



HAL
open science

Le cycle de l'eau dans les prairies : ses spécificités par rapport aux autres végétations naturelles et cultivées

André A. Granier

► To cite this version:

André A. Granier. Le cycle de l'eau dans les prairies : ses spécificités par rapport aux autres végétations naturelles et cultivées. Prairies - Herbivores - Territoires : Quels enjeux ?, Nov 2006, PARIS, France. hal-02751342

HAL Id: hal-02751342

<https://hal.inrae.fr/hal-02751342>

Submitted on 3 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Chapitre 2

Le cycle de l'eau dans les prairies

Ses spécificités par rapport aux autres végétations naturelles et cultivées

André Granier

Bien que leur surface soit en régression régulière depuis ces dernières décennies, les prairies occupent encore en France un peu plus de 20 % du territoire national, se situant juste après les forêts qui sont en extension régulière et les cultures. Les grands types de couvertures végétales, forêts, prairies, cultures, se distinguent par leurs caractéristiques physiologiques et morphologiques. Sous une même demande climatique, ces caractéristiques modulent le bilan d'énergie et les cycles biogéochimiques des éléments majeurs (eau, carbone, azote, éléments minéraux). Nous nous intéresserons ici au cycle hydrologique.

L'eau devient, même sous nos régions, un enjeu qui prend progressivement de plus en plus d'importance à cause de ses multiples usages et des conflits qui leur sont associés. L'agriculteur et le sylviculteur tentent d'optimiser l'utilisation de l'eau disponible pour la végétation en recherchant une croissance maximale en matière sèche par rapport à la consommation en eau du couvert. Le surplus d'eau qui n'est pas consommé par la végétation quitte la parcelle en suivant deux voies : l'infiltration sub-v verticale vers le sous-sol, qui peut alors alimenter les nappes souterraines, et l'écoulement vers le réseau hydrographique. Les activités humaines vont alors pouvoir utiliser une partie de cette eau excédentaire pour l'irrigation, l'industrie, la consommation des ménages ou pour les activités récréatives.

Le constat actuel est double :

- la consommation globale en eau ne cesse d'augmenter dans tous les secteurs des activités humaines ;
- les prévisions climatiques pour le siècle en cours sont alarmistes : les spécialistes prévoient en Europe de l'ouest une augmentation des précipitations hivernales et un accroissement des sécheresses estivales. La France a connu ces dernières années des sécheresses exceptionnelles en durée et en intensité, rapprochées dans le temps, qui ont eu des conséquences fortes sur l'agriculture, la foresterie et sur l'environnement.

Prairies, herbivores, territoires : quels enjeux ?

La gestion des territoires, – tant les modifications de l'utilisation des terres que les pratiques culturales – a des effets directs sur la ressource en eau. La transformation progressive des prairies permanentes en zones forestières dans certaines régions de montagne ou en cultures a ainsi des conséquences importantes sur la ressource en eau. Nous analyserons les caractéristiques du fonctionnement hydrique des prairies en mettant l'accent sur ses spécificités par rapport aux autres végétations et en dégagant les conséquences en matière de disponibilité de la ressource en eau⁵.

Surfaces herbagères et ressources en eau

Le maintien des surfaces toujours en herbe pour lutter contre la progression de la forêt est un enjeu, non seulement pour les territoires enherbés mais pour le territoire national tout entier. Conserver des herbivores dans le Massif Central paraît essentiel pour les écoulements de la Loire en période d'étiage. Ces écoulements conditionnent le refroidissement des centrales nucléaires : quand les centrales nucléaires de la Loire fonctionnent, la France exporte l'électricité à l'étranger, alors que lorsqu'elles cessent, par manque d'eau, la France doit importer de l'électricité.

► Méthodes d'étude aux différentes échelles

Depuis longtemps, physiologistes et écophysiologistes ont proposé des mesures réalisées à l'échelle de l'organe (feuilles, tiges, racines) ou de la plante entière. Pour les arbres, les mesures du flux de sève brute (Granier, 1985) permettent d'avoir accès à la transpiration à l'échelle de l'individu. Ces mesures fines permettent de calibrer des modèles de transpiration foliaire. Toutefois, le passage à une échelle supérieure pose de délicats problèmes d'intégration spatiale qui sont liés, à savoir ceux de la complexité (architecture aérienne) et de l'hétérogénéité des peuplements végétaux.

Le cycle de l'eau à l'échelle de la parcelle intègre le fonctionnement des individus qui la constituent. Traditionnellement, ces études utilisaient des mesures périodiques de teneur en eau du sol, en principe hebdomadaires, pour appliquer la méthode du bilan hydrique, en mesurant aussi les précipitations incidentes. Récemment, depuis les années 1990, une nouvelle méthode de mesure des flux d'énergie et de masse (eau et CO₂) au-dessus des couverts s'est développée, à plus haute résolution temporelle (la demi-heure) et à bonne intégration spatiale (la méthode des « corrélations turbulentes »). Cette méthode est actuellement mise en œuvre dans les réseaux d'observation intensive du fonctionnement des écosystèmes. En France, ce sont les ORE (Observatoires de recherche sur l'environnement, principalement sur les forêts et les prairies) ; en Europe et dans le monde, les réseaux Carboeurope et Fluxnet. L'utilisation de cette méthodologie commune

5. L'auteur remercie tout particulièrement Mme Claude Cosandey (CNRS) et Éric Blanchart (IRD) pour la communication de leurs données expérimentales, particulièrement précieuses et centrales.

continue de se développer très largement ; elle permet d'obtenir des données plus aisément comparables sur les différents types de végétations.

Enfin, des approches à l'échelle des bassins versants, qui mobilisent des mesures de climat et d'écoulements aux exutoires, sont précieuses à cause de leur caractère intégrateur, aussi bien des propriétés d'évapotranspiration des végétaux que du fonctionnement hydrique du sol colonisé par les racines. Malheureusement, il existe relativement peu de données publiées permettant de comparer différents types végétaux.

► Quelques données de base

– L'« évapotranspiration réelle » (ETR) d'un couvert végétal est égale à la somme des différents flux de vapeur d'eau qui quittent ce couvert (transpiration foliaire, interception des pluies, évaporation du sol). La transpiration des végétaux représente le plus souvent le flux de vapeur le plus important de l'évapotranspiration réelle. L'interception de précipitations correspond à l'évaporation de l'eau liquide à la surface des feuilles pendant et après la pluie. On pourra se reporter aux articles de Saugier (1996) pour les prairies et les cultures et de Granier (1996) pour les forêts, qui développent les bases biophysiques de ces concepts. Il faut noter que, selon la méthode de mesure utilisée, certains des résultats présentés ici concernent la transpiration des couverts, d'autres leur évapotranspiration réelle. Mais les mesures démontrent que, lorsque le feuillage est sec, les couverts denses (c'est le cas des cultures ou des prairies à couvert bien développé, ou celui d'une forêt), la transpiration dépasse 90 % de l'évapotranspiration réelle. L'évapotranspiration réelle dépend de trois principaux facteurs :

– L'énergie disponible, donc le climat : l'évapotranspiration potentielle (ETP)⁶ est un indice climatique très utilisé qui permet de bien expliquer les variations de l'ETR à l'échelle de la parcelle.

– La surface foliaire par unité de surface au sol, appelée « indice foliaire » (LAI) : les feuilles représentant à la fois les sites de transpiration et d'interception des précipitations (transpiration et interception augmentent avec le LAI). Ainsi, les écosystèmes forestiers, qui possèdent généralement un LAI élevé, présentent une interception des précipitations plus importante que celle des végétations basses. Il existe des différences importantes entre espèces forestières : l'interception des forêts feuillues se situe dans une gamme de 20 à 25 % des précipitations incidentes et les résineux souvent dans celle de plus de 30 % (voir Aussenac, 1975). La phénologie conditionne aussi les flux d'eau, notamment la durée de la phase feuillée d'un couvert. Enfin, le prélèvement de tout ou partie de la végétation (pâturage, récolte) a évidemment des conséquences directes sur l'évapotranspiration.

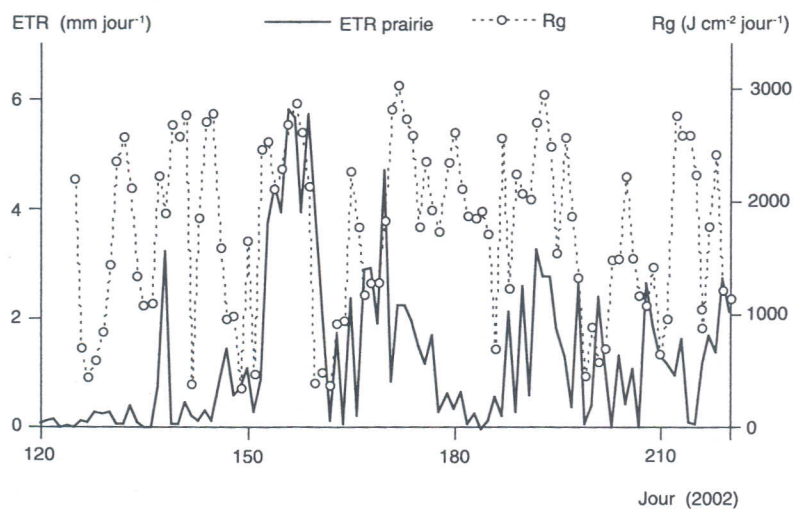
– Les possibilités d'utilisation de l'énergie disponible par les feuilles : on distingue leurs propriétés spectrales, dont l'« albédo » qui caractérise le pouvoir réfléchissant des feuilles et les « conductances » pour le flux de vapeur d'eau,

6. Il existe une grande variété de formules de calcul de l'ETP (Penman, Turc, Thornthwaite, Priestley-Taylor, etc.)

aérodynamique et stomatique. La « conductance stomatique » joue un rôle majeur : à une forte conductance est associée un flux de vapeur élevé. Les stomates sont aussi le lieu majeur de la régulation de la transpiration en situation de contrainte hydrique.

Importance de l'albédo

De ce paramètre physique caractérisant toute surface, végétale ou non, dépend le « rayonnement net », c'est-à-dire la fraction du rayonnement global qui est utilisée pour produire simultanément deux flux d'énergie : le flux de chaleur sensible qui correspond à l'échauffement des feuilles et de l'air environnant et le flux de chaleur latente qui est la consommation d'énergie pour l'évapotranspiration réelle, lié au passage de la phase liquide à la phase vapeur. L'albédo des prairies et des cultures est souvent plus élevé que celui des forêts, surtout celles de résineux. Rost et Mayer (2006) qui ont effectué des mesures sur une prairie permanente et sur une forêt de pins en Allemagne ont calculé des valeurs de 23 % pour la prairie et de 11 % pour la forêt. Ainsi, la forêt résineuse consomme une fraction plus élevée – d'environ 12 % – du rayonnement solaire que la prairie, cette dernière réfléchissant une plus forte proportion du rayonnement incident vers l'atmosphère. Cette propriété confère aux couverts forestiers une capacité supérieure à transformer l'énergie radiative en évapotranspiration.

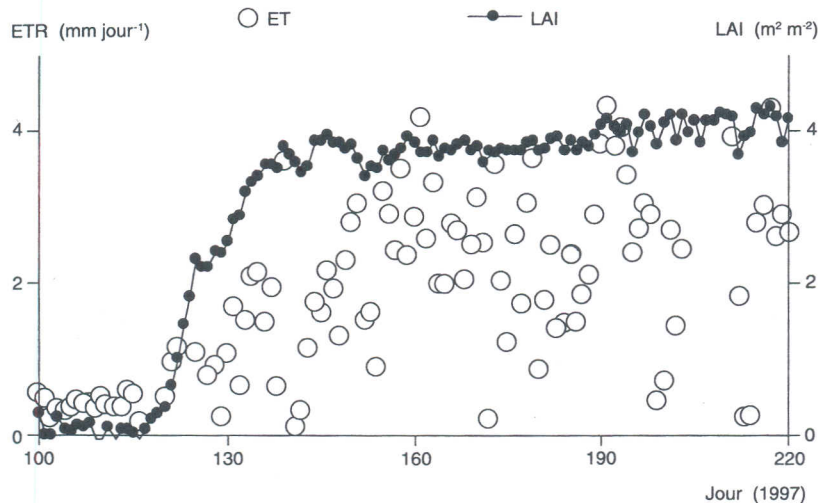


L'évapotranspiration (ETR) augmente au début du mois de juin avec le développement du couvert végétal ; au 20 juin (jour 171), la prairie est fauchée, ce qui réduit brutalement son ETR. (légende de la figure).

Figure 9. Évolution de l'évapotranspiration réelle d'une prairie semi-permanente au Danemark et du rayonnement global (Rg).

Variations de l'évapotranspiration réelle avec l'indice foliaire et la phénologie

L'apparition et le développement des feuilles au printemps se traduisent par une augmentation de l'évapotranspiration du couvert. C'est clairement illustré sur la figure 9 pour une prairie danoise et sur la figure 10 pour une parcelle de hêtres du site-atelier de la forêt de Hesse (Moselle).

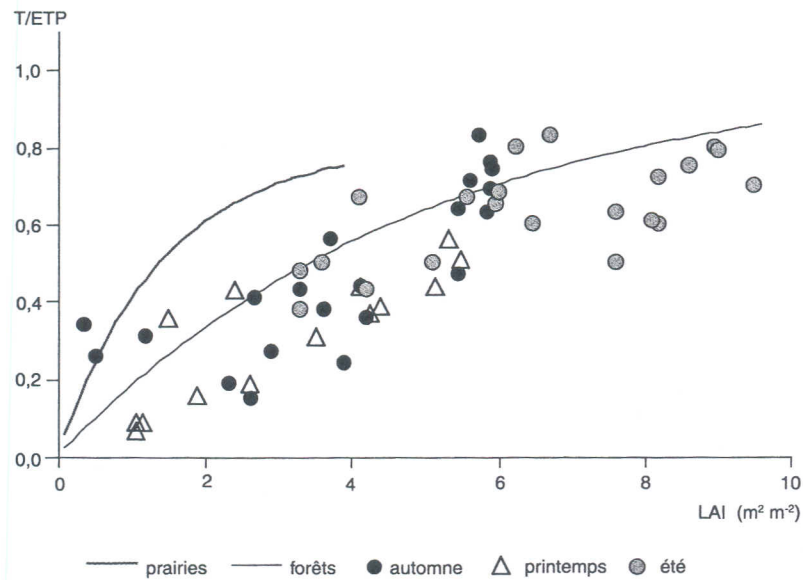


Le débourrement intervient au jour 115 (25 avril), date après laquelle la surface des feuilles augmente rapidement (jour 145 : 25 mai).

Figure 10. Évolution de l'évapotranspiration réelle (ETR) d'un couvert de hêtres au printemps et de son indice foliaire (LAI).

Sur chacune de ces parcelles, des mesures de flux de vapeur ont été réalisées au moyen de la méthode des corrélations turbulentes. On constate que l'augmentation de l'ETR au printemps s'effectue en phase avec le développement du LAI ; plus tard, fin juin, le fauchage et la récolte de l'herbe diminuent brutalement l'ETR. Dans le cas de la forêt, le même synchronisme entre développement des feuilles et ETR est observé. Toutefois, le niveau maximum de transpiration, qui constitue dans ce peuplement environ 95 % de l'ETR, n'est atteint qu'une dizaine de jours après le maximum de développement foliaire à cause du délai de maturation physiologique des feuilles.

S'il existe une relation croissante entre l'indice foliaire et la transpiration du couvert, celle-ci diffère entre forêts et végétations basses. La figure 11, qui rassemble des données obtenues sur différents couverts forestiers et prairiaux, montre pour les forêts une relation presque linéaire entre le rapport T/ETP et le LAI, alors que l'on constate un phénomène de saturation pour les prairies – à partir d'une valeur de l'ordre de $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ – au-delà duquel T n'augmente presque plus. De ce fait, la comparaison du niveau de transpiration entre les deux types de couverts n'est pas immédiate. Par exemple, pour de faibles valeurs de LAI (compris entre 1 et 2), les prairies présentent un niveau de transpiration plutôt



Pour les couverts forestiers sont distinguées différentes périodes de l'année : celles de printemps et d'automne correspondent aux phases d'augmentation, puis de diminution de l'indice foliaire chez les feuillus, hêtres et chênes. (légende figure)

Figure 11. Relations entre l'indice foliaire (LAI) et le rapport entre la transpiration de couverts végétaux (T) et l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Sources : données forestières, Granier *et al.*, 1999 ; courbe d'ajustement pour les couverts prairiaux, Saugier, 1996.

supérieur à celui des forêts, alors pour les forts LAI, les couverts forestiers seront de plus gros consommateurs d'eau, ce qui est encore accentué par une plus forte interception des pluies.

► L'évapotranspiration réelle des prairies comparée à celle des forêts

La difficulté de comparer l'ETR des différents types de couvertures végétales provient du fait que les mesures ne sont que très rarement réalisées sur les mêmes sites et, de ce fait, dans des conditions climatiques différentes. Il s'avère nécessaire d'effectuer une standardisation des données. On peut, par exemple, ramener l'ETR mesuré soit au rayonnement global, au rayonnement net ou à l'ETP. Nous avons choisi ici de comparer l'ETR de couverts forestiers et prairiaux au rayonnement global (R_g), cette variable pouvant être considérée comme une référence climatique universelle. La figure 12 présente deux ensembles de données, obtenues dans le réseau européen Carboeurope au moyen de méthodologies identiques. Une première comparaison a porté sur le couvert de hêtres de la forêt de Hesse (France) et une prairie de fauche à Grillenburg (Allemagne). Les relations entre ETR et R_g sont linéaires, avec une certaine dispersion qui traduit l'influence des autres paramètres climatiques (température et déficit de saturation de l'air, vitesse

du vent). Dans cet exemple, l'ETR de la prairie est en moyenne égale à seulement 50 % de celle de la hêtraie. Sur les deux sites de Bili Kriz, en République tchèque, les mesures ont été effectuées sur deux types de couverts, épicéas et prairie permanente. Là encore, les relations entre ETR et R_g étaient sensiblement linéaires et l'ETR de la prairie était égale à environ 70 % de celle de la forêt d'épicéas. Ainsi, sur ces deux exemples, nous retrouvons encore un plus faible niveau d'évapotranspiration pour les prairies que pour les forêts, que celles-ci soient feuillues ou résineuses.

Ces résultats ont été obtenus à partir de mesures réalisées au maximum de développement foliaire et ainsi ne prennent pas en compte d'éventuelles variations liées à la phénologie. En particulier, la prairie peut transpirer de façon non négligeable en automne et en fin d'hiver, alors qu'un couvert de forêt à espèces caduques est encore défeuillé et ne transpire pas, ou bien qu'une parcelle de cultures de printemps ne porte pas encore de végétation. Par ailleurs, la prairie peut être soumise à des chutes de LAI pendant la belle saison, tant par la fauche (voir figure 9) que par le pâturage. Les effets du pâturage sur l'ETR ont été étudiés par Bremer *et al.* (2001) au Kansas (États-Unis) sur un couple de parcelles de prairie naturelle dont l'une a été soumise au pâturage, en comparaison avec un témoin non pâturé. Progressivement, l'ETR de la parcelle pâturée a chuté de 40 % par rapport à la parcelle témoin. Après retrait des animaux de la parcelle, l'ETR a augmenté pour atteindre le même niveau que la parcelle témoin au bout d'environ 30 jours.

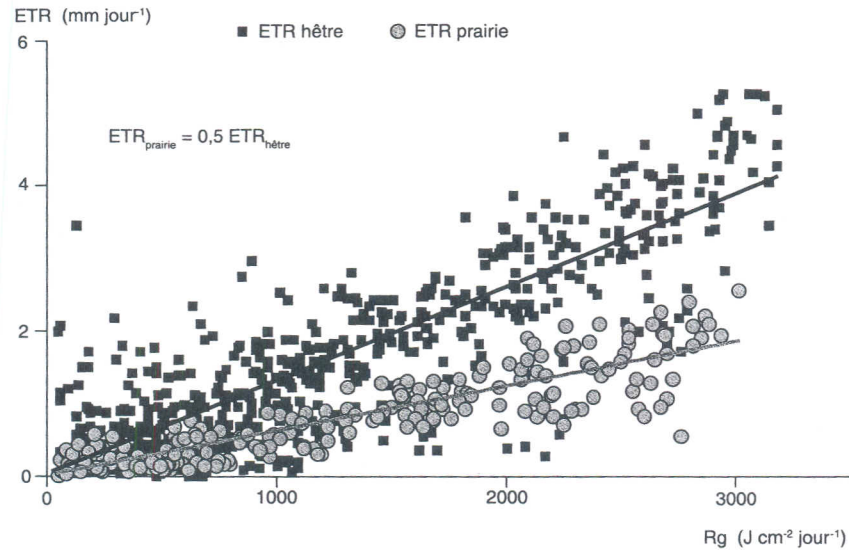
À l'échelle du bassin versant, échelle particulièrement intéressante, car intégrative dans le temps et dans l'espace, Cosandey (2000) a analysé les débits à l'exutoire de petits bassins versants bretons caractérisés par des types de couvertures végétales différentes, bocages et forêt. De mars à juin, les débits étaient sensiblement similaires, alors qu'en dehors de cette période le débit pour le bassin versant forestier était systématiquement inférieur à celui des deux bassins bocagers (figure 13) ; sur une période de quatre années, le débit à l'exutoire du bassin forestier n'a été que de 55 % de celui des bassins bocagers. Pour l'année humide 1977, cette différence a été atténuée (forêt = 65 % des bocages). Cette approche amène donc aux mêmes conclusions qu'avec des mesures de flux : une plus forte évapotranspiration pour la forêt a pour effet un plus faible drainage de l'eau excédentaire. Le cas des cultures n'a pas été abordé ici, mais les données expérimentales montrent une forte similitude avec le fonctionnement de la prairie. Toutefois, les cultures très couvrantes, comme le maïs ou le colza, se montrent grosses consommatrices d'eau, ceci d'autant plus qu'elles seront irriguées, mais leur saison de végétation est relativement courte. Les conséquences sur le flux de drainage dépendront de ce fait de la répartition intra-annuelle des précipitations.

► Les propriétés des sols et des systèmes racinaires

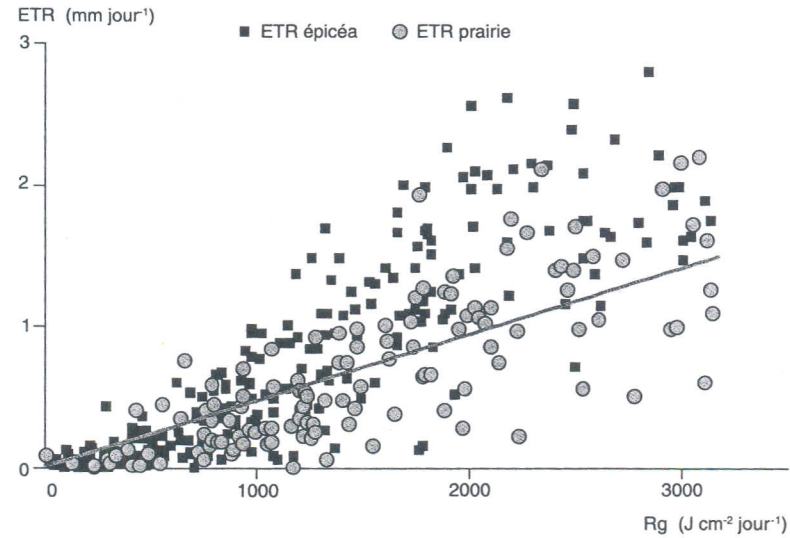
Nous avons pu voir que les propriétés des feuilles et l'indice foliaire permettaient d'expliquer les différences importantes d'évapotranspiration réelle entre prairies, cultures et forêts. Leurs sols présentent aussi des caractéristiques contrastées. Tout

Prairies, herbivores, territoires : quels enjeux ?

a) Hesse (F) et Grillenburg (D)



b) Bily Kriz (CZ) 2005



Les points correspondent à des valeurs journalières. a) hêtraie de Hesse (France) et prairie semi-permanente de Grillenburg (Allemagne) ; b) pessière et prairie permanente de la région de Bily Kriz (République tchèque).

Figure 12. Relations entre l'évapotranspiration réelle de couverts forestiers et prairiaux et le rayonnement global (Rg).

d'abord des différences dans leur porosité et leur agrégation, particulièrement dans les horizons superficiels, les plus colonisés par les racines. Une étude particulièrement intéressante a été réalisée dans les Antilles françaises sur différentes parcelles, sur un même substrat de type vertisol (Blanchart *et al.*, 2000). Ces

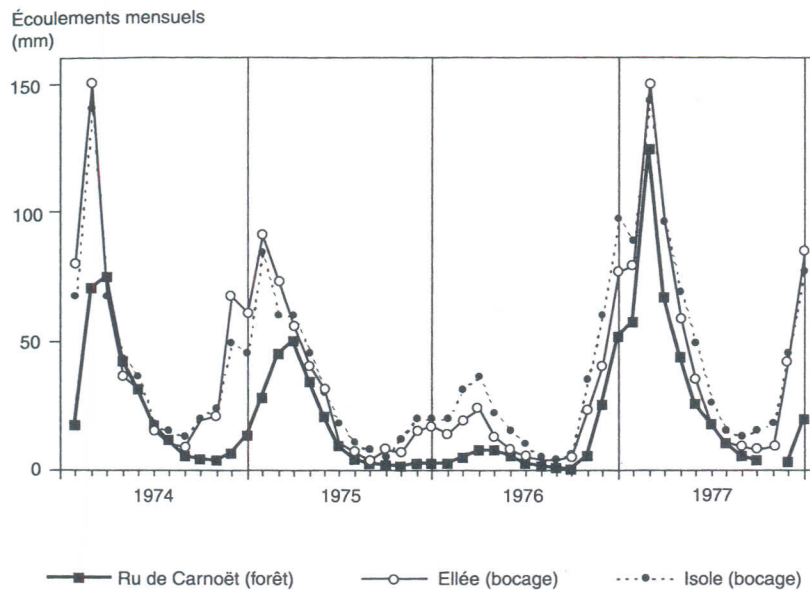


Figure 13. Écoulements mensuels comparés de petits bassins versants bretons : ru de Carnoët (forêt), ruisseaux d'Ellée et d'Isole (bocage).

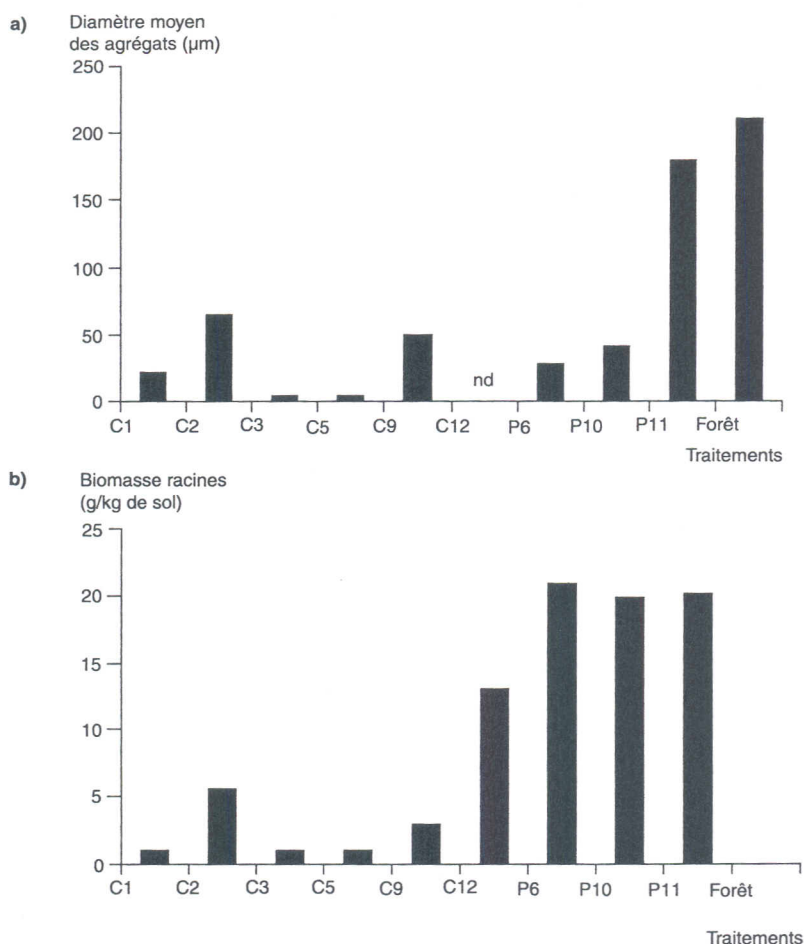
Source : données fournies par Claude Cosandey.

parcelles se répartissaient entre cultures maraîchères, jachères, prairies et forêt. La figure 14a met en évidence des agrégats d'un diamètre moyen plus gros pour la forêt et pour une parcelle de prairie par rapport aux cultures, indiquant pour celles-ci une plus forte stabilité culturale. Il existe aussi un contraste important dans les valeurs de biomasses racinaires, qui sont systématiquement plus élevées sous prairie que sous culture (figure 14b). Cela résulte de la longévité de nombreuses espèces prairiales et *a fortiori* des espèces forestières, en comparaison avec des cultures annuelles. En outre, prairies et forêts ne sont pas irriguées, sauf dans quelques cas anecdotiques. De ce fait, les espèces qui les composent présentent généralement une bonne, voire très bonne, résistance à la sécheresse, dont une des composantes est un système racinaire vigoureux et profond. Enfin, les sols sous cultures sont aussi plus vulnérables : leur érodibilité provient de la taille moindre de leurs agrégats et de systèmes racinaires plus limités (Blanchart *et al.*, 2000).

► Conclusion

Les prairies se caractérisent par des propriétés structurales et physiologiques spécifiques et contrastées par rapport aux autres types de végétations, ce qui a des conséquences fortes sur le cycle de l'eau. Le tableau 2 fait la synthèse de l'ensemble des résultats présentés pour les trois grands types de végétation. Les propriétés des deux interfaces pour le transfert d'eau du sol à l'atmosphère, sol-racines et feuilles-atmosphère, conditionnent fortement les flux d'eau et plus

Prairies, herbivores, territoires : quels enjeux ?



a) diamètre médian des agrégats (1-2 mm) issus de vertisols de différentes parcelles de Martinique et de Guadeloupe après 2 heures d'agitation dans l'eau.
 b) biomasses racinaires mesurées après traitement sur les différentes parcelles de l'étude. Les parcelles C désignent des cultures maraîchères, P les prairies et les chiffres correspondent à différents traitements.

Figure 14. Propriétés des sols et des systèmes racinaires.
 Source : d'après Blanchart *et al.* (2000).

généralement le cycle hydrologique des couverts végétaux, avec *in fine* des conséquences sur le drainage de l'eau vers les nappes profondes ou les cours d'eau. La forêt est, en moyenne, fortement consommatrice en eau, du fait du développement important de ses deux interfaces, avec pour conséquence de limiter le drainage de l'eau. La prairie occupe une place intermédiaire entre les forêts et les cultures. Les cultures, notamment annuelles, dont les systèmes racinaires se développent moins que ceux des forêts et des prairies, ont un cycle phénologique plus court.

Forêts et prairies se caractérisent aussi par des sols à forte macroporosité, en liaison avec une abondante macrofaune, surtout de vers de terre. Ces sols sont filtrants ce

qui assure un transfert efficace de l'eau excédentaire et limite l'érosion des sols, conférant aux prairies et aux forêts un rôle régulateur. Une étude d'infiltrabilité conduite par Van der Kamp (2003) au Canada a confirmé une plus forte porosité des sols prairiaux, comparés aux sols sous cultures, avec aussi une autre particularité en climat froid, celle d'une plus forte capacité de rétention de la neige.

Une consommation d'eau inférieure à celle des forêts

Les données actuellement disponibles montrent de façon générale un fort contraste entre le fonctionnement des couvertures forestières et celui des végétations basses, les prairies notamment. En fait, les forêts utilisent plus d'eau que les végétations basses, que ce soit de façon passive à cause d'une interception des précipitations importante, ou par le processus actif de la transpiration foliaire. Il existe évidemment des variations importantes, par exemple entre des forêts à couvert clair de pins et des forêts denses d'épicéas dont les niveaux d'évapotranspiration sont contrastés. Les différences dans le cycle de l'eau entre les prairies et les cultures restent relativement faibles. Toutefois, si l'on doit prendre en compte la pratique de l'irrigation, qui participe fortement dans certaines régions de France aux prélèvements de la ressource en eau dans les nappes ou les cours d'eau, les prairies se montrent plus économes en eau que les cultures.

À la lumière des connaissances actuelles, il est possible de modéliser le fonctionnement hydrique des différents types de végétations à partir de leur structure aérienne et souterraine, de leur phénologie, des caractéristiques des sols et des données météorologiques classiques. La modélisation permet en particulier d'évaluer les conséquences de différents scénarios de changements, qu'ils soient de gestion ou du climat. Twine *et al.* (2004) ont ainsi modélisé les conséquences de modifications d'usage des sols sous conditions climatiques identiques. Leurs simulations prévoient les plus fortes différences lors de la transformation des forêts en cultures annuelles (tableau 3). En revanche, en l'absence d'irrigation, le passage d'une prairie à une culture ne modifie que peu les flux hydriques. Sous cette hypothèse, leurs simulations prévoient une diminution modérée des écoulements sous forme de ruissellement et de drainage.

Enfin, il faut donner une valeur relative à l'ensemble de ces résultats, car, pour chaque type de végétation, il existe une forte variabilité de structure et de fonctionnement, en particulier pour l'indice foliaire, donc pour l'évapotranspiration réelle. Il existe par exemple des forêts à faible indice foliaire, soit de façon intrinsèque, comme c'est le cas de beaucoup de pinèdes, soit à cause de pratiques de gestion vigoureuses avec des éclaircies fortes et fréquentes.

Tableau 2. Les principales caractéristiques structurales et fonctionnelles jouant un rôle dans le cycle de l'eau des grands types de végétation.

Paramètre	Forêt	Prairie	Culture
LAI	+++	+	+ à ++
Transpiration	+++	++	++ à +++
Interception des pluies	+++	+	+ à ++
Enracinement	+++	++ à +++	++
Capacités d'extraction de l'eau du sol	+++	++	+
Porosité et teneur en matière organique des sols	+++	++	+ à ++

Tableau 3. Variation annuelle du rayonnement net (Rn), de l'évapotranspiration réelle (ETR), du ruissellement (S) et du drainage (Dr) lors de conversions totales, depuis une forêt ou une prairie, en cultures d'hiver, de printemps ou d'été.

Végétation initiale	Nouvelle végétation : culture	Pourcentage de variation			
		Rn	ETR	S	Dr
Forêt décidue	hiver	- 17	- 23	+ 26	+ 63
Forêt décidue	printemps	- 17	- 20	+ 26	+ 57
Forêt décidue	été	- 14	- 15	+ 26	+ 41
Prairie	hiver	+ 19	+ 7	- 4	- 8
Prairie	printemps	+ 19	+ 10	- 4	- 12
Prairie	été	+ 23	+ 17	- 4	- 20

Source : d'après Twine *et al.* (2004)

► Références bibliographiques

- Aussenac G., 1975.** Couverts forestiers et facteurs du climat : leurs interactions, conséquences écophysologiques chez quelques résineux. Thèse d'écophysologie de l'Université de Nancy I, 227 p.
- Blanchart E., Achouak W., Albrecht A., Barakat M., Bellier G., Cabidoche Ym., Hartmann C., Heulin T., Larre-Larrouy C., Laurent J.Y., Mahieu M., Thomas F., Villemin G., Watteau F., 2000.** Déterminants biologiques de l'agrégation dans les vertisols des Petites Antilles. Conséquences sur l'érodibilité. *Étude et Gestion des Sols*, 7, 309-328.
- Bremer D.J., Auen L.M., Ham J.M., Owensby C.E. 2001.** Evapotranspiration in a prairie ecosystem : effects of grazing by cattle. *Agronomy Journal*, 93, 338-348.
- Cosandey C. 2000.** In : Cosandey C. et Robinson M. : *Hydrologie continentale*, collection U, Armand Colin, Paris, 360 p.
- Granier A. 1985.** Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*, 42, 193-200.
- Granier A. 1996.** Évapotranspiration des forêts. *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 82, 119-132.
- Granier A., Bréda N., Biron P., Villette S. 1999.** À lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116, 269-283.
- Rost J., Mayer H. 2006.** Comparative analysis of albedo and surface energy balance of a grassland site and an adjacent Scots pine forest. *Climate Research*, 30, 227-237.
- Saugier B. 1996.** Évapotranspiration des prairies et des cultures. *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 82, 133-153.
- Twine T.E., Kucharik C.J., Foley J.A. 2004.** Effects of land cover change on the energy and water balance of the Mississippi river basin. *Journal of Hydrometeorology*, 5, 640-655.
- Van Der Kamp G., Hayashi M., Gallén D. 2003.** Comparing the hydrology of grassed and cultivated catchments in the semi-arid Canadian prairies. *Hydrological Processes*, 17, 559-575.