacité à fournir des biens et services écosystémiques. Cela suggère qu'une diminution du couvert forestier pourrait accroître la quantité d'eau disponible pour d'autres usages mais réduirait en revanche la capacité des forêts à produire ces biens et services.

Afin d'explorer la dimension économique de la mise en œuvre de programmes visant à la réduction du couvert forestier, nous devons comparer le gain et la valeur de la ressource en eau supplémentaire qui en résulterait, avec les pertes et la valeur des biens et services environnementaux. La question de la consommation en eau des forêts a été précédemment discutée dans la section 4.1. Dans la présente section, nous examinerons seulement les thèmes liés à la valeur économique de l'eau et à la valeur des biens et services écosystémiques.

Lorsque l'on examine la valeur de l'eau, il est nécessaire de distinguer au minimum les deux concepts suivants: la valeur et le prix de l'eau (voir Figure 43). Selon l'une des classifications, la valeur de l'eau comprend la valeur économique et intrinsèque. **La valeur économique** inclut :

- a) la valeur de l'eau pour les utilisateurs ; par exemple la valeur de l'eau pour les usages industriel et agricole, et le consentement à payer pour son usage domestique,
- b) les bénéfices nets des flux de retour (ex. recharge des nappes souterraines),
- c) les bénéfices nets provenant de son usage indirect : par exemple, les bénéfices liés à l'amélioration des revenus et de la santé, pouvant résulter des plans mis en œuvre pour la fourniture d'eau pour l'irrigation, l'élevage, et l'usage domestique,
- d) les ajustements à des objectifs sociaux, par exemple atténuation de la pauvreté, création d'emplois et sécurité alimentaire.

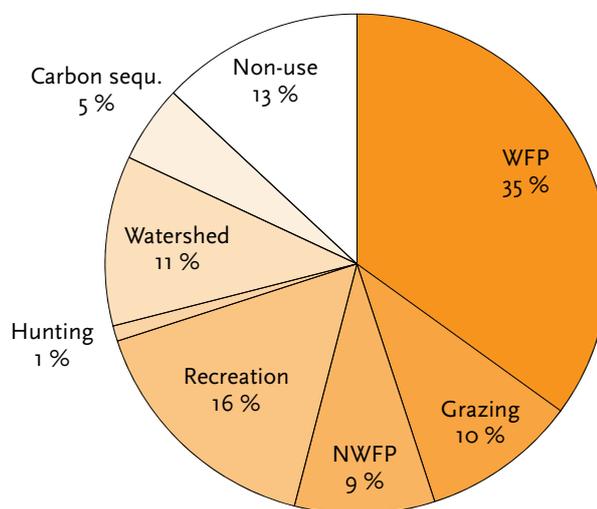
La valeur intrinsèque de l'eau comprend : la valeur de sa bonne gestion, sa valeur patrimoniale et sa pure valeur d'existence.

Tableau 7. Structure des systèmes d'établissement des prix agricoles et niveaux de prix (Chohin-Kuper et al. 2003)

Structure de prix	Pays	Prix		Incitation à l'économie d'eau
		€/ha	€/m ³	
Libre	Egypte Albanie			Aucune
Tarification par surface (per ha)	France Grèce Espagne Liban	108 75-175 32-200 227		Faible
Tarification par surface en fonction des cultures	Turquie (et par région) Italie (et par type de sol)	16-80 24-200		Faible
Tarif volumétrique uniforme	Espagne (rare) Maroc (en partie) Tunisie (en partie) Chypre France (ASA) France (SAR)		0,02-0,06* 0,01-0,04 0,07 0,095 0,05-0,06 0,05-0,23*	Faible Faible Faible Modérée Modérée Modérée à haute
Optionnel	France (SAR)	40 ou 25	0,05 ou 0,14	Modérée
Tarification par paliers progressifs	Jordanie Israël		0,02 0,10	Modérée Modérée, Haute dans les limites du quota

*Seulement la composante volumétrique d'un tarif à deux entrées

Figure 44. Composition de la valeur économique totale des forêts méditerranéennes (source : Merlo & Croitoru 2005)



Cependant le prix réel de l'eau est principalement défini sur la base du coût de sa fourniture. L'approche recommandée serait de définir le prix de l'eau sur la base du coût total réel de la fourniture qui inclut les coûts de fourniture (ex. coûts de fonctionnement et d'entretien, coût d'utilisation du capital), les coûts d'opportunité, et les externalités économiques et environnementales (cf. Figure 43). Néanmoins, dans la majorité des pays du Bassin méditerranéen le prix de l'eau est inférieur à son coût total réel. Le Tableau 7 donne des exemples de prix de l'eau pour l'agriculture. Un tel système d'établissement

des prix non seulement sous-estime le prix de l'eau, mais n'encourage en aucune façon une utilisation de l'eau plus efficace de l'eau (voir également section 5.5).

Concernant la valeur économique des biens et services écosystémiques, il est à noter que très peu d'entre eux ont des prix de marché établis ou sont commercialisés sur les marchés traditionnels. Néanmoins, il est reconnu que ces services ont une importance et une valeur capitales pour la société. Au cours des dernières décennies, un certain nombre d'études ont été menées pour estimer la valeur économique des différents biens et services écosystémiques. Merlo & Croitoru (2005) par exemple, ont estimé une valeur économique totale pour les forêts méditerranéennes de 133€ en moyenne par hectare de forêt, soit presque 50€ par année et par habitant. Seulement 35% de cette valeur peut être attribuée aux produits forestiers ligneux (voir Figure 44). Néanmoins, il faut savoir que les valeurs citées représentent des moyennes de données provenant d'un certain nombre de différentes études de cas. Dans la pratique, cela signifie que selon le cas, la valeur économique des biens et services écosystémiques peut varier considérablement en grandeur et dans sa composition.

Il est donc difficile d'émettre des avis tranchés d'ordre général sur l'ampleur des effets économiques et sociaux d'une réduction potentielle des zones forestières, visant à accroître la disponibilité en eau pour d'autres usages (agriculture, industrie, usage domestique). En outre, de tels changements n'influeraient très probablement pas seulement sur le bien-être social, mais pourraient aussi fortement affecter l'accès aux biens et services fournis par les forêts et les autres écosystèmes, tout spécialement pour les populations qui en dépendent directement. Toutes choses égales par ailleurs, les espaces boisés ne devraient donc pas être considérés comme de simples consommateurs nets d'eau mais comme des pourvoyeurs de biens et services écosystémiques fondamentaux, essentiels au bien-être même de tous les hommes sur terre.

Pour en savoir plus

- Chohin-Kuper, A., Rieu, T. and Montginoul, M. 2003. Water policy reforms: pricing water, cost recovery, water demand and impact on agriculture. Lessons from the Mediterranean experience. Water Pricing Seminar (June 30 – July 2, 2003) Agencia Catalana del Agua & World bank Institute; Parallel session C: The impact of cost recovery on Agriculture. [www.semide.net/media_server/files/i/9/CohinRieuMontginoulWaterpolicyreformspricingwatercostecoverwaterdemand.pdf]
- Falkenmark, M. and Rockström, J. 2005. Balancing Water for Humans and Nature. Earthscan, Sterling.
- Merlo, M. and Croitoru, L. (2005) Valuing Mediterranean Forests – Towards Total Economic Value. CABI Publishing.
- Millennium Ecosystem Assessment 2005. Ecosystem Services and Human Well-being: Wetlands and Water. 80 p. [www.millenniumassessment.org/documents/document.358.aspx.pdf]
- Rockström, J., Gordon, L., Folke, C., Falkenmark, M. and Engwall, M. 1999. Linkages Among Water Vapor Flows, Food Production, and Terrestrial Ecosystem Services. Conservation Ecology 3(2): 5. [www.consecol.org/vol3/iss2/art5]
- Rogers, P., de Silva, R. and Bhatia, R. 2002. Water is an economic good: How to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability. Water Policy 4: 1–17.
- Turner, K., Georgiu, S., Clark, R., Brouwer, R. and Burke, J. 2004. Economic valuation of water resources in agriculture: From the sectoral to a functional perspective of natural resource management. Water reports 27. FAO, Rome. 203 p. [www.fao.org/docrep/007/y5582e/y5582e00.htm#Contents]

Gestion intégrée de l'eau à l'échelle du paysage : la science au service du développement, l'exemple de la Tunisie

Jean Albergel, Jean Collinet, Patrick Zante et Hedi Hamrouni

La gestion intégrée de l'eau – et du sol – autour du Bassin méditerranéen est fondée sur différentes stratégies selon le pays concerné. Entre le 'pas une goutte d'eau de plus vers la mer' et l'épuisement des ressources en eau souterraine, ou le début de l'épuisement des aquifères fossiles, différents choix existent. Fondée sur l'exemple du programme national de gestion des bassins versants en Tunisie, cette section illustre comment les résultats scientifiques récents peuvent soutenir ce programme et l'améliorer.

Les stratégies visant à accroître la disponibilité des ressources en eau mais également à limiter les crues et réduire les effets négatifs de l'érosion des sols, ont évolué vers la conception et la mise en œuvre d'un vaste programme de gestion de bassins versants de petite dimension (< 50 km²) ; un échantillon de ceux-ci est consacré à une recherche d'accompagnement pour l'amélioration des connaissances dans la perspective d'une extension de ce programme.

La construction de **petits barrages** semble s'affirmer, comme aménagements ne visant pas seulement à mobiliser des ressources en eau de surface (lacs collinaires), mais également à contrôler les fortes crues tout en protégeant –et limitant l'envasement– des plus grandes structures en aval. Au cours de ces dernières années, la Tunisie et le Maroc ont opté pour cette formule. En Tunisie, dans le cadre d'un projet de construction de 1.000 barrages, plus de 500 ont été construits avec les objectifs suivants : i) gérer les pentes pour réduire les pertes de surface de terre agricole représentant 5.200 ha/an ; ii) réduire l'envasement de 10 barrages principaux en aval, pouvant atteindre 25 million m³/an.; iii) accroître la recharge des nappes souterraines; iv) mobiliser la plus grande partie des 500 million m³ d'eau perdus dans les *sebkhas* (*sebkha* désigne une dépression à forte salinité dans les régions arides) ou dans la mer ; v) créer des points de développement de l'irrigation.

Une retenue collinaire est un lac résultant de la construction d'un petit barrage de terre, dans le lit d'une rivière éphémère ou intermittente. Le barrage peut atteindre 10 mètres de haut (mais sera toujours au-dessous de 15 mètres, seuil fixé par la commission internationale des grands barrages) et est équipé d'un déversoir latéral. Ce déversoir, de construction légère, est utilisé comme « fusible » en cas de pluies très fortes.

Tableau 8. Envasement de petits barrages dans 13 retenues collinaires à l'aval de bassins versants ayant une couverture végétale variée.

Annuaire - ACTA et IRD Tunis – Les chiffres ne montrent ni ne représentent les relations entre couvert forestier et protection contre l'érosion. Les terres agricoles utilisant les techniques de conservation du sol et de l'eau offrent une meilleure protection des sols. Le pourcentage de sols nus dans les bassins versants n'est pas un indicateur fiable du transport solide. Les sols nus peuvent être développés sur des marnes, très sensibles à l'érosion, ou sur un matériau rocheux produisant très peu de sédiments.

Station	Surface du Bassin versant	Année Constr.	volume sédiments 1996	Durée de vie	Volume Exportations	Erosion totale	Érosion spécifique	Végétation %		
								ha	m ³	ans
Sadine 1	384.0	1988	31 275	9	4 746	54 786	17.8	0	68	32
Fidh Ali	412.5	1991	29 640	23	0	47 424	23.0	0	12	88
M'Richet el Anse	158.0	1991	5 000	42	0	8 000	10.1	0	92	8
El Gouazine	1810.0	1990	16 810	83	1 390	28 286	2.6	20	65	15
Hadada	469.0	1992	14 060	24	1 275	23 771	12.7	0	76	24
Janet	521.0	1992	36 010	11	3 482	61 098	29.3	0	62	38
Dekikira	307.0	1991	21 300	51	0	34 080	22.2	33	35	42
Es Senega	363.0	1991	11 850	36	356	19 316	10.6	0	34	66
Arara	708.0	1993	41 220	7	4 126	70 078	33.0	59	41	0
Saadine	272.0	1992	27 370	7	6 570	50 362	46.3	30	70	0
Es Seghir	431.0	1992	2 020	>100	0	3 232	1.9	20	80	0
Kemech	245.5	1993	11 380	38	10 020	28 228	38.3	0	75	25
Brahim Zaher	464.4	1992	14 360	24	174	23 150	12.5	30	27	43

Les lacs collinaires sont très divers et de capacité variable, allant de quelques dizaines de milliers de mètres cubes à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes ; leurs bassins versants d'approvisionnement peuvent varier de quelques hectares à plusieurs douzaines de kilomètres carrés.

Depuis 1995, 26 barrages ont été sélectionnés et équipés pour former un réseau d'observation hydrologique permettant, entre autres, l'évaluation de leur envasement, et donc de leur durée de vie, et de l'érosion d'ensemble du bassin versant (Tableau 8).

Des expérimentations (avec simulateur de pluies) et des travaux de modélisation sur le ruissellement, les réserves en eau et les pertes en sol des versants, ont été réalisés. Ils permettent de préconiser – et de mettre en œuvre - des mesures de gestion et de conservation de l'eau et du sol à l'échelle du bassin versant, fondées sur une base scientifique solide.

Les connaissances fondées sur le calcul de la réserve utile en eau du sol (RU) permettent de: i) simuler des résultats divers pour la pluviométrie annuelle; ii) comparer la capacité de stockage en eau du sol des bassins versants avec celles des barrages de rétention; iii) simuler les besoins en irrigation de différents couverts végétaux. Finalement, elles apportent des outils pour trouver des équilibres entre l'eau verte et l'eau bleue.

Encadré 15. Calcul des réserves utiles (RU) en eau dans le bassin versant de Zanfour

Les cartes de sol au niveau du bassin versant et un système d'informations géographiques (SIG) ont été utilisés pour construire cette information hydro-physique et la spatialiser. Le bassin versant de Zanfour qui mesure 42km² et possède un réservoir de 710.000m³, fait partie du réseau pilote des bassins versants tunisiens. Il s'est avéré donc très intéressant de calculer la réserve utile en eau du sol (RU), pour simuler une variété de résultats en fonction de la pluviométrie annuelle, pour comparer la capacité en eau du sol dans les bassins versants avec celle des barrages et simuler les besoins en irrigation pour tous les types de couvert.

Les profondeurs, textures et charges en éléments grossiers sont tirées de la carte de sol, alors que les seuils critiques d'humidité du sol avec 2,5 à la capacité au champ et 4,2 au point de flétrissement sont calculés par la méthode de A. Bruand, et al. (2002), les deux méthodes permettant ainsi d'ignorer toutes les classes de pédotransfert. Un SIG (logiciel ArcView) a été utilisé pour relier les unités de sol aux variations de profondeur, texture et éléments grossiers, humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement, et finalement calculer les isolignes de la réserve utile en eau du sol et en tracer la carte (Figure 45). Parmi toutes les stimulations possibles nous retiendrons :

- **une simulation d'un remplissage partiel de la RU du sol dans le bassin versant**

En 2001, avec des pluies de 350mm, le taux de remplissage des réserves du sol a été obtenu en cumulant annuellement les volumes des différentes classes de sol. Le remplissage partiel des réserves utiles en eau de tous les sols dans le bassin versant a fourni un stockage d'eau de 1.376.495m³ (Tableau 9) représentant deux fois la capacité du barrage.

- **une simulation à saturation de la RU du sol dans le bassin versant**

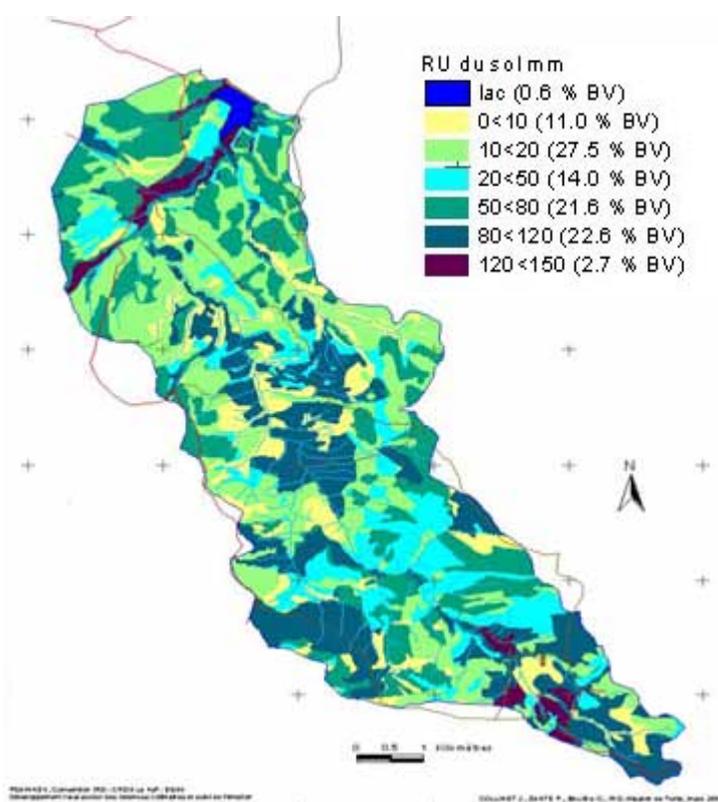
La comparaison des réserves insaturées en 2001 avec les réserves saturées permet d'établir des coefficients de réductions dans la colonne 4 du Tableau 9. Le remplissage complet des réserves en eau de tous les sols du bassin versant fournirait une réserve de 2.176.400 m³ représentant trois fois la capacité du barrage. Avec ce stock et les résultats de 2001 (Pluviométrie annuelle P : 350mm, évapotranspiration d'une culture de référence ETo : 1.896mm), il a été possible de calculer la pluviométrie théorique annuelle permettant de remplir totalement les réserves en eau des sols. Elle devrait atteindre 553mm, à comparer avec la moyenne de la pluviométrie annuelle sur le bassin versant de Zanfour : 400mm)

La capacité de stockage en eau a d'abord été estimée à partir de paramètres climatiques pour des sols ayant des caractéristiques hydro-physiques supposées homogènes et une profondeur constante. Une meilleure évaluation de la réserve utile en eau du sol (RU) a ensuite été obtenue grâce à un coefficient d'utilisation de ces réserves par une plante dont le système racinaire permettrait une utilisation progressive des 100cm de sol meuble. L'utilisation de la mesure de la profondeur (épaisseur) du sol accessible aux racines constitue déjà un progrès. Néanmoins, cela ne nous donne aucune information ni sur les caractéristiques physiques des matériaux qui peuvent contrôler l'accessibilité pour les racines, ni sur le volume des réserves en eau nécessaires, ni sur les possibilités de la remontée capillaire d'un aquifère plus profond. Un exemple des méthodes utilisées pour surmonter ces difficultés est présenté dans l'encadré 15, le tableau 9 et la figure 45.

Les résultats illustrent l'utilité de méthodes fournissant des données quantitatives et spatiales précieuses pour la gestion de l'eau dans les bassins versants, et tout particulièrement pour les cultures pluviales et irriguées, en relation avec les pluies et l'eau stockée dans le barrage, permettant ainsi d'agir sur l'équilibre entre l'eau bleue et verte.

Tableau 9. Réserves en eau du bassin versant pour une saturation partielle et totale du sol

RU moyenne par classe (mm)	Superficie de chaque classe (ha)	Saturation totale RU x surface (m ³)	Coef. réduction Stock / P cum	Remplissage 2001 RU x surface x coefficient (m ³)
5	481	24	0.29	7
15	1,202	180	0.51	92
35	609	213	0.63	134
65	943	613	0.65	398
100	988	988	0.65	642
135	117	158	0.65	103
total	4,340	2,176		1,376



Les effets du changement de la couverture végétale, y compris le couvert forestier, et des techniques de conservation de l'eau et du sol, peuvent être prédits grâce au calcul de l'érosion en nappe et en ravine et à l'utilisation de méthodes de simulation.

Les paragraphes suivants offrent trois exemples de la manière dont les progrès scientifiques peuvent servir à la gestion du bassin versant vis-à-vis de l'érosion des sols. Ces résultats ont été obtenus par un travail de recherche sur le bassin versant d'Abdessadok

Encadré 16. Calcul de l'érosion depuis la création du barrage, pour la période 1993 à 2001

Le modèle a donné les érosions globales suivantes :

- a) 1,75t / ha / an pour une année sèche calculée avec un index de pluviométrie $R_{si} = 25 \text{ MJ}\cdot\text{mm} / \text{ha}\cdot\text{h}$
- b) 4,12 t / ha / an pour une année médiane où $R_{si} = 64 \text{ MJ}\cdot\text{mm} / \text{ha}\cdot\text{h}$,
- c) 6,03 t / ha / an pour des années humides où $R_{si} = 93 \text{ MJ}\cdot\text{mm} / \text{ha}\cdot\text{h}$.

Il semble que les occurrences exceptionnelles de forts orages (au-dessus de 50 mm par jour avec des intensités élevées, supérieures à 90 mm/h pendant 5 minutes) affectent fortement ces estimations calculées sur de longues durées. Ainsi, 1994-1995 a été une année particulièrement agressive avec un index de pluie calculé à partir de 276 épisodes pluvieux (intensité calculée sur 30 minutes) dont 219 épisodes pluvieux en octobre 1994, période de forte vulnérabilité du sol à cause des labours ; le calcul de l'érosion globale, pondéré par la superficie et un index de sol nu ($C = 1$) pendant la saison des labours, donne 22,5 t / ha / an, ce qui est suffisant pour expliquer l'envasement précédent.

Encadré 17. Simulation de reboisement en pin d'Alep en remplacement de formations arbustives d'amont situées sur lithosols calcaires.

La première simulation a concerné le reboisement de la zone actuelle de formations arbustives sur des piémonts à forte pente (>25%), avec des lithosols (sol unité 3) et des régosols (sol unité 7). Sans attendre que les arbres atteignent l'âge de 20 ans pour observer une amélioration générale de la protection du bassin, la simulation a permis de détecter un accroissement de la protection d'environ 12% (Figure 46). D'autres facteurs doivent également être pris en compte, tels que l'amélioration des réserves en eau (tel que cela a été observé pour le bassin versant de Zanfour), la disponibilité en bois de construction et bois de feu, biens essentiels pour la communauté agricole du bassin, qui viennent s'ajouter aux bénéfices liés à la réduction de l'érosion.

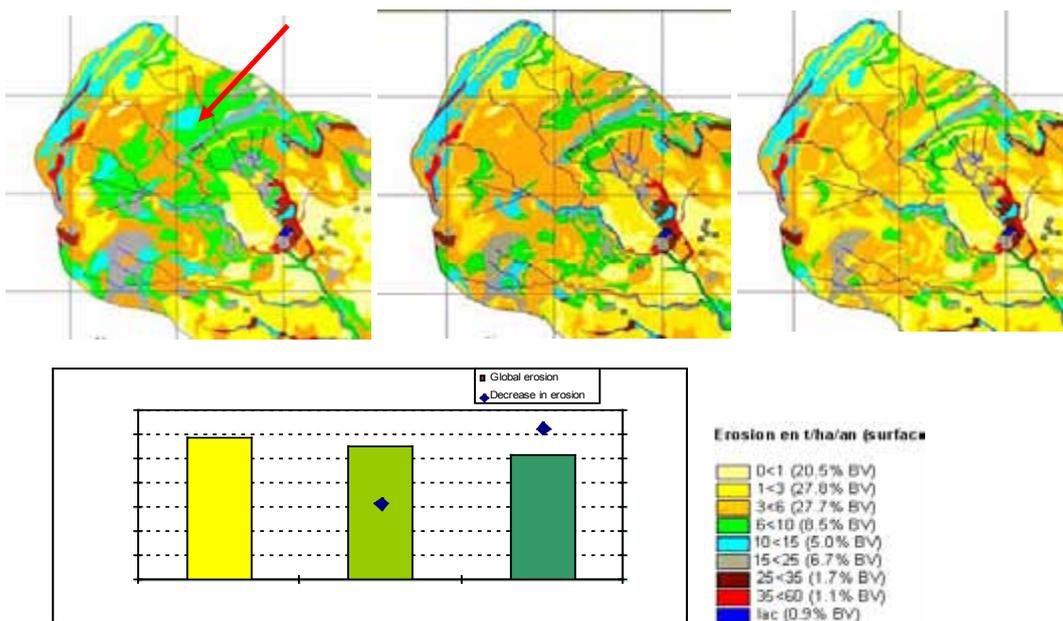


Figure 46. Le Bassin versant d'Abdessadok (en partie) : contrôle de l'érosion par le remplacement en amont de formations arbustives sur lithosols (à gauche) par une jeune forêt (au centre) ; à droite la même forêt adulte.

Encadré 18. Simulation de l'enlèvement de banquettes pour la rétention de l'eau et du sol

Cette simulation a analysé les effets de l'enlèvement total des banquettes de rétention sur les deux rives d'une rivière s'écoulant entre des glacis cultivés. Cet enlèvement augmenterait de 30% l'érosion globale du bassin versant (Figure 47). En enlevant les banquettes seulement sur la rive droite ou seulement sur la rive gauche, on a constaté que leurs effets de protection variaient de façon significative selon les rives : la rive droite s'est montrée plus fragile du fait de sols nus sur une plus grande surface et de pentes plus fortes.

dont les caractéristiques sont les suivantes : surface : 307 ha, capacité initiale du barrage : 92.500 m³. En 2001 sa capacité était de 65.000 m³ en raison d'un envasement spécifique de 10,6 m³/ha/an, 50% du bassin étant utilisé pour les activités agricoles (culture de céréales à faible rendement + élevage extensif de moutons sur les zones pentues).

- a) L'érosion des pentes selon les modes d'utilisation du bassin a été analysée et quantifiée, soit à partir de parcelles expérimentales, soit à l'échelle du bassin. L'analyse de comportement (parcelle) à grande échelle a permis de comprendre le phénomène à petite échelle (bassin), et en particulier de distinguer la transition de l'érosion aréolaire et linéaire à l'érosion en ravine. Les modèles statistiques tels que celui de la RUSLE₂ (équation universelle de perte en sol révisée) de G.R. Foster permet des applications sur des pentes à géométrie complexe. Ils ont été mis en oeuvre et combinés à l'aide d'un SIG pour différents bassins de Tunisie (voir Encadré 16). Les résultats ont été comparés à l'envasement de la retenue collinaire ; ils ont montré que les méthodes utilisées pour simuler l'érosion du sol sont cohérentes avec les observations réelles, et peuvent apporter des données précieuses permettant l'amélioration des techniques agricoles et d'usage des terres.

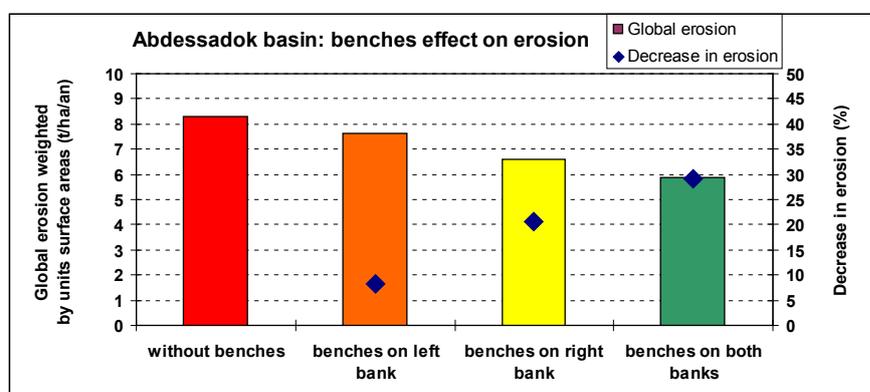


Figure 47. Le bassin versant d'Abdesadok : modification des érosions calculées à l'aval du bassin versant à la suite de l'enlèvement partiel ou total des banquettes.

- b) Le couvert végétal influe sans aucun doute sur les processus hydriques et d'érosion (voir chapitres 1 et 2). Il est donc important lorsque l'on établit des plans de gestion de bassins versants, de prévoir les conséquences que certains types de couvertures du sol dans certaines parties du bassin versant pourront avoir sur l'érosion. Comme l'expérimentation serait très longue (en particulier dans le cas de la plantation d'une nouvelle forêt !), des techniques pertinentes de modélisation peuvent offrir d'excellentes alternatives. Ces méthodes ont été appliquées avec succès pour le bassin versant d'Abdessadok (voir Encadré 17). Les résultats montrent que la substitution sur certaines unités de la végétation arbustive par des peuplements de pin d'Alep réduirait effectivement les pertes en sol et l'envasement du barrage, et pourrait, de surcroît, fournir d'autres biens.
- a) En plus des barrages, la gestion des bassins versants comprend souvent aussi la construction de **banquettes pour la rétention de l'eau et du sol** sur les deux rives d'un cours d'eau s'écoulant à travers des glacis cultivés. Des techniques de modélisation permettent de simuler l'absence ou l'enlèvement de ces équipements. Quelques données concernant les simulations réalisées dans le bassin versant d'Abdessadok sont présentées dans l'Encadré 18 ; elles montrent que les banquettes jouent un rôle significatif dans la réduction de l'érosion mais que l'efficacité de leur protection diffère en fonction du sol et de son couvert végétal.

Il convient de garder un esprit critique vis-à-vis d'un modèle plus empirique (statistique) que mécaniste (physique). Le modèle utilisé présente, en effet, plusieurs termes multiplicatifs qui ne rendent pas compte de la non linéarité entre les différents facteurs, mais le fait est que les calculs de l'érosion obtenus dans quatre études antérieures de bassins d'une surface équivalente, ont donné des résultats cohérents avec ceux mesurés par bathymétrie dans les lacs collinaires. Cette cohérence de résultats est probablement due à ce que les sédiments produits sur les différents segments des pentes sont transportés dans leur totalité vers l'émissaire, sans sédimentation intermédiaire en raison de pentes courtes et généralement très fortes, et que les écoulements conservent durablement leur capacité de transport des sédiments du fait de leur vitesse et de la finesse des éléments transportés. Dans la limite des caractéristiques présentées ci-dessus, l'estimation de l'érosion globale calculée par pondération est également une hypothèse raisonnable. Enfin, les simulations fournissent une évaluation adéquate des effets de tout changement de couvert végétal envisagé, y compris le reboisement qui peut être réalisé, si c'est pertinent, sur des zones où les réserves en eau sont propices à l'établissement des jeunes plants. Un cas spécifique, non couvert par les études décrites ici, est celui de bassins partiellement ou totalement situés sur marnes, qui sont particulièrement sujets au ravinement. Dans de telles conditions, l'érosion peut être de 10 à 100 fois plus grande que les érosions en nappe, calculées dans les modèles précédents.

Pour en savoir plus

- Albergel, J. and Rejeb, N., 1997. Les lacs collinaires en Tunisie: Enjeux, contraintes et perspectives. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*. Pp.77–88.
- Bruand, A., Perez Fernandez, P., Duval, O., Quetin, P., Nicoulaud, B., Gaillard, H. and Raison, L. 2002. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols, utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *EGS / AFES* 9(2) 105–125.
- Collinet J., Zante P. and Ghesmi M. 2001. Cartographie des risques érosifs sur le bassin versant du barrage collinaire de Zanfour (nord dorsale tunisienne). Pour la convention CRDA Le Kef / ESAK / IRD dans le cadre du Programme: Développement durable autour des retenues collinaires et suivi de l'érosion., Mission I R D de Tunis. 60 p.
- Hentati, A., Kawamura, A., Amaguchi, H. and Iseri Y. 2010. Evaluation of sedimentation vulnerability at small hillside reservoirs in the semi-arid region of Tunisia using the Self-Organizing Map. *Geomorphology* 122: 56–64.
- Foster, G.R., Yoder, D.C., McCool, D.K., Weesies, G.A., Toy T.J. and Wagner L.E. 2001. The Design Philosophy Behind RUSLE2: Evolution of an Empirical Model. Pp. 95–98. In: *Soil Erosion Research for the 21st Century, Proc. Int. Symp.* (3-5 January 2001, Honolulu, HI, USA). Eds. J.C. Ascough II and D.C. Flanagan. St. Joseph, MI: ASAE. 701P0007.

Vers une gestion écologique, socio-économique et hydrologique intégrée

Bart Muys, Paolo Ceci, Thomas Hofer, et Claudia Veith

Cette section vise à assembler les éléments sectoriels présentés dans les sections précédentes et à traiter le sujet de « l'eau pour les arbres et les hommes en région méditerranéenne » dans une perspective holistique. Le titre de cette section suggère qu'une telle approche implique nécessairement des dimensions hydrologiques, écologiques et socio-économiques.

En raison de modèles non durables de consommation en eau et des impacts du changement climatique, la rareté de l'eau est en passe de devenir un problème énorme pour la région méditerranéenne. Les conflits d'intérêt entre l'amont et l'aval, et entre les zones rurales et urbaines vont probablement s'aggraver, d'autant plus que les coûts de gestion pour la protection de l'eau, l'assainissement urbain et le contrôle de pollution augmentent. En outre, les forêts étant de grandes consommatrices d'eau, la discussion sur les compromis entre la réduction de la disponibilité en eau et les services écosystémiques qu'elles fournissent, va faire l'objet d'une attention croissante. Cette section met en évidence la nécessité d'une intégration des différents intérêts et la collaboration de toutes les parties prenantes impliquées afin de trouver des solutions durables. Une gestion écologique socio-économique et hydrologique intégrée s'avère donc indispensable pour garantir la continuité de la fourniture à la fois de ressources en eau suffisantes et d'autres services environnementaux.

Le paradigme de l'eau bleue est fondé sur l'évaluation de la disponibilité des ressources en eau bleue à des fins humaines, en tant que variable dépendante des effets de la gestion des forêts et d'autres usages des terres et types de gestion. Cette évaluation peut être réalisée à l'aide de modèles hydrologiques mais également d'indicateurs politiques.

Au cours de ces dernières années, le rôle des forêts et de la gestion forestière dans le cycle de l'eau est devenu extrêmement controversé. Encore récemment, les forestiers pensaient couramment que les forêts avaient un effet bénéfique sur les flux hydriques, y compris sur le contrôle de l'érosion, et un effet tampon sur les pics de crue et les écoulements de base (voir sections 1.5 et 2.2). Cette interprétation, fondée en partie sur des idées fausses, tel que le cliché de l'« éponge » qui est aujourd'hui encore souvent ensei-

gné, a été le moteur de vastes programmes (voir section 4.5) de plantation et de restauration forestière en région méditerranéenne dans la seconde partie du 20^e siècle. La recherche hydrologique, en particulier dans les bassins versants expérimentaux appariés, a montré qu'il y avait une diminution considérable des écoulements de base après un boisement avec des pins ou des eucalyptus, spécialement dans les zones ayant un faible « surplus » de précipitations (ce surplus étant défini comme la différence entre précipitations et évapotranspiration réelle).

Ces résultats sont à la base de ce que nous appelons ici le **paradigme de l'eau bleue**, dans lequel l'effet des forêts et des autres usages des terres sur le cycle de l'eau est évalué en termes de disponibilité en eau bleue pour les besoins des hommes. Les méthodes actuelles d'évaluation de l'impact environnemental ont généralement une approche fondée sur l'eau bleue et la plupart d'entre elles ont besoin de la calibration complète d'un modèle hydrologique pour chaque bassin versant étudié, tâche laborieuse exigeant en outre la collecte de nombreuses données. Afin de sortir de cette impasse, les scientifiques ont évalué jusqu'à quel point le simple transfert des paramètres du modèle d'un bassin versant à un autre est possible. Le bilan régional en eau, approche proposée par certains chercheurs, est une façon élégante d'obtenir des **indicateurs pratiques pour évaluer l'impact de la gestion des terres sur les ressources en eau bleue**, soit directement à partir des données de mesure de l'écoulement du cours d'eau, soit à partir de données modélisées. Avec cette méthode, le risque de crue est défini comme le 0,95 percentile des données journalières de l'écoulement (classées selon leur valeur), le risque de sécheresse est défini comme le 0,05 percentile des données mensuelles de l'écoulement (classées selon leur valeur) et la disponibilité moyenne en eau, comme la médiane de ces mêmes données mensuelles d'écoulement (Figure 48). Afin de pouvoir comparer les valeurs des indicateurs de systèmes de gestion des terres entre des bassins versants soumis à différents climats ou d'autres facteurs relatifs au lieu, les valeurs des indicateurs sont normalisées avec une valeur de référence, qui est la valeur indicative du Potentiel

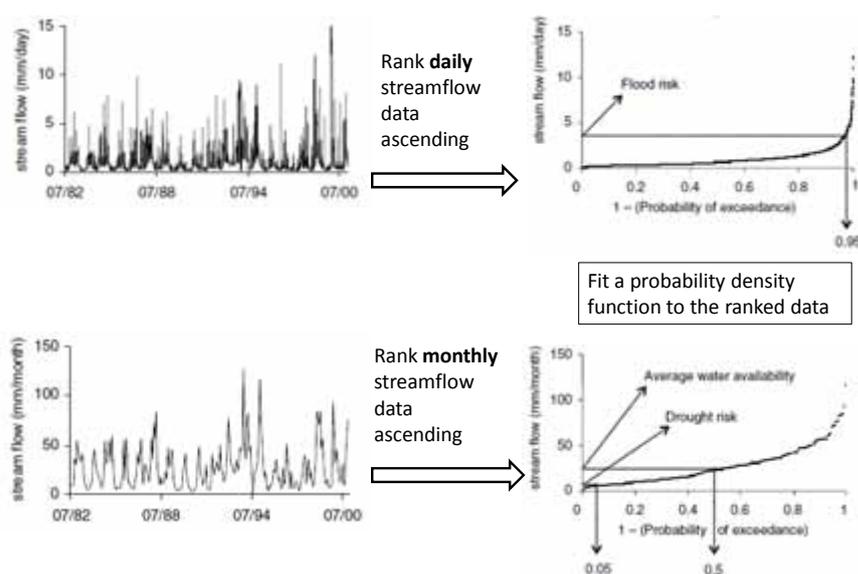


Figure 48. Calcul d'indicateurs simples d'eau bleue pour évaluer l'effet de l'utilisation des terres dans un bassin versant sur les risques de crue et de sécheresse, et la disponibilité moyenne en eau en aval (Heuvelmans et al. 2005).

naturel de Végétation (PNV) : c'est-à-dire celui de l'écosystème terrestre qui se développerait sur le long terme dans le bassin versant considéré sans intervention humaine.

Une plus grande attention devrait être accordée au paradigme de l'eau verte – en plus du paradigme de l'eau bleue – car ce sont les flux d'eau verte qui garantissent les fonctions des principaux écosystèmes.

En dépit de la grande pertinence du paradigme de l'eau bleue, il semblerait que l'on ait perdu de vue l'évapotranspiration en tant que facteur principal déterminant la croissance de la plante, et le contrôle interne à l'écosystème des flux d'énergie et de matière. Pourtant, des recherches récentes sur les écosystèmes mettent l'accent sur le rôle clé du flux d'eau verte dans le fonctionnement et la stabilité des écosystèmes terrestres. Les forêts en particulier ont une capacité plus importante de transpiration que les autres formations végétales terrestres grâce à leur enracinement plus profond et leur plus grande surface foliaire. Un enracinement profond favorise la disponibilité en eau pour l'écosystème tout entier grâce au prélèvement et à la remontée de l'eau, tandis que la grande surface foliaire des couverts multi-strates contribue au contrôle de l'érosion, à la fois par la dissipation de l'énergie cinétique des gouttes de pluie et par les pertes d'eau de pluie par interception (voir section 1.5). La structure du couvert et l'évapotranspiration forment ensemble un microclimat stable, condition nécessaire à la conservation de la biodiversité liée à la forêt. Ces résultats confortent un **paradigme de l'eau verte**, qui considère que les flux d'eau verte contribuent substantiellement au maintien des forêts en tant que systèmes complexes auto-organisés et hautement résilients aux perturbations.

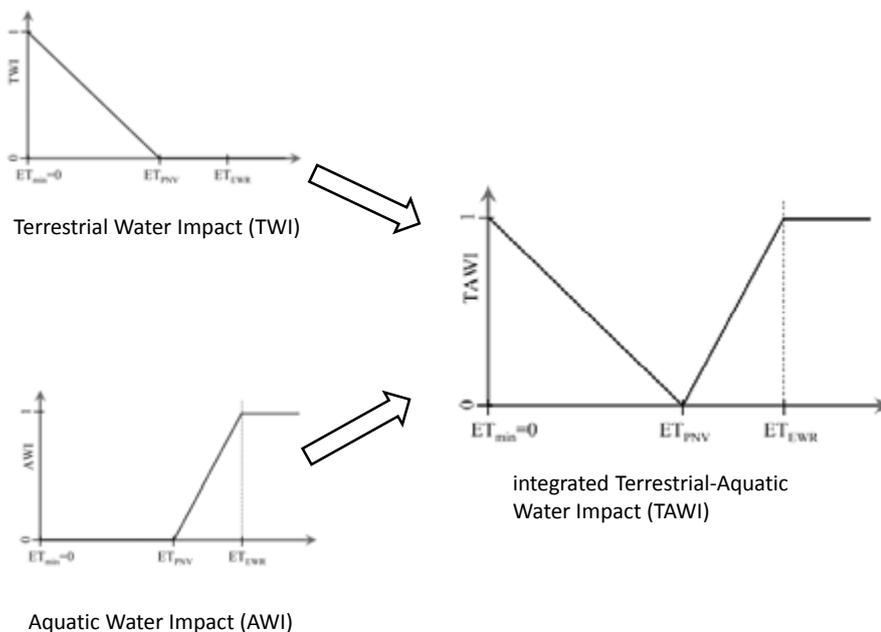


Figure 49. Impact intégré de la gestion des terres sur les services des systèmes terrestres et aquatiques dans le bassin versant (TAWI) en fonction de l'évapotranspiration réelle (ETR). Les valeurs de seuil sont déterminées par l'évapotranspiration de la végétation naturelle potentielle (ETPNV) et des besoins en eau de l'écosystème (ETEWR) (Maes et al. 2009).

Le défi de l'intégration des intérêts de l'amont et de l'aval, y compris ceux des écosystèmes terrestres et aquatiques, peut être relevé en réconciliant les paradigmes de l'eau bleue et de l'eau verte. Concrètement, ceci peut être accompli par l'utilisation de méthodes spécifiques telles que l'indicateur d'impact sur l'eau « terrestre et aquatique ».

Il est devenu évident que les deux composantes de l'eau : verte et bleue, constituent le fondement d'importants services écosystémiques, la composante de l'eau verte se situe principalement en amont dans le système terrestre, et celle de l'eau bleue en aval dans l'hydrosystème. La question est de savoir comment évaluer une gestion des territoires dans une **approche intégrée des écosystèmes terrestres et aquatiques**, prenant en compte ses impacts sur les fonctions vitales et les services écosystémiques en amont comme en aval. Des chercheurs ont proposé la méthode de l'indicateur d'impact sur l'eau terrestre et aquatique (TAWI), évitant l'exercice complexe de collecte des données requises pour le calibrage des modèles de bassins versants. L'indicateur d'impact utilisé est l'évapotranspiration réelle (ETR) du système. Son impact sur les services de l'écosystème terrestre est défini par une simple fonction de réponse comprenant : une **composante d'impact terrestre** (cette composante a une diminution d'impact linéaire entre zéro et la valeur l'évapotranspiration de la végétation naturelle potentielle : ET_{PNV}), et une **composante d'impact aquatique** (cette composante a une augmentation linéaire d'impact entre ET_{PNV} et le niveau d'évapotranspiration qui réduirait l'écoulement total à un niveau critique inférieur aux besoins en eau de l'environnement (ET_{EWR}) (Figure 49). Le besoin en eau de l'environnement, ou flux minimal, est une valeur spécifique au bassin versant, que l'on peut calculer par des méthodes standard existantes. La conversion d'une forêt naturelle sèche en plantation d'eucalyptus conduirait par exemple à une augmentation de l'ETR au-dessus du seuil de l' ET_{PNV} et provoquerait un certain impact sur la composante aquatique de l'indicateur TAWI. En revanche, la dégradation de la même forêt sèche par le surpâturage ou des feux induits par l'homme conduirait à une diminution de l'ETR au-dessous du seuil de l' ET_{PNV} et pourrait provoquer un impact similaire, mais à travers la composante terrestre de l'indicateur TAWI. Avec davantage de données, le calcul peut être rendu plus réaliste, en définissant par exemple, l'impact terrestre le plus élevé comme le niveau de l'évapotranspiration d'une surface fermée au lieu de zéro, ou en définissant l'évapotranspiration du PNV plutôt comme une fourchette, prenant en compte les cycles des perturbations naturelles dans une forêt non gérée.

L'intégration de l'eau aux autres services écosystémiques devrait être fondée sur une meilleure compréhension de l'interaction de ces services entre eux.

La régulation de l'eau est une fonction importante des forêts mais elle n'est pas exclusive. La forêt méditerranéenne est également importante pour de nombreux autres **services écosystémiques (SE)**, comme le maintien de la biodiversité (service de support), la cueillette des champignons et la récolte de résine (services d'approvisionnement), la séquestration du carbone (service de régulation) et la récréation (service culturel) (voir sec-

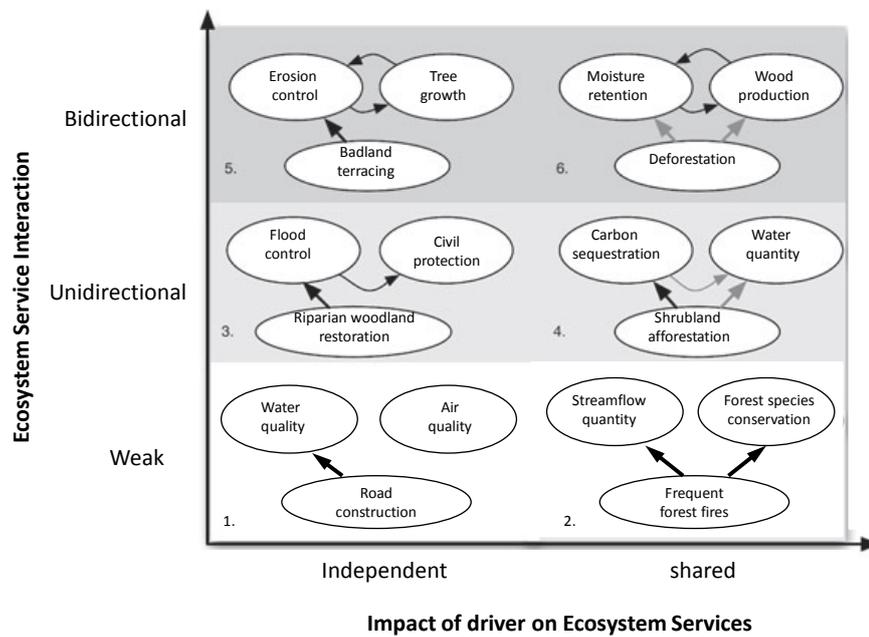


Figure 50. Exemples d'interactions possibles entre l'eau et les autres services écosystémiques en forêt méditerranéenne, ajoutées au modèle conceptuel de Bennett et al. (2009). L'eau est liée aux autres services par sa réponse (indépendante ou partagée) au même déterminant de changement (climat, gestion des terres), ou en raison des interactions directes (faibles, uni- ou bi-directionnelles) avec les autres services. Les flèches noires indiquent les effets positifs, les flèches grises, les effets négatifs.

tions 3.1 et 4.2). Ces services interagissent tous de manières différentes dans le temps et dans l'espace. À première vue, ils peuvent être soit synergiques (ex. flux d'eau verte et séquestration du carbone) soit antagonistes (ex. flux d'eau verte et plaisirs de l'eau). La Figure 50 illustre les **interactions** possibles entre l'eau et les autres services écosystémiques dans les forêts méditerranéennes.

De nouveaux outils d'analyse de compromis et d'optimisation de la gestion des terres sont aujourd'hui disponibles pour l'intégration de l'eau aux autres services écosystémiques.

Il y a différentes façons d'évaluer les relations entre les services écosystémiques. Une approche simple mais robuste pour relier l'eau à une autre fonction de la forêt est l'**analyse de ratio**. Le ratio entre la transpiration et la productivité primaire nette par exemple est un indicateur classique de la productivité en eau des cultures agricoles, mais il est tout aussi tout utile en foresterie (voir section 4.5 sur l'empreinte de l'eau). Des ratios peuvent être utilisés pour calculer le coût de consommation d'eau verte pour n'importe quel service écosystémique de la forêt, par ex. la quantité d'eau évapotranspirée en mm par tonne de gaz à effet de serre dont l'émission sera réduite. Une autre approche est celle de l'**analyse des compromis**, dans laquelle les gestionnaires des forêts et des territoires cherchent spécifiquement les services écosystémiques ayant des interactions antagonistes, comme par exemple une augmentation de production de bois aux dépens

Encadré 19. Gestion intégrée socio-économique et environnementale en Italie

Les deux tiers de l'Italie sont en zone montagneuse. A la fin des années 90, l'Italie a développé des pactes territoriaux (lois nationales 104 de 1995 et 662 de 1996), qui constituent des contrats juridiquement contraignants de partenariat social pour l'aménagement du territoire. Ces pactes sont des accords publics et privés visant à la mise en œuvre de mesures de développement local intégrant la gestion des ressources naturelles, l'industrie, l'agriculture, les entreprises de pêche, les services publics, le tourisme et les infrastructures. N'importe quel secteur peut bénéficier d'un pacte, mais les zones marginales sont prioritaires. Les pactes territoriaux impliquent 47% de la population totale de l'Italie et couvrent 53% du territoire. Ils favorisent une approche intégrée intersectorielle et l'implication d'acteurs clés, ce qui les rend pertinents dans le cadre de la gestion des bassins versants.

La caractéristique principale de ces pactes est l'harmonisation des acteurs locaux sans imposition de conditions externes : la participation est volontaire et inclut tous les secteurs –administration, entreprises, banques, recherche, commerce, etc. L'objectif d'un pacte territorial est de parvenir à une cohésion entre les initiatives actuelles et nouvelles impliquant : ressources naturelles, personnes et activités économiques. Chaque pacte a trait à des activités spécifiques, telles que la gestion des ressources naturelles, y compris les ressources en eau ; plus de la moitié des pactes approuvés jusqu'à 2003 incluent des aspects touchant aux ressources naturelles et à l'eau. Le territoire couvert par un pacte peut aller, par exemple, du petit bassin versant aux 1600 km de la chaîne des Apennins.

Le pacte territorial de la province de Rieti, implique 12 municipalités, trois collectivités de montagne et 35 parties signataires. Il a créé 227 emplois nouveaux à plein temps et consacré 18 millions d'euros à deux activités principales : le renforcement des capacités des petites et moyennes entreprises et l'investissement dans les infrastructures, le tourisme et les services environnementaux, incluant l'agriculture et la foresterie.

Le pacte territorial fournit un cadre d'action et des avantages en termes d'économies d'échelle, mais les dimensions humaines et culturelles ont une grande influence sur sa mise en œuvre.

d'une diminution de l'écoulement total. Ces types de compromis peuvent être cartographiés afin de mieux comprendre leur structure spatiale. Les interactions des fonctions multiples de la forêt ont été à peine explorées. L'utilisation de techniques avancées de **modélisation empirique** est prometteuse pour la détection de ce qu'on appelle communément **faisceaux de SE** ; ce sont des ensembles de SE liés entre eux, qui apparaissent conjointement et de façon répétée, dans le temps et l'espace, au sein des territoires, et montrent un comportement parallèle. La détection de ces faisceaux liés aux questions des interactions forêt/eau l'eau faciliterait la conception de systèmes de gestion à objectifs multiples. L'interaction entre des SE multiples, comme la recharge des nappes souterraines et la séquestration du carbone, peut également être abordée en utilisant des **modèles écosystémiques mécanistes**, étant donné que les processus sous-tendant les écosystèmes comme l'évaporation, la photosynthèse et le cycle des éléments minéraux sont tous liés. L'addition à ces modèles d'une interface utilisateur et de fonctionnalités d'automatisation et de visualisation, peut les transformer en de puissants **simulateurs** de la performance du service écosystémique et de ses interactions

La compréhension des compromis entre SE est une excellente base pour **une gestion intégrée et durable des territoires**. Le choix d'une modalité de gestion par les aménagistes, les propriétaires et gestionnaires forestiers aura un effet sur le type, l'ampleur et le mélange relatif des SE fournis par le territoire forestier. L'optimisation de la gestion est une tâche complexe car le choix d'une option quelconque, peut conduire à sacrifier une par-

Encadré 20. Recommandations pour une gestion durable des forêts et de l'eau en région méditerranéenne

- On devrait considérer les périmètres de fourniture d'eau et les sites d'aquifères importants, comme des zones où il s'agit de préserver la forêt et de minimiser les perturbations. Bien qu'une coupe des arbres (réduisant d'au moins 20% le couvert) produise une augmentation temporaire du rendement en eau, des compromis doivent être considérés car cette coupe entraîne une réduction de la qualité de l'eau et un accroissement de l'érosion, et a un impact sur la biodiversité. Toute exploitation forestière devrait veiller à éviter la compaction du sol et sa mise à nu afin de minimiser le ruissellement de surface et l'érosion concomitante. Les périmètres de captage d'eau potable devraient avoir un statut légal d'aire protégée ou de forêts de protection.
- Dans certains cas à évaluer attentivement, le rendement en eau des bassins versants alimentant des collectivités peut être accru lorsque des espèces arborées moins consommatrices en eau sont plantées en remplacement de celles à consommation plus élevée, ou lorsque les peuplements forestiers sont périodiquement éclaircis.
- Les autorités en charge de l'aménagement du territoire devraient identifier les zones sujettes au risque de glissements de terrain et les réserver, soit au maintien de la forêt, soit à un usage agroforestier et sylvopastoral avec un couvert assez dense. Ces zones pourraient donc faire partie du domaine forestier de protection.
- Les ripisylves peuvent maintenir de faibles niveaux de transport de sédiment vers les rivières, lacs et réservoirs. Elles devraient donc être gérées pour la protection de la qualité de l'eau, qui, à son tour favorise la capacité productive des écosystèmes aquatiques et améliore la santé et le bien-être des populations locales. Il est recommandé aux pays méditerranéens d'entreprendre une évaluation de leurs ripisylves et de les classer en fonction d'objectifs : gestion de conservation, protection ou restauration. Une législation adéquate sur l'entretien de la bande riveraine tampon, devrait être établie.
- Les bassins versants boisés des montagnes méditerranéennes méritent une attention particulière. Ils sont sources d'eau douce, mais aussi à l'origine des torrents et des crues, et des glissements de terrain. Une action pour prévenir ou atténuer les risques naturels en montagne devrait inclure le maintien d'un couvert forestier en bon état dans les bassins versants sujets aux précipitations torrentielles. La gestion des risques naturels, et la gestion des ressources hydrologiques et forestières devraient être placées sous une autorité unique permettant leur intégration efficace. L'Encadré 21 décrit l'importance du développement durable des régions de montagne pour la région méditerranéenne.
- Une approche par bassin versant prenant en compte les couplages amont/ aval devrait être incluse dans la gestion des ressources forestières et hydrologiques, ainsi que dans l'aménagement des zones agricoles et urbaines. Une telle approche est nécessaire tant au niveau local qu'au plus haut niveau de gouvernance afin de promouvoir des solutions durables.
- Les paiements pour les services environnementaux ont un potentiel considérable et devraient être examinés plus en détail. En réduisant les subventions pour l'eau et en la considérant comme une matière première plutôt que comme un bien gratuit, des mesures économiques incitatives pourront contribuer à une meilleure gestion. Il s'agit là en dernière instance d'un problème de gouvernance impliquant le développement des arrangements institutionnels nécessaires. Une évaluation spécifique à chaque zone demande des ajustements à la fois institutionnels et de recherche.
- Il est nécessaire de développer et d'élargir des programmes éducatifs et de formation sur la gestion écologique, socio-économique et hydrologique, ciblés vers tous les acteurs pertinents, depuis les habitants locaux des bassins versants jusqu'aux décideurs de plus haut niveau.

tie d'un des SE pour en conserver un autre. Plusieurs **techniques de gestion et d'aménagement du territoire à objectifs multiples**, y compris l'analyse multicritère pondérée par partie prenante, la programmation linéaire à objectifs multiples et les approches heuristiques spécifiquement dédiées aux problèmes spatiaux, ont été développées dans ce but.

Encadré 21 : Importance des montagnes

Les montagnes sont les châteaux d'eau du monde. En influant sur les régimes climatiques et pluviométriques, et modulant les régimes d'écoulement, ils jouent un rôle clé dans le cycle de l'eau. Dans les régions semi arides et arides telle que la région méditerranéenne, la proportion d'eau issue des montagnes peut comprendre jusqu'à 95% du total de l'eau douce disponible dans un bassin versant. Comme la moitié des pays de la région méditerranéenne ont au moins 50% de leurs territoires classés comme zones de montagne, le développement durable des montagnes et les couplages équilibrés amont/aval méritent une attention toute particulière.

Les conditions climatiques extrêmes et les contraintes environnementales comme la fragilité des sols et les fortes pentes sont des obstacles majeurs au bien-être des communautés de montagne. Par ailleurs, une forte demande par les populations de plaine de ressources issues de zones de montagne et des politiques favorisant les régions de plaine, exacerbent souvent les pressions humaines et les perturbations environnementales sur le milieu montagnard. La dégradation des écosystèmes de montagne ne détruit pas seulement la base même des moyens d'existence des habitants locaux, mais influe aussi très négativement sur la situation en aval. Ces facteurs ont conduit à se préoccuper de plus en plus d'une mise en œuvre de politiques et stratégies nationales d'ensemble pour un développement durable et une protection de ces écosystèmes et de leurs habitants. Afin de gérer les ressources des montagnes de façon durable, des couplages amont/aval et des opportunités équitables à la fois pour le développement et la conservation, sont nécessaires sur de larges territoires, depuis la cime des chaînes de montagnes jusqu'aux côtes, couvrant des bassins versants entiers et traversant les frontières internationales.

Elles permettent de trouver des solutions de gestion optimale fondées sur des règles de décision multicritère. Une approche d'optimisation économique est également possible afin d'identifier la solution offrant le plus grand bénéfice social net pour la zone considérée. Une telle approche coût-bénéfice suppose la disposition de méthodes capables de fournir des valeurs monétaires pour tous les bénéfices considérés, y compris ceux qui ne sont pas mis en marché. Il est cependant encore nécessaire de développer et d'intégrer ces approches dans des **systèmes d'aide à la décision spatiale** pour une gestion durable des ressources forestières et hydriques en région méditerranéenne.

Intégrer la gestion écologique, socio-économique et hydrologique, constitue une approche clé de la durabilité.

Dans le but d'améliorer l'équilibre entre l'offre et la demande pour l'eau, de réduire la pression sur l'environnement et de répondre aux problèmes sociaux et économiques, il est nécessaire de lier l'eau à la gestion globale des ressources naturelles. L'eau étant une ressource rare et menacée dans la région méditerranéenne, la gestion des ressources en eau doit veiller tout particulièrement à réduire les pertes, augmenter l'efficacité de son utilisation et arbitrer sa distribution. Ceci revient à définir des objectifs sociaux et environnementaux, distribuer les rôles et responsabilités entre secteurs publics et privés, décentraliser la gestion et accroître la participation des parties concernées, et enfin appliquer des outils techniques et économiques adaptés.

L'expérience a montré que des mesures purement techniques sont insuffisantes pour solutionner les problèmes des bassins versants. Du fait du rôle pivot des populations

humaines dans le façonnement des paysages et le maintien d'écosystèmes en bonne santé et équilibrés, les moyens d'existence locaux jouent un rôle clé dans la gestion intégrée des forêts et de l'eau. Lorsque la pression sur les ressources est trop importante et leur utilisation non durable, des activités alternatives rémunératrices devraient être encouragées afin de réduire cette pression. De telles interventions socio-économiques nécessitent une prise de conscience accrue et un renforcement des compétences à différents niveaux.

Une gestion intégrée de la forêt de l'eau réussie implique de dépasser les barrières sectorielles, institutionnelles et administratives ; elle requiert la participation des différentes parties impliquées : forestiers, usagers de l'eau, agriculteurs, propriétaires fonciers, gouvernement local, administrations, etc. La gestion des ressources naturelles entraîne toujours des coûts économiques et sociaux, un consensus sur le partage de ces coûts doit donc être atteint. La négociation, la médiation et le compromis à l'intérieur de la sphère politique locale jouent une part essentielle dans la pratique d'une gestion intégrée. Elles sont mieux abordées à travers une approche collaborative dans laquelle les techniciens, les décideurs de haut niveau, les administrateurs locaux et les parties locales concernées partagent la responsabilité d'évaluer la situation localement et de mettre en œuvre les actions nécessaires. Cette approche conduit logiquement à des fonctions et des responsabilités claires de gestion pour un ensemble donné de ressources naturelles.

Un des objectifs principaux de la gestion collaborative est de garantir des couplages équilibrés et durables entre l'aval et l'amont à l'échelle du bassin versant et du paysage. Par exemple, l'utilisation de la forêt d'altitude doit être rendue compatible avec l'exigence de fourniture continue de services environnementaux essentiels telle que la qualité de l'eau, la réduction des charges de sédiment dans les rivières, les activités récréatives, etc. L'expérience acquise suggère que l'on obtient des couplages aval /amont équilibrés dans les bassins versants, lorsque les politiques et les mécanismes sont en place pour compenser les désavantages socio-économiques auxquels sont généralement confrontés les populations de montagne, et lorsque les parties prenantes des plaines consentent à payer pour les services environnementaux fournis en amont, contribuant ainsi à l'amélioration des moyens d'existence de ces territoires. La gestion collaborative des ressources forestières et hydrologiques demande à être renforcée par une législation appropriée et des mesures économiques incitatives.

Répondre à ces enjeux demande une synergie accrue entre les deux communautés de gestionnaires : celle de la forêt et celle de l'eau, au moyen de mécanismes institutionnels visant à la mise en œuvre de programmes d'action aux niveaux local, régional et national. Dans le même sens, il y a un besoin urgent d'une compréhension améliorée et différenciée au niveau sous-régional des interactions entre forêts et eau, en particulier dans un contexte de changement climatique, et d'insertion des acquis scientifiques dans les politiques. Il y a également besoin de partenariats renforcés entre les institutions de recherche, éducatives, financières et politiques. L'Encadré 1 offre un exemple concret de gestion socio-économique et environnementale intégrée.

La fourniture d'eau en quantité et qualité adéquates pour répondre aux besoins des hommes s'avère essentielle et représente un défi particulier pour la zone méditerranéenne. Les forêts jouent un rôle important à cet égard, leur gestion et celle de l'eau doivent donc aller de pair. La mise en œuvre d'approches intégrées requiert des politiques et des institutions adéquates pour promouvoir le dialogue et la coopération intersectoriels. Les programmes concernant la forêt, l'eau et l'usage des terres devraient être fondés sur une science rigoureuse et non sur des idées fausses. Les gestionnaires

des ressources forestières et hydrologiques, comme les décideurs économiques et politiques de ces deux secteurs, devraient prendre en compte et adopter un ensemble de recommandations pour la protection et la conservation de l'eau, si précieuse en région méditerranéenne, comme celles détaillées dans l'encadré 20.

Pour en savoir plus

- Benett, E.M., Peterson, G.D. and Gordon, L.J. 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters* 12: 1394–1404.
- Dassonville, L. and Fé d'Ostiani, L. 2005. Mediterranean watershed management: overcoming water crisis in the Mediterranean. In: Tennyson, L. and Zingari, P.C.(eds.) *Preparing for the next generation of watershed management programmes and projects. Water resources for the future. Proceedings of the International Conference. Porto Cervo, Sassari, Sardinia, Italy, 22–24 October 2003. Watershed Management and Sustainable Development Working Paper No. 9. Rome, FAO, FORC.*
- FAO. 2007. *Forests and water. Unasylva No. 229, Vol. 58(4). Rome, FAO.*
- FAO. 2006. *The new generation of watershed management programmes and projects. Forestry Paper No. 150. Rome, FAO, FORC.*
- Hamilton, L.S. 2008. *Forests and water: a thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005. Rome, FAO, FOMC.*
- Heuvelmans, G., Muys, B., Feyen, J. 2005. Extending the Life Cycle Methodology to Cover Impacts of Land Use Systems on the Water Balance. *International Journal of Life Cycle Assessment* 10: 113–119.
- Hofer, T. and Warren, P. 2007. *Why invest in watershed management? Rome, FAO, FOMC.*
- Maes, W.H., Heuvelmans, G. and Muys, B. 2009. Assessment of land use impact on water-related ecosystem services capturing the integrated terrestrial-aquatic system. *Environmental Science and Technology* 43: 7324–7330.
- Muys, B., Hynynen, J., Palahi, M., Lexer, M.J., Fabrika, M., Pretzsch, H., Gillet, F., Briceño, E., Nabuurs, G.J. and Kint, V. 2010. *Simulation tools for decision support to adaptive forest management in Europe. Forest Systems, in press.*
- Pukkala, T (ed.) (2002). *Multi-objective forest planning. Kluwer Academic Publishers.*
- Regato, P. & Salman, R. 2008. *Mediterranean Mountains in a Changing World: Guidelines for developing action plans. Gland, Malaga, IUCN.*
- Zingari, P.C. 2005. Effective watershed management: a European perspective. In M. Achouri and L. Tennyson, eds. *Preparing for the next generation of watershed management programmes and projects. Proceedings of the European Regional Workshop, Megève, France, 4 September 2002. Watershed Management and Sustainable Mountain Development Working Paper No. 6. Rome, FAO, FORC.*

L'empreinte "eau" de notre vie quotidienne : combien d'eau utilisons-nous ?

Yves Birot

La gestion de l'eau, nécessaire aux hommes et à la nature, implique la prise en compte des besoins multiples des "anthropo-eco-systèmes". L'analyse de l'empreinte « eau » permet la traçabilité de la fourniture et de la consommation d'eau et d'identifier les impacts des activités humaines. Elle donne une information claire sur les risques et les responsabilités.

Équilibrer la répartition de l'eau entre les hommes et la nature implique que nous, en tant qu'êtres humains et citoyens, ayons conscience des quantités d'eau que nous utilisons à partir d'une ressource en quantité finie, et qui doit être partagée avec des écosystèmes, qu'ils soient terrestres ou aquatiques. Cette question a une dimension temporelle (intra et inter-annuelle), une dimension spatiale (de l'échelle du bassin-versant à celle du pays, et jusqu'à l'échelle planétaire), et aussi une dimension économique (marché). Avec quelques similitudes et aussi des différences avec les concepts d'empreinte écologique, d'empreinte carbone et d'analyse du cycle de vie, l'empreinte « eau » est récemment apparue comme un moyen de traiter ce problème complexe.

L'empreinte « eau » peut être évaluée aux niveaux d'un **produit**, d'une **filière** ou d'une activité économique, d'un **pays** (relation entre la consommation nationale, le marché et l'eau). Dans ce qui suit, nous considérerons principalement les deux premiers niveaux. Nous avons aussi, en tant que **consommateurs**, une empreinte « eau ».

L'empreinte "eau" d'un produit peut se définir comme le volume d'eau douce utilisé pour produire le produit, cumulé sur l'ensemble des étapes de la chaîne de production. Elle renseigne aussi sur les aspects spatiaux et temporels (« où » et « quand ») de l'utilisation de l'eau, ainsi que le type d'eau utilisé : eau verte (volume de pluie évaporé), eau bleue (volume ou surface, d'eau souterraine évaporée), eau grise (volume d'eau polluée au cours du processus de production¹). Par comparaison avec les statistiques traditionnelles, qui considèrent l'eau prélevée, le concept d'empreinte « eau » fournit un moyen plus complet d'examiner l'utilisation de l'eau (voir Figure 51).

¹ L'eau grise correspond au volume d'eau douce nécessaire pour diluer l'eau polluée et ramener sa teneur en polluant au-dessous du seuil acceptable.

Encadré 22. Le concept d'empreinte "eau" couvre un champ plus large que celui de teneur en eau virtuelle.

L'empreinte « eau » est un terme qui renvoie à l'eau utilisée pour fabriquer un produit. Nous pourrions alors parler de « teneur en eau virtuelle » au lieu d'empreinte « eau ». Cependant le concept d'empreinte « eau » a un champ d'application plus large. On peut par exemple parler de l'empreinte « eau » d'un consommateur en examinant l'empreinte « eau » des biens et services consommés, ou parler de l'empreinte « eau » d'un producteur (filière, industrie manufacturière, fournisseur de services) en examinant l'empreinte « eau » des biens et services qu'il a produit. En outre, le concept d'empreinte « eau » ne se limite pas seulement à un volume d'eau, comme dans le cas de la teneur en eau virtuelle d'un produit. L'empreinte « eau » est un indicateur multi-dimensionnel, qui ne se limite pas au seul volume d'eau utilisé, mais aussi rend explicite le lieu où le volume d'eau est utilisé, et quelle source d'eau est utilisée. Ce supplément d'information est crucial pour évaluer les impacts de l'empreinte « eau » d'un produit.

Source : water footprint : http://www.waterfootprint.org/?page=files/FAQ_Technical_questions

Dans le cas de l'**agriculture**, qui a de loin l'empreinte « eau » la plus marquée (70%) parmi toutes les activités humaines au niveau planétaire, l'empreinte « eau » peut être évaluée pour les productions végétales comme le rapport du volume d'eau utilisé par unité de surface (m^3/ha) au rendement (tonne/ha), et pour les productions animales comme la somme des volumes d'eau utilisés dans la ration alimentaire et la boisson des animaux et pour leurs soins. Pour les produits végétaux et animaux, l'approche consiste à répartir l'empreinte « eau » du produit de base sur les produits qui en sont dérivés. Des modèles divers, fondés sur des données climatiques et les caractéristiques propres des productions végétales, sont disponibles pour estimer les besoins en eau des cultures ; une approche complémentaire doit être utilisée dans le cas de cultures irriguées. Dans ce cas, l'eau verte (c'est à dire le volume d'eau de pluie évapotranspirée par un champ au cours du développement de la culture), et l'eau bleue (c'est à dire le volume d'eau d'irrigation extraite des eaux souterraines ou de surface) qui est évapotranspiré par le champ au cours de la même période.

L'évaluation de l'empreinte "eau" par produit ou matière première, activité sectorielle ou filière, fournit un nouvel angle d'attaque des questions liées à l'eau à différentes échelles (locale, nationale, régionale et planétaire), et ouvre la voie à de nombreuses applications dans les domaines économiques, du commerce, de l'environnement, des politiques, de l'industrie, etc.

La Figure 52 présente un exemple en Espagne concernant l'empreinte "eau" de différentes cultures utilisant de l'eau bleue et de l'eau verte, ainsi que la productivité économique de l'eau utilisée. Malgré la simplification adoptée, attribuant à l'eau verte et à l'eau bleue la même valeur (ce qui en fait n'est pas juste), cet exemple illustre l'utilité d'une telle approche dans le choix de politiques.

Un autre exemple concerne les aspects spatiaux. L'empreinte « eau » a une dimension spatiale qui permet donc de la cartographier. Une carte d'empreinte « eau » montre le volume d'eau utilisé à différents endroits, par exemple l'eau utilisée au niveau mon-

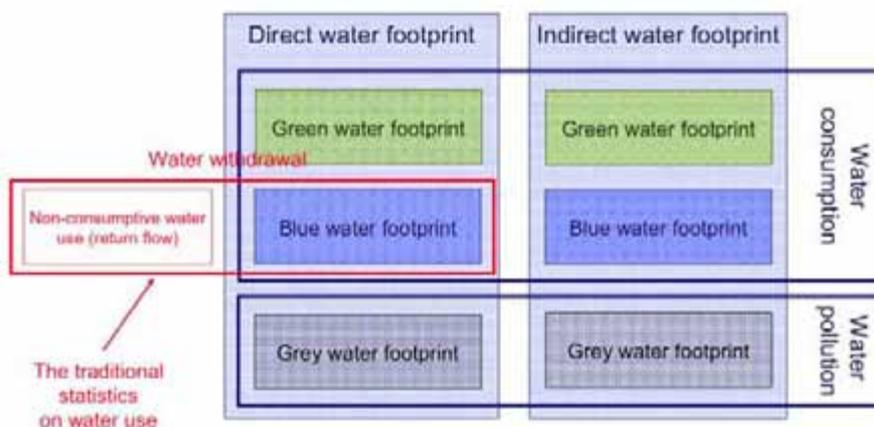


Figure 51. Composantes de l’empreinte “eau” Source: Hoekstra, (2008)

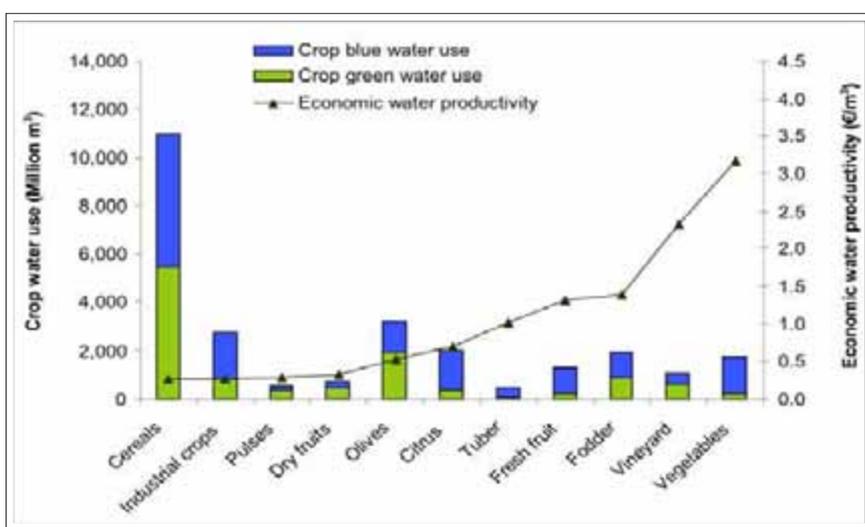


Figure 52. Productivité économique de l’eau (€/m³) et utilisation d’eau bleue et verte pour différentes cultures en Espagne pour l’année 2006. Source : Garrido et al. (2009)

dial pour fabriquer des produits consommés par une communauté donnée (voir Figure 53). A cet égard, l’empreinte « eau » permet de relier la consommation en un lieu aux impacts sur les hydrosystèmes dans un autre lieu. En outre, l’évaluation de l’empreinte « eau » permet d’identifier des zones critiques pour ce paramètre, dans le temps et dans l’espace. C’est par exemple le cas, lorsque l’empreinte « eau » (d’un produit, d’un consommateur ou d’un producteur) est importante dans une zone et pour une période de l’année données, et lorsque l’eau devient rare dans cette zone et pour cette période.

L’agriculture est responsable au niveau mondial, de l’empreinte “eau” la plus marquée. Au niveau mondial et en moyenne, la production alimentaire demande soixante-dix fois plus d’eau que la consommation des ménages. Pour produire une ration de 3000 kcal/personne/jour (dont 20% de protéines animales), 3500 litres d’eau sont nécessaires contre 5l/personne et par jour pour un usage domestique.

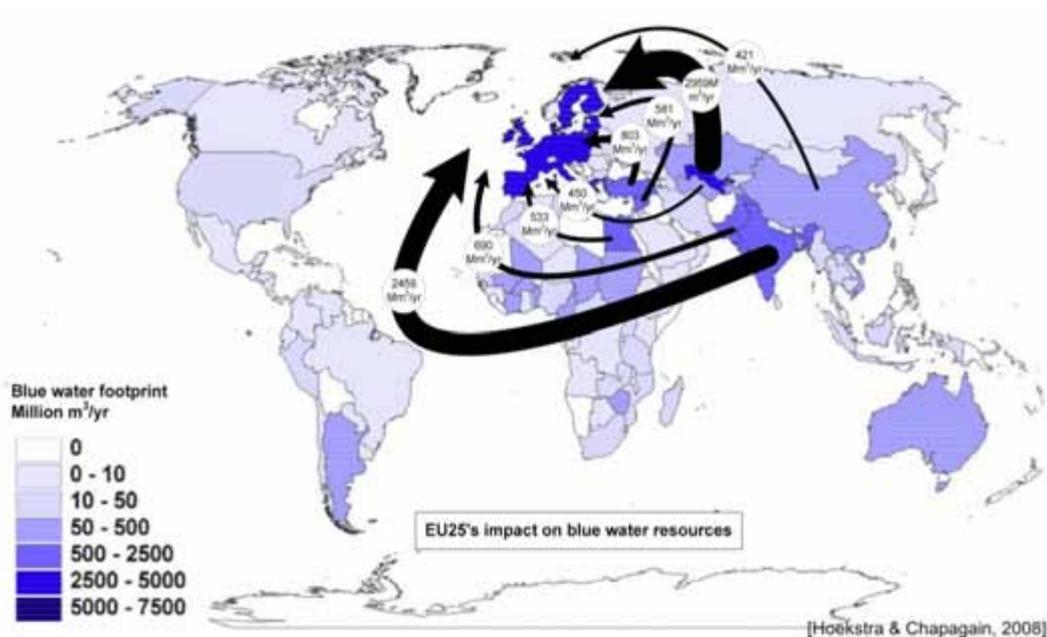


Figure 53. L'impact de la consommation de produits à base de coton par les citoyens de l'UE à 25 sur les ressources en eau du monde (millions m³/a. Période 1997-2001. Cette carte montre l'empreinte « eau » pour l'eau bleue, c'est à dire le volume d'eau d'irrigation évapotranspirée. Source : Hoekstra and Chapagain (2008).

Figure 54. Empreinte "eau" (en litre) de quelques produits alimentaires communs. Source : water footprint

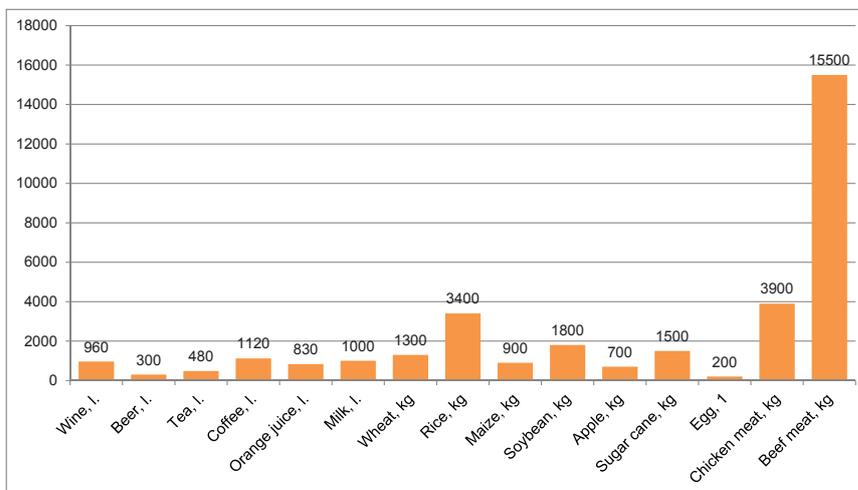


Figure 55. Teneur en eau virtuelle par produit en l/kg en France, Lybie et en moyenne pour la région méditerranéenne. Source des données : FAO, Hoekstra

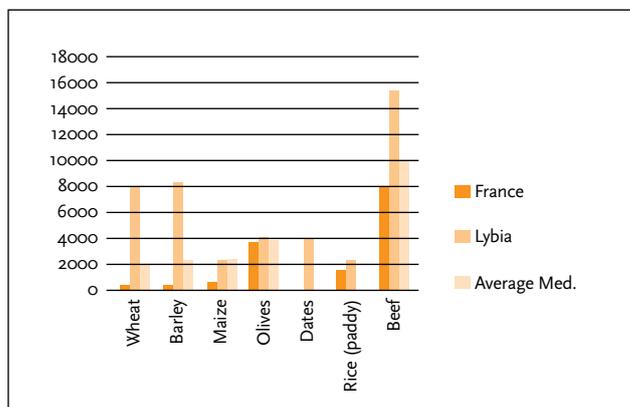


Tableau 10. Empreinte “eau” de quelques produits industriels (en litre)

Produits	Empreinte “eau” (l)
Papier – feuille A4	10
Cuir (1kg)	16.600
Chemise coton (250g)	2.700
Jeans (1.000g)	10.800
Couches bébé (75g)	800
Drap (900g)	9.700
Automobile (1,1t)	400.000-1.000.000
Maison (construction)	6.000.000

La Figure 54 présente des données très informatives sur l’empreinte “eau” de quelques produits alimentaires courants. Ces exemples permettent de comprendre comment les préférences alimentaires, telles qu’une alimentation riche en viande, en relation avec le niveau de vie du consommateur, peuvent avoir un impact marqué sur les ressources en eau, et pourquoi certaines cultures (par exemple, le maïs) peuvent être inappropriées là où l’eau est moins disponible.

Les données présentées dans la Figure 54 sont des moyennes. Comme indiqué ci-dessus, l’empreinte « eau » des produits alimentaires varie selon les conditions locales (systèmes cultureux et leur efficacité pour l’eau, évapo-transpiration potentielle, etc.). La Figure 55 présente des données pour deux situations contrastées : France et Lybie et pour la Région Méditerranéenne en moyenne. On voit que pour certaines cultures, il y a des différences mineures, tandis que pour d’autres, ces différences sont très importantes.

L’eau n’est pas seulement intégrée dans les aliments, mais aussi dans des produits de consommation courante, et parfois en très grande quantité (Tableau 10).

Il est pertinent d’examiner l’**empreinte « eau » totale des pays et de leurs citoyens**. Une étude menée sur la période 1997-2001 montre que les USA ont une empreinte « eau » moyenne de 2.480 m³/personne/an, soit 6,8 m³/personne/jour, tandis que pour la Chine, ces chiffres sont respectivement de 700 m³/personne/an et 1,9 m³/personne/jour. Au niveau mondial, ces valeurs sont 1.240 m³/personne/an et 3,4 m³/personne/

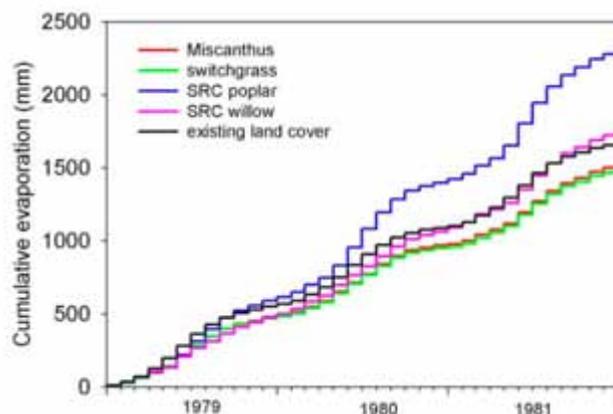
**Figure 56.** Évapotranspiration cumulée de quelques taillis à courte rotation pour la production de bio-carburant. (Finch, 2008)

Tableau 11. Estimations de l'empreinte « eau » du bois fondées sur la croissance de différentes espèces en région méditerranéenne. L'empreinte est exprimée en m³ d'eau nécessaire pour produire 1 m³ de bois. Noter que la croissance *Pinus radiata* peut atteindre 15 à 20 fois celle de *Q. ilex*, ce qui signifie que la consommation d'eau par hectare est proportionnelle. Source : IEFC (Inventaire forestier écologique de Catalogne) (Gracia et al, 2000-2004).

Espèces	empreinte « eau » m ³ eau/m ³ bois
<i>Pinus radiata</i>	332
<i>Pinus pinaster</i>	698
<i>Abies alba</i>	762
<i>Pinus sylvestris</i>	1.443
<i>Pinus nigra</i>	1.458
<i>Pinus pinea</i>	1.642
<i>Pinus uncinata</i>	1.708
<i>Pinus halepensis</i>	2.073
<i>Castanea sativa</i>	675
<i>Fagus sylvatica</i>	698
<i>Quercus ilex</i>	2.842
<i>Quercus suber</i>	2.981

jour. Les quatre facteurs principaux déterminant l'empreinte « eau » d'un pays sont : le volume de la consommation (il est lié au PIB), le régime alimentaire (faible ou forte consommation de viande), le climat (conditions de croissance) et les pratiques agricoles (efficacité de l'utilisation de l'eau des techniques culturales).

Les plantations forestières visant au stockage du carbone sont très discutables en région méditerranéenne en raison de leur coût élevé pour l'eau.

Les données sur l'empreinte « eau » ne sont pas très nombreuses pour le secteur forestier, mis à part pour certaines industries (pâte et papier) et pour des plantations de type intensif, comme la ligniculture visant à produire des fibres, de l'énergie (Figure 56) ou des composés chimiques; ces plantations sont comparables à l'agriculture, en ce sens qu'elles sont à court terme et qu'elles utilisent de l'eau verte et de l'eau bleue. Des données existent cependant concernant le coût en eau de la production de bois (Tableau 11). Ceci soulève la question du coût en eau (principalement verte) du stockage du carbone en forêt. A travers la photosynthèse, carbone et eau sont étroitement liés, et le coût en eau de la fixation du carbone est élevé (voir chapitre 3) Dans des conditions de faible disponibilité en eau, comme en région méditerranéenne, planter des forêts comme « puits de carbone » est donc très discutable.

L'empreinte « eau » : un concept et un instrument intéressant...mais à combiner avec d'autres approches.

Le concept d'empreinte « eau » offre d'intéressantes perspectives sur les problèmes de l'eau. Dans le contexte d'une évolution de la gestion des ressources hydriques, déplaçant la priorité donnée à l'offre d'eau vers la demande, l'empreinte « eau » ouvre la porte à de nouveaux modes de gouvernance, et facilite la différenciation et les compromis entre des perspectives, conditions et intérêts variés. Ce concept permet également d'établir des distinctions entre échelles géographiques : locale, régionale et même planétaire, et les liens qui existent entre elles. Il est aussi cohérent avec l'approche de la gestion intégrée des ressources en eau (IWRM) (voir la section 4.3 ci-dessus). Cependant l'hypothèse implicite que le surplus d'eau verte, généré par un changement d'une activité consommatrice d'eau (en relation avec certains types de végétation) vers une activité moins consommatrice, serait disponible pour cette nouvelle activité, peut se révéler fausse ou non économiquement faisable.

L'empreinte « eau » est un outil, qui devrait être combiné à d'autres dans une analyse globale intégrant tous les facteurs. Dans le cas des forêts, ces écosystèmes sont en général des consommateurs net d'eau. Dans une approche intégrée, d'autres facteurs sont aussi à prendre en compte, tels que : i) le contrôle de l'érosion par le couvert végétal, contribuant ainsi à limiter l'envasement des barrages et maintenir la fourniture d'eau bleue ; ii) l'infiltration et la percolation dans le sol facilitée par l'écoulement le long des troncs, la perméabilité du sol accrue par la matière organique et le système racinaire des arbres, contribuant ainsi à la recharge des eaux souterraines ; iii) le rôle bénéfique des forêts sur la qualité de l'eau.

Pour en savoir plus

- Blue Plan, 2009. Virtual water: Which perspective for the Mediterranean water management and distribution? Blue Plan Notes, April 2008. 4 p.
- Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije H.H.G. and Gautam R, 2006. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics* 60(1): 186–203. www.waterfootprint.org/?page=files/Publications
- Gracia C., Burriel, J. A., Mata, T. and Vareyda J., 2000–2004, Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya Volums 1 to 9. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals. (Obra completa)
- Hoekstra A.Y. and Chapagain A.K. 2007. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern *Water Resource Management* 21:35–48.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M.M. 2009 *Water Footprint Manual, State of the Art 2009*. Water Footprint Network, Enschede, The Netherlands. 128 p. www.waterfootprint.org/?page=files/productgallery&product=apple

Leçons du passé : une perspective historique sur l'hydrologie forestière et la conservation des sols au nord et au sud du Bassin Méditerranéen.

Pietro Piussi, Yves Birot, Éric Roose et Mohamed Sabir

Les problèmes de la conservation des sols et de l'hydrologie forestière sont strictement liés au processus de déboisement. Dans la région méditerranéenne, la destruction du couvert forestier a commencé à l'époque préhistorique, résultant parfois de la transformation planifiée des forêts en terres agricoles – à travers la culture en terrasse, l'organisation de l'écoulement de l'eau et du drainage, la culture de plantes et d'arbres – et parfois de l'utilisation irrationnelle des forêts pour le pâturage ou des systèmes variés de culture itinérante. D'un point de vue hydrologique, ces activités ont conduit à des crues fréquentes causant de lourds dommages aux communautés des vallées et des plaines. Les conséquences négatives des activités humaines ont été exacerbées par des conditions environnementales adverses spécifiques à la zone méditerranéenne : climat, topographie accidentée et présence importante des roches calcaires. Localement, le déclin temporaire de la population a parfois entraîné l'abandon des terres, et les processus de succession végétale secondaire ont rétabli un couvert boisé, mais la tendance dominante a été, tout au moins dans certaines parties de la rive nord de la Méditerranée, une intense exploitation des terres jusqu'à la moitié du 19^e siècle ou au milieu du 20^e siècle, selon les zones géographiques. C'est la situation à laquelle sont confrontés aujourd'hui les pays des rives est et sud, avec peut-être quelques aspects additionnels liés à la gestion des ressources en eau (envasement des barrages).

En réponse à des catastrophes hydrologiques majeures, les vastes programmes de gestion des bassins versants, fondés sur le génie civil et biologique, entrepris en Europe depuis la seconde moitié du 19^e siècle, ont connu une large réussite malgré une connaissance limitée en hydrologie forestière et une prise en compte insuffisante des facteurs sociaux. Le défi aujourd'hui est de maintenir les fonctions de protection à travers la rénovation des zones plantées et des équipements, dans un contexte économique et social totalement différent.

Encadré 23. De 1860 à nos jours : le programme français de Restauration des Terrains en Montagne (RTM)

Au milieu du 19^e siècle, des crues catastrophiques affectant les parties inférieures des bassins versants, ont été considérées comme liées à la disparition de la forêt, résultant d'une pression humaine excessive (démographie, surpâturage et culture). Un débat politique national très actif en a résulté, qui s'est conclu par une série d'ordonnances et de lois, dont la plus connue est la loi de 1882 sur la « restauration et conservation des terrains en montagne ». Ce cadre juridique et légal, s'ajoutant à un financement public substantiel, a permis le développement d'une politique d'Etat ambitieuse entraînant l'achat de 380.000 ha de terres, sur lesquelles furent réalisés des travaux de génie civil et biologique visant à prévenir et contrôler le ruissellement et l'érosion, et limiter leurs impacts sur les populations et les infrastructures. Ces opérations sont intervenues dans le contexte d'une industrialisation en plein boom et du lancement de programmes majeurs, comme le développement du chemin de fer, l'aménagement du territoire et la réhabilitation de certaines régions (Landes, Sologne, Champagne) par le drainage et le reboisement, bref à une époque où la croyance dans un progrès fondé sur la technologie était florissante.

Outre l'émergence d'une véritable idéologie articulée autour des concepts et des objectifs de la RTM, l'Administration des Forêts, à qui fut confiée la mise en œuvre de cette politique, réussit à élaborer un corpus de méthodes et de technologies, fondées sur la théorie et l'application des travaux novateurs de Surrel et Demontzey. Les opérations focalisées sur l'amont des bassins versants et/ou dans des zones vulnérables, avaient recours à une combinaison de techniques : i) re-végétalisation ou recolonisation, avec des arbres (espèces locales et *Pinus nigra*) sur les pentes, avec des arbustes et des plantes herbacées le long des rives et dans les ravines, et réalisation complémentaire de proflage en gradins ; ii) génie civil avec la construction de barrages en séquence dans le lit du torrent pour réduire son érosion et celle des rives, et limiter le transport des matériaux. En se plaçant dans les conditions qui prévalaient il y a 150 ans, il ne fait aucun doute que cette politique, poursuivie au fil des décennies, a connu un vrai succès. Cette histoire à succès de la RTM, à l'origine d'une véritable saga, a été présentée comme la panacée. Elle a servi de fondement à un transfert de type « copier-coller » des concepts et principes de RTM à des pays européens ou autres, et au Maghreb durant la période coloniale. Dans le dernier cas, la sous-estimation des différences de contexte écologique, socioéconomique et culturel, a parfois conduit à des échecs (voir Encadré 25).

Les réalisations de la RTM en quelques chiffres

Reboisement >260.000 ha

Nombre de communes concernées : 950 dans 25 départements en moyenne et haute montagne

110 torrents « traités », 100.000 petits barrages construits ; travaux sur 115 zones de glissements de terrain et 100 couloirs d'avalanche

Sous l'angle social cependant, on doit souligner que la RTM a été principalement un processus directif et autoritaire qui a, dans certains cas, entraîné des conflits au sein des communautés rurales locales (agriculteurs contraints de vendre leur terre) ou accéléré leur migration vers les villes et d'autres régions. La RTM doit également être replacée dans le contexte du 19^e siècle, caractérisé par une centralisation marquée et la conviction qu'une politique d'intérêt public, équilibrant les besoins des zones amont et aval, voire même de zones plus étendues, et répondant à des objectifs à long terme, devait être conçue et mise en œuvre de façon centralisée.

« L'âge d'or » de la RTM se situe entre 1882 et la première guerre mondiale. En 1909, plus d'un tiers des zones labellisées RTM étaient déjà traitées. La période 1914-1940 fut caractérisée par l'entretien et la gestion des travaux existants, en raison de l'impact économique et démographique de la première guerre mondiale. Après la deuxième guerre mondiale, la RTM a connu un déclin en raison d'un moindre financement et du poids grandissant des coûts d'entretien (en particulier les coûts de main d'œuvre). Néanmoins en 1980, la RTM a été profondément réformée et re-fondée au sein de l'ONF (Office National des Forêts).

Les principaux défis actuels, dans un contexte de ressources financières limitées, portent sur les compromis entre les coûts d'entretien et de rénovation des peuplements forestiers et des équipements et sur la réponse aux besoins de sécurité (risques acceptables et acceptés) vis-à-vis de différents risques naturels en montagne). Par ailleurs, l'articulation de la politique d'Etat avec les autorités et les collectivités locales est aujourd'hui de première importance. La politique de la RTM au 19^e siècle fut une réponse à des événements catastrophiques, elle fut conduite en s'appuyant sur une nouvelle législation et des moyens financiers considérables. Sa mise à jour sera-t-elle suffisamment vigoureuse et efficace, et engagée sans attendre de prochaines catastrophes écologiques et humaines ?

Encadré 24. Bassin versant, ruissellement, barrage, sédiments : l'expérience italienne

Au cours des dernières 150 années, les travaux de reboisement et de génie hydraulique se sont développés simultanément dans les montagnes italiennes. Les montagnes et collines dominent le paysage italien, alors que les plaines n'occupent que seulement 20% du pays. A la fin du 19e siècle, après de nombreux siècles de surexploitation des zones montagneuses – résultant de la forte densité de la population et des pratiques irrationnelles d'usage des terres – le territoire italien était caractérisé par un couvert forestier dramatiquement réduit et une érosion torrentielle extrêmement active, alors que les plaines, situées entre montagnes et mer, étaient fréquemment occupées par des marais.

Des travaux de reboisement et de correction des torrents furent réalisés dès la fin du 19e siècle. Cependant, une nouvelle politique intégrée d'usage des terres a été lancée en 1933 pour répondre à la bonifica integrale (restauration globale) des bassins versants par le biais de travaux de drainage, constructions de routes et la mise en valeur de nouvelles zone de plaine, ainsi que des travaux de foresterie et de génie civil dans les montagnes. Au même moment, le développement de l'hydro-électricité rendait nécessaire la réduction de l'érosion pour limiter l'accumulation des sédiments dans les barrages artificiels. Entre 1867 et 1959, les surfaces plantées ont atteint 194.000 ha. Les travaux d'assainissement des marais furent poursuivis sur une plus longue période.

Dans les années 1950, une nouvelle vague de reboisement fut entreprise, avec comme objectif additionnel la réduction du taux de chômage, très élevé dans les zones rurales. Entre 1950 et 1959, 159.000 ha furent plantés, principalement dans la partie sud du pays. La technique la plus courante employée dans les terrains pentus était celle des gradoni, petites terrasses construites en courbes de niveau sur lesquelles les jeunes plants pouvaient trouver suffisamment de sol et d'humidité pour survivre à la saison sèche. Dans les Apennins et la partie inférieure des Alpes, les conditions de dégradation des sols nécessitaient une utilisation presque exclusive de plants de pin noir (*Pinus nigra*), même si occasionnellement des graines de feuillus ont étéensemencées entre les jeunes pins, mais sans succès. Les plantations réalisées depuis les années 1960 ont fréquemment utilisé de meilleurs sols, permettant alors l'emploi du sapin pectiné (*Abies alba*) et du Douglas (*Pseudotsuga menziesii*). Les reboisements – réalisés principalement avec du pin pignon (*Pinus pinea*) – sur les sols sablonneux le long de la côte avaient des caractéristiques très différentes, puisqu'il s'agissait de stopper l'érosion éolienne et le mouvement des dunes, ainsi que de protéger les cultures agricoles, les zones de mise en valeur et les infrastructures.

D'un point de vue social, il est vrai que les programmes de boisement dans les zones de montagne ont créé de nombreuses opportunités d'emploi. Cependant et spécialement dans le sud de l'Italie il y avait, tout au moins au début, une nette opposition aux plantations de la part des bergers et des grands propriétaires terriens qui louaient leurs terres à de petits fermiers. En conséquence, de jeunes plantations ont été très souvent détruites par des feux et du pâturage illégaux.

L'aménagement des bassins versants grâce au génie civil et au reboisement, pratiqué en général sur des terres privées, a toujours été entravé par le manque de moyens financiers publics. Le manque de fonds n'a pas permis le contrôle du sous-étage et l'éclaircie dans les plantations et, plus récemment, les travaux d'entretien des barrages. Au cours des dernières décennies, la valeur du bois a fortement diminué, tandis que ces forêts nouvelles étaient souvent plus appréciées pour leur valeur récréative et esthétique. L'importance sociale de l'existence des forêts a donc augmenté, mais sans avantage pour les propriétaires terriens. Aujourd'hui, la plupart des plantations sont excessivement denses, et la sécheresse estivale y provoque une mortalité élevée, augmentant l'accumulation du combustible au sol et le risque de feu. La régénération naturelle des espèces introduites n'est pas observée, et l'installation naturelle d'autres espèces (appelée renaturalisation) n'est pas courante. Les forestiers sont donc aujourd'hui confrontés à de nouveaux problèmes politiques, sociaux, techniques et économiques.

Encadré 25. Programmes de conservation des sols au Maghreb ; le cas de la DRS (« Défense et Restauration des Sols ») en Algérie de 1940 à 1980.

A la suite de l'envasement du port d'Oran et de plusieurs phénomènes spectaculaires liés à l'érosion hydrique des chaînes de montagnes du nord de l'Algérie, l'Administration coloniale française des Eaux et Forêts, a consulté W.C. Lowdermilk, un spécialiste américain de conservation des sols, et entrepris alors un ambitieux programme de conservation des sols et de l'eau appelé DRS (Défense et Restauration des Sols). Ce programme était fondé sur la réalisation de terrasses en courbes de niveau sur des terres cultivées (appelées banquettes d'absorption et de diversion), complétées par des travaux analogues à ceux de la RTM (voir Encadré 23), tels que contrôle des ravines et correction des torrents, et boisement des terres dégradées et surpâturées, principalement en aval des bassins versants. Ces travaux fondés sur une connaissance empirique ne bénéficiaient pratiquement d'aucune recherche permettant de les valider. Entre 1940 et 1980, près d'un million d'hectares dans la région du Maghreb ont été traités par le service spécialisé de la DRS, sous les auspices de plusieurs ministères. Des financements et des moyens considérables furent consacrés par l'administration coloniale, et par la suite par l'Etat, à la lutte contre les phénomènes spectaculaires d'érosion. De gigantesques chantiers de réalisation de banquettes furent entrepris dans les bassins versants, complétés par des barrages, le reboisement dans les parties supérieures des bassins versants (plus de 800.000 ha pour la seule Algérie), des travaux de correction des ravines, de stabilisation temporaire des cours d'eau (oueds) et de protection de grands équipements menacés comme les barrages.

A partir des années 1980, on a réalisé des évaluations de ces programmes de conservation de l'eau et des sols en Algérie, mais également en Tunisie et au Maroc. Elles ont montré, de manière générale, un impact positif limité de ces énormes investissements. Et les crues, l'envasement des barrages, une faible production agricole et forestière sont toujours d'actualité. En Algérie, une enquête a montré que parmi les 350.000 ha traités, 20% des banquettes ont été intentionnellement détruites par le labour, 60% sont sujettes au ravinement, n'ont jamais été entretenues et ne sont plus opérationnelles, tandis que 20% sont en bon état mais situées dans des zones non sujettes à l'érosion. Au Maroc, des études ont montré que la plupart des banquettes construites sur certains types de sol et de roche mère (argilite, schiste mou, marne) sur des pentes marquées (25%) ont, en fait, contribué au glissement de terrain et au ravinement, pires que l'érosion en nappe antérieure.

Une nouvelle stratégie a été mise en place en Algérie depuis 1985. Elle est fondée sur l'approche participative d'un développement rural intégré qui est proposé, discuté et testé. Elle incorpore les résultats récents de travaux de recherche (niveau limité de l'érosion en nappe, effet négatif de certaines pratiques culturelles), et de nouveaux critères, tels qu'une meilleure exploitation des terres par des cultures vivrières pour les populations locales et fourragères pour leurs animaux domestiques, tout en réduisant le risque d'érosion. Au Maroc, de récentes études sur les techniques traditionnelles de gestion de l'eau de surface et de la fertilité des sols ont montré qu'une large palette de techniques adaptées aux conditions humaines et agro-écologiques est utilisée. Des améliorations sont proposées pour accroître leur rentabilité et leur efficacité en termes de limitation des pertes en sols, séquestration du carbone et biodiversité.

Les travaux de gestion des bassins versants ont été généralement réalisés par l'État au milieu du 19^e siècle (quelques décennies plus tôt en Autriche) en réponse au besoin de contrôler les crues et réduire l'érosion des sols, qui causaient fréquemment la perte de vies humaines et de grands dommages aux habitats et infrastructures dans la partie basse des vallées et dans les plaines (Encadrés 23 et 24). Les travaux réalisés au cours du 20^e siècle ont visé également la protection des pentes des montagnes entourant les réservoirs artificiels construits pour l'industrie électrique. Dans la plupart des cas, ces travaux – construction de barrages et reboisement – ont été un soutien précieux à l'emploi dans les régions montagneuses où le dépeuplement était déjà un phénomène lar-

gement répandu. Les plantations ont été généralement faites avec des espèces arborées pionnières. Les techniques de génie civil mises en œuvre pour la correction des torrents des montagnes et les techniques de reboisement ont été largement étudiées ; elles sont devenues des matières d'enseignement universitaire et les expériences locales ont stimulé des visites et des contacts internationaux.

Mais certains des facteurs (agriculture et pastoralisme) provoquant le déboisement et l'érosion des sols, ont également constitué, tout au moins localement, des obstacles à la formation d'un nouveau couvert forestier, car les plantations ont réduit les surfaces pâturables et interdit des pratiques traditionnelles d'utilisation des terres, profondément ancrées dans les zones rurales isolées. Le reboisement, qui n'était pas toujours strictement lié aux travaux de gestion des bassins versants, ne représentait pas seulement un problème technique ayant trait à l'écologie et au génie civil. La gestion des bassins versants avait également pour objectif d'améliorer les conditions de vie des secteurs les plus importants de la population et de l'économie : agriculture moderne dans les plaines, villes, industries, routes et voies ferrées, etc. Dans certains cas, ces travaux d'aménagement des bassins versants furent également le prétexte pour le pouvoir politique de marquer son empreinte : le 'nouveau' paysage représentait en effet la signature permanente du pouvoir en place. Bien sûr, cela a apporté aussi, tout au moins temporairement, une solution au chômage. On a peu parlé des sociétés traditionnelles locales vivant dans les territoires de montagne : les terres érodées et la végétation pauvre étaient quand même à la base d'une économie rurale. Les plantations, en particulier lorsqu'elles étaient pratiquées sur des terres collectives (comme les *baldios* au Portugal) ou de grandes propriétés privées louées à de petits fermiers, ont intensifié les difficultés économiques déjà existantes et contribué à accroître le malaise social. Les réponses à ces difficultés prirent la forme évidente du pâturage et de feux illégaux.



Figure 57. Opérations de reboisement en Italie en 1895.



Figure 58. Équipements de correction de torrent au Maroc - Crédit : M. Sabir

Les très vastes programmes de conservation des sols et de l'eau entrepris sur la rive sud de la Méditerranée, avec une approche plus intégrée incluant le pastoralisme, l'agriculture et la foresterie, ont obtenu des résultats quelque peu contrastés, bien au-dessous des attentes. On peut l'attribuer à des connaissances scientifiques insuffisantes et une approche excessivement centralisée, directive et autoritaire.

L'hydrologie forestière et les mesures de conservation des sols n'ont été développées que bien plus tard sur la rive sud de la Méditerranée (Maroc, Algérie, Tunisie). Cela a été entrepris à très grande échelle par l'administration coloniale française, dès 1940 et au-delà, à travers d'ambitieux programmes de gestion des bassins versants et de restauration des terres dégradées, par le boisement et la construction de terrasses (*banquettes*), et une gestion agro-forestière. Le modèle RTM (voir Encadré 22) a inspiré toute cette entreprise, mais il fut transposé dans un contexte différent, à savoir : une mise en œuvre dans des zones à forte densité de population, et le recours à une approche plus intégrée des activités liées au développement rural à l'échelle du paysage. Il a également combiné, dans une large mesure, le génie biologique et le génie civil, avec pour ce dernier l'utilisation des engins lourds alors disponibles (tracteurs, bulldozers, etc.).

Ces travaux, conduits sur plus d'un million d'hectares en Algérie, Tunisie et Maroc, visaient à créer un couvert forestier, consolider les pentes et protéger la mise en valeur de vastes zones, à développer des pratiques agricoles et pastorales durables et à protéger les infrastructures humaines. Ces programmes furent poursuivis ici et là, après que les pays aient recouvré leur indépendance (Figure 58). L'Encadré 25 propose une vue d'ensemble de ces programmes et de leurs résultats. Ils furent réalisés avec une connaissance limitée des processus d'érosion, et selon les principes d'une politique centralisée, autoritaire et « descendante » dans sa conception et dans sa mise en œuvre (l'approche participative n'étant pas encore « à la mode » à l'époque !).

Les raisons principales de l'échec général de ces programmes sont dues à des problèmes techniques et sociaux, qui peuvent être résumés comme suit : i) faible niveau de connaissances de la géologie locale et de la dynamique des sols ; ii) surestimation de

l'érosion en nappe ; iii) surestimation en moyenne du ruissellement, bien qu'il soit important dans le cas de pluies fortes et intenses ; iv) mauvaise qualité des plants utilisés pour les plantations et tendance excessive aux plantations monospécifiques à grande échelle ; v) réticence des populations locales à changer leurs pratiques culturelles et pastorales ; vi) aspects légaux liés à la propriété foncière, etc.

La mise à jour et l'ajustement des politiques de conservation de l'eau et des sols en liaison avec les arbres et forêts, doivent être repensés dans le contexte actuel. Il est urgent d'entreprendre cette démarche aussi vite que possible, sans attendre de nouvelles catastrophes, en utilisant les connaissances les plus récentes et en intégrant tous les aspects liés au développement durable.

Les leçons à tirer de ces entreprises passées pour limiter les dommages dus à l'eau et les pertes en sols sont multiples :

- a) il apparaît clairement que les problèmes environnementaux ne sont pas seulement techniques mais aussi socio-économiques et culturels. Afin d'être efficace et durable sur le long terme, chaque projet devrait toujours être mené avec une forte implication des populations locales. Les administrations locales devraient être davantage en charge des nouveaux développements urbains et des activités rurales traditionnelles.
- b) les problèmes environnementaux sont complexes et couvrent *inter alia* le bilan en eau, l'érosion de la fertilité des sols et le développement économique rural. La solution doit donc intégrer tous les aspects d'un développement durable.
- c) il est crucial de définir des risques acceptables, et les compromis entre des aléas différents et/ou interdépendants.

Dans le contexte actuel, il est évident qu'une approche holistique de la planification et de la gestion des paysages et des territoires s'avère nécessaire. Des événements récents dans le sud de l'Italie ont montré comment les problèmes de conservation incluent non seulement la gestion traditionnelle des bassins versants et le reboisement, mais également l'utilisation inappropriée de zones pour des constructions et des infrastructures sur des terrains géologiquement fragiles. De fait, l'érosion en nappe a diminué au cours des dernières décennies en raison de l'accroissement des surfaces forestières (principalement par succession secondaire) et de la culture raisonnée des sols, mais les feux de forêt peuvent causer des dommages brutaux et importants aux horizons superficiels du sol. Les glissements de terrain et l'érosion en ravine sont les facteurs les plus importants contribuant au transport de sédiments. Les aléas climatiques – comme la sécheresse de l'été 2003 et les fortes pluies de l'hiver 2010 – nous rappellent que les phénomènes naturels ne doivent pas être sous-estimés. Depuis les débuts de la politique de gestion des bassins versants, de nombreux changements ont eu lieu et de nouveaux problèmes sont apparus : la régénération des plantations les plus anciennes, le manque de coupe d'éclaircies et le danger croissant de feu, l'impact de la faune sauvage (ongulés), le nouveau rôle des forêts dans les activités récréatives, la fixation du carbone et la biodiversité. Ces questions doivent être abordées conjointement.

Pour en savoir plus

- Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze 1961. Atti del congresso nazionale sui rimboschimenti e sulla ricostituzione dei boschi degradati. AISF Firenze.
- Arabi, M. , Kedaid, O.E., Bourougaa, L., Asla, T. and Roose, E., 2004. Bilan de l'enquête sur la défense et la restauration des sols (DRS) en Algérie. *Sécheresse (Paris)* 15(1): 87–95.
- Brugnot G. and Cassayre Y. 2003. De la politique française de restauration des terrains en montagne à la prévention des risques naturels XII World Forestry Congress. Québec, Canada. [acceded:http://www.fao.org/DOCREP/ARTICLE/WFC/XII/0034-C3.HTM](http://www.fao.org/DOCREP/ARTICLE/WFC/XII/0034-C3.HTM)
- Lilin, Ch. 1986. Histoire de la restauration des terrains en montagne. *Cah. ORSTOM sér Pédol.*, 22: 139–146.
- Puglisi, S. 1996. Le scienze forestali contro le alluvioni. In: *La difesa dalle alluvioni* (M. Falcia e F. Preti eds.) Consiglio Nazionale delle Ricerche. Pp. 485–499.
- Roose, E. 2004. Evolution historique des stratégies de lutte antiérosive: vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Sécheresse (Paris)* 15:1: 9–18.
- Roose, E., Laouina, A. and Sabir, M., 2010. Adaptation des stratégies paysannes de la gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols(GCES) aux conditions écologiques du Maroc. IRD + ENFI, éditeurs, Montpellier. 380 p.

Quelques défis majeurs

La durabilité actuelle et future des socio-éco-hydrosystèmes méditerranéens dépend de notre capacité collective à répondre à d'importants défis. Sans prétendre à l'exhaustivité, ce chapitre vise à identifier les plus importants d'entre eux, à comprendre leur fondement scientifique et à proposer des façons d'y répondre. Cinq défis ont été sélectionnés ; ils sont présentés ci-dessous :



Figure 59. Sécheresse affectant la végétation dans la Péninsule Ibérique au printemps 2005

Entre novembre 2004 et mars 2005, l'Espagne et le Portugal ont subi l'hiver le plus sec, respectivement depuis 1943 et 1980. L'impact de la sécheresse sur la végétation est présenté sur la carte des anomalies constatées sur la végétation. Cette carte a été établie à l'aide de données collectées par spectrométrie d'image à moyenne résolution, entre le 7 avril et le 22 avril 2005. Par comparaison avec la densité moyenne de végétation (un bon indicateur de la santé des plantes) pour la même période au cours des cinq années précédentes, la végétation en 2005 apparaît clairement en condition de stress. Les zones brunes représentent les régions où la végétation était plus maigre et moins dense que la moyenne, tandis que les petites taches vertes correspondent à une végétation en meilleur état que la moyenne. Les filets brun-rouges correspondent aux régions les plus sévèrement affectées (d'après la NASA). Notez sur cette image l'importance du réseau de barrages, dont le remplissage a aussi été affecté par la sécheresse hivernale. Dans le contexte du changement climatique, de telles sécheresses pourraient devenir plus fréquentes.

1. Les implications du changement climatique sur les forêts et l'hydrologie
2. Faire face aux changements d'occupation des sols et la croissance démographique
3. Le reboisement pour combattre la désertification dans les zones arides : une entreprise à raisonner
4. Maintenir en bon état les écosystèmes ripicoles et aquatiques : défis et solutions grâce à la gestion des ripisylves
5. L'économie de l'eau et des forêts : enjeux et recommandations pour fonder une politique

Les implications du changement climatique sur les forêts et l'hydrologie

Javier Martin-Vide, Francesc Gallart et Joan-Albert Lopez-Bustins

Le Bassin méditerranéen est une région climatiquement complexe, composée d'une mosaïque variée de sous-types climatiques, induisant des milieux écologiques très contrastés.

Le Bassin méditerranéen est une des régions les plus uniques au monde géographiquement parlant. Il comprend une vaste mer de 2,5 millions km² ayant un volume de 3,7 millions km³. Situé entre trois continents, il n'a presque aucune connexion avec les eaux océaniques ; le territoire qui l'entoure présente de nombreuses chaînes de montagne. 3.800 kilomètres séparent les côtes Est de l'embouchure de l'Atlantique au détroit de Gibraltar. Il s'agit donc d'une mer entre les terres, comme son nom l'indique. Le détroit de Gibraltar mesure 15 kilomètres en son point le plus étroit, renforçant la nature « continentale » de la mer Méditerranée, fait paradoxal pour une mer.

La variété et la complexité de ses facteurs géographiques et de son « isolement de l'extérieur » donnent à son climat une personnalité spécifique et des caractéristiques uniques. Bien que ce climat soit méditerranéen par définition, il présente de telles nuances dans nombre de territoires entourant cette mer, que les termes « climats » au pluriel ou encore « mosaïque climatique » semblent plus adéquats pour le décrire.

La Méditerranée a prêté son nom à l'un des principaux types climatiques de la planète : le climat méditerranéen, qui, dans l'inconscient collectif est associé à des conditions atmosphériques plaisantes, à l'idée de plages baignées de soleil, d'un soleil permanent, d'hivers doux et d'étés longs, de pluies faibles, et de paysages humanisés au fil des siècles, avec un faible couvert végétal, ce dernier point étant néanmoins discutable. L'adjectif « méditerranéen » a été exporté, d'un point de vue climatique, à des régions d'autres continents situées à des latitudes similaires et à l'ouest de ces continents, et bordées par l'océan à l'ouest.

En termes généraux, les climats méditerranéens, ou climats subtropicaux à étés secs (entre la latitude 30/32° et 41/45°, et tous situés près de la côte occidentale des continents), sont influencés par le front polaire en hiver, et présentent donc des températures modérées et un temps pluvieux. En été, ils subissent l'influence des anticyclones subtropicaux, et connaissent un temps chaud et sec (sous-type *Csa* dans la classification de

Köppen), excepté dans certaines zones côtières, avec des conditions plus fraîches, voire même du brouillard, en raison de la présence de courants froids océaniques (sous-type *Csb de Köppen*). (Tableau 12)

Tableau 12. Principales caractéristiques des climats méditerranéens

- Toutes les régions sont situées entre les latitudes 30/32° et 41/45° N/S, et, excepté de vastes portions du bassin méditerranéen, elles se trouvent sur les côtes ouest.
- Le régime des précipitations saisonnières typiques est le suivant : hivers humides et étés secs
- Les étés sont chauds à très chauds, les hivers de frais à doux ; les températures au-dessous de 0° C ne sont pas fréquentes au niveau de la mer.
- Les précipitations annuelles sont relativement faibles, avec un fort pourcentage de pluies tombant pendant la moitié hivernale de l'année. Une moyenne typique de précipitations annuelles se situe entre 250 et 900 mm.
- Le rayonnement solaire est élevé, spécialement dans les zones intérieures, en raison d'un ciel clair et sans nuage, et d'une faible humidité ; l'évapotranspiration y est également élevée. Les courants marins froids donnent des étés doux et brumeux dans certaines zones côtières.
- Les montagnes, souvent parallèles à la ligne côtière, influencent et modifient les modèles climatiques, en formant des zones abritées de la pluie bien distinctes, des « îlots » plus pluvieux et des microclimats.

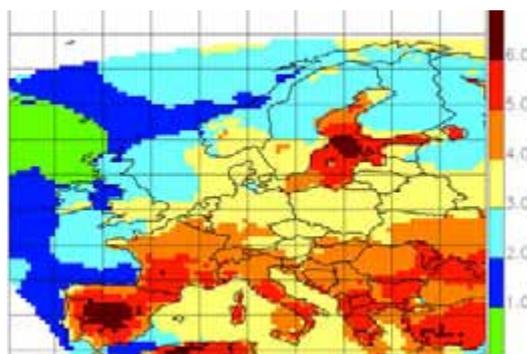
Les facteurs géographiques sont complexes dans le Bassin méditerranéen et forment un « puzzle » de régimes pluviométriques saisonniers. Dans les régions faisant face à l'Est (par exemple, la frange Est de la Péninsule Ibérique), la saison la plus pluvieuse n'est pas l'hiver mais l'automne. Dans d'autres régions, la saison la plus pluvieuse est le printemps, voire l'été dans certaines zones de montagne au nord.

En ce qui concerne la dynamique atmosphérique, le bassin méditerranéen est une zone unique où le signal de *téléconnexion** et des modèles externes de variabilité est généralement très faible. Certains mécanismes internes ont une plus grande influence sur la pluviométrie que les modèles hémisphériques principaux. Ainsi, l'*Oscillation méditerranéenne** qui connecte les bassins de l'est et de l'ouest, à travers une bonne adéquation des longueurs d'onde de la circulation supérieure (*ondes de Rossby**) donne lieu à un modèle comportemental opposé, bien que synchronisé, entre les deux extrêmes, si bien que quand le temps est pluvieux sur la Péninsule ibérique, il a tendance à être sec sur la Péninsule des Balkans et vice-versa. La situation est similaire pour la température.

Le Bassin méditerranéen subit un processus de réchauffement depuis les années 1970, similaire à celui de la planète, mais à un niveau supérieur. Les modèles climatiques sont concordants pour prédire clairement une augmentation généralisée des températures tout au long du 21^e siècle.

Les meilleures séries de données de température sous abri disponibles pour le bassin méditerranéen montrent presque toutes sans exceptions, une augmentation de la température depuis 1970, parallèlement à l'évolution planétaire. On peut constater les mêmes phases dans l'évolution de la température, c'est-à-dire, des valeurs inférieures à celles de la période internationale de référence (1961-1990) tout au long de la seconde moitié du 19^e siècle, une augmentation pendant les premières décennies du 20^e siècle, une diminution vers les années 1960 et une claire augmentation des années 1970 à nos jours.

Figure 60. Augmentation des températures annuelles projetées pour 2071-2100 par rapport aux deux dernières décennies du 20^e siècle pour l'Europe. (Source : <http://prudence.dmi.dk/>)



Il nous faut néanmoins remarquer que dans de nombreux cas l'augmentation de la température dans le Bassin méditerranéen au cours du siècle dernier (de 1906 à 2005) dépasse la valeur de 0,74°C correspondante à l'augmentation de la température planétaire, selon le 4^e Rapport du GIEC en 2007. En effet, la valeur du réchauffement du siècle dernier pour la zone méditerranéenne est estimée à environ 1°C.

Selon le 4^e rapport du GIEC (2007), une augmentation de la température dans le Bassin méditerranéen est, tout comme au niveau mondial, hautement probable (90%) pour le 21^e siècle. Si à l'échelle planétaire l'éventail des augmentations de températures pour la période 2090-2099, par rapport aux deux dernières décennies du 20^e siècle, se situe entre 1,8°C et 4,0°C, en fonction des scénarios des émissions de gaz à effet de serre, on peut s'attendre à des augmentations plus importantes dans les zones entourant la Méditerranée. Néanmoins, comme il s'agit d'une zone maritime, une partie substantielle des températures du bassin est atténuée par l'effet des eaux, c'est-à-dire par l'influence thermo-régulatrice de la mer. On peut donc s'attendre à des augmentations plus modérées des températures pour les zones maritimes et côtières qu'à l'intérieur des terres et dans les zones de montagne continentales. Les modèles climatiques indiquent une augmentation de la température de 1 à 2°C pour l'intérieur des péninsules ibérique, italienne, balkanique et anatolienne, tout spécialement la première, par rapport aux zones côtières adjacentes. (Figure 60)

Les prédictions mondiales concernant l'élévation du niveau de la mer montrent une augmentation notable causée par la dilatation thermique des masses d'eau et la fonte des glaces. Pour le bassin méditerranéen, les modèles régionaux prévoient des augmentations du niveau de la mer d'environ 35 cm pour la fin du siècle, bien que ces dernières puissent être plus modérées sur les côtes. Cette augmentation pourrait favoriser l'entrée d'eau salée dans les aquifères proches de la mer et menacer les écotones côtiers tels que les deltas et les marais.

L'évolution des régimes futurs de précipitations pour le Bassin méditerranéen comporte des incertitudes. Toutefois la diminution des hauteurs de pluie est très probable, avec peut-être une variabilité temporelle des pluies plus marquée qu'aujourd'hui.

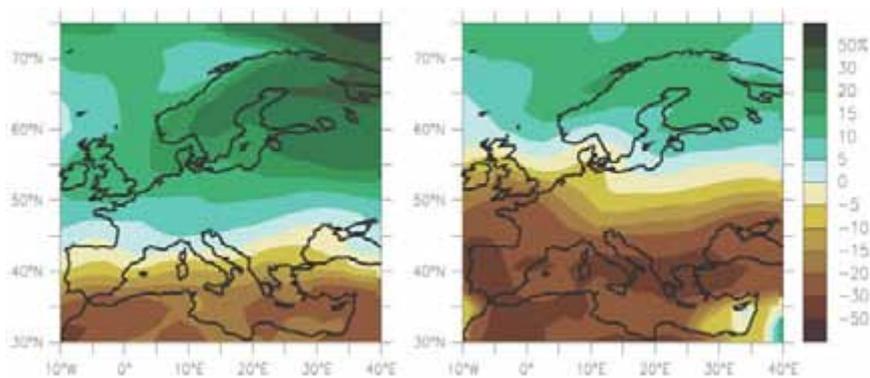


Figure 61. Évolution des précipitations sur l'Europe à partir des données multi-modèles – A1B scénario de simulations entre 1980-99 et 2080-99, moyenne de 21 modèles. À gauche : décembre, janvier et février ; à droite : juin, juillet et août (Source : Christensen et al. 2007).

Au niveau du globe, la hausse des températures renforcera probablement le cycle de l'eau, en raison d'augmentations logiques de l'évaporation, se traduisant par un retour d'eau de l'atmosphère vers la surface de la terre, c'est-à-dire, une pluviosité accrue. Néanmoins, les modèles planétaires prédisent que ce phénomène ne sera pas généralisé, et identifient certaines zones subtropicales, comme les zones méditerranéennes, et de nombreuses zones tropicales, comme des régions moins arrosées dans le futur. Ces prédictions ont un bon niveau de probabilité, mais il faut reconnaître que le niveau d'incertitude est plus grand pour la pluviométrie que pour les températures et leur accroissement.

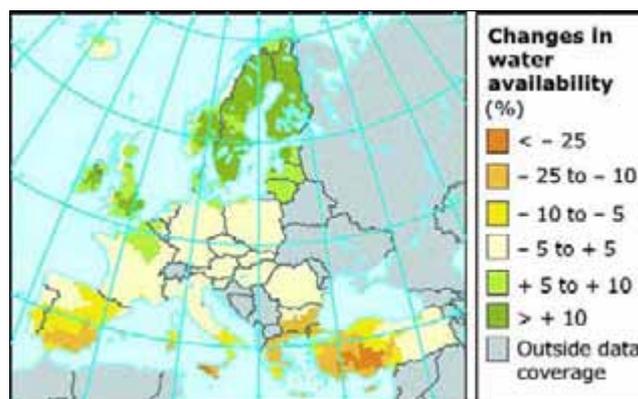
Dans tous les cas, si l'on associe les deux phénomènes : le réchauffement et la réduction des précipitations, on peut s'attendre, pour l'Europe méridionale, à un scénario futur dans lequel les ressources en eau seront plus faibles, ce qui exacerbera les différences avec le reste du continent.

Pour la moitié froide de l'année, les prédictions de pluies par les modèles climatiques montrent une certaine augmentation au nord de la Méditerranée et une diminution au sud. Par contre en été, les modèles prédisent une diminution généralisée des précipitations.

Les prédictions des pluies pour l'Europe par les modèles climatiques planétaires présentés dans le cadre du 4^e rapport du GIEC, montrent pour l'hiver un accroissement des pluies dans l'extrême nord du Bassin méditerranéen et une diminution ailleurs, et pour l'été, une diminution généralisée des pluies dans tout le Bassin (Figure 61). Ainsi, on assistera à une diminution considérable et générale des pluies d'été, entre 20% et 50% (mois de juin, juillet et août) alors qu'en hiver (décembre, janvier et février), un fort gradient est attendu entre le nord, avec des précipitations plus importantes, et le sud avec des précipitations plus faibles.

Les modèles climatiques régionaux, plus détaillés au niveau spatial, confirment cette projection pour l'Europe. Les résultats les plus substantiels du projet PRUDENCE, l'un des plus grands projets jamais conduits dans le domaine de la recherche et du calcul en

Figure 62. Évolution de la moyenne annuelle de la disponibilité en eau des sols jusqu'en 2030 (Source : EEA (2005)).



science climatique, pourraient être résumés très succinctement et textuellement, comme suit : « Le climat futur en Europe : étés chauds et secs dans le sud, hivers doux et humides dans le nord ». (http://prudence.dmi.dk/public/raisanen_et_al.html). En conséquence, le Bassin méditerranéen, dont une partie comprend la totalité de la zone sud de l'Europe, sera très probablement (90%) plus chaud que dans les décennies précédentes et possiblement (66%) moins pluvieux. Cela confirme l'hypothèse, déjà vérifiée pour certaines régions, du remplacement progressif des forêts par des formations arbustives, moins exigeantes en eau et mieux adaptées au déficit hydrique estival, caractéristique du climat méditerranéen.

L'accroissement de la température augmentera la demande de l'évapotranspiration et, même sans diminution des hauteurs de pluies, ceci entraînera une réduction de la teneur en eau des sols, une augmentation du stress hydrique pour la végétation et une baisse des ressources en eau générées dans les zones pluvieuses.

Le changement attendu des conditions climatiques causera essentiellement une baisse généralisée de la teneur en eau des sols, tandis que les baisses en valeur absolue de la recharge des aquifères et l'écoulement de surface seront plus marquées dans les zones humides où l'évapotranspiration est limitée par l'énergie disponible, que dans les zones plus sèches où l'évapotranspiration est limitée par l'eau.

En 2030, la plus grande partie des terres autour du Bassin méditerranéen aura subi des diminutions de plus de 10% de la disponibilité annuelle moyenne en eau des sols (Figure 62). Le sud et le sud-est de la Péninsule ibérique, la Sicile et les Balkans ainsi que la Péninsule anatolienne sur la rive nord du Bassin, subiront les baisses les plus importantes.

La probabilité d'une augmentation des températures et la possibilité d'une diminution des précipitations en été entraîneront un accroissement du stress hydrique de la végétation, avec une diminution faible en valeur absolue du ruissellement (lui-même déjà faible), et de la recharge des aquifères. Durant la partie plus froide de l'année, même en l'absence de changement dans les précipitations, la recharge des aquifères et les écou-

lements diminueront de façon significative en montagne et dans les milieux humides (à l'origine des ressources en eau), en raison de l'augmentation de la demande créée par l'évapotranspiration. Toutefois, les changements seront plus limités dans les zones plus sèches, l'évapotranspiration n'étant pas limitée par l'énergie mais par la disponibilité en eau. Par ailleurs, l'augmentation des températures réduira l'effet régulateur du manteau neigeux en montagne.

Sur la rive sud de la Méditerranée, l'effet combiné d'une température croissante et de précipitations décroissantes aura de graves effets à la fois sur la teneur en eau des sols et la genèse des ressources en eau.

Le Bassin méditerranéen connaîtra vraisemblablement une plus grande fréquence et une plus grande intensité des sécheresses et des vagues de chaleur, et en conséquence, plus de feux de forêts. Les précipitations torrentielles pourraient également augmenter, bien que cette prédiction demeure très incertaine.

Bien que les projections futures de l'évolution des risques liés au climat soient incertaines, on peut s'attendre à ce qu'une augmentation des températures provoque des vagues de chaleur et des sécheresses de plus en plus fréquentes et intenses dans le Bassin méditerranéen. Cette prédiction renforce l'hypothèse d'une plus grande fréquence des feux de forêt.

La dynamique atmosphérique, plus typiquement subtropicale dans le futur, quasi tropicale au sud du Bassin, avec des processus convectifs qui pourraient être plus vigoureux du fait du réchauffement de surface, peut expliquer l'augmentation possible des pluies à forte intensité. S'il est confirmé, le binôme « sécheresse-pluies torrentielles » nécessitera une gestion très prudente des forêts méditerranéennes, afin d'éviter l'érosion et les processus de désertification, allant de pair avec des déséquilibres biophysiques irréversibles.

Les forêts peuvent subir de grands changements en surface, en raison du changement climatique, ce qui peut également influencer sur la disponibilité future des ressources en eau.

Au cours des dernières décennies, différentes cartes d'occupation des sols de la région méditerranéenne, en particulier de la rive nord, ont montré un accroissement des surfaces forestières au détriment des terres arables, principalement dans les zones de moyenne montagne où la déprise rurale (abandon des terres arables et des pâturages) a permis une augmentation soutenue du couvert forestier. Les tendances décroissantes observées dans l'écoulement de plusieurs cours d'eau du nord de l'Espagne, ont été attribuées à une plus grande consommation en eau des forêts, en dépit des biais dus à la variabilité climatique et à des changements dans les zones irriguées. Cette évolution forestière récente va accroître, dans un futur immédiat, le risque de feux de forêt en raison de l'augmentation des quantités de combustible et de la continuité du couvert forestier.

Néanmoins l'expansion actuelle de la forêt pourrait être freinée par les conditions environnementales du 21^e siècle. Les modèles écologiques prévoient une mortalité gé-

néralisée des forêts se trouvant actuellement au seuil hydrique limite de survie, alors que l'accroissement des températures favorisera l'extension des forêts dans les zones de moyenne et haute montagne.

Pour en savoir plus

- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr A. and Whetton, P. 2007. Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*.
- Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor M. and Miller, H.L. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- EEA 2005: European Environment Outlook. European Environment Agency, Copenhagen. www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2005_4/

Faire face aux changements d'occupation des sols et à la croissance démographique

Gaëlle Thivet

La région méditerranéenne est caractérisée par une croissance démographique élevée, des changements rapides d'usage des terres et des dégradations environnementales étendues et visibles. Dans certains cas, ces dégradations sont observées sur les deux rives alors que dans d'autres elles sont plus spécifiques à l'une ou l'autre des rives, ou encore à une sous-région, en fonction des conditions environnementales, démographiques et socio-économiques.

La forte croissance démographique au Sud et à l'Est va augmenter les besoins en nourriture, eau, sol et énergie et accroître la pression sur les ressources naturelles. On s'attend à ce que les risques naturels et sociaux soient les plus élevés sur le littoral méditerranéen, dont la qualité et l'intégrité sont menacées.

Dans les pays du Bassin méditerranéen, la population est passée de 207 à 473 millions d'habitants entre 1950 et 2010. Dans le sud et l'est, la population a presque doublé en 30 ans et atteint 280 millions d'habitants en 2010. Néanmoins, la principale observation sur ces 20 dernières années, est la chute du taux de fertilité dans les pays du sud et de l'est (PSEM) (Figure 62), et il est fortement probable que cette transition démographique persiste jusqu'en 2050. Malgré la convergence des indices de fertilité, on peut s'attendre à ce que l'oscillation démographique entre les deux rives continue. Les populations des rives sud et est pourraient s'accroître de 57 millions d'habitants en 2025 et de 117 millions en 2050. Dans le nord, la croissance démographique ne devrait pas dépasser 3,8 millions d'habitants en 2025, et devrait diminuer de 3 millions d'habitants entre 2025 et 2050 (Figure 64).

Une pression démographique plus élevée est prévue dans les zones urbaines et côtières. D'ici à 2025 on prévoit une augmentation de 20 millions du nombre d'habitants urbains et le doublement du flux de touristes (plus de 140 millions touristes / an) sur les côtes méditerranéennes. Ce scénario vaut pour les zones urbaines et côtières, mais ne signifie néanmoins pas une diminution des populations rurales au sud et à l'est, où elles demeureront certainement importantes, au moins jusqu'en 2025.

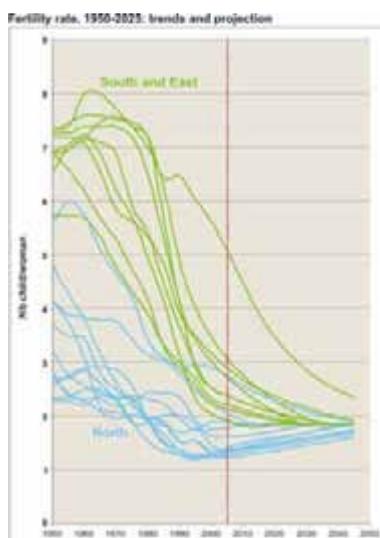


Figure 63. Indices synthétiques de fertilité : évolution depuis 1950 et prévisions pour 2050
Source : United Nations Population Division, World Population Prospects : The 2006 revision

Les changements d'usage des terres affecteront les dynamiques spatiales et provoqueront des dégradations environnementales.

Au sud et à l'est, la « faim de terres » a conduit à un fort accroissement des mises en culture. L'impact le plus grave concerne les 5 pays nord-africains (+40% au Maroc, et +28% en Egypte entre 1960 et 2000), où les besoins en terre ont été conquis avec difficulté sur les parcours, les forêts et les déserts. Bien qu'il y ait eu un ralentissement de ce phénomène au cours des dernières années, la pression va demeurer forte dans plusieurs des PSEM, au moins jusqu'en 2020, accroissant la déforestation et la désertification, et aggravant la dégradation des ressources. La dégradation et l'érosion des sols sont particulièrement alarmantes dans les zones très pauvres de montagne où les initiatives pour la conservation et le reboisement ont été moins nombreuses. L'accroissement des terres irriguées, estimé à 38% dans le sud et 58% à l'est en 2030 (FAO) ne peut qu'intensifier les pressions sur les ressources en eau et les écosystèmes, et augmenter les risques de salinisation des sols.

Au nord, l'expansion rapide des forêts et des formations arbustives devrait continuer jusqu'en 2045, en relation avec la diminution prévue du nombre des agriculteurs, et en

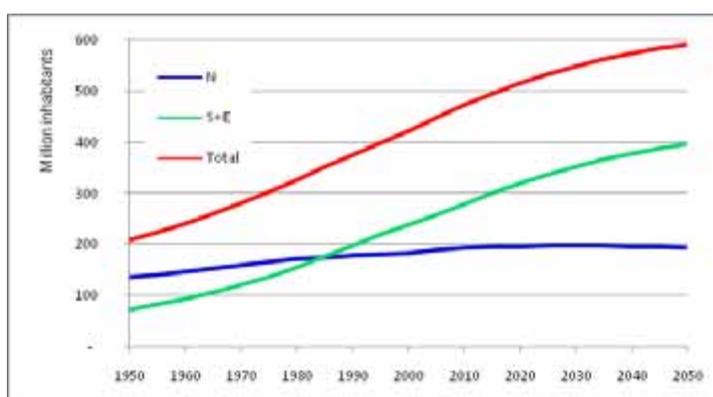


Figure 64. Évolution des populations dans les pays de la Méditerranée du nord, sud et est de la Méditerranée jusqu'en 2050. Source : United Nations World Population Prospects 2008

raison des changements dans les pratiques agricoles. L'impact de la biomasse d'une forêt en expansion sur les terres agricoles est contrasté, avec des aspects écologiques et économiques positifs, mais aussi des effets négatifs comme la fermeture des paysages ou un appauvrissement floristique en sous-étage. Mais c'est essentiellement le risque accru des grands feux de forêt, qui a eu et continuera d'avoir les impacts les plus importants au niveau humain, économique et écologique.

Le développement économique des territoires conduit à la perte irréversible des meilleures terres arables dans les PSEM, cette tendance étant particulièrement lourde dans le nord. On s'attend à une persistance de cette tendance dans les plaines côtières, où elle réduira la capacité d'infiltration des sols, contribuant ainsi à l'augmentation du risque des crues. Presque 50% des zones côtières, en effet, pourraient être bétonnées d'ici à 2025 (vs 40% en 2000).

Si les évolutions actuelles des zones rurales (forêts, parcours, champs cultivés) se poursuivent, elles induiront ou aggraveront certains risques majeurs conduisant à une non durabilité des territoires :

- Désertification et pauvreté rurale dans les PSEM
- Impacts directs et indirects : augmentation de la pression sur les villes, accroissement de l'exode rural, engorgement des barrages, perte de biodiversité
- Perte de terres agricoles de qualité du fait de l'urbanisation et des infrastructures (estimée à plus de 1,5 million d'hectares en 2025)
- Dégradation des ressources en eau et augmentation de la vulnérabilité aux feux et aux crues.

Nous devons ajouter à ces impacts les risques liés au changement climatique planétaire et les risques économiques associés à l'augmentation des prix de l'énergie, des matières premières et des produits agricoles.

Indices d'exploitation pays et bassins - 2025

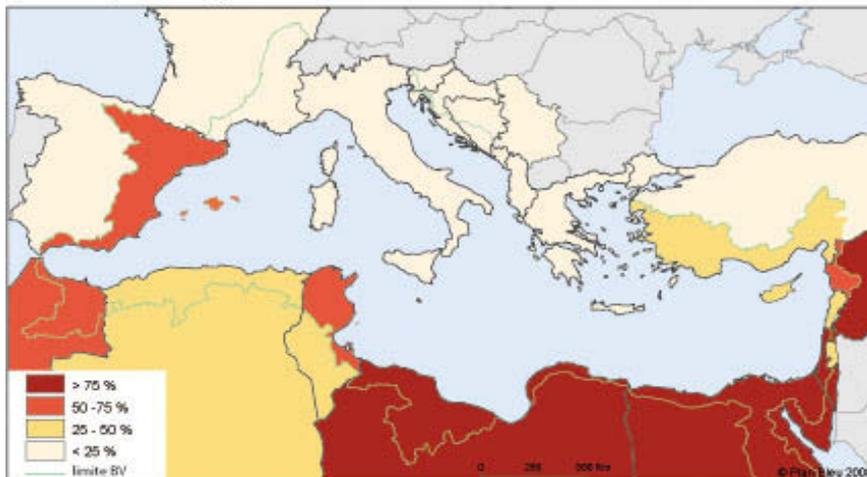


Figure 65. Indices d'exploitation des ressources renouvelables en eau par pays et grands bassins, 2005. Source : Plan Bleu

La demande croissante en eau, que ce soit pour l'agriculture, l'industrie ou l'usage domestique, accroît la pression sur cette ressource.

Selon les prévisions du Plan Bleu 2009, la croissance démographique et le développement économique augmenteront la demande en eau des pays méditerranéens (essentiellement dans les PSEM) de 50 km³ (18%) d'ici à 2025, pour atteindre un total de 330 km³/an.

On prévoit que l'agriculture restera le premier consommateur en eau, à travers les volumes requis pour satisfaire les besoins d'irrigation. La demande en eau potable devrait également continuer à augmenter pour répondre aux besoins de la population résidente – de plus en plus concentrée dans de très grandes villes – et des touristes. Bien que la demande additionnelle en eau induite par le tourisme demeure modeste à l'échelle annuelle, elle est néanmoins problématique, car elle coïncide aussi avec une demande accrue en eau pour l'irrigation durant une période où les ressources sont à leur niveau le plus bas.

Cette pression sur les ressources en eau, reflétée par l'indice d'exploitation des ressources naturelles renouvelables en eau, révèle des contrastes géographiques qui sont dans certains cas pessimistes s'agissant du « futur de l'eau » (Figure 65)

Les niveaux de pression sur les ressources peuvent en outre multiplier et amplifier les conflits entre les usagers, en commençant par la compétition entre les villes et l'agriculture irriguée. Cela s'applique également aux conflits relatifs au partage de cette ressource entre régions ou pays, en particulier entre les zones amont et aval des bassins versants transfrontaliers (Euphrate, Jourdain, Nil...). Plus généralement cela peut induire des conflits entre les besoins en eau des populations et ceux requis pour la conservation de la nature, en augmentant les menaces pour les écosystèmes et limitant les possibilités de conservation.

Les évolutions de températures et de précipitations décrites par les modèles climatiques entraîneront une aggravation de ces tendances. Les régions méditerranéennes, qui souffrent déjà d'un stress hydrique important, vont se retrouver particulièrement exposées à des réductions de leurs ressources en eau. Dans les PSEM, près de 290 millions de personnes pourraient se trouver en situation de pénurie d'eau en 2050. (Figure 66).

De nouvelles politiques offrent des solutions en améliorant la gestion de la demande et de l'offre en eau.

Si la demande croissante en eau doit être satisfaite dans le contexte actuel d'insuffisance de la ressource, de sa raréfaction, de son utilisation excessive et de la détérioration de sa qualité, de surcroît aggravées par l'impact du changement climatique, il est souhaitable et nécessaire de mettre en œuvre des politiques déterministes ciblées visant à restaurer l'équilibre entre les approches fondées sur l'offre et la gestion améliorée de la demande en eau. De telles politiques doivent mettre l'accent sur les points suivants :

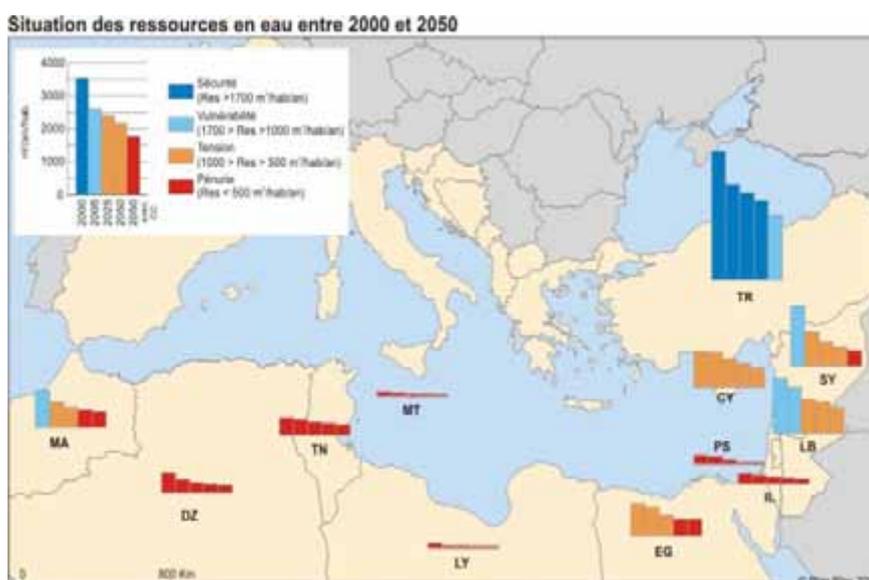


Figure 66. Évolution des ressources en eau per capita dans les PSEM entre 2000 et 2050

- Utilisation efficace de l'eau pour différents besoins¹ à travers la mise en place d'instruments techniques, économiques, réglementaires ou sociaux.
- Accroissement du potentiel exploitable des ressources renouvelables en eau via la recharge artificielle des aquifères, le fractionnement des équipements régulateurs (barrages) dans la partie amont des bassins versants, et des initiatives favorisant la conservation de l'eau et des sols (re-végétalisation, pratiques culturales, infrastructures, processus biologiques). Ces mesures limiteront l'envasement dans les barrages, faciliteront la pénétration de l'eau et le stockage dans un sol plus poreux et dans les aquifères et réduiront les pertes liées à l'évaporation.
- Recours à des ressources en eau non conventionnelles (réutilisation pour l'irrigation des eaux usées après traitement, désalinisation de l'eau de mer ou saumâtre pour produire de l'eau potable), ou à l'importation d'eau virtuelle pour limiter les pressions sur les ressources naturelles locales.

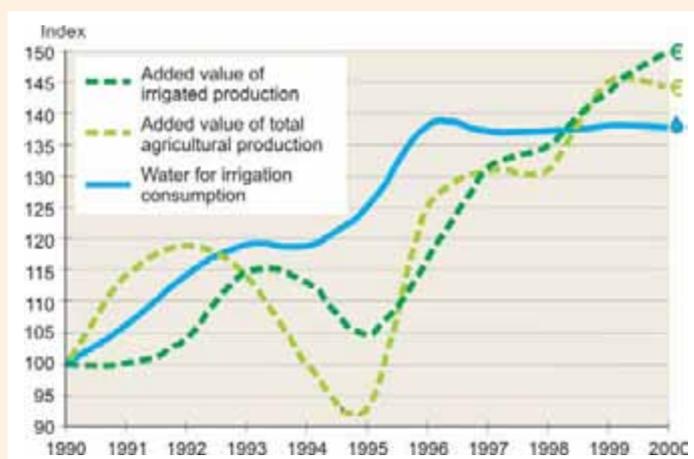
Les marges de progrès sont considérables puisqu'une meilleure gestion de la demande permettrait d'en économiser un quart, soit 85 km³/an en 2025 (Figure 67). L'agriculture irriguée représente le plus gros potentiel d'économies en volume, avec près de 65% du total des économies d'eau possibles identifiées pour les pays méditerranéens.

Dans cette perspective optimiste et que l'on suppose généralement applicable à tous les pays méditerranéens, la totalité de la demande en eau pourrait être de 105 km³/an au Nord et de 140 km³/an au Sud et au Proche-Orient, ce qui équivaldrait globalement à une diminution de la demande totale actuelle de 40 km³/an. Ces économies d'eau permettraient, par ailleurs, une plus grande efficacité énergétique et des économies financières. Ces es-

¹ Les rendements actuels de l'utilisation de l'eau sont loin d'être satisfaisants. Pertes, fuites et gaspillage sont estimés à environ 40% de la demande totale en eau dans toute la région méditerranéenne. Les pertes sont considérables du fait de l'obsolescence et du faible entretien des réseaux d'eau et du gaspillage issu d'utilisations diverses (usagers, industrie, agriculture – techniques d'irrigation inadéquates).

Encadré 26. La stratégie nationale pour les économies d'eau d'irrigation en Tunisie

La Tunisie a mis en place une stratégie nationale d'économie d'eau d'irrigation comprenant la création d'associations d'usagers, une tarification qui a permis un recouvrement progressif des coûts, et des instruments financiers spécifiques pour équiper les exploitations agricoles en technologies économes en eau et soutenir les revenus des agriculteurs. Cette politique a permis, depuis 1996, de stabiliser la demande en eau d'irrigation malgré le développement important du secteur agricole et de sécuriser les besoins du secteur touristique - source de devises- et ceux des villes.



Consommation en eau et valeur ajoutée de l'irrigation en Tunisie

Source : Plan Bleu, Hamdane, Fiuggi, 2002

timations d'ensemble, fondées sur des expérimentations concrètes réalisées dans plusieurs pays, montrent qu'un tel changement de cap est réellement possible (Encadré 26).

Des mesures pour augmenter le potentiel exploitable des ressources naturelles renouvelables à des coûts environnementaux, économiques et énergétiques plus faibles, aideraient à rééquilibrer la répartition des ressources en eau sur le territoire.

La gestion durable des ressources en eau et de la demande doit avant tout reposer sur une approche intégrée au niveau des bassins versants, et sur un principe de solidarité amont/aval entre l'arrière-pays et la côte.

Les politiques doivent tenir compte de la richesse du patrimoine des zones rurales méditerranéennes, et la diversité de leurs fonctions, comme autant d'atouts majeurs et d'opportunités pour le futur, et les adapter aux changements. La gestion durable de ces zones doit prendre en compte la multiplicité de leurs fonctions et être dirigée vers la prévention des risques naturels (feux de forêt, inondations).

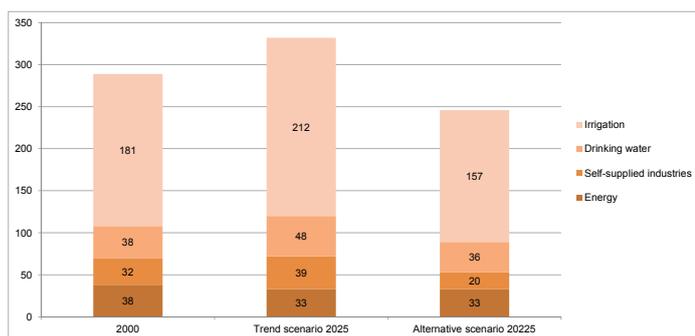


Figure 67. Demande en eau par secteur d'utilisation, scénarios tendanciel et alternatif (2025)

Les nouveaux usages sociaux des écosystèmes naturels méditerranéens, le souci de conservation de la biodiversité et la lutte contre le changement climatique requièrent d'importantes innovations au niveau de la gestion des espaces ruraux et boisés. Travailler en vue de processus plus durables implique la nécessité de changements de fonds dans la « vision » des rôles et des avenir possibles et souhaitables des espaces ruraux, et dans les politiques correspondantes de gestion de pays.

Outre leurs rôles en tant que producteurs de biomasse, les espaces ruraux – y compris les espaces boisés – remplissent de nombreuses fonctions environnementales et sociales, essentielles à toutes les populations méditerranéennes :

- Le rôle écologique de ces espaces est déterminant pour la qualité de l'environnement rural et des zones périurbaines et urbaines, et au-delà, en aval, pour les équilibres côtiers et écologiques. Leur fonction comprend la régulation et la conservation des ressources en eau, sols et biodiversité, la « production » d'eau et les apports sédimentaires aux écosystèmes littoraux.
- Les écosystèmes boisés méditerranéens contribuent à compenser les émissions de gaz à effet de serre, malgré leur capacité de fixation de carbone relativement faible. Ils peuvent également fournir de l'énergie et des matériaux renouvelables.
- Les espaces ruraux sont également essentiels à l'équilibre démographique rural-urbain. Si la concentration de la population dans les villes et sur le littoral les zones s'accélère, ceci pourrait provoquer des risques d'instabilité sociale et des coûts élevés de congestion et de pollution. La question de l'emploi rural devient alors un facteur déterminant dans la recherche d'un équilibre social et spatial viable.
- Les espaces ruraux, utilisés à des fins résidentielles et pour les activités récréatives permettent de diversifier l'offre de l'industrie touristique.

Les multiples fonctions des espaces ruraux, qui devraient être considérées comme essentielles dans les processus de prises de décision, sont encore insuffisamment reconnues. Les espaces boisés en particulier, fournissent des biens non-marchands importants non reflétés dans les mécanismes de marché.

Les enjeux majeurs actuels incluent le développement durable, le financement et la rémunération des biens et services environnementaux dispensés par les écosystèmes méditerranéens. Les économistes de l'environnement cherchent à mesurer les valeurs environnementales et écologiques totales de zones telles que les forêts, mettant l'accent sur la nécessité de reconnaître leurs contributions environnementales et sociales, indispensables au développement durable.

Les approches territoriales sont particulièrement nécessaires pour garantir la gestion durable des ressources naturelles, dont les forêts.

Toutes les stratégies de développement rural durable doivent être fondées sur les paradigmes suivants : intégration, territorialité, subsidiarité, participation et partenariats. Elles doivent nécessairement intégrer les zones rurales et surfaces boisées dans des ensembles plus vastes incluant les petites villes et les villages ruraux.

Des plans directeurs et des plans de gestion aident à définir les objectifs de développement, les règles et les limites de l'utilisation des ressources pour protéger l'équilibre des écosystèmes à long terme, tout en prenant en compte les risques et les évolutions résultant des impacts du changement climatique et du stress hydrique dans la région méditerranéenne.

De nombreux pays, et en particulier les pays fortement décentralisés comme l'Espagne et l'Italie, travaillent sur ces approches territoriales qui demandent une coopération étroite entre toutes les parties impliquées, tels que les acteurs économiques, les associations et les autorités locales. L'implication de toutes les parties concernées permet l'identification de conflits d'intérêt potentiels, aide à redéfinir les priorités, à fixer un ensemble de règles collectives d'usage et à mieux répartir le financement de la gestion durable des ressources.

L'intégration des politiques forestières dans l'ensemble des politiques d'aménagement du territoire semble d'autant plus importante que, comme indiqué ci-dessus, la forte valeur patrimoniale des espaces boisés méditerranéens provient des fonctions multiples qu'ils assurent. Une gestion intégrée et durable de ces espaces peut mettre un frein à l'urbanisation linéaire continue par la création de coupures vertes, contribuer à la diversification de l'offre touristique par la promotion de l'arrière-pays, et participer à la réduction de la pauvreté et de la désertification. L'intégration des politiques sur l'eau et les forêts est indispensable à la gestion durable des ressources naturelles à l'échelle du bassin versant. Enfin, la mise en place de stratégies efficaces de prévention des feux requiert l'intégration totale des politiques actuelles liées aux feux : politiques d'urbanisation, de développement agricole (incluant les pratiques d'élevage), questions de droits d'usage et de propriété, etc.

La gestion durable des ressources et des demandes en eau, et des zones rurales et espaces boisés, doit avant tout reposer sur une approche intégrée au niveau du bassin versant et sur un principe de solidarité amont/aval entre arrière-pays et régions côtières. Elle doit également être en harmonie avec toutes les politiques sectorielles : agriculture, énergie, tourisme, environnement et aménagement du territoire pour faciliter l'arbitrage de la répartition des ressources en eau et en sols entre les différents usages.

Les réponses à apporter pour faire face aux défis futurs en matière de gestion des ressources hydriques et des espaces boisés méditerranéens, défis dérivant tout particulièrement de la croissance démographique et de changements d'occupation des sols, dépassent ainsi largement le cadre des seules politiques forestières et de l'eau.

Pour en savoir plus

- Blinda, M. and Thivet, G. 2009. Ressources et demandes en eau en Méditerranée, situation et perspectives. In: Science et changements planétaires Sécheresse vol. 20(1). Montrouge, John Libbey Eurotext. www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/agro_biotech/sec/e-docs/00/04/49/C6/article.phtml
- CIHEAM, UNEP-MAP-Plan Bleu, Hervieu, B. and Thibault, H.L. 2009. *Mediterra 2009: Re-thinking rural development in the Mediterranean*. Paris, Presses de Sciences Po; CIHEAM.
- UNEP-MAP-Plan Bleu, Thibault, H.L. 2009. *State of the Environment and Development in the Mediterranean*. Athens, UNEP-MAP-Plan Bleu. www.planbleu.org
- UNEP-MAP-Plan Bleu, Benoit G. and Comeau A. 2005. *A sustainable future for the Mediterranean: the Blue Plan's environment and development outlook*. London, Earthscan Publishers. www.planbleu.org

Le reboisement pour combattre la désertification dans les zones arides : une entreprise à raisonner¹

Orna Riesman-Berman, Leopoldo Rojo et Pedro Berliner

Les processus biophysiques conduisant à la désertification consistent principalement en une augmentation du ruissellement et de l'érosion des sols, consécutive à une réduction importante de la canopée. Ils peuvent être évités ou corrigés par le reboisement, si ce dernier est réalisé de façon adéquate, en apportant toute l'attention nécessaire au bilan d'eau dans le bassin versant.

Le reboisement dans le Bassin méditerranéen, tout au long de son histoire, a été réalisé sur des terres détériorées et dégradées : espaces naturels surpâturés, forêts et matorrals brûlés, champs cultivés abandonnés ou espaces forestiers intensivement exploités par des coupes à blanc. Ces terres sont très menacées par un processus de destruction de la structure de leurs sols, de pertes de fertilité, de productivité et de biodiversité, ainsi que par le développement des processus de désertification. Nous examinerons dans ce chapitre la durabilité du reboisement dans des écosystèmes sujets à de graves sécheresses, en nous focalisant sur les zones méditerranéennes sèches et semi-arides sur le pourtour du Bassin méditerranéen.

Dans les zones arides, le surpâturage, les feux et toutes les activités anthropiques responsables de l'enlèvement du couvert végétal et de la mise à nu des terres, exposent dangereusement la surface des sols à l'érosion éolienne et hydrique. Ces activités détruisent également la « croûte biologique » du sol, qui, dans les zones arides, stabilise et protège le sol de l'érosion, redistribue le ruissellement et apporte azote et carbone au sol. Les orages qui s'abattent sur les terres dégradées accélèrent le processus de destruction de la structure du sol et donc les processus de désertification. Les gouttes d'eau, qui frappent le sol, détruisent les agrégats de surface, ce qui provoque la formation d'une « croûte physique » dense et l'augmentation du ruissellement. Les écoulements d'eau,

¹ Voir également les sections 1.5, 4.3 et 4.6

Encadré 27. Quelques définitions

« Le terme « désertification » désigne la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et sub-humides sèches causée par divers facteurs, dont les variations climatiques et les activités humaines ». « Combattre la désertification » désigne les activités qui relèvent de la mise en valeur intégrée des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, en vue d'un développement durable » : (source : UN Convention to Combat Desertification <http://www.unccd.int/convention/text/convention.php?annexNo=-1>)

qui ne sont plus contenus sur un terrain en pente, peuvent devenir turbulents et entraîner les particules détachées de la surface du sol. Les crues ont tendance à se développer sur les vastes espaces recouverts d'une telle croûte. Lorsque les eaux de crue se retirent, le matériau érodé recouvre les horizons supérieurs fertiles du sol, contribuant à une plus grande destruction de la structure du sol et compromettant les activités agricoles sur les espaces cultivés. Dans ces terres dégradées, la perte de fertilité du sol est accompagnée par une baisse considérable de la disponibilité en eau, limitant donc la régénération des espèces herbacées annuelles ainsi que des arbres et arbustes. La baisse accélérée de la disponibilité en eau et la perte continue du couvert végétal, constituent un cercle vicieux : des espaces initialement fertiles et couverts de végétation se transforment en des paysages inhospitaliers entrecoupés de profondes ravines. La Figure 68 illustre la sensibilité à la désertification de la région nord méditerranéenne.

On peut donc dire qu'une réduction de surface de la canopée est la cause principale de la séquence d'événements conduisant à la désertification. Prévenir et combattre la désertification repose donc sur le maintien d'une canopée stable, tout au moins durant la saison des pluies, ou sur l'installation d'un couvert pour les terres sujettes au risque de désertification. Les feuilles absorbent l'énergie des gouttes d'eau qui frappent leur surface, et diminuent donc leur énergie avant qu'elles n'atteignent la surface du sol. La canopée réduit donc de façon significative la destruction des agrégats de surface et prévient la formation d'une croûte physique sur le sol et le ruissellement qui en résulte. La rétention des gouttes d'eau par le couvert forestier, et la réduction de l'infiltration de la pluie dans le sol, revêtent une importance particulière lors des orages intenses qui ont souvent lieu dans la zone méditerranéenne au printemps et en automne, lorsque le couvert végétal est clairsemé. Un reboisement avec des espèces à feuilles persistantes ou semi-décidues permettrait donc idéalement d'obtenir une canopée suffisamment protectrice pendant les saisons cruciales.

Le reboisement à grande échelle des zones désertifiées peut affecter les bilans en eau dans les bassins versants. Des expériences de terrain à grande échelle (12 km²) menées dans une plantation de pin d'Alep de 30 ans, plantés dans une zone de transition entre la zone méditerranéenne et semi-aride (285 mm de précipitations annuelles), ont montré que le ruissellement était négligeable, même pendant les orages à forte intensité. L'augmentation de l'eau stockée dans le profil du sol n'entraînait cependant pas de percolation d'eau au-dessous de la zone prospectée par les racines, la recharge de l'aquifère ne pouvait donc pas avoir lieu. L'eau était efficacement utilisée par les arbres et un sous-étage temporaire. L'utilisation efficiente de l'eau disponible par les arbres accroît l'utilisation d'énergie et diminue la température de surface. Ce processus est déterminant pour remédier à la désertification. La présence d'arbres peut donc réduire la genèse des

écoulements d'eau et donc réduire l'érosion. Il en résulte que le reboisement est un outil efficace pour à la fois prévenir la désertification et y remédier pour des terres agricoles en déshérence et des zones naturelles perturbées.

Le reboisement en zones arides et semi arides doit faire appel aux techniques de collecte des eaux de pluie comme la construction de terrasses en courbes de niveau ou encore de petits barrages.

Il n'est néanmoins pas tâche facile d'établir des forêts durables sur les terres sèches du Bassin méditerranéen, caractérisées par des pluies faibles et un potentiel élevé d'évapotranspiration, même en hiver. Les forestiers étaient déjà conscients au milieu du 19^e siècle de la dégradation des écosystèmes forestiers méditerranéens – et de ses liens avec l'érosion des sols – et aussi de l'augmentation des crues catastrophiques. Des activités de restauration d'écosystèmes ont donc alors été décidées pour promouvoir le boisement, en particulier de la partie amont des bassins versants torrentiels. En conséquence, de vastes programmes de reboisement furent conduits au 20^e siècle dans la plupart des pays méditerranéens. En Espagne, par exemple, plus de quatre millions d'hectares ont été reboisés (environ 9% de la totalité du territoire national et 18% du potentiel des terres à vocation forestière). La création d'un effet de rétroaction positive entre le sol et l'eau grâce au reboisement entraîne une amélioration de la disponibilité en eau pour les plantes introduites sur les terres dégradées. Ceci peut être réalisé en utilisant plusieurs moyens complémentaires : i) préparation du sol avant plantation pour accroître l'infiltration de l'eau et la capacité de rétention en eau du sol, spécialement avec des techniques de collecte des eaux de ruissellement ; ii) sélection minutieuse des espèces et écotypes ligneux pouvant tolérer les conditions de stress des terres dégradées ; iii) acclimatation des jeunes arbres en pépinière pour favoriser leur résistance à la sécheresse ; iv) utilisation d'équipements pour créer un microclimat, comme les tubes-abris.

Déjà à l'époque des Nabatéens (100 av.J.C. – 50 ap. J.C.) et des Byzantins (324 ap. J.C.– 640 ap. J.C.), des techniques avaient été conçues pour pallier le déséquilibre structurel entre la demande d'un approvisionnement stable en eau pour l'agriculture et l'évaporation, comme, par exemple, en transformant le fléau des crues potentielles en une bénédiction. Récolte de l'eau, détournement des crues et collecte des eaux de ruissellement sont quelques termes utilisés pour décrire la collecte des eaux de ruissellement dans des structures adaptées à la géomorphologie locale. Le principe de cet ingénieux système est extrêmement simple – le ruissellement généré naturellement sur une vaste surface est concentré et réparti entre de plus petites surfaces où il est retenu. En conséquence, la hauteur de l'eau dans les zones de collecte d'eau sera beaucoup plus importante que « la hauteur de pluie ». Le point important ici est que l'eau peut être stockée en quantités suffisantes pour permettre le développement normal des cultures, mais seulement sur une surface réduite. Dans ces microsites, la disponibilité en eau est donc supérieure à celle des surfaces voisines. Un exemple d'une mise en œuvre moderne de cette approche est le boisement à grande échelle pratiqué dans la zone de transition entre la Méditerranée et le désert semi aride du Néguev en Israël (50–300 mm de précipitations annuelles). Elle consiste à planter de jeunes arbres le long de bourrelets de terre de faible hauteur, construits en courbes de niveau sur une pente (Figure 69A, B). Le ruissellement se produit sur la surface intermédiaire entre deux bourrelets voisins,

constituant une zone « source », et il est collecté au niveau de bourrelet, appelé zone « puits », où les jeunes arbres sont plantés.

La distance entre les terrasses en courbes de niveau et le type de sol déterminent la quantité du ruissellement produit. Par exemple, les surfaces rocheuses produisent plus de ruissellement. Il en est de même pour les terres qui ont une croûte biologique : les surfaces encroûtées produisent plus de ruissellement entre les terrasses que les surfaces dont les sols sont dégradés. Dans les zones avec des terrasses en courbes de niveau, la survie des arbres est considérablement accrue et l'érosion est contrôlée. Il est possible de construire des terrasses en courbe de niveau avec un minimum de perturbation pour le terrain, en utilisant une petite pelle mécanique pour creuser les fossés et former des bourrelets en courbes de niveau. De cette façon, la surface entre les terrasses reste presque intacte. Ce type de boisement est connu sous le nom de « savanisation », un terme décrivant un type de plantation relativement clairsemé, où un espace est laissé entre les terrasses en courbes de niveau, et entre les arbres le long d'une de ces courbes. La technique des terrasses en courbe de niveau est donc une technologie efficace de gestion du bassin versant dans son ensemble. Un avantage additionnel est son impact positif sur la biodiversité et la productivité de la forêt. L'humidité élevée sous les terrasses améliore l'installation d'espèces herbacées annuelles et contribue à y augmenter considérablement la biomasse. De la même façon, la biodiversité des espèces poussant sur les bourrelets de terre est plus grande que sur les sols encroûtés entre les terrasses. Dans les zones sèches aménagées en terrasses, augmenter le nombre de terrasses en courbes de niveau peut accroître la biomasse végétale et la biodiversité spécifique. Ainsi, les services écosystémiques sont conservés et le pâturage peut être intégré à l'écosystème forestier. Un autre type de construction utilisé dans le désert du Néguev pour collecter les eaux de ruissellement est le liman (*limen* et *limne* signifiant respectivement port et lac en Grec, voir Figure 69C, D); il s'agit d'un mini-bassin versant artificiel fermé par des digues, pour piéger l'eau de ruissellement venant des *ouadis*.

Les tubes-abris, cylindres en vinyle, installés individuellement autour des plants, forment un microenvironnement ombragé, ils réduisent ainsi l'évapotranspiration et accroissent la survie des plants. La hauteur de ces plants est augmentée également, grâce aux effets de l'ombrage. Les plants protégés de *Quercus ilex*, peuvent atteindre, par exemple, deux fois la hauteur de plants non protégés après seulement deux ans.



Figure 68. Sensibilité à la désertification au nord de la Méditerranée (2005) Source EEA

Dans les climats chauds, il est recommandé d'utiliser des manchons ventilés pour réduire la température à l'intérieur du tube. De la même façon, dans des conditions environnementales de stress, un couvert végétal encore existant peut faciliter à la fois l'installation d'espèces ligneuses introduites et la régénération naturelle d'espèces locales. L'effet de l'ombre sera traité dans la dernière partie de ce chapitre lorsque nous examinerons la régénération spontanée.

L'agroforesterie peut accroître la productivité des reboisements sur les terres sèches.

Dans les zones boisées où le sol est suffisamment profond (champs cultivés abandonnés, par exemple), la surface entre les terrasses en courbes de niveau peut être utilisée pour des cultures à petite échelle, une pratique connue sous le nom d'agroforesterie. La technique, commune dans les zones méditerranéennes plus humide, est fondée sur l'inter-culture entre les lignes d'arbres plantés, ou encore, après éclaircie d'une forêt pour créer une savane boisée ouverte qui puisse accepter des cultures. Des exemples connus sont les *dehesas* en Espagne et les *montados* au Portugal, systèmes agro-forestiers dans des espaces ouverts boisés à base de chêne, façonnés par l'homme. L'agroforesterie n'est pas communément pratiquée dans les zones plus sèches. Cependant, même dans ces zones, concentrer les eaux de ruissellement sur une parcelle relativement grande, peut accroître la disponibilité en eau du sol si bien, qu'au début de l'été, le contenu en eau du sol soit similaire à celui de zones humides. Ce système est appelé système agro-forestier avec collecte des eaux de ruissellement. La zone de surface du ruissellement est conçue de telle façon que le ruissellement généré s'étende sur toute la surface cultivée, et humidifie le sol à une profondeur prédéterminée. La taille optimale de la parcelle réceptrice du ruissellement est d'approximativement un hectare, surface maximum qui puisse être nivelée à la main de façon satisfaisante (pour garantir une répartition uniforme de l'eau) et qui permette également une culture aisée du terrain.



Figure 69. A, B Reboisement en courbes de niveau dans le Néguev, Israël. Les jeunes arbres sont plantés le long de bourrelets bas construits en courbes de niveau sur une pente (C, D). Un liman est une zone de bassin versant planté (photographie : B. Bookend and <http://desert.bgu.ac.il/desert/>).

La difficulté de régénération de l'étage dominant, et du sous-étage au sein des reboisements en zone sèche, est un obstacle majeur à la durabilité des forêts. Cependant, encourager la régénération des espèces autochtones dans ces forêts sèches, peut favoriser la diversité structurelle et des espèces, ainsi que les services écosystémiques.

Les activités de reboisement dans les zones sèches sont conçues pour produire durablement des services écosystémiques multiples pour l'homme et l'environnement. Ces services incluent la récréation, l'entretien d'un microclimat frais, la conservation et la régénération du sol, la conservation de l'eau, la recharge de nappes souterraines, la prévention des crues et de la poussière, la production de fourrage, et la sauvegarde de la biodiversité. Étant donné le peu de ressources disponibles des zones sèches, il est crucial de concevoir des reboisements visant à maximiser la fourniture de services écosystémiques, malgré les difficultés inhérentes à l'installation de forêts durables dans ces zones. Le sous-étage forestier, une composante de la forêt importante en termes de biodiversité spécifique, et sa complexité structurelle peuvent fournir de nombreux services écosystémiques, dont la nourriture pour le bétail et les abeilles, ainsi que des services culturels et esthétiques. Il n'est néanmoins pas tâche facile de créer en zone sèche une forêt qui héberge un sous-étage. En principe, le reboisement des écosystèmes arides conduit à la création d'un nouvel écosystème qui modifie profondément les écosystèmes initiaux : pâturages initiaux naturels ou dégradés, ou les formations arbustives ou encore les terres agricoles en désertification. Ce type de nouvel écosystème forestier forme un milieu distinct de celui des espaces voisins : formations naturelles ouvertes ou terres cultivées, en ce sens que les arbres plantés changent le microclimat, la couverture et les propriétés structurales de surface du sol, et donc la disponibilité globale en ressources ainsi que l'habitat pour de nombreux animaux et plantes. Dans les zones sèches, le « pool » des espèces locales ne contient pas nécessairement de groupe d'espèces de forêts naturelles bien adaptées à vivre en sous-étage, mais est composé d'espèces herbacées ou arbustives issues de zones voisines. Le développement de la végétation de sous-étage dans une zone boisée contribue donc à la connectivité du paysage et atténue les effets de sa fragmentation résultant du reboisement lui-même, tout comme ceux d'une possible dégradation antérieure des terres. Créer une forêt qui héberge un sous-étage peut nécessiter une stratégie spécifique, car les espèces forestières sont sélectionnées principalement pour leur tolérance à la sécheresse, une installation et une croissance rapides, et pas nécessairement pour favoriser l'établissement d'un sous-étage. Ainsi, certaines des espèces les plus tolérantes à la sécheresse, telles que certaines espèces d'Eucalyptus, inhibent l'établissement de plantes sous leur couvert (du fait par exemple de phénomènes d'allélopathie). Une solution possible à ce problème repose sur la « savanisation », technique de reboisement mentionnée ci-dessus qui permet également l'installation d'un sous-étage, grâce à un schéma consistant à espacer les arbres à la plantation, créant ainsi des trouées dans le couvert laissant passer la lumière nécessaire aux espèces autochtones. Il est donc recommandé d'encourager la régénération et l'installation d'espèces autochtones à l'intérieur des reboisements en zones sèches ; les essences arborées devraient être sélectionnées en fonction de leurs interactions avec les espèces arbustives autochtones, et plantées à une densité relativement faible.

Cependant, un des obstacles majeurs au boisement des zones sèches est la régénération limitée de l'étage dominant, et des espèces autochtones arbustives en sous-

étage. Des plantations de pin d'Alep dans la zone de transition entre les zones méditerranéenne et semi aride (285 mm de précipitations) en offrent un exemple ; les pins ne se régénèrent pas. Des études menées jusqu'à ce jour, n'ont pas réussi à en élucider les causes ou à développer des outils pour y remédier. Dans la zone méditerranéenne sèche (400 mm de précipitations), les espèces de l'étage dominant se sont régénérées avec succès, mais la régénération des espèces ligneuses autochtones feuillues est très limitée au sein de la plantation de pins. Des études ont montré que l'ombre du couvert de l'étage principal est bénéfique pendant les premiers stades de l'installation des plants de chêne commun, et que l'ombre modérée (50 – 70%) est très efficace pour améliorer leur survie. Cependant, le développement ultérieur des jeunes plants de chêne est beaucoup plus vigoureux dans les trouées du couvert forestier. Dans les écosystèmes sujets à la sécheresse, l'ombre peut améliorer les relations hydriques dans la plante, et le stress conséquent au manque de lumière devient, de ce fait, moins important. Une façon pratique de régénérer les espèces ligneuses serait donc de créer un environnement ombragé pendant les premiers stades de l'installation des espèces du sous étage et de l'étage principal, et d'exposer ensuite les jeunes plants à la lumière par création de trouées dans le couvert forestier.

Pour en savoir plus

- <http://desert.bgu.ac.il/desert/EngDefault.aspx>
- Ben-Asher, J. and Berliner, P.R. 1994. Runoff irrigation. In: Tanji, K.K. and Yaron, B. (eds.). *Management of Water Use in Agriculture*, Chapter 6. Springer Verlag.
- Evenari, M., Shanan, L. and Tadmor, N. 1982. *The Negev: The Challenge of a Desert*, 2nd Edition. Cambridge, MA; Harvard University Press. 437 p.
- Lovenstein, H., Berliner, P.R. and van Keulen, H. 1991. **Runoff agroforestry in arid lands**. *Forest Ecology and Management* 45: 59–70.
- Reisman-Berman, O., Age-related change in canopy traits shifts conspecific facilitation to interference in a semi-arid shrubland. *Ecography* 30: 459–470.
- Rojo, L., Vallejo, V.R. and Valdecantos, A. 2009. *Forest and natural landscapes*. LUCINDA, EC Specific Support Action. Booklet series C, nr 1. Universidade Lusófona & FCSH (Universidade Nova de Lisboa). <http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/>
- Vallejo, V.R., Aronson, J., Pausas, J. and Cortina, J. 2006. **Restoration of Mediterranean Woodlands**. In: *Restoration Ecology. The New Frontier*. J. Van Andel and J. Aronson (eds.). Blackwell Publ., Oxford. Pp. 193–207.

Maintenir en bon état les écosystèmes ripicoles et aquatiques : défis et solutions grâce à la gestion des ripisylves

Francesc Sabater et Susana Bernal

Les ripisylves jouent un rôle fondamental dans le maintien de la biodiversité, la régulation des flux d'énergie et de nutriments entre les environnements terrestres et aquatiques, et dans le maintien de la santé des écosystèmes aquatiques adjacents et des ressources en eau. Leur futur est menacé en région méditerranéenne par les sécheresses croissantes, la surexploitation de l'eau et la pollution.

Les zones ripicoles constituent des frontières écologiques entre les écosystèmes aquatiques et terrestres (ces interfaces sont définies par les écologistes comme de réels écotones) et comme telles, elles renferment des gradients prononcés de conditions environnementales, de processus écologiques et de communautés végétales. En amont des cours d'eau, les zones ripicoles sont souvent constituées de bandes étroites de végétation adjacentes au lit du cours d'eau, alors que dans les zones de basse altitude, elles sont caractérisées par de larges plaines inondables couvertes de forêts.

Du fait de leur rôle crucial dans le maintien de la biodiversité et la régulation des flux d'énergie et de nutriments entre les environnements terrestres et aquatiques, les ripisylves sont devenues un thème de grand intérêt pour de nombreux scientifiques et gestionnaires des milieux au cours des dernières décennies. Nous identifierons ici une série de fonctions-clés des écosystèmes, qui seront à prendre en compte lors de la conception de préconisations pour une bonne gestion de ces écosystèmes extrêmement précieux, l'accent étant mis sur leur rôle dans les régions méditerranéennes semi arides et arides.

Les ripisylves jouent un rôle fondamental dans le maintien de la bonne santé des écosystèmes aquatiques adjacents. Tout d'abord, l'ombre procurée au lit du cours d'eau par le couvert forestier régule la productivité primaire du cours d'eau et a un effet tampon sur la température de son eau, ce qui est particulièrement important dans les zones semi-arides pour garantir la survie de certaines espèces de poissons tels que les salmonidés. D'autre part, elles fournissent de grandes quantités de litière de feuilles de haute



Figure 70. Ripisylve à dominance d'aulnes (*Alnus glutinosa*) en amont d'un bassin versant méditerranéen, (La Tordera – NE Espagne). Photo : F. Sabater

qualité – source importante de nourriture pour les insectes aquatiques –, et des débris ligneux grossiers qui accroissent l'irrégularité du lit et réduisent le flux d'énergie favorisant un accroissement de la quantité de nutriments dans le cours d'eau, la rétention des sédiments, la diversité de son habitat et enfin sa productivité.

Il est bien établi que le complexe racinaire et la strate en sous-étage de la ripisylve préviennent efficacement l'érosion des sols et contribuent à la stabilisation des berges du cours d'eau. Les ripisylves agissent comme des barrières vis-à-vis de la perturbation du sol causée par les pratiques agricoles dans les champs adjacents, et prélèvent de façon efficace les sédiments des eaux de drainage. Cet effet d'atténuation est d'une importance capitale dans les régions méditerranéennes où les crues soudaines sont courantes et ont un énorme pouvoir de destruction. Le contrôle de l'érosion par les écosystèmes ripicoles contribue certainement à protéger la qualité de l'eau du cours d'eau, à prévenir l'envasement et à maintenir un lit profond adapté aux communautés aquatiques, en particulier les poissons.

La proximité des ripisylves des sources d'eau de surface et de sous-surface permet l'établissement de communautés végétales uniques que l'on ne trouve pas ailleurs dans le bassin versant (Figure 70). L'accès aux ressources en eau permet une évapotranspiration continue des arbres riverains pendant la période végétative, maintenant des niveaux d'humidité relative de l'air élevés. Les conditions environnementales dans les écosystèmes ripicoles méditerranéens sont typiquement les plus humides et les plus fraîches de tout le paysage, et le gradient prononcé de température et d'humidité offre un éventail d'habitats pour les organismes vivants. Les zones ripicoles sont également des « hot spots » pour la faune car ils offrent simultanément trois ressources essentielles : l'eau, - un bien rare dans les zones méditerranéennes -, nourriture et abris. Par ailleurs, la configuration linéaire des ripisylves facilite leur rôle, comme corridors biologiques ou voies préférentielles pour la diffusion, dispersion et migration des espèces animales et végétales.

Les ripisylves affectent réellement le bilan hydrique annuel en réduisant l'écoulement de l'eau.

Les ripisylves, connues pour recourir à des mécanismes d'évitement de la sécheresse, sont typiquement décidues et facultativement phréatophytes (plantes associées à l'existence d'une frange capillaire liée à une nappe souterraine peu profonde), à l'opposé de ces espèces sclérophylles prédominantes dans le paysage méditerranéen et habituées à endurer un stress hydrique. L'évapotranspiration dans les ripisylves peut être une composante majeure du bilan hydrique annuel dans les bassins versants semi-arides et arides. Une bande ripicole boisée à New Mexico par exemple a fait baisser de 20-33% le bilan hydrique annuel dans un bassin versant aride soumis à des précipitations annuelles de 200-300mm. Dans un bassin versant méditerranéen densément boisé du NE de l'Espagne (précipitations annuelles d'environ 600 mm) cependant, la contribution de l'évapotranspiration de la ripisylve au bilan en eau annuel total était modeste (<5%). Néanmoins, l'évapotranspiration réelle de la ripisylve était en moyenne de 510 mm (entre 2 et 5 mm/jour), soit 70% de l'évapotranspiration potentielle pendant la période de végétation (d'avril à octobre). Ces chiffres indiquent que les arbres des ripisylves dans les régions méditerranéennes peuvent avoir un impact élevé sur les bilans hydriques des bassins versants en particulier pendant le printemps et l'été lorsque les ressources en eau sont plus limitées.

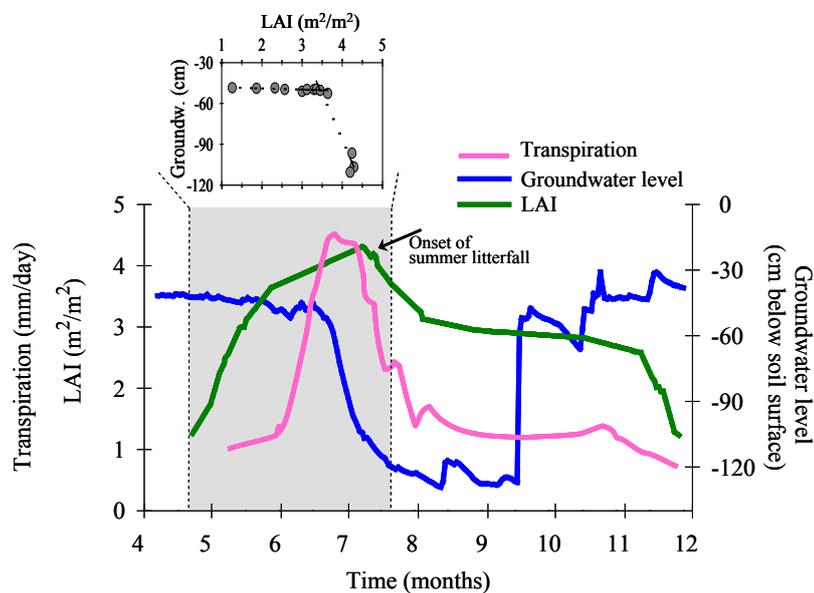


Figure 71. Niveau des nappes souterraines de la ripisylve relevé par un piézomètre situé à 5m du lit du cours d'eau Fuirosos et transpiration moyenne de deux espèces d'arbres de la ripisylve (*Alnus glutinosa* et *Platanus acerifolia*) situés à proximité pendant la période de végétation 1998-1999. L'indice foliaire (LAI) sur la parcelle riveraine du Fuirosos est également illustré. L'encadré montre la relation entre le niveau de la nappe de l'aquifère souterrain riverain et le LAI pendant la période de développement du couvert. La flèche noire indique le début de la chute estivale des feuilles, qui a eu lieu peu de temps après la baisse brutale du niveau de la nappe souterraine. Le cours d'eau Fuirosos est situé dans le Parc Naturel du (couloir) Montnegre (NE Espagne) où les précipitations annuelles sont d'environ 600 mm. La Figure 71 a été adaptée à partir de la thèse de maîtrise d'Ester Nin (2000, Université de Barcelone).

La Figure 71 montre que la transpiration des arbres ripicoles a exercé une influence énorme sur le niveau de la nappe d'eau souterraine pendant la période d'évapotranspiration maximum, c'est-à-dire au moment du plein développement du couvert. Pendant une période de 2 semaines, le niveau des eaux souterraines de cette zone a enregistré une baisse brutale de 54 cm avec un taux de 3,5 cm/jour, soit 4,6 mm/jour, coïncidant avec les valeurs mesurées pour la transpiration des arbres. Il faut noter que l'impact de l'évapotranspiration sur le niveau des nappes souterraines était particulièrement notable pour un indice foliaire (LAI) supérieur à 3,5 m²/m², et que les arbres de la ripisylve ont commencé à perdre leurs feuilles peu après l'abaissement de la nappe souterraine en dessous de 120 cm sous la surface du sol, soit à un niveau ne permettant probablement pas au système racinaire des arbres d'y puiser. Ces observations suggèrent que des couverts ripicoles denses peuvent provoquer un stress hydrologique, entraînant la baisse du débit du cours d'eau ou même provoquant une intermittence du cours d'eau dans les bassins versants semi arides pendant la période de sécheresse. Malgré l'influence des ripisylves sur l'écoulement de l'eau, cet aspect a été largement ignoré dans les modèles hydrologiques des bassins versants. La plupart de ces modèles sont développés

Encadré 28. Recommandations pour la gestion des ripisylves

- Si l'objectif est de maintenir une biodiversité élevée et des habitats pour la flore et la faune ripicoles, il faut donc préserver les ripisylves mûres en interdisant toute récolte ou, n'autoriser seulement qu'une coupe sélective le long des rives du cours d'eau. Garder un nombre important de vieux arbres intacts : ils fournissent des débris ligneux grossiers à l'environnement du cours d'eau, favorisant la rétention de nutriments et la qualité des habitats aquatiques. Laisser toujours un nombre suffisant d'arbres en bordure le long du cours d'eau pour garantir un ombrage suffisant au-dessus de son lit.
- Essayer de maintenir des strates herbacées et arbustives vigoureuses car elles augmentent la stabilisation du sol des rives et l'interception des sédiments durant les crues. Utiliser des clôtures pour éviter l'accès du bétail à la ripisylve.
- Accroître la capacité des arbres de la ripisylve à retenir les nutriments des nappes souterraines provenant de zones adjacentes ; maintenir une demande élevée en nutriments et à prévenir leur excès, en gardant une dynamique de forêts jeunes et d'âge moyen grâce un programme proactif de coupe de taillis. Cela s'avère spécialement important pour la gestion de zones ripicoles méditerranéennes proches de champs cultivés sujets à de vastes opérations de fertilisation. Il est important de noter que l'effet tampon des ripisylves dépend de la géomorphologie, de la topographie, de la composition en espèces et de la largeur de la bande boisée, entre autres facteurs. En ce qui concerne la largeur de cette bande, un minimum de 5 à 30 m est nécessaire pour réduire d'au moins 50% les apports en nutriments des eaux souterraines.
- Lorsque la coupe sélective est recommandée, il faut minimiser le plus possible la perturbation des sols durant les pratiques sylvicoles. Garder les brindilles et les grosses branches dans la zone riveraine. Éviter d'utiliser la mécanisation aussi souvent que possible ; utiliser les chevaux pour l'extraction de bois. Des méthodes traditionnelles de gestion des ripisylves favorisant la diversification de l'habitat pour la flore et la faune, comme l'éclaircie sélective, sont préférables.
- Permettre une régénération naturelle des ripisylves, de préférence avec des espèces autochtones adéquates adaptées au climat et au régime hydrique locaux. Éviter les espèces opportunistes et contrôler l'invasion étendue des espèces exotiques en les coupant ou par pulvérisation précoce d'herbicides.
- Les ripisylves et les milieux humides sont des écosystèmes précieux des paysages régionaux, une gestion attentive de leur structure et de leur composition s'avère donc nécessaire au maintien, voire à l'amélioration, de leur valeur paysagère et de leur qualité esthétique.

pour des bassins versants humides, et ne réussissent donc pas à simuler correctement l'écoulement du cours d'eau lorsqu'ils sont appliqués à des bassins versants en conditions semi-arides. Des approches de modélisation novatrices, incluant le réservoir d'eau souterraine de la zone ripicole, ont conclu que cet aquifère est un instrument clé dans la simulation des écoulements du cours d'eau pendant la période de sécheresse dans les bassins versants méditerranéens.

Les ripisylves agissent comme des filtres de polluants et améliorent la qualité des eaux souterraines.

La capacité des zones ripicoles à retenir les nutriments, pesticides et autres polluants provenant des eaux souterraines de zones adjacentes, est bien établie. Un vaste corpus de connaissances est disponible concernant l'effet tampon des ripisylves sur les charges en nitrate des eaux souterraines provenant de zones cultivées adjacentes. Sur une année, les zones ripicoles dans les régions tempérées peuvent réduire au moins de 30% les charges en nitrate des nappes souterraines. Des résultats similaires ont été observés pour les régions méditerranéennes : une diminution de 10% en nitrate de l'eau souterraine par mètre de largeur de la bande forestière a été décrite pour une ripisylve. La récupération des nitrates dans les eaux souterraines a lieu principalement grâce au prélèvement réalisé par la végétation ripicole, et à la dénitrification microbienne assurée par la réduction du nitrate en gaz dans des conditions anaérobiques. Dans les zones ripicoles méditerranéennes cependant, les sols ne sont généralement pas saturés en nitrates, et les taux de dénitrification sont très faibles ($< 20 \text{ mg N}_2\text{O-N/m}^2/\text{yr}$, soit en moyenne, un ordre de grandeur inférieur aux valeurs décrites pour les zones ripicoles tempérées). En conséquence, ce processus microbien représente une proportion insignifiante ($< 1\%$) du prélèvement annuel d'azote dans les systèmes ripicoles méditerranéens, ce qui implique que l'assimilation par la végétation ripicole et en particulier les arbres, sont les principaux responsables du prélèvement de l'azote de l'eau souterraine.

La gestion des ripisylves est un outil pour améliorer la qualité de l'eau et protéger les habitats ripicoles et des cours d'eau, ainsi qu'une nécessité pour les milieux méditerranéens vulnérables, mais c'est malheureusement une question négligée par les politiques environnementales.

Dans l'ensemble, les recherches menées dans les régions semi-arides soulignent que les arbres de la ripisylve contribuent à une amélioration substantielle de la qualité des eaux souterraines, même si leur demande en évapotranspiration peut potentiellement diminuer la disponibilité en eau et réduire l'écoulement issu des bassins versants. Les écologistes ont appris que dans les ripisylves méditerranéennes il existe un compromis critique entre l'utilisation en eau et la qualité de l'eau, qui doit être évalué lors de la gestion de ces écosystèmes. Nous recommandons donc une gestion proactive des ripisylves pour toute action concernant l'amélioration de la qualité de l'eau et/ou de la protection de la flore et de la faune ripicoles ou de celles des cours d'eau, principalement dans les pays méditerranéens dont les environnements ripicoles et aquatiques sont

extrêmement vulnérables aux perturbations anthropiques. L'Encadré 28 fournit une brève liste de recommandations pour la bonne gestion des écosystèmes forestiers ripicoles méditerranéens.

De nombreux gestionnaires de l'eau et environnementalistes reconnaissent aujourd'hui que les ripisylves sont bénéfiques pour l'amélioration de la qualité de l'eau et les écosystèmes d'eau douce. Néanmoins, et malgré tous les services fournis par les écosystèmes ripicoles, déjà mentionnés, ils sont à peine pris en compte dans la Directive-cadre européenne sur l'Eau (WFD) (2000/960/EC). Aucune mention sur la possibilité d'une contribution de ces zones à la mise en œuvre du WFD n'a été faite, et aucune recommandation quant à leur protection et leur restauration n'a été donnée. Nous croyons néanmoins que les milieux humides en général et les ripisylves en particulier, sont des zones offrant un intérêt considérable, tout particulièrement dans les régions méditerranéennes où la pression des hommes sur les ressources en eau est extrêmement forte.

Pour en savoir plus

- Bernal, S., Butturini, A., Nin, E., Sabater, F. And Sabater, S. 2003. Leaf litter dynamics and nitrous oxide emission in a Mediterranean riparian forest: implications for soil nitrogen dynamics. *Journal of Environmental Quality* 32(1): 191–197.
- Dahm, C.N., Cleverly, J.R., Allred Coonrod, J.E., Thibault, J.R., McDonnell, D.E. and Gilroy, D.J. 2002.
- Evapotranspiration at the land/water interface in a semi-arid drainage basin. *Freshwater Biology* 47: 831–843.
- Medici, C., Butturini, A., Bernal, S., Vázquez, E., Sabater, F., Vélez, J.I. and Francés, F. 2008. Modelling the nonlinear hydrological behaviour of a small Mediterranean forested catchment. *Hydrological Processes* 22(18): 3814–3828.
- Naiman, R.J., Décamps, H. and McLain, M.E. 2005. *Riparia: Ecology, Conservation and Management of Streamside Communities*. Elsevier Academic Press, London, UK. 448 p.
- Sabater, S., Butturini, A., Clement, J.C., Burt, T., Dowrick, D., Hefting, M., Maitre, V., Pinay, G., Potoloché, C., Rzepecki, M. and Sabater, F. 2003. Nitrogen removal by riparian buffers along a European climatic gradient: Patterns and factors of variation. *Ecosystems* 6(1): 20–30.

L'économie de l'eau et des forêts : enjeux et recommandations pour fonder une politique

Lelia Croitoru et Mike Young

Dans la région méditerranéenne, les rares ressources en eau sont souvent attribuées à des usages à faible valeur, principalement liés à l'agriculture. Quelle en est la raison ? La gestion efficace de l'eau requiert la prise en considération à la fois de l'offre et de la demande. Une tarification adéquate du prix de l'eau, l'amélioration des politiques d'attribution, et des instruments législatifs peuvent être utilisés pour diminuer la demande excessive en eau et promouvoir sa meilleure utilisation. Les mécanismes de financement des systèmes « fournisseurs » d'eau, tels que les écosystèmes forestiers, peuvent maintenir ou améliorer l'offre en eau. Ce chapitre présente brièvement plusieurs défis auxquels sont confrontées les ressources en eau en région méditerranéenne et examine comment certains de ces mécanismes fonctionnent dans la pratique. Comme la plus grande partie de l'Australie a un climat méditerranéen et des problèmes similaires de pénurie d'eau, ce chapitre inclut également des leçons et des observations tirées de ce pays.

Dans un contexte de pénurie de ressources en eau, des politiques principalement centrées sur l'offre, ont conduit à une mauvaise utilisation et une surexploitation de l'eau dans la région méditerranéenne. Inverser ces tendances est possible en agissant à la fois sur la demande et l'offre, par le biais d'instruments économiques adaptés.

L'eau dans la région méditerranéenne est rare comparée à d'autres régions du monde. La pénurie en eau est particulièrement marquée en Afrique du Nord et dans les pays du Moyen-Orient, où la disponibilité en eau est de 1.100 m³ *per capita*, soit seulement 12% de la moyenne mondiale. De surcroît, la croissance démographique diminuera encore la disponibilité en eau, qui se réduira à 550 m³ *per capita* en 2050 (seulement 9% de la moyenne mondiale prévue pour la même année). Par ailleurs, le changement climatique provoquera des sécheresses de plus en plus graves et fréquentes et l'on prévoit une baisse considérable de la disponibilité en eau dans de nombreuses zones de la région méditerranéenne.

La région a réalisé d'impressionnants progrès en améliorant les opportunités de gestion de rares ressources en eau, grâce à des investissements considérables dans les bar-

rages et réservoirs, et à l'élargissement de l'offre en eau et des services d'assainissement. Cependant, ces investissements, principalement centrés sur l'offre, ont engendré des problèmes de gestion de l'eau dans de nombreux pays. En effet, les gouvernements sont incapables de contrôler l'utilisation des aquifères, les eaux usées non traitées sont souvent déversées dans les cours d'eau ce qui affecte leur qualité, l'eau destinée aux communautés urbaines est généralement fortement subventionnée, exacerbant ainsi la demande et accélérant le besoin de financement additionnel pour la réhabilitation des hydro-systèmes.

Dans de nombreuses régions, ces problèmes ont conduit à une surexploitation et une mauvaise utilisation de l'eau, contribuant à une dégradation accrue de l'eau distribuée et menaçant le bien-être des populations : l'accès inadéquat à l'eau potable et à l'assainissement entraînant des maladies véhiculées par l'eau, en particulier chez les enfants. L'envasement des barrages et la surexploitation des nappes souterraines menacent la disponibilité future en eau potable et d'irrigation¹. Une série d'études sur le coût de la dégradation environnementale, menées au cours de la dernière décennie par la Banque Mondiale, a estimé que le coût annuel associé à la dégradation, la distribution inadéquate et un mauvais assainissement de l'eau, allait de 0,6% du PNB en Tunisie à 2,8% en Iran.

Trouver des mesures adéquates pour la conservation et le partage de l'accès à une eau déjà rare en région méditerranéenne, s'avère essentiel. De nombreux pays du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord ont commencé à gérer leurs ressources en eau d'une façon plus intégrée. Cette approche de gestion reconnaît l'importance des instruments économiques en complément de solutions techniques, et l'importance de gérer la demande en eau aussi bien que son offre. Du côté de la demande, des mesures telles qu'un plus grand recours à la facturation de l'eau, des procédures robustes d'attribution de cette ressource, et le développement de marchés pour l'eau, ont été utilisées pour influencer sur l'utilisation de l'eau. Un des défis restants dans le cadre de cette approche, est de trouver les meilleures façons d'utiliser ces mesures afin de protéger les écosystèmes « fournisseurs » d'eau en volume et en qualité. En effet, de nombreuses forêts et formations arbustives jouent un rôle important dans la régulation des flux hydriques et la réduction des risques de crues². Comme ces services sont généralement des externalités, il y a souvent peu de mesures financières incitatives pour la conservation des écosystèmes qui les fournissent. Des mécanismes de financement pour la conservation de ces écosystèmes, comme les Paiements pour Services Environnementaux, peuvent contribuer à l'amélioration de la fourniture en eau de façon durable.

Une facturation appropriée de l'eau et une commercialisation adéquate peuvent contribuer à réduire la surexploitation de l'eau.

¹ Une étude se fondant sur des données obtenues en Jordanie, au Yémen, en Egypte, en Tunisie et au Maroc, a estimé que la valeur de la diminution des nappes souterraines pouvait être de 2% du PNB. En Tunisie par exemple, le coût annuel du prélèvement excessif des eaux souterraines est de 0,1% du PNB soit environ 20% du coût total de la dégradation de l'eau dans le pays tout entier.

² Un nombre croissant de publications montre que les relations biophysiques entre les forêts et l'eau varient fortement d'un lieu et à l'autre, en fonction des types de climat, de sol et de végétation. Tandis que les forêts ont tendance à améliorer la qualité de l'eau, leur impact sur les écoulements d'eau pendant la saison sèche varie en fonction des conditions locales et leur impact sur l'écoulement annuel total est généralement négatif. Les forêts contribuent également à la réduction des risques de crue en aval, mais ne jouent aucun rôle dans la réduction des crues les plus dommageables qui ont lieu exceptionnellement.

Encadré 29. Le développement des marchés de l'eau dans le Bassin Murray-Darling en Australie

Dans le bassin Murray-Darling, la permission de prélever de l'eau pour l'irrigation fut à l'origine donnée en fonction de la surface. Entre 1960 et 1980, le système est passé à un régime de mesure volumétrique de toute l'eau utilisée et de facturation pour les irrigants. Dans certains systèmes, une distinction fut également faite entre l'eau nécessaire au maintien des arbres pérennes et des vignes, et pouvant également être utilisée pour irriguer des prairies, et/ou des cultures annuelles. Il était clair pour toutes les parties concernées que l'irrigation des cultures pérennes bénéficierait d'une attribution prioritaire. Au même moment, la surface maximale autorisée à l'irrigation était redéfinie en termes de volume maximum d'eau pouvant être prélevé.

A la fin des années 1980, il est devenu évident que les ressources en eau du Bassin avaient atteint leur seuil d'utilisation maximum, voire l'avait dépassé. En conséquence, en 1993 un seuil fut fixé, limitant la quantité d'eau pouvant être prélevée. Très rapidement et encouragé par une politique nationale de concurrence – appelant, entre autres, au développement des marchés de l'eau afin qu'elle puisse être transportée dans des lieux où son utilisation serait plus profitable - un marché d'attributions et de droits pour l'eau a émergé. Aujourd'hui la plupart des irrigants du Bassin achètent et vendent de l'eau, les uns aux autres, de façon régulière.

Des registres formels de droits pour l'eau ont été mis en place et le volume maximum prélevable autorisé a été redéfini en tant que droit à utiliser l'eau, calculé en parts plutôt qu'en valeur absolue. Les marchés et les systèmes de comptabilisation ont alors été établis de façon à ce que les irrigants puissent décider de vendre leurs droits pour l'eau et/ou leurs attributions quant cela leur était le plus profitable. Avec le développement des marchés, les droits pour l'eau, l'attribution de l'eau et les systèmes de contrôle d'utilisation et d'aménagement des terres, ont été formellement disjointes. Aujourd'hui les droits pour l'eau peuvent être transférés du compte en eau d'un propriétaire à celui de son voisin en utilisant internet, de manière identique au virement d'argent d'un compte et à l'achat d'actions. Des processus similaires sont utilisés pour faciliter les transactions des droits à l'eau.

Les autorisations concernant l'utilisation des terres, leur développement et les travaux sont délivrées séparément, et il est possible de les obtenir sans posséder de droits pour l'eau. Le respect du système de comptabilisation est strictement appliqué. Les tentatives de falsification des compteurs volumétriques peuvent entraîner des poursuites et être passibles d'amendes si considérables qu'acheter une attribution d'eau sur le marché reviendra toujours moins cher que de payer des amendes pour dépassement du volume attribué.

Le résultat de cette politique s'est traduit par des innovations et des investissements sur de vastes zones, s'accompagnant d'une nouvelle série de problèmes d'attribution de l'eau du fait de l'échec de la mise en place de procédures d'attribution suffisamment robustes. Afin de résoudre ces problèmes, les gouvernements ont approuvé collectivement la désignation d'un groupe d'experts pour préparer un nouveau programme pour le Bassin Murray-Darling, de manière à confiner les attributions dans les limites compatibles avec une gestion durable des ressources en eau. Le rôle du gouvernement dans ce nouveau système est de fixer des limites absolues du volume d'eau pouvant être prélevé dans un fleuve et d'établir un marché pour déterminer où cette eau sera utilisée. L'eau est attribuée aux détenteurs de parts en proportion du nombre de parts qu'ils détiennent. Les détenteurs de parts sont alors libres de déterminer si ils veulent utiliser, vendre ou laisser cette eau en stock pour une utilisation future.

Source : Young (2010)

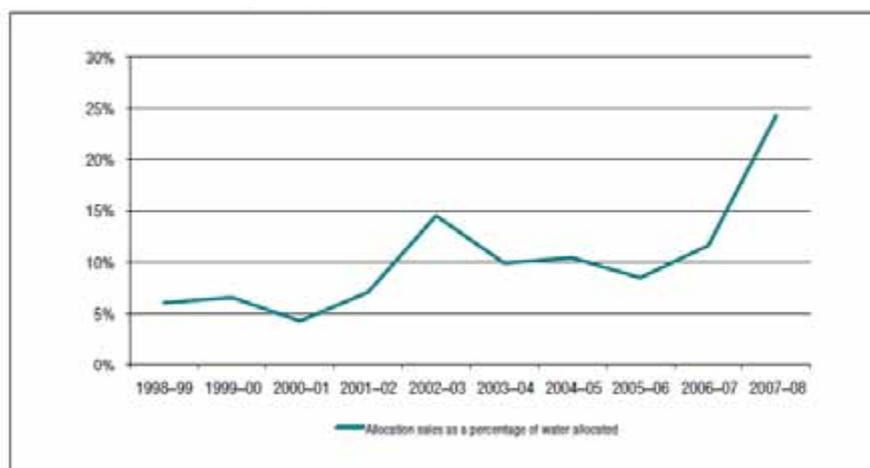


Figure 72. Pourcentage des attributions de l'eau vendues à un autre usager dans le Système fluvial combiné Murray-Darling, Australie (Source : NWC 2010)

Au niveau de la demande, il est nécessaire d'établir une distinction claire entre la fixation du prix (ce qu'on facture) qui reflète le coût du service fourni, et la fixation du prix qui reflète la pénurie³. En règle générale, les gouvernements sont réticents à utiliser la tarification comme un moyen de gérer la pénurie. Une explication de cette réticence peut être due au simple fait que les politiciens n'aiment pas augmenter les prix et les charges en période de difficulté financière comme lors d'une sécheresse. En Australie, néanmoins, et dans une moindre mesure en Espagne, les gouvernements ont autorisé le développement de marchés de l'eau comme un moyen d'afficher des prix liés à la pénurie et de faciliter un ajustement du prix de l'eau. L'avantage majeur de cette approche fondée sur le marché, est que les utilisateurs de l'eau négocient entre eux le prix à payer sans avoir besoin d'impliquer une agence étatique. De manière classique, ceux qui veulent vendre de l'eau le font à un prix supérieur de la valeur qu'ils lui donnent. Quant aux acheteurs, ils paient l'eau à un prix moindre que la valeur qu'ils se fixent. Il en résulte que les deux parties, l'acheteur et le vendeur sont plus à l'aise hors du système étatique et que les autres usagers de l'eau ne sont pas affectés par la transaction. Ceci est très différent du cas où le gouvernement fixe un prix de rareté, encaisse les redevances et décide ensuite de ce qu'il en fera.

Dans le système fluvial du Murray-Darling au sud de l'Australie, par exemple, la croissance rapide des transactions sur l'eau a été encouragée par l'établissement de registres officiels de droits ou quota d'eau, leur comptabilisation, et leur division en parts, attributions, approbations d'utilisation et approbations de travaux (voir Encadré 29 et Figure 72)

L'utilisation des systèmes de droits pour l'eau et d'attribution de l'eau, comme moyen d'envoyer des signaux sur la rareté de l'eau et de révéler des coûts d'opportunité, s'est

³ Dans la plupart des systèmes d'allocation de ressources, l'efficacité économique peut être atteinte en faisant payer le coût marginal. Lorsque les approvisionnements en eau sont abondants et fournis via un seul système de distribution, les coûts marginaux sont inférieurs au coût moyen et tendent à diminuer à mesure que l'utilisation augmente. En conséquence et si une agence d'approvisionnement en eau veut récupérer ses coûts de fonctionnement et d'entretien, le prix de la fourniture doit être fixé à un coût moyen. Cependant, lorsque les ressources en eau sont rares, le coût marginal de l'offre en eau augmente à mesure que son utilisation s'accroît. Ainsi, la règle générale à suivre pour appliquer efficacement un régime de prix est de faire payer celui des deux qui est le plus élevé : coût moyen ou marginal.

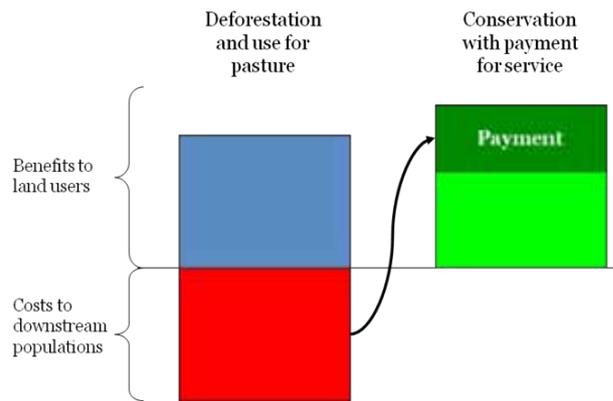


Figure 73. Paiement pour Services Environnementaux.

avérée extrêmement efficace dans le secteur de l'irrigation. Elle a conduit à des améliorations très importantes en termes de rendement et d'innovation, comme, par exemple, le remplacement de l'irrigation par submersion par des systèmes automatisés d'irrigation goutte à goutte et le développement de systèmes de contrôle total des voies de distribution. La commercialisation de l'eau a considérablement réduit l'impact négatif de la sécheresse sur les économies et les entreprises locales. Le gouvernement se tourne maintenant vers le développement d'arrangements institutionnels pour étendre le marché, et inclure l'impact des utilisations non comptabilisées de l'eau telles que : l'augmentation des surfaces de plantations forestières, la construction de barrages dans le cadre d'exploitations agricoles et la capture d'écoulements de surface non soumis à réglementation. Des arrangements sont également mis en place pour traiter les problèmes considérables de sur-attribution et tenir compte du fait que l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau a tendance à réduire les flux de retour des eaux de drainage. Un nouveau plan d'attribution est en préparation pour le Bassin Murray-Darling. Il sera conçu, entre autres, pour prendre en compte la connectivité entre les ressources en eaux de surface et souterraines et le changement climatique.

Une des implications de cette approche plus robuste de la comptabilisation de l'eau est de poser comme condition aux personnes désirant établir une nouvelle plantation forestière, que chaque impact négatif de la foresterie sur les offres d'eau soit compensé par l'acquisition d'un droit pour l'eau d'un montant suffisant pour compenser les effets négatifs de cette nouvelle plantation sur les autres usagers. Les options peuvent aller du simple achat d'un droit pour l'eau estimé en fonction de l'impact à long terme prévu de la plantation sur les autres usagers, à un droit compensant les impacts sur une base annuelle.

Vu sous l'angle des pays méditerranéens, l'aspect le plus important à tirer de l'expérience australienne est que les réformes prennent du temps et que la séquence des réformes requiert une attention minutieuse. Le développement d'un marché pour les attributions saisonnières d'eau a été, par exemple, profondément dépendant de l'introduction préalable des compteurs volumétriques, et du développement d'une culture garantissant que les irrigants utilisent uniquement le volume d'eau leur étant alloué.

Améliorer la conservation des écosystèmes forestiers comme fournisseurs d'eau est possible au travers de paiements consentis par les utilisateurs d'eau potable en aval aux utilisateurs des terres en amont, permettant d'internaliser ce qui autrement serait une externalité.

Si la facturation de l'eau et les différents systèmes d'attribution contribuent à réduire la demande et la surexploitation de l'eau, ils ne contribuent néanmoins pas à la conservation des écosystèmes qui fournissent des services en eau. Il est donc nécessaire d'établir d'autres mécanismes pour la conservation des écosystèmes tels que forêts et formations arbustives, dont les PSE (Paiements pour Services Environnementaux), les systèmes de transactions, et autres. Dans ce qui suit, l'accent est mis principalement sur l'utilisation des PSE, étant donné le succès de leur mise en oeuvre dans de nombreux pays.

Les PSE sont fondés sur deux principes conjoints : ceux qui bénéficient des services environnementaux (tels que les usagers d'eau potable) devraient payer pour leur utilisation, et ceux qui contribuent à générer ces services (tels que les utilisateurs des terres en amont) devraient être compensés pour leur fourniture (voir Figure 73). Cette approche vise à créer des mécanismes établissant des transactions entre usagers et fournisseurs de services, qui soient dans l'intérêt des deux parties, internalisant ce qui serait, sinon, une externalité. L'approche des PSE est séduisante dans la mesure où: i) elle génère un nouveau financement pour la conservation, qui ne serait pas disponible autrement ; ii) elle a de fortes chances d'être durable car les PSE dépendent de l'intérêt mutuel des usagers et fournisseurs de services, et non pas des caprices d'un gouvernement ou du financement de donateurs ; et iii) elle a de fortes chances d'être efficace, dans la mesure où elle maintient des services dont les bénéfices excèdent le coût de fourniture et ne les conserve plus en cas contraire.

Deux principaux types de programmes PSE peuvent être identifiés. Le cas idéal est celui des programmes *financés par l'utilisateur*, dans lesquels les paiements aux fournisseurs de services dépendent des paiements consentis par les usagers de ces services. De tels programmes de PSE ont plus de chance d'être efficaces, car les usagers fournissent non seulement un financement, mais également une information sur les services qui leur sont les plus bénéfiques, et sont par ailleurs fortement motivés pour s'assurer que leurs paiements soient utilisés de façon efficace. À l'inverse, les programmes PSE à *financement étatique*, dépendent du financement d'une tierce partie, généralement le gouvernement national ; ils couvrent habituellement des zones beaucoup plus grandes, mais ils ont moins de chance d'être efficaces.

La plupart des exemples réussis de mise en oeuvre de PSE se trouvent en Amérique Latine. Les utilisateurs de l'eau participant aux programmes des PSE (financés par les usagers) incluent : i) des systèmes d'approvisionnement d'eau à usage domestique pour des cités dont la taille va de Quito-Equateur, à des villes de taille moyenne comme Heredia-Costa Rica, et enfin à de nombreuses petites villes telles que San Francisco de Menéndez, El Salvador et Jesús de Otoro au Honduras ; ii) les centrales hydroélectriques publiques et privées ; iii) les systèmes d'irrigation. Les programmes cherchent tous à protéger les bassins versants dans lesquels les usagers prélèvent leur eau. Des programmes financés par le gouvernement national ont été mis en place au Costa Rica, au Mexique et en Équateur, et sont programmés dans plusieurs états brésiliens. Ces programmes ont eu tendance à se focaliser sur les services liés à l'eau.

Qu'ils soient financés par les usagers ou par le gouvernement, les programmes PSE peuvent induire l'adoption beaucoup plus durable d'un usage des terres qui préserve les offres en eau, en autorisant des paiements à long terme aux utilisateurs des terres adoptant ces pratiques. La conditionnalité des paiements, caractéristique importante des programmes PSE, permet également un plus grand contrôle sur les résultats. Dans le passé, les projets de gestion de bassin versant ont eu tendance à n'offrir seulement qu'un soutien financier à court terme, et leur impact positif sur l'usage des terres a souvent cessé une fois les projets terminés. L'étude d'un bassin versant tunisien a montré que la mise en œuvre de PSE financés par le gouvernement et remplaçant le système habituel de subventions, pouvait conduire à l'adoption d'usages des terres les plus durables dans des zones sujettes à un risque élevé d'érosion. Les défis principaux de la mise en œuvre des programmes PSE sont les suivants : (a) comprendre clairement comment l'usage des terres affecte les services en eau en aval et (b) développer des structures institutionnelles appropriées, capables de gérer efficacement et sur le long terme les PSE.

De nouvelles approches sont prometteuses pour améliorer significativement l'utilisation de l'eau par une meilleure gestion de la demande et une meilleure protection des offres. Bien que ces approches doivent être adaptées aux situations individuelles, il ya des exemples dans le monde qui ont fait leur preuve et qui peuvent être utilisés comme référence. La tendance des problèmes de l'eau à être spécifiques au bassin versant constitue un élément favorable. De nouvelles approches peuvent alors être testées dans des bassins versants individuels, sans nécessité de les généraliser à tout le pays dès le départ. Les processus peuvent également progresser à des vitesses différentes dans différents bassins versants, en fonction des capacités et des besoins locaux.

Remerciements : Nous tenons spécialement à remercier Stefano Pagiola pour ses commentaires constructifs sur ce chapitre.

Pour en savoir plus

- Croitoru, L. and Sarraf, M. (eds.) 2010. *The Cost of Environmental Degradation: Case Studies from the Middle East and North Africa*. Directions in Development. The World Bank. Washington D.C. 168 p.
- National Water Commission. 2010. *The impacts of water trading in the southern Murray-Darling Basin: An economic, social and environmental assessment*. National Water Commission, Canberra, Australia.
- Pagiola, S. and Platais, G. 2007. *Payments for Environmental Services: From Theory to Practice*. Washington: World Bank.
- Pagiola, S., Zhang, W. and Colom, A. 2010. Can payments for watershed services help finance biodiversity conservation? A spatial analysis of highland Guatemala. *Journal of Natural Resources Policy Research* 2(1): 7–24.
- Young, M.D. and McColl, J.C. 2008. Double trouble: the importance of accounting for and defining water entitlements consistent with hydrological realities. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 53: 19–35.
- Young, M.D. 2010. *Environmental Effectiveness and Economic Efficiency of Water Use in Agriculture: The Experience of and Lessons from the Australian Water Reform Programme*. Background report prepared for OECD study. Sustainable Management of Water Resources in Agriculture. Available at www.oecd.org/water.



Figure 74. Scène issue du papyrus d'Hounefer montrant la pesée du cœur lors du jugement de l'âme (1300 B.C) - Crédit: Eternal Egypt: Masterworks of Ancient Art from the British Museum par Edna R. Russmann

L'Eau pour les Forêts et les Hommes en Région Méditerranéenne : un équilibre à trouver

Ce que peut nous dire la science : messages importants

Chapitre 1. Ce qu'il faut savoir

1.1 Le cycle hydrologique en un coup d'œil: eau bleue et verte

À l'échelle mondiale et depuis les origines de notre planète, le même stock d'eau a circulé au travers des flux selon les processus et les voies du cycle hydrologique. Ce cycle relie la biosphère à l'atmosphère, les écosystèmes entre eux, y compris les systèmes anthropisés.

Une gestion rigoureuse des ressources en eau à diverses échelles géographiques est fondée sur une analyse approfondie du bilan en eau. Il s'agit d'une méthode comptable qui requiert la mesure de nombreuses données hydrologiques concernant les stocks d'eau et les flux d'entrée et de sortie.

L'utilisation du concept d'eau verte a suscité un grand intérêt ces dernières années, en particulier pour les régions sèches où l'eau verte domine le cycle hydrologique. Néanmoins, il est clair que cette approche rencontre des limites dans sa capacité à délivrer des informations pertinentes concernant la gestion et la planification des ressources en eau.

1.2 Ressources en eau, ressources forestières, et populations dans la région méditerranéenne aujourd'hui

La croissance démographique est extrêmement forte dans l'est et le sud, et particulièrement élevée dans les zones urbaines et côtières avec une croissance annuelle de 4,1 millions d'habitants et un flux de 175 millions de touristes par an.

L'irrégularité spatio-temporelle des pluies nécessite la construction de systèmes de stockage d'une capacité correspondante à une proportion élevée des eaux de surface (>90% en Syrie, >80% au Maroc et en Tunisie).

En 2005 près de 180 millions d'habitants de la région méditerranéenne étaient considérés comme « pauvres en eau » et 60 millions confrontés à la pénurie d'eau.

Le besoin en eau s'accroît énormément dans le sud et l'est de la région méditerranéenne, et l'on y répond de plus en plus par une production non durable de l'eau.

Les politiques de l'eau sont encore trop axées sur l'offre en eau induisant de ce fait des risques à long terme.

Les écosystèmes forestiers ou boisés et leurs dynamiques montrent des variations régionales malgré des traits communs. Sur les deux rives de la Méditerranée, les forêts, souvent situées dans des zones montagneuses, fonctionnent comme des « châteaux d'eau » et constituent des zones d'accueil majeures de biodiversité; leur interaction avec l'eau en amont des zones de bassins versants est donc cruciale.

Les demandes de la société vis-à-vis des forêts ont évolué vers une multifonctionnalité accrue, allant de la production de bois, à l'usage social ou aux préoccupations environnementales.

Le futur des forêts méditerranéennes est menacé par l'augmentation des risques d'incendie induits par la sécheresse.

Les territoires méditerranéens sont sujets à des processus de désertification lents mais continus, liés à une dégradation marquée du sol, elle-même due à la gestion inadéquate des terres de parcours ou d'agriculture irriguée et pluviales spécialement dans le sud et l'est de la Méditerranée.

Des politiques plus rigoureuses et des pratiques de gestion durable pour les ressources en eau, les forêts et les surfaces boisées, et pour la préservation du sol, sont nécessaires.

1.3 Les zones forestières influencent-elles le régime des précipitations ?

La déforestation tropicale à grande échelle a un impact sur les pluies et peut créer un climat plus chaud et plus sec.

Les forêts « brouillards » de montagne captent réellement l'eau des nuages mus par le vent ou par convection.

Des résultats convergents, découlant d'observations et de modélisation, suggèrent que les forêts affectent les schémas climatologiques et météorologiques locaux au travers de changements dans l'albédo, l'indice foliaire (LAI), la structure du couvert (rugosité) et l'évapotranspiration.

Une découverte récente, appelée théorie de la « pompe biotique » active, suggère que sur des surfaces dont le couvert forestier naturel est continu et étendu, l'humidité atmosphérique est transportée à l'intérieur des terres depuis l'océan vers les forêts.

Nous devons combler les lacunes et imprécisions dans la compréhension et la modélisation des réponses climatiques – y compris les régimes des précipitations - au changement de la couverture végétale.

1.4 Les flux d'eau dans les forêts

Les flux d'entrée et de sortie d'eau des forêts peuvent être observés à des échelles spatiales et temporelles différentes. Au niveau du bassin versant (première échelle spatiale à prendre en compte), ils sont généralement faciles à identifier et suivent une équation simple de bilan de masse en eau.

Les précipitations sont généralement le seul flux d'entrée d'eau dans le bassin versant. Dans les climats de type méditerranéen, les précipitations ont une variabilité interannuelle élevée et une forte saisonnalité, avec des pluies de forte intensité pendant la saison pluvieuse.

La transpiration des forêts méditerranéennes peut atteindre 75% de l'évapotranspiration réelle totale, tandis que les pertes par interception représentent environ 25%.

Bien que n'étant qu'une petite composante du bilan en eau annuel des bassins versants méditerranéens, l'écoulement d'eau de l'exutoire en sortie du bassin, c'est-à-dire l'eau bleue, joue un rôle capital dans l'alimentation en eau en aval des populations, de l'industrie et de l'agriculture irriguée.

Le type et la densité de la végétation peuvent affecter la distribution en temps et en quantité de l'écoulement du cours d'eau par leur action sur l'évaporation et l'infiltration à travers la surface du sol. La manipulation de la végétation dans les bassins versants boisés méditerranéens peut donc jouer un rôle important dans l'obtention d'un équilibre adéquat et optimisé entre les flux du bilan en eau. Il est donc nécessaire de porter une attention particulière à la multiplicité des objectifs de gestion, du fait des contradictions et des compromis qui sont impliqués.

1.5 Le rôle des forêts méditerranéennes dans la conservation de l'eau et du sol

Dans la région méditerranéenne, les sols constituent une composante fragile des écosystèmes terrestres. Ils sont sensibles aux risques d'érosion, car exposés à de fortes et intenses précipitations, provoquant un phénomène de ruissellement marqué, accéléré par une topographie vallonnée ou montagneuse. Les questions de l'eau et des sols sont donc indissociables.

L'énergie cinétique des gouttes de pluie ayant un impact sur le sol peut être réduite par la végétation, si le taux de couvert du sol excède 20 à 30% avec de légères différences entre les plantes, formations arbustives buissonnantes et arborées.

Les sols forestiers ont un avantage, comparativement aux autres types de sols, quant à la porosité et à la conductivité hydraulique, et une moindre sensibilité à l'effet « splash » de la pluie.

La genèse du ruissellement dépend de l'état de la surface de sol, de sa teneur initiale en eau et bien sûr de l'intensité de la pluie. Le couvert forestier influe sur le ruissellement, mais seulement en retardant son déclenchement et en ralentissant l'établissement d'un régime de fort ruissellement.

Les pertes en sol sous forme de charges en sédiments dans l'eau de ruissellement, et leurs dynamiques durant les épisodes pluvieux, dépendent également de l'état de la surface de sol. Sous couvert forestier, comparé aux autres types de couverts végétaux, la limitation de l'érosion est liée au retard du déclenchement du ruissellement et de la lenteur de l'instauration du régime de fort ruissellement comme indiqué ci-dessus.

L'implication du couvert des forêts méditerranéennes dans la conservation de l'eau et des sols est bien différente des clichés trop souvent évoqués et acceptés, qui considèrent les forêts comme offrant une protection totale contre les processus d'érosion.

Une étude plus approfondie s'avère nécessaire pour développer un corpus de connaissances sur la conservation de l'eau et du sol en conditions forestières méditerranéennes. Un programme concerté de recherche pourrait offrir des perspectives intéressantes.

Chapitre 2. L'eau bleue

2.1 Hydrologie des écosystèmes méditerranéens

La plupart des ressources en eau de la région méditerranéenne sont produites dans les montagnes humides, tandis que les zones de basse altitude et côtières sont des consommatrices d'eau.

Les flux des cours d'eau varient fortement en région méditerranéenne. Les petits bassins alimentent de petits cours d'eau typiquement sporadiques ou éphémères (ramblas, oueds), qui laissent la place à des crues soudaines. Les grands bassins versants ont des cours d'eau saisonniers ou permanents dont les étiages sont alimentés par les eaux souterraines.

Les principaux processus de génération des ressources en eau en région méditerranéenne (comme dans les climats plus humides) sont liés à la percolation de l'eau à des niveaux plus profonds, une fois que la capacité en rétention d'eau du sol est atteinte. Mais dans les climats plus secs, ces processus sont en général aussi liés à des pluies dont le niveau excède la capacité d'infiltration de la partie supérieure du sol, ce qui entraîne le ruissellement provoquant l'érosion et des risques d'inondation.

Les caractéristiques de la couverture du sol et de son état de surface jouent un rôle important, bien que complexe, dans les processus hydrologiques et érosifs.

La préservation de la qualité écologique des cours d'eau méditerranéens requiert la protection du régime hydrologique, de la qualité de l'eau, de la morphologie du cours d'eau, de la ripisylve et du transport de sédiments.

2.2 Les ressources en eau dépendent du couvert végétal et de l'usage des terres

Le couvert végétal et sa gestion peuvent avoir un impact marqué sur la partition de l'eau et de l'énergie.

Le couvert et les sols forestiers ont en général un effet bénéfique sur la qualité des eaux souterraines et de surface générées dans le bassin versant.

Quelques mythes sur la forêt et l'eau :

- a) Les effets bénéfiques des forêts ont parfois été exagérés par les « écologistes » soucieux de protéger les zones naturelles, et par les forestiers « productivistes » désireux de justifier de nouvelles plantations.
- b) Les forêts peuvent parfois accroître les débits d'étiage, mais, en général, il est plus probable qu'elles les réduisent.
- c) La capacité des forêts à réguler les inondations est souvent beaucoup plus faible qu'on ne l'affirme souvent ; elle se limite aux orages pas trop intenses et aux bassins versants de taille réduite.

Chapitre 3. L'eau verte

3.1 L'eau verte, élément indispensable des processus intervenant dans les écosystèmes forestiers et leurs fonctions

L'eau verte est nécessaire, non seulement comme fondement de la biologie et de la vie des arbres, mais aussi pour permettre le fonctionnement de toutes les composantes de la biodiversité forestière (micro-organismes, insectes, animaux, plantes) impliquées dans les processus écosystémiques de base. Bien que la photosynthèse consomme très peu d'eau, les plantes terrestres ont besoin d'une circulation d'importantes quantités d'eau pour permettre la fixation du CO₂. L'eau est aussi essentielle à la circulation de nombreux éléments à travers l'écosystème.

L'étude des processus naturels de l'écosystème, qui dépendent en grande mesure de l'eau, permet de comprendre leur influence sur les fonctions écosystémiques et sur les services qui y sont liés. L'eau est très souvent un facteur limitant dans les écosystèmes forestiers méditerranéens. Le manque d'eau peut entraîner une altération prononcée des fonctions écosystémiques, et avoir un impact négatif sur la fourniture de biens et services pour les sociétés humaines.

L'eau verte est nécessaire pour alimenter et maintenir les processus au sein des écosystèmes, ainsi que les fonctions, biens et services dispensés par ces écosystèmes.

3.2 Fonctionnement hydrique des arbres: transpiration et photosynthèse

L'énorme quantité d'eau transpirée pour fixer le carbone est à souligner. Dans le cas du chêne vert (*Quercus ilex*), des valeurs d'environ 3-5 (mmols CO₂ /mol of H₂O) sont classiques. Une fois décompté le carbone réémis dans l'atmosphère par la respiration, la

fixation de 1g de carbone peut entraîner un coût en eau 1.000 à 1.500 fois supérieur.

Dans la région méditerranéenne, il est clair que les forêts sont de façon prédominante limitées en eau pendant les périodes d'été et limitées en énergie pendant les périodes d'hiver.

Le mouvement de l'eau à travers les membranes cellulaires est facilité par des protéines appelées aquaporines. Ces protéines appartiennent à une famille protéinique essentielle, dont les membres existent dans pratiquement tous les organismes vivants.

La réponse la plus rapide des plantes pour contrôler les pertes en eau est la fermeture des stomates, ce qui réduit la conductance stomatique pour l'eau, mais en même temps réduit leur gain en carbone.

3.3 Comment les espèces végétales s'adaptent au stress hydrique

Les plantes ont développé des stratégies diverses, à différentes échelles temporelles, pour gérer la disponibilité réduite en eau du sol : ajustements phénologiques, contrôle du statut de l'eau et caractères morphologiques et anatomiques qui peuvent varier entre les espèces et à l'intérieur de celles-ci.

Lors d'un stress hydrique prononcé, une embolie des vaisseaux conducteurs (empêchant la sève de monter du sol vers les feuilles) peut avoir lieu et conduire à la dessiccation et la mortalité des branches et de l'arbre. Les seuils de la pression critique du xylème liés à l'embolie sont fortement variables entre les espèces, les espèces méditerranéennes étant parmi les plus résistantes à la sécheresse.

Le haut niveau de résistance à la sécheresse des espèces forestières méditerranéennes se paie au prix d'une forte densité du bois et d'une faible croissance.

Les caractères adaptatifs à la sécheresse augmentent les chances de survie des plantes soumises à un déficit hydrique du sol. Les variations entre espèces et au sein des espèces (entre populations) permettent la sélection de sources de graines mieux adaptées pour la plantation.

Une diversité au sein des espèces végétales méditerranéennes a été observée dans leur capacité d'accumuler la biomasse par la photosynthèse pour une quantité donnée d'eau utilisée, appelée efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE). Cela ouvre la voie à des applications potentielles dans les domaines de l'amélioration génétique et de la sylviculture.

Chapitre 4. Eau bleue et/ou verte : quel compromis possible ?

4.1 Sécuriser l'eau pour les arbres et les hommes : les voies possibles

Dans les conditions méditerranéennes, la réduction du LAI (par éclaircies) ne réduit pas la transpiration totale car les arbres restants utilisent une grande partie de l'eau rendue disponible par les arbres coupés. En conséquence, ils ont un meilleur taux de survie.

Le maintien des arbres en vie, même sans augmentation de la biomasse, peut avoir un coût énorme en eau, en particulier pour les espèces sempervirentes, communes dans la région méditerranéenne.

Dans l'environnement méditerranéen limitant en eau, seuls des changements drastiques du couvert forestier, au-delà de l'intensité des éclaircies classiques, peuvent conduire à un accroissement de la production d'eau bleue.

La question d'un changement drastique du couvert forestier pour accroître la production d'eau bleue en aval mérite une grande attention et doit également intégrer tous les biens et services liés au couvert initial.

Les usagers d'amont peuvent bénéficier des utilisations directes des plantations forestières, tandis que les usagers d'aval, utilisateurs des ressources en eau, sont affectés par les conséquences du changement dans la gestion des sols en amont sur la quantité et la qualité de l'eau atteignant les réservoirs.

Les investissements pour les plantations forestières induisent des revenus directs plus faibles par comparaison avec le scénario « business as usual », mais pourraient générer des bénéfices plus importants pour la société si les externalités à l'échelle locale et nationale (augmentation de la fertilité des sols et de la conservation de l'eau), et les externalités à l'échelle planétaire (protection de la biodiversité, séquestration du carbone) étaient incluses.

4.2 Équilibrer la répartition de l'eau pour les écosystèmes, les biens et services et les hommes

Les biens comme les services fournis par l'eau et les écosystèmes sont fondamentaux pour notre existence.

L'eau bleue et l'eau verte sont nécessaires à la fourniture des biens et services dont nous avons besoin.

Dans la nature, la majorité de l'eau de pluie est utilisée par les écosystèmes, fournisseurs de biens et de services.

Une réduction drastique de la surface forestière pourrait accroître la disponibilité en eau mais influencerait négativement la fourniture des biens et services écosystémiques.

4.3 Gestion intégrée de l'eau à l'échelle du paysage : la science au service du développement, l'exemple de la Tunisie

Les connaissances fondées sur le calcul de la réserve utile en eau du sol (RU) permettent de : i) simuler des résultats divers pour la pluviométrie annuelle; ii) comparer la capacité de stockage en eau du sol des bassins versants avec celles des barrages de rétention; iii) simuler les besoins en irrigation de différents couverts végétaux. Finalement, elles apportent des outils pour trouver des équilibres entre l'eau verte et l'eau bleue.

Les effets du changement de la couverture végétale, y compris le couvert forestier, et des techniques de conservation de l'eau et du sol, peuvent être prédits grâce au calcul de l'érosion en nappe et en ravine et à l'utilisation de méthodes de simulation.

4.4 Vers une gestion écologique, socio-économique et hydrologique intégrée

Le *paradigme de l'eau bleue* est fondé sur l'évaluation de la disponibilité des ressources en eau bleue à des fins humaines, en tant que variable dépendante des effets de la gestion des forêts et d'autres usages des terres et types de gestion. Cette évaluation peut être réalisée à l'aide de modèles hydrologiques mais également d'indicateurs politiques.

Une plus grande attention devrait être accordée au *paradigme de l'eau verte* – en plus du paradigme de l'eau bleue – car ce sont les flux d'eau verte qui garantissent les fonctions des principaux écosystèmes.

Le défi de l'intégration des intérêts de l'amont et de l'aval, y compris les écosystèmes terrestres et aquatiques, peut être relevé en réconciliant les paradigmes de l'eau bleue et de l'eau verte. Concrètement, ceci peut être accompli par l'utilisation de méthodes spécifiques comme l'indicateur d'impact sur l'eau « terrestre et aquatique ».

L'intégration de l'eau aux autres services écosystémiques devrait être fondée sur une meilleure compréhension de l'interaction de ces services entre eux.

De nouveaux outils d'analyse de compromis et d'optimisation de la gestion des terres sont aujourd'hui disponibles pour l'intégration de l'eau aux autres services écosystémiques.

Intégrer la gestion écologique, socio-économique et hydrologique, constitue une approche clé de la durabilité.

4.5 L'empreinte « eau » de notre vie quotidienne: combien d'eau utilisons-nous ?

La gestion de l'eau, nécessaire aux hommes et à la nature, implique la prise en compte des besoins multiples des "anthropo-eco-systèmes". L'analyse de l'empreinte « eau » permet la traçabilité de la fourniture et de la consommation d'eau et d'identifier les impacts des activités humaines. Elle donne une information claire sur les risques et les responsabilités

L'évaluation de l'empreinte "eau" par produit ou matière première, activité sectorielle ou filière, fournit un nouvel angle d'attaque des questions liées à l'eau à différentes échelles (locale, nationale, régionale et planétaire) et ouvre la voie à de nombreuses applications dans les domaines économiques, du commerce, de l'environnement, des politiques, de l'industrie, etc.

L'agriculture est responsable au niveau mondial, de l'empreinte "eau" la plus marquée. Au niveau mondial et en moyenne, la production alimentaire demande soixante-dix fois plus d'eau que la consommation des ménages. Pour produire une ration de 3000 kcal/personne/jour (dont 20% de protéines animales), 3500 litres d'eau sont nécessaires contre 5l/personne et par jour pour un usage domestique.

Les plantations forestières en région méditerranéenne visant au stockage du carbone sont très discutables en raison de leur coût élevé pour l'eau.

L'empreinte « eau » : un concept et un instrument intéressant...mais à combiner avec d'autres approches.

4.6 Leçons du passé : une perspective historique sur l'hydrologie forestière et la conservation du sol dans le nord et le sud du Bassin méditerranéen.

En réponse à des catastrophes hydrologiques majeures, les vastes programmes de gestion des bassins versants, fondés sur le génie civil et biologique, entrepris en Europe depuis la seconde moitié du 19^e siècle, ont connu une large réussite malgré une connaissance limitée en hydrologie forestière et une prise en compte insuffisante des facteurs sociaux. Le défi aujourd'hui est de maintenir les fonctions de protection à travers la rénovation des zones plantées et des équipements, dans un contexte économique et social totalement différent.

Les très vastes programmes de conservation des sols et de l'eau entrepris sur la rive sud de la Méditerranée, avec une approche plus intégrée incluant le pastoralisme, l'agriculture et la foresterie, ont obtenu des résultats quelque peu contrastés, bien au-dessous des attentes. On peut l'attribuer à des connaissances scientifiques insuffisantes et une approche excessivement centralisée, directive et autoritaire.

La mise à jour et l'ajustement des politiques de conservation de l'eau et des sols en liaison avec les arbres et forêts, doivent être repensés dans le contexte actuel. Il est urgent d'entreprendre cette démarche aussi vite que possible, sans attendre de nouvelles catastrophes, en utilisant les connaissances les plus récentes et en intégrant tous les aspects liés au développement durable.

Chapitre 5. Quelques défis majeurs

5.1 Les implications du changement climatique sur les forêts et l'hydrologie

Le Bassin méditerranéen est une région climatiquement complexe, composée d'une mosaïque variée de sous-types climatiques, induisant des milieux écologiques très contrastés.

Le Bassin méditerranéen subit un processus de réchauffement depuis les années 1970, similaire à celui de la planète, mais à un niveau supérieur. Les modèles climatiques sont concordants pour prédire clairement une augmentation généralisée des températures tout au long du 21^e siècle.

L'évolution des régimes futurs de précipitations pour le Bassin méditerranéen comporte des incertitudes. Toutefois la diminution des hauteurs de pluie est très probable, avec peut-être une variabilité temporelle des pluies plus marquée qu'aujourd'hui.

Pour la moitié froide de l'année, les prédictions de pluies par les modèles climatiques montrent une certaine augmentation au nord de la Méditerranée et une diminution au sud. Par contre en été, les modèles prédisent une diminution généralisée des précipitations.

L'accroissement de la température augmentera la demande de l'évapotranspiration et, même sans diminution des hauteurs de pluies, ceci entraînera une réduction de la teneur en eau des sols, une augmentation du stress hydrique pour la végétation et une baisse des ressources en eau générées dans les zones pluvieuses.

Le Bassin méditerranéen connaîtra vraisemblablement une plus grande fréquence et une plus grande intensité des sécheresses et des vagues de chaleur, et en conséquence, plus de feux de forêts. Les précipitations torrentielles pourraient également augmenter, bien que cette prédiction demeure très incertaine.

Les forêts peuvent subir de grands changements en surface, en raison du changement climatique, ce qui peut également influencer sur la disponibilité future des ressources en eau.

5.2 Faire face aux changements d'occupation des sols et à la croissance démographique

La forte croissance démographique au Sud et à l'Est va augmenter les besoins en nourriture, eau, sol et énergie et accroître la pression sur les ressources naturelles. On s'attend à ce que les risques naturels et sociaux soient les plus élevés sur le littoral méditerranéen, dont la qualité et l'intégrité sont menacées.

Les changements d'usage des terres affecteront les dynamiques spatiales et provoqueront des dégradations environnementales.

Si les évolutions actuelles des zones rurales (forêts, parcours, champs cultivés) se poursuivent, elles induiront ou aggraveront certains risques majeurs conduisant à une non durabilité des territoires :

- Désertification et pauvreté rurale dans les PSEM.
- Impacts directs et indirects : augmentation de la pression sur les villes, accroissement de l'exode rural, envasement des barrages, perte de biodiversité.
- Perte de terres agricoles de qualité du fait de l'urbanisation et des infrastructures (estimée à plus de 1,5 million d'hectares en 2025).
- Dégradation des ressources en eau et augmentation de la vulnérabilité aux feux et aux crues.

La demande croissante en eau, que ce soit pour l'agriculture, l'industrie ou l'usage domestique, accroît la pression sur cette ressource.

De nouvelles politiques offrent des solutions en améliorant la gestion de la demande et de l'offre en eau.

La gestion durable des ressources en eau et de la demande doit avant tout reposer sur une approche intégrée au niveau des bassins versants, et sur un principe de solidarité amont/aval entre l'arrière-pays et la côte.

Les politiques doivent tenir compte de la richesse du patrimoine des zones rurales méditerranéennes, et la diversité de leurs fonctions, comme autant d'atouts majeurs et d'opportunités pour le futur, et les adapter aux changements. La gestion durable de ces

zones doit prendre en compte la multiplicité de leurs fonctions et être dirigée vers la prévention des risques naturels (feux de forêt, inondations).

Les approches territoriales sont particulièrement nécessaires pour garantir la gestion durable des ressources naturelles, dont les forêts.

La gestion durable des ressources et des demandes en eau, et des zones rurales et espaces boisés, doit avant tout reposer sur une approche intégrée au niveau du bassin versant et sur un principe de solidarité amont/aval entre arrière-pays et régions côtières. Elle doit également être en harmonie avec toutes les politiques sectorielles : agriculture, énergie, tourisme, environnement et aménagement du territoire pour faciliter l'arbitrage de la répartition des ressources en eau et en sols entre les différents usages.

5.3 Le reboisement pour combattre la désertification dans les zones arides : une entreprise à raisonner

Les processus biophysiques conduisant à la désertification consistent principalement en une augmentation du ruissellement et de l'érosion des sols, consécutive à une réduction importante de la canopée. Ils peuvent être évités ou corrigés par le reboisement, si ce dernier est réalisé de façon adéquate, en apportant toute l'attention nécessaire au bilan d'eau dans le bassin versant.

Le reboisement en zones arides et semi-arides doit faire appel aux techniques de collecte des eaux de pluie comme la construction de terrasses en courbes de niveau ou en-core de petits barrages.

L'agroforesterie peut accroître la productivité des reboisements sur les terres sèches.

La difficulté de régénération de l'étage dominant, et du sous-étage au sein des reboisements en zone sèche, est un obstacle majeur à la durabilité des forêts. Cependant, encourager la régénération des espèces autochtones dans ces forêts sèches, peut favoriser la diversité structurelle et des espèces, ainsi que les services écosystémiques.

5.4 Maintenir en bon état les écosystèmes ripicoles et aquatiques : défis et solutions grâce à la gestion des ripisylves

Les ripisylves jouent un rôle fondamental dans le maintien de la biodiversité, la régulation des flux d'énergie et de nutriments entre les environnements terrestres et aquatiques, et dans le maintien de la santé des écosystèmes aquatiques adjacents et des ressources en eau. Leur futur est menacé en région méditerranéenne par les sécheresses croissantes, la surexploitation de l'eau et la pollution.

Les ripisylves affectent réellement le bilan hydrique annuel en réduisant l'écoulement de l'eau.

Les ripisylves agissent comme des filtres de polluants et améliorent la qualité des eaux souterraines.

La gestion des ripisylves est un outil pour améliorer la qualité de l'eau et protéger les habitats ripicoles et des cours d'eau, ainsi qu'une nécessité pour les milieux méditerranéens vulnérables, mais c'est malheureusement une question négligée par les politiques environnementales.

5.5 L'économie de l'eau et des forêts : enjeux et recommandations pour fonder une politique

Dans un contexte de pénurie de ressources en eau, des politiques principalement centrées sur l'offre ont conduit à une mauvaise utilisation et une surexploitation de l'eau dans la région méditerranéenne. Inverser ces tendances est possible en agissant à la fois sur la demande et l'offre, par le biais d'instruments économiques adaptés.

Une facturation appropriée de l'eau et une commercialisation adéquate peuvent contribuer à réduire la surexploitation de l'eau.

Améliorer la conservation des écosystèmes forestiers comme fournisseurs d'eau est possible au travers de paiements consentis par les utilisateurs d'eau potable en aval aux utilisateurs des terres en amont, permettant d'internaliser ce qui autrement serait une externalité.

Glossaire

Le glossaire ci-après a été compilé à partir de diverses sources : Bank-Netherlands, 2001 ; Programme de partenariat pour l'eau – FAO, 2004 - Glossaire des termes hydrologiques du USGS. <http://www.ga.water.usgs.gov/edu/dictionary.html>

Aquifère

Formation géologique ou structure qui stocke et/ou transmet de l'eau, comme les puits et les sources. L'utilisation de ce terme est généralement restreinte aux formations capables de contenir de l'eau en quantité suffisante pour constituer un approvisionnement utilisable par les hommes.

Bassin (ou bassin fluvial)

Plus généralement utilisé pour décrire une région drainée par un vaste système fluvial (implique un bassin versant de grande dimension)

Bassin versant

(1) Zone de drainage naturel se trouvant dans les limites définies par des lignes de crête dont les eaux alimentent un exutoire commun. (2) La distinction entre deux zones qui sont drainées par des systèmes fluviaux différents. L'usage courant de ce mot renvoie non seulement à la division per se mais également à la zone de drainage naturel à l'intérieur de ces limites. L'échelle du bassin versant peut varier en surface de quelques hectares à des milliers de kilomètre carrés.

Collecte des eaux de pluie

Collecte des eaux de pluie venant des toits des habitations ou de surfaces de sol préparées pour fournir de l'eau potable, d'irrigation, ou pour la recharge des aquifères.

Conductance stomatique

La conductance stomatique est la vitesse à laquelle l'eau s'évapore à partir des pores d'une plante ; elle est directement liée à la taille relative de l'ouverture stomatique. En gros, plus le taux d'évaporation est élevé, plus la conductance de la feuille est élevée. Il faut également noter que l'humidité, l'état hydrique de la plante et l'intensité de la lumière sont aussi des facteurs qui agissent sur la conductance stomatique.

Cours d'eau

Terme général pour caractériser : a) un cours d'eau s'écoulant de façon permanente ; b) un cours d'eau naturel contenant de l'eau au moins une partie de l'année. En hydrologie, terme généralement appliqué à l'eau s'écoulant dans une voie d'eau naturelle, par opposition à un canal.

Crues soudaines

Événements de ruissellement de courte durée (moins de 6 heures) dans de petits ou moyens cours d'eau qui alimentent les aquifères par les *pertes de transmission*, mais présentent des risques importants pour les personnes et les biens.

Cycle hydrologique

Transfert en boucle de vapeur d'eau depuis la surface de la terre vers l'atmosphère par évapotranspiration, retour de l'atmosphère vers la terre sous forme de précipitations, et ruissellement vers les cours d'eau, rivières et lacs et finalement les océans.

Débit

Volume d'eau qui passe en un point donné dans une période de temps donnée.

Débit de pointe

Écoulement maximum instantané d'un cours d'eau ou rivière à un point donné. Il a lieu généralement à l'instant ou au voisinage du moment du niveau maximal.

Écoulement du cours d'eau

L'écoulement d'eau qui a lieu dans une voie d'eau naturelle. Terme plus général que ruissellement, il peut être appliqué à l'écoulement qu'il soit ou non affecté par un prélèvement ou une régulation (barrage).

Eau de surface

Eau qui se trouve à la surface de la Terre, par exemple dans un cours d'eau, une rivière, un lac ou un réservoir.

Eau souterraine

(1) Eau qui coule ou s'infiltré à travers les sols ou la roche et les sature, alimentant sources et puits. La surface supérieure de la zone saturée est appelée nappe phréatique. (2) Eau stockée sous terre dans les fissures de la roche et dans les pores des matériaux géologiques qui forment la croûte terrestre.

Écoulement de base

Écoulement permanent d'un cours d'eau en l'absence d'un ruissellement direct. Il comprend les écoulements des cours d'eau naturels et induits par l'homme. L'écoulement de base naturel est largement alimenté par les écoulements des nappes souterraines.

Flux de retour

(1) Partie d'un flux d'eau capté qui n'est pas utilisé pour la consommation et est re-dirigé vers sa source originale ou un autre cours d'eau. (2) (Irrigation) Eau de drainage provenant des zones de cultures irriguées qui retourne vers l'hydrosystème pour être utilisée en aval.

Gestion du bassin versant

La gestion du bassin versant est à la fois une entreprise sociale et technique : i) du point de vue technique : réduction de l'érosion des sols, promotion d'un couvert végétal et gestion du cycle hydrique ; ii) du point de vue social : promotion des processus de négociation entre toutes les parties prenantes du bassin versant (harmonisation des activités des nombreux utilisateurs des terres dont les objectifs sont multiples et souvent contradictoires). Le but est de garantir une bonne intégration des objectifs environnementaux avec les objectifs culturels, sociaux, économiques et locaux.

GIEC/IPCC

Groupe d'experts inter-gouvernemental sur l'évolution du climat.

Indice foliaire

Rapport de la somme des surfaces de la partie supérieure des feuilles de tous les végétaux présents sur une zone donnée par la surface au sol de cette zone.

Infiltration

(1) Flux d'eau depuis la surface du sol vers le sous-sol. (2) Mouvement lent de l'eau à travers de petites fissures, pores, interstices, etc., d'un matériau, vers - ou à partir de - un cours d'eau de surface ou souterrain. (3) Perte par infiltration dans le sol d'eau issue d'un canal, fossé de drainage, contre-canal, ruisseau, réservoir, système de stockage ou autre cours d'eau, ou d'un champ.

Inondation

Débordement d'eau sur les terres qui sont utilisées ou utilisables par l'homme et ne sont pas en conditions normales couvertes par l'eau. L'inondation a deux caractéristiques essentielles : elle est temporaire et affecte des terres adjacentes à un cours d'eau, une rivière, un lac ou un océan.

IPCC/GIEC

Groupe d'experts inter-gouvernemental sur l'évolution du climat.

Köppen (types climatiques)

Le système de classification des climats de Köppen est le plus utilisé dans le monde. Les frontières des types climatiques ont été choisies en tenant compte de la distribution de la végétation autochtone. Il combine les moyennes des températures et précipitations mensuelles et annuelles ainsi que la saisonnalité des précipitations.

Lessivage

Processus par lequel les matériaux solubles dans le sol, tels que les sels, nutriments, pesticides ou contaminants, sont transportés par l'eau vers une couche inférieure du sol, ou sont dissous et emportés par l'eau à longue distance.

Nappe phréatique

La partie supérieure de la surface de l'eau dans la partie saturée d'un aquifère.

Oscillation méditerranéenne

Une *téléconnection* existante entre les conditions méditerranéennes occidentales (Alger) et orientales (Le Caire) liée aux séries temporelles de données de température et de précipitations.

Percolation

(1) Mouvement de l'eau dans la roche ou le sol à travers les interstices. (2) Entrée d'une partie de l'eau du cours d'eau dans les matériaux du lit pour contribuer à la recharge des nappes souterraines.

Pertes de transmission

Perte de flux d'eau le long des cours d'eau due à l'infiltration profonde dans des alluvions ou une roche-mère perméable. Il s'agit communément du mécanisme principal de la *recharge* de l'aquifère dans les climats secs.

Porosité

Mesure de la capacité en eau de la roche souterraine. En ce qui concerne le mouvement de l'eau, ce n'est pas seulement le volume total de la porosité qui est important, mais le volume des vides et leur degré d'interconnexion, car les pores dans la formation peuvent être ouverts, ou interconnectés, ou bien fermés et isolés. Par exemple, l'argile peut avoir une porosité élevée par rapport au contenu potentiel en eau, mais représente un milieu pauvre en tant qu'aquifère car les pores sont généralement très petits.

Qualité de l'eau

Terme utilisé pour décrire les caractéristiques biologiques, physiques et chimiques de l'eau, généralement en relation avec son aptitude à une utilisation particulière.

Recharge

Alimentation des eaux souterraines (puits et sources) par une percolation d'eau profonde et significative. Flux d'entrée d'eau dans un réservoir d'eau souterraine depuis la surface. Également, le volume d'eau ajouté par ce processus.

L'infiltration des précipitations et leur mouvement vers la nappe phréatique est une forme de recharge naturelle.

Roche mère

Roche solide en sous-sol et roche superficielle. Terme général se référant à la roche solide qui se trouve au dessous du sol, des sédiments meubles ou autres matériaux non consolidés.

Rosby (Ondes de)

Les ondes de Rossby (ou ondes planétaires) sont des trajectoires sinueuses géantes dans les vents de haute altitude qui ont une influence majeure sur la distribution spatiale du temps, causant des corrélations spatiales atmosphériques positives ou négatives.

Ruissellement

Partie des précipitations, neige fondue, ou eau d'irrigation qui apparaît de façon naturelle sous forme d'écoulement de surface, dans les rivières, et les systèmes de drainage et de collecte des eaux usées.

Services environnementaux (SE)

Terme générique se référant aux externalités positives ou aux bénéfices externes qui sont générés par un usage spécifique des terres. Généralement, les SE sont peu mis en marché, et aucune compensation économique n'est versée pour leur fourniture. En conséquence, les utilisateurs des terres ont tendance à ne pas prendre en compte les SE lors de la prise de décisions de gestion.

Sol fersialitique

Sol rouge présent dans les régions méditerranéennes et subtropicales.

Sol isohumique

Sol à dominance argileuse, avec incorporation profonde par voie biologique de la matière organique stabilisée par une phase de maturation climatique prolongée.

Sol vertique

Sols argileux avec des propriétés de retrait/gonflement qui présentent de larges fissures lorsqu'ils sont secs et ont des surfaces de glissement et/ou agrégats structuraux lenticulaires en profondeur.

Téléconnexion

La téléconnexion en science atmosphérique renvoie aux anomalies climatiques liées les unes aux autres à de longues distances (généralement des milliers de kilomètres).

Turbidité

Une mesure de la non-transparence de l'eau due à la présence de matières en suspension.

Zone insaturée

La zone immédiatement au dessous de la surface du sol où les pores contiennent à la fois de l'eau et de l'air, mais ne sont pas totalement saturés d'eau. Ces zones diffèrent des aquifères, dans lesquels les pores sont saturés d'eau.

What Science Can Tell Us



Nous vivons dans un contexte compliqué et changeant, avec des interactions à double sens entre les écosystèmes, la société, l'économie et l'environnement. La collection d'EFI "What Science Can Tell Us" (ce que la Science peut nous dire) est fondée sur des expertises scientifiques collectives, fournissant aux décideurs, politiques, citoyens et à la société en général, des informations de base et de nature interdisciplinaire sur des questions forestières importantes et complexes.



EUROPEAN FOREST INSTITUTE

Torikatu 34, FI-80100 Joensuu, Finland
Tel. +358 10 773 4300, Fax. +358 10 773 4377
www.efi.int

L'Institut Européen de la Forêt (EFI) est une organisation internationale établie par des États européens. Il conduit des travaux de recherche et fournit des conseils sur les politiques liées aux questions forestières. Il facilite et stimule la mise en réseau en rapport avec la forêt et favorise la fourniture d'informations objectives et pertinentes pour les décideurs sur la forêt et la sylviculture. Il défend également la recherche forestière et les informations solides sur le plan scientifique comme base des décisions politiques relatives à la forêt.