

Impacts de l'utilisation accrue de biomasse forestière sur les eaux de surface

Etienne E. Dambrine, André A. Granier, Nathalie Bréda, François Guerold, Anne Probst, Claude Cosandey, Manuel Nicolas

▶ **To cite this version:**

Etienne E. Dambrine, André A. Granier, Nathalie Bréda, François Guerold, Anne Probst, et al.. Impacts de l'utilisation accrue de biomasse forestière sur les eaux de surface. 2009. hal-02818758

HAL Id: hal-02818758
https://hal.inrae.fr/hal-02818758

Submitted on 6 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.

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie,
du Développement durable et de la Mer
en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat

Présent pour l'avenir

BIO 2
BIOMASSE ET BIODIVERSITÉ FORESTIÈRES

Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles

Coordination scientifique : Guy Landmann, Frédéric Gosselin et Ingrid Bonhême

ECOFOR
ECOSYSTEMES FORESTIERS

Rapport réalisé sous la coordination du GIP Ecofor

à la demande du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer

Rapport de la subvention n° 000 1120

Juillet 2009

BIO 2
BIOMASSE ET BIODIVERSITÉ FORESTIÈRES

Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles

Coordination scientifique : Guy Landmann, Frédéric Gosselin et Ingrid Bonhême

Ministère de l'écologie du développement durable et de la mer
Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature
Direction de l'Eau et de la Biodiversité,
Sous-direction des Espaces Naturels,
Bureau de l'Intégration de la Biodiversité dans les Territoires
Grande Arche Paroi Sud
92055 LA DEFENSE cedex
Tél. 01 40 81 30 72

GIP Ecofor
42, rue Scheffer
75116 Paris
Tél. 01 53 70 21 41
secretariat@gip-ecofor.org

Juillet 2009

Citation conseillée :

Landmann G., Gosselin F., Bonhême I. (coord.), 2009. Bio2, Biomasse et biodiversité forestières. Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles. Paris, MEEDDM-Ecofor, 210 p. (www.gip-ecofor.org)

Pour faciliter la lecture :

- les passages importants sont signalés en gras,
- les astérisques (*) signalent les termes définis dans le glossaire (annexe 3),
- les sigles sont explicités dans l'annexe 4.

Maquette : Hego communication

Mise en forme, relectures : Hego Communication, Guénaëlle Couderc

© GIP Ecofor, Paris, 2009
ISBN : 978-2-914770-00-2

CHAPITRE 11

IMPACTS DE L'UTILISATION ACCRUE DE BIOMASSE FORESTIÈRE SUR LES EAUX DE SURFACE

Etienne Dambrine, André Granier

et Nathalie Bréda, INRA Nancy,

François Guérold, Université de Metz,

Anne Probst, CNRS - Université de Toulouse

Claude Cosandey, CNRS Paris,

Manuel Nicolas, ONF-INRA

1. Contexte

L'incidence de la gestion forestière sur les eaux est une question aussi ancienne que l'hydrologie forestière. Pour autant, on est loin d'avoir clarifié tous les mécanismes très complexes en jeu, et on a encore moins exploré toutes les hypothèses à présent évoquées d'évolution de la gestion forestière et des autres utilisations du sol (voir les scénarios en chapitre 3).

Doit-on craindre que certaines évolutions ne remettent en cause les avantages naturels liés – ou supposés liés – à la forêt ?

Dans ce chapitre, nous présentons une courte analyse de l'influence d'une utilisation accrue de biomasse forestière sur :

- le bilan hydrique des écosystèmes forestiers et les quantités d'eau drainées ;
- les modifications de la composition des eaux.

Ces deux termes sont d'ailleurs souvent liés par le jeu des effets de concentration-dilution.

Nous n'analyserons pas les répercussions sur les nappes souterraines mais ferons par contre référence à l'avantage que l'on pourrait tirer d'une instrumentation des propriétés épuratrices des forêts par le biais

de zones humides construites (constructed wetlands), pour permettre de combiner production de biomasse et épuration naturelle des eaux.

2. Impacts de l'utilisation accrue de biomasse forestière sur le régime des cours d'eau et l'alimentation des bassins versants

2.1. Impacts des changements d'utilisation des terres et de la gestion forestière sur le bilan hydrique des écosystèmes et les quantités d'eau drainées

Les changements d'utilisation des terres et de la gestion forestière ont un impact sur les flux d'eau, notamment sur l'évapotranspiration et le drainage.

De façon schématique, on peut établir une typologie des pratiques de gestion ayant un impact sur le bilan hydrique des surfaces végétales.

Les changements d'utilisation des terres

Quelques données expérimentales démontrent de **fortes différences d'évapotranspiration (ETR) entre forêts et prairies** (Granier, 2007), la différence entre forêts et certains types de cultures grandes consommatrices d'eau étant moins évidentes. Ces végétations basses sont caractérisées par :

- des flux de transpiration sensiblement plus faibles que les forêts, en liaison avec une différence d'indice foliaire (LAI*), souvent plus élevé pour les forêts ;
- une interception des précipitations souvent faible à négligeable, alors que ce terme atteint 20 à 35 % de la pluie incidente sous les climats tempérés pour les arbres ;
- des enracinements relativement plus superficiels pour les végétations herbacées, conduisant à une plus faible capacité d'extraction d'eau dans le sol en conditions de sécheresse.

Il est maintenant bien connu que les arbres sont capables de dessécher très fortement les sols, au-delà de ce que peuvent dessécher les prairies ou la plupart des cultures. De ce fait, **la substitution d'un taillis à courte révolution (TCR) à une forêt gérée de manière extensive aura un impact bien moindre sur le bilan hydrique que la substitution d'un TCR ou d'une forêt à une prairie**.

La modélisation est nécessaire pour analyser quantitativement des situations concrètes en utilisant cette typologie d'utilisation du sol. A cet effet, il est nécessaire de connaître : 1) les paramètres des différentes espèces, 2) la distribution spatiale de la couverture végétale, des sols et du climat. Ces paramètres sont issus de mesures de flux et de stocks d'eau réalisés à l'échelle de la parcelle, notamment dans des sites-ateliers sur des cultures, prairies ou forêts. Les observatoires de recherche sur l'environnement fournissent ce type d'informations.

La gestion des écosystèmes forestiers

La gestion de la structure et de la composition des peuplements forestiers module également leurs bilans hydriques. Les deux facteurs qui ont une influence bien connue sur ces derniers sont :

- l'**éclaircie des peuplements forestiers**) (Aussenac *et al.*, 1982, 1995). La conséquence directe est une diminution des surfaces foliaires (Bréda, 1999) et d'absorption d'eau dans le sol. **L'effet sur l'évapotranspiration (ETR) n'est réellement significatif que si la diminution de l'indice foliaire* ou LAI* est conséquente**. Des expérimentations réalisées sur résineux et sur feuillus montrent que jusqu'à un prélèvement de 25-30 % des arbres, l'incidence sur l'ETR donc sur les flux de drainage restait faible (Granier et Bréda, 2007). La raison est qu'après éclaircie : i) la transpiration des arbres restants dans le peuplement augmente, ii) alors que l'interception des précipitations diminue peu et iii) que la transpiration du sous-étage et l'évaporation du sol augmentent. En d'autres termes, une dynamisation de la sylviculture peut augmenter les réserves d'eau disponibles pour les arbres sur pied (dans la perspective notable d'un risque sécheresse augmenté) mais sans accroître de manière conséquente le drainage d'eau sous le peuplement global (Bréda et Roman Amat, 2002) ;

- **la substitution d'espèces forestières.** Il existe, au niveau du bilan hydrique, des différences marquées entre des peuplements de feuillus et de résineux. La première, d'ordre phénologique, tient à la présence de feuilles (aiguilles) des résineux toute l'année ; alors que les espèces décidues n'ont pas encore de feuilles, les résineux peuvent transpirer notablement lorsque l'énergie disponible est suffisante, particulièrement pendant les mois d'octobre, mars et avril. La deuxième raison est liée à la structure contrastée de ces deux types de peuplements : l'interception des précipitations par les couverts résineux est plus élevée, son augmentation entraînant celle de l'ETR et en conséquence la diminution du drainage (Granier *et al*., 1995, Bréda *et al*., 2004). Ainsi, globalement, **à climat et LAI* identiques, les écoulements sous peuplements de résineux sont plus faibles que sous feuillus**.

2.2. Impacts du passage d'engins d'exploitation sur le régime des cours d'eau

Les études de terrain montrent que ce sont souvent les **aménagements associés à la déforestation** (mise en culture, drainage des sols, construction de routes, compaction des sols pendant les travaux forestiers) qui **sont responsables des pointes de crue** (Cosandey, 1993 ; Cosandey et Robinson, 2000). Lors d'opérations de déboisement, les travaux forestiers peuvent modifier l'état de surface, en créant de larges plages de sol à nu sur lesquelles un ruissellement peut prendre naissance ; les pistes forestières construites pour les besoins de l'exploitation sont autant de surfaces susceptibles de générer, conduire ou accélérer un ruissellement.

La circulation d'engins d'exploitation, en déclenchant ou en aggravant des phénomènes d'érosion des sols (chapitre 10), ont des **répercutions plus ou moins fortes sur le colmatage, le transfert de matières (re-suspension, mobilisation) et le fonctionnement hydrologique des cours d'eau** (forestiers ou non) en aval. C'est ce que montre une étude récente réalisée en Alsace et en Lorraine sur les conséquences de la tempête de 1999 et de la gestion forestière qui en a découlé sur les milieux aquatiques vosgiens (ONF, 2006). La mobilisation de particules dans le lit des ruisseaux, consécutive à l'érosion des versants et à l'augmentation de pics de crue, a eu des effets très négatifs sur les frayères*. Ces effets sont d'autant plus négatifs que les trajets des engins d'exploitation se rapprochent des ruisseaux. Lors de leur franchissement, il convient en particulier de prendre des précautions (chapitre 12). Dans un contexte différent, Fritsch (1990) et Bruijnzeel (1990) ont conclu de leurs études en forêt primaire amazonienne, sur les conséquences de la disparition de la forêt, que le tassement lié à l'utilisation d'engins lourds était responsable d'une grande partie du ruissellement qui se produit après la coupe. Dans une forêt primaire en Australie, Croke *et al.* (1999) estiment que les perturbations de surface perdurent pendant 5 ans après l'achèvement des travaux de coupe.

D'autres perturbations, comme une modification du régime hydrologique d'un bassin versant, peuvent également se produire. Par exemple, dans le petit bassin de la Latte, situé sur le versant du Mont Lozère, un tracteur est tombé dans une narse* lors de la coupe, et les ornières qu'il a créées pour en sortir ont évolué en ravine l'hiver suivant. Cette ravine a alors fonctionné en drainant la petite zone humide dont elle était issue. Lors de pluies même faibles pour la région, la nappe de versant, qui d'habitude ne participait pas aux écoulements de crue, s'est alors trouvée connectée par voie de surface avec le cours d'eau. Lorsque la nappe était suffisamment haute, les débits de crue ont pu être doublés. En contrepartie, lors des très fortes crues, qui résultent de la saturation de l'ensemble du bassin, le comportement du bassin n'apparaît pas modifié par la disparition de la forêt, ni même par les opérations de coupe, dont les effets deviennent négligeables au regard du facteur climatique (Cosandey, 1993).

3. Impacts du prélèvement de biomasse sur la qualité chimique des eaux de surface

3.1. L'acidification des eaux de surface

Les importants **dépôts atmosphériques acides** reçus par les sols depuis les années 1950 dans une partie de l'Europe, et dans le Nord-Est de la France en particulier, ont eu un triple effet d'apport au sol d'acidité, de désaturation des sols en éléments nutritifs et d'accélération du drainage de cations par lixiviation de

nitrates et de sulfates (Landmann et Bonneau, 1995). Cela a entraîné, au début des années 1980, dans certains écosystèmes sensibles (Vosges, Ardennes) une **acidification des eaux de surface** (Probst *et al.*, 1990 ; Février *et al.*, 1999 ; Probst *et al.*, 1999) et une **altération du fonctionnement des écosystèmes aquatiques** (Massabuau *et al.*, 1995 ; Guérold *et al.*, 2000) :

- diminution de la biodiversité des cours d'eau, à l'exemple de la disparition des truites de nombreux ruisseaux vosgiens (Probst *et al*., 1990), réduction du nombre d'espèces d'invertébrés (Massabuau *et al.*, 1995 ; Guérold *et al*., 2000) et de champignons aquatiques (Baudoin *et al*., 2008) ;
- altération du fonctionnement écologique des ruisseaux forestiers, avec notamment un ralentissement marqué de la dégradation de la matière organique allochtone (Dangles *et al*., 2004) ;
- baisse du pouvoir tampon des eaux de source (Probst *et al.*, 1999), augmentation des concentrations en aluminium (Probst *et al.*, 1990) et métaux lourds (comme le plomb) dans les captages d'eaux potables (Dambrine *et al*., 1999).

L'acidification des eaux de surface peut intervenir à la suite de l'acidification des sols, mais ne se manifeste que lorsque plusieurs facteurs sont réunis :

- les **dépôts atmosphériques** ;
- de **fortes précipitations annuelles** ;
- **des sols et des couches géologiques** traversées par les eaux de pluie de compositions minéralogique et chimique **pauvres** (Probst *et al.*, 1995b ; Party, 1999 ; Nedeltcheva *et al*., 2006).

Si des sols et des roches riches en minéraux altérables sont soumis à un faible excès de précipitation par rapport à l'évapotranspiration, les sols et les eaux resteront bien entendu alcalins, mais, à l'inverse, dans le cas de sols très acides et soumis à fortes précipitations, les eaux de pluies qui traversent des substrats très pauvres en minéraux altérables produiront des sols très acides et des eaux de très faible alcalinité, sans cependant être nécessairement acides. Ceci s'explique par le fait que l'acidité carbonique résultant de la dissolution du CO_2 produit dans les sols par l'activité biologique ne peut abaisser le pH des eaux en dessous d'une valeur approximative de 5,6 et que les acides organiques (acides faibles) produits dans l'humus sont rapidement dégradés dans les sols de sorte qu'ils parviennent rarement dans les eaux.

En conclusion, il faut retenir que **pour entraîner une forte acidité des eaux, il faut mettre en œuvre des acides forts, nitrique ou sulfurique, dont l'origine est principalement la pollution atmosphérique**.

La sylviculture joue vis-à-vis de l'acidification des eaux de plusieurs façons :

- **en favorisant les résineux dans certains massifs, elle a accru, à conditions de pollution donnée, un drainage accru de sulfates et nitrates**. En effet, en raison de leur couvert permanent, les résineux captent davantage de polluants atmosphériques acides sous forme de dépôts secs* ou occultes* notamment et augmentent ainsi les dépôts de protons, de sulfates et nitrates. Probst *et al.* (1995b) ont ainsi montré que la perte de pouvoir tampon des eaux de ruisseaux des Vosges était plus importante sous résineux et Nedeltcheva *et al*. (2006) ont établi que la couverture résineuse des bassins versants vosgiens a un impact sur les concentrations en sulfates de l'eau à leur exutoire. De plus, il semble que certaines espèces comme le Douglas augmentent le drainage de nitrates (Jaffrain *et al*., en préparation), tandis que d'autres comme le hêtre le réduisent (Andrianarisoa *et al*., en préparation) ;
- **une exploitation forestière intensive et non compensée par amendement* peut accélérer un processus d'acidification des eaux** en cours en réduisant le taux de saturation en Ca et Mg des sols (c'est-à-dire en concourant à leur acidification). Un bilan à l'échelle de bassins versants plantés en résineux a montré que les prélèvements de cations par la biomasse constituent une source importante de protons (dans des pessières des Vosges ou du Mont-Lozère - Probst *et al*., 1995a), ce qui contribue largement à l'acidification des sols. Ce processus est d'autant plus significatif : i/ en présence d'espèces à forte productivité implantées sur sols désaturés (Durand *et al*., 1992) ; ii/ sur des sols recevant de faibles dépôts atmosphériques de cations nutritifs (particules de calcium notamment) capables de compenser les prélèvements par la biomasse (Moncoulon *et al.*, 2004) ;

- une exploitation forestière qui a recours à des **coupes rases**, et qui met **le sol à nu par les engins** peut accélérer les effets d'une acidification en cours en rendant plus superficiel le cheminement de l'eau ou/et en réduisant les temps de transit de l'eau dans les sols. Dans certains cas, les coupes rases entraînent une mise en solution de quantités importantes de **nitrates** (Didon-Lescot *et al*., 1998), mais de façon générale, l'effet n'est pas durable.

Par ailleurs, le prélèvement accru de biomasse peut aussi affecter directement l'**alimentation des ruisseaux forestiers en carbone**. En effet leur fonctionnement écologique repose en grande partie sur la dégradation de la biomasse végétale allochtone et des feuilles mortes (hétérotrophie) (Gessner *et al*., 1999).

En revanche, l'**apport d'amendement* calcaire** permet de restaurer la fertilité de sols appauvris (chapitre 10) et **améliore également dans certains cas les propriétés chimiques de cours d'eau acidifiés**. L'effet dépend notamment du temps de réponse des eaux de surface à ce type de traitement, lequel peut varier très fortement selon le temps de parcours de l'eau jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Dans les Vosges, un amendement* calcaire en forêt dans un contexte de sols peu perméables a pu avoir une influence positive rapide sur la composition chimique de l'eau d'un bassin versant, tandis que la même opération dans un contexte de sols profonds et perméables et de roche poreuse (grès) n'a pas eu d'effet notable sur la qualité de l'eau pendant plusieurs années (Angéli, 2006).

3.2 Pollutions de natures diverses des eaux de surface

Dans des systèmes intensifs imparfaitement maitrisés, il y a des **risques de pollution liés** par exemple à un recours accru à **la fertilisation ou à des épandages de déchets industriels** (eaux usées, boues d'épuration, boues de papeterie, cendres) et à l'apport accidentel d'hydrocarbures par des engins d'exploitation en forêt (chapitre 12).

Dans l'hypothèse où ces pratiques de fertilisation ou d'épandage seraient intensifiées et étendues à des surfaces gérées jusqu'ici de manière extensive, elles pourraient engendrer un **drainage plus important en phosphate et en nitrate vers les eaux de surface**, de manière analogue aux effets d'une fertilisation agricole mal maîtrisée**. La fertilisation azotée pourrait contribuer à acidifier les sols** (production de protons par la nitrification) voire, d'après des travaux originaux récents, à augmenter les émissions de CO_2 liées aux processus d'altération (Perrin *et al.*, 2008).

4. Les systèmes combinant production de biomasse et pouvoir épurateur de la végétation: une opportunité réaliste ?

Le propos est ici d'introduire brièvement deux approches qui ont en commun d'utiliser les propriétés épuratrices de la végétation, mais dans des contextes différents.

Dans le premier cas, il s'agit de l'idée – qui a fait l'objet de quelques expérimentations (et d'un réseau de suivi) – de **l'utilisation d'eaux usées au sein de systèmes « classiques » de production (généralement intensive) de biomasse de type TTCR**. Beaucoup de travaux se développent à l'étranger et en particulier en Suède sur ces « constructed wetlands* ». Le développement de tels systèmes constitue une des opportunités liées au développement du bois-énergie. La bonne maîtrise des pollutions diverses des eaux à l'échelle du bassin versant, avec des répercutions écologiques et sanitaires potentielles est une condition au développement durable et accepté de ces systèmes. Il faudrait, le cas échéant, mener des recherches et déboucher sur des recommandations à l'échelle territoriale. Pour l'anecdote, signalons qu'il y a 40 ans déjà, Poncet (1970), alors ingénieur au service de restauration des terrains de montagne au CERAFER (Cemagref) et soucieux de trouver des solutions d'épuration plus esthétiques que les stations classiques, avait rapporté les travaux étrangers, particulièrement américains, sur la question dans la *Revue forestière française*.

Dans le second cas, l'idée est d'aménager de vastes zones de végétation forestière dans les bas fonds, pour favoriser l'épuration des eaux de surface polluées par les usages agricoles, par le jeu du ralentissement de l'eau et de la récolte de biomasse**. Ce thème n'a guère été abordé en France pour des raisons probablement liées à la sectorisation historique des questions de recherche liées à la forêt, à**

l'eau et au territoire. Pourtant, l'influence très positive des ripisylves* naturelles sur la qualité des eaux de surface a été largement démontrée et en particulier par des équipes de recherche en France (voir notamment Pinay et Decamps, 1988).

5. Conclusions et recommandations

L'influence de la forêt sur l'hydrologie des cours d'eau (écoulement annuel, atténuation des crues) est imparfaitement connue[16], mais il apparaît clairement que la **forêt réduit – quoique dans une proportion incertaine - l'écoulement annuel, au moins à l'échelle où peuvent intervenir des aménagements humains**.

En bref, plus le déficit hydrique est grand, les réserves en eau du sol abondantes, mais aussi les précipitations fines et fréquentes, et plus la végétation forestière aura tendance à réduire l'écoulement annuel (Cosandey, 2006). **Ses conséquences sur les ressources en eau peuvent apparaître comme négatives dans les régions où les ressources en eau sont limitées, et où il y a alors concurrence entre différents usages**. C'est en ayant à l'esprit ces conclusions qu'il faudra aller plus loin dans l'analyse (ou la prévention) des risques liés à certains scénarios d'aménagement du territoire et aux changements climatiques.

S'agissant de l'influence de la forêt sur de la qualité des eaux à l'échelle du bassin versant, il est clair que, de façon générale, **la forêt alimente cours d'eau (**Benoit et Fizaine, 1999) **et nappes souterraines en eau de grande qualité**. Les modifications négatives que peut entraîner la forêt (acidification des eaux dans les sites exposés aux dépôts acides, perte de nitrates) restent le plus souvent mineures par rapport à celles provoquées par l'agriculture intensive, la forêt recevant très peu d'intrants. Cette appréciation serait bien entendu remise en cause dans le cas d'une évolution radicale des pratiques en la matière, mais dans les conditions actuelles, les précautions prises (ou recommandées) doivent permettre que la forêt reste la source – et la référence - d'eau propre.

Au total, l'incidence d'un prélèvement accru de biomasse est susceptible de modifier de diverses manières les quantités et qualité des eaux de surface, à l'échelle locale comme à celle du grand bassin versant, mais **les problèmes sérieux seraient davantage à envisager dans le cadre de modifications importantes de l'utilisation des terres et, éventuellement, de modifications drastiques des pratiques sylvicoles qui pourraient intervenir, qui plus est, dans un contexte d'évolution défavorable du régime hydrique liée au changement climatique.** On serait donc avisé d'investir sans tarder dans un effort de recherche soutenu sur l'influence de ces facteurs à l'échelle du bassin versant.

6. Références bibliographiques

Angéli N., 2006. *Évolution de la composition chimique des ruisseaux Vosgiens. Analyse rétrospective et effet d'un amendement.* Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur en Géosciences de l'Université Henri Poincaré, Nancy I. Nancy, INRA, 419 p.

Aussenac G., Granier A., Naud R., 1982. Influence d'une éclaircie sur la croissance et le bilan hydrique d'un jeune peuplement de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Canadian Journal of Forest Research,* 12 (2) : 222-231.

Aussenac G., Granier A., Bréda N., 1995. Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. *Revue forestière française,* 47 (1) : 54-62.

Baudouin J.-M., Guérold F., Felten V., Chauvet E., Wagner P., Rousselle P., 2008. Elevated aluminium concentration in acidified headwater streams lowers aquatic hyphomycete diversity and impairs leaf litter breaddown. *Microbial Ecology*, 56 (2) : 260–269.

Benoit M., Fizaine G., 1999. Qualité des eaux en bassins forestiers d'alimentation. *Revue forestière française*, 51 ('2) 162-172.

[16] et comme le souligne Bruijnzeel (in Consandey, 2006), les travaux et la communication en la matière sont souvent sujet quatre "M" ; "Misinformation, Misinterpretation, Mis-understanding and Myth".

Bréda N., Granier A., Aussenac G., 2004. La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiologique et influence sur les arbres forestiers. *Revue forestière française*, 56 (2) : 109-131.

Bréda N., 1999. L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue forestière française*, 51 (2) : 135-150.

Bréda N., Roman-Amat B., 2002. Impact de la conduite des peuplements forestiers sur les ressources en eau. *La Houille Blanche*, (3) : 145-166.

Bruijnzeel L. A., 1990. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion : a state of knowledge review*. Paris, Unesco, 224 p.

Cosandey C., 1993. *Forêt et écoulements : rôle de la forêt sur la formation des crues et le bilan d'écoulement annuel. Impact d'une coupe forestière.* Meudon, CNRS, 81 p.

Cosandey C., 2006. Conséquences des forêts sur l'écoulement annuel des cours d'eau. *Revue forestière française*, 58 (4) : 317-327.

Cosandey C., Robinson M., 2000*. Hydrologie continentale.* Paris*,* Colin, 360 p.

Croke J., Hairsine P., Fogarty P., 1999. Runoff generation and re-distribution in logged eucalyptus forests, south-eastern Australia. *Journal of Hydrology*, 216 (1-2) : 56-77.

Dambrine E., Party J.-P., Pollier B., Nicolaï M., Probst A., Rozin CH., Duc M., 1999. Acidification des eaux de source et saturnisme dans le Massif vosgien. *Revue forestière française*, 51 (2) : 173-183.

Dangles O., Gessner M. O., Guérold F., Chauvet E., 2004. Impact of stream acidification on litter breakdown : implication for assessing ecosystem functioning. *Journal of Applied Ecology*, 41 (2) : 365–378.

Didon-Lescot J.-F., Guillet B., Lelong F., 1998. Nitrate in streamwater as an indicator of forest status and forest ecosystem manipulations. Example at Mont-Lozère (South-East France). *Comptes rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 327 (2) : 107-113.

Durand P., Neal C., Lelong F., Didon-Lescot J.-F., 1992. Effects of land-use and atmospheric input on stream and soil chemistry - field results and long-term simulation at Mont-Lozère (Cevennes National Park, southern France). *Science of the Total Environment*, 119 : 191-209.

Février C., Party J.-P., Probst A., 1999. Acidité des eaux de surface et charges critiques dans le massif des Ardennes françaises. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 328 (1) : 29-35.

Fritsch J.-M., 1990. Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie des petits bassins versants. Thèse de doctorat. Montpellier, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 392 p.

Gessner M. O., Chauvet E., Dobson M., 1999. A perspective on leaf litter breakdown in streams. *Oikos*, 85 (2) : 377–384.

Granier A., 2007. Rôle des prairies dans le cycle de l'eau. Comparaison avec la forêt. *Fourrages*, (192) : 399-408.

Granier A., Badeau V., Bréda N., 1995. Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue forestière française,* 47 (n° spécial) : 59-68.

Granier A., Bréda N., 2007. Ecophysiologie et fonctionnement des écosystèmes forestiers. *Rendez-vous techniques de l'ONF*, hors série n° 3 : 81-88.

Guérold F., Boudot J.-P., Jacquemin G., Vein D., Merlet D., Rouiller J., 2000. Macroinvertebrate community loss as a result of headwater stream acidification in the Vosges mountains (N-E France). *Biodiversity and Conservation*, 9 (6) : 767–783.

Landmann G., Bonneau M. (Eds.), 1995. *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains*. Berlin, Heidelberg, New-York, Springer, 461 p.

Massabuau J.-C., Probst A., Guérold F., 1995. Critical loads of acidity to streamwaters in the Vosges mountains (France) : Biological criteria. *In* Landmann G., Bonneau M. (Eds), *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains*. Berlin, Heidelberg, New-York, Springer, 387-393.

Moncoulon D., Probst A., Party J.-P., 2004. Weathering, atmospheric deposition and vegetation uptake : role for ecosystem sensitivity to acid deposition and critical load. *Comptes rendus - Geosciences*, 336 (16) : 1417-1426.

Nedeltcheva T., Piedallu C., Gégout J.-C., Boudot J.-P., Angéli N., Dambrine E., 2006. Environmental factors influencing streamwater composition on sandstone (Vosges Mountains). *Annals of Forest Science,* 63 (4) : 369–376.

ONF, 2006. Rapport d'étude sur les conséquences de la tempête de 1999 et de sa gestion forestière sur les milieux aquatiques vosgiens. Présentation des résultats et approche générale des impacts sur le milieu physique, Office national des forêts, DT Alsace – Service d'Appui Technique.

Party J.-P., 1999. Acidification des sols et des eaux de surface des écosystèmes forestiers français : facteurs, mécanismes et tendances. Taux d'altération sur petits bassins versants silicatés. Applications au calcul des charges critiques. Thèse de Doctorat. Université Louis Pasteur de Strasbourg, Mention Géochimie de l'Environnement. Strasbourg, Université Louis Pasteur Strasbourg I, 235 p.

Pinay, G., Décamps H., 1988. The role of riparian woods in regulating nutrient fluxes between the alluvial aquifer and surface water : a conceptual model. *Regulated Rivers,* 2 : 507-516 (1988).

Perrin A.-S., Probst A., Probst J.-L., 2008. Impact of nitrogenous fertilizers on the dissolution of carbonate bedrock in small agricultural catchments : implications for regional and global atmospheric CO2 source/sink. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 72 (13), 3105-3123.

Poncet A., 1970. Rénovation des eaux urbaines usées et fertilisation forestière par irrigation. *Revue forestière française,* 22(1) : 85-88.

Probst A., Lelong F., Viville D., Durand P., Ambroise B., Fritz B., 1995a. Comparative hydrochemical behaviour and element budgets of the Aubure (Vosges Massif) and Mont-Lozère (Massif Central) spruce forested catchments. *In* Landmann G., Bonneau M. (Eds), *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains*. Berlin, Heidelberg, New-York, Springer, 203-225.

Probst A., Massabuau J.-C., Probst J.-L., Fritz B., 1990. Acidification des eaux de surface sous l'influence des précipitations acides : rôle de la végétation et du substratum, conséquences pour les populations de truites. Le cas des ruisseaux des Vosges. *Comptes rendus de l'Académie des sciences - Série 2 - Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 311 (3) : 405-411.

Probst A., Party J.-P., Février C., Dambrine E., Thomas A.-L., Stussi J.-M., 1999. Evidence of springwater acidification in the Vosges mountains (North-East of France) : influence of bedrock buffering capacity. *Water Air and Soil Pollution,* 114 (3-4) : 395-411.

Probst A., Probst J.-L., Massabuau J.-C., Fritz B., 1995b. Surface water acidification in the Vosges mountains : relation to bedrock and vegetation cover. *In* Landmann G., Bonneau M. (Eds), *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains*. Berlin, Heidelberg, New-York, Springer, 371-386.