



Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine

99-3 | 2011

La forêt sur le devant de la scène : une ressource naturelle témoin de notre temps ?

L'évolution forestière dans les massifs alpins et jurassiens : conséquence directe sur l'état physico-chimique des niveaux profonds des lacs ?

Van Tuan Nghiem, Rachid Nedjai et Nacer Nasreddine Messaoud



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/rga/1579>

DOI : [10.4000/rga.1579](https://doi.org/10.4000/rga.1579)

ISSN : 1760-7426

Éditeur

Association pour la diffusion de la recherche alpine

Référence électronique

Van Tuan Nghiem, Rachid Nedjai et Nacer Nasreddine Messaoud, « L'évolution forestière dans les massifs alpins et jurassiens : conséquence directe sur l'état physico-chimique des niveaux profonds des lacs ? », *Revue de Géographie Alpine | Journal of Alpine Research* [En ligne], 99-3 | 2011, mis en ligne le 15 février 2012, consulté le 03 mai 2019. URL : <http://journals.openedition.org/rga/1579> ; DOI : [10.4000/rga.1579](https://doi.org/10.4000/rga.1579)

Ce document a été généré automatiquement le 3 mai 2019.



La *Revue de Géographie Alpine* est mise à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

L'évolution forestière dans les massifs alpins et jurassiens : conséquence directe sur l'état physico-chimique des niveaux profonds des lacs ?

Van Tuan Nghiem, Rachid Nedjai et Nacer Nasreddine Messaoud

- 1 L'évolution de l'occupation des sols dans les Alpes et le Jura au cours des trente dernières années est devenue une question récurrente et a fait l'objet de nombreuses recherches scientifiques afin de mesurer principalement l'impact du changement climatique sur certaines espèces (plateau du Vercors, Col du Lautaret, Haut Jura) et surtout l'évolution forestière et paysagère à l'échelle de ces régions. Le traitement et l'analyse des photographies aériennes et des images satellites ont confirmé cette évolution et ont démontré la fermeture progressive du paysage en particulier dans les secteurs de moyenne montagne et l'extension urbaine en plaine. Ce phénomène a été accentué par deux facteurs importants qui sont la nette réduction du foncier, provoquant une extension manifeste des villes et des espaces urbanisés, et l'exode massif des agriculteurs, réduisant ainsi les surfaces cultivées au profit d'une végétation arborée formée principalement de résineux.
- 2 Ce processus est sans conteste préoccupant pour les gestionnaires en particulier de la ressource en eau, qui voient les réserves en eau exploitables s'amenuiser progressivement sous l'effet d'une évapotranspiration grandissante et d'une perturbation sensible du bilan hydrologique à l'échelle des bassins versants. Cette fermeture paysagère est également contraignante pour les rivières et les plans d'eau qui enregistrent des hausses assez nettes de leurs teneurs en matière organique, le plus souvent accompagnée par la baisse sensible à la fois de l'oxygène dissous dans l'eau, du potentiel redox et surtout du pH. L'acidification des milieux aquatiques tend à s'amplifier et les recherches qui se sont penchées sur la question ont tenté d'abord de comprendre les causes et d'évaluer les

effets de tels phénomènes sur les écosystèmes (Smol, 2008, Ek A, *et al.*, 2001 ; Battarbee, Chen-tung A. *et al.*, 2004). Au total, trois facteurs sont à la base des processus d'acidification : les pluies acides, les rejets industriels (N, S) et domestique directs et finalement le regain forestier par le développement d'espèces acidophiles (conifères essentiellement). D'autres privilégient la présence et l'extension des zones humides dans les bassins versants lacustres et en périphérie des lacs.

- 3 L'intégration des nouvelles technologies de l'information, en particulier les SIG et la télédétection a donné un nouveau souffle à la compréhension des processus écologiques et à l'organisation des espaces paysagers. Néanmoins, rares sont les tentatives de modélisation de ces mêmes systèmes dans une optique prédictive et surtout d'évaluation des conséquences de telles mutations par le couplage de modèles hydrogéochimiques et des SIG. Dans le cadre de ces recherches, nous proposons une démarche innovante pour tenter de modéliser l'évolution du couvert forestier sur les vingt prochaines années, sur la base d'une combinaison judicieuse de la télédétection et de la géomatique dans un premier temps, puis leur couplage à un modèle hydrogéochimique. En effet, cette démarche repose sur le traitement de quatre images landsat et la modélisation de l'évolution du mode d'occupation des sols par recours au module LCM (Land Cover Modelling) d'Idrisi et l'intégration des résultats de cette première phase dans le modèle WARMF (Watershed Assesment Risk Management Framwork). Il s'agit donc de comprendre le fonctionnement général des plans d'eau et puis de prédire le futur en particulier l'état physico-chimique des lacs. Le secteur d'application sur lequel a porté notre analyse est le Jura, plus précisément le secteur des lacs (plateau moyen).

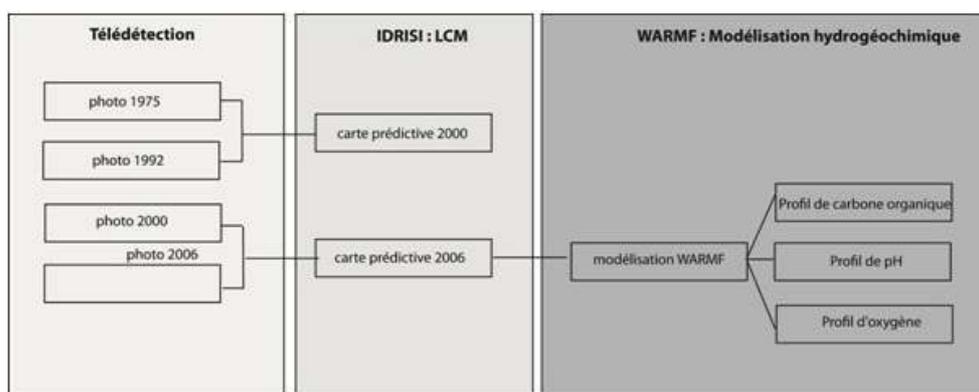
Méthodes d'analyse et techniques de modélisation paysagère et hydrogéochimique

- 4 Globalement, trois étapes caractérisent notre démarche (Figure 1) :
- 5 1 – Le traitement par télédétection des quatre missions satellitales
- 6 Au total, quatre images Landsat ont été utilisées (1975, 1992, 2000 et 2006). La méthode consiste à combiner trois canaux : 2,3,4. Les études expérimentales menées sur la définition des groupements végétaux ont montré que la supériorité de la combinaison TM 2,3,4 est assez nette. La classification supervisée, basée sur l'algorithme du « maximum de likelihood » (N.Boulaouat et B.Naert, 1996 ; Aykut Akgun *et al.*, 2000) a permis d'extraire les différents types d'occupation du sol. L'image 2006 a été traitée en premier pour permettre de vérifier les résultats avec un échantillon de terrain. Elle a servi de référence pour le traitement des autres images, plus anciennes, sur la base de valeurs extraites de l'image « invariant ». Elle a servi également au choix des échantillons qui ont permis le traitement des autres images par recours à la même méthode et donc au même algorithme. Le logiciel utilisé est ENVI 4.5.
- 7 2 – Intégration et calage du modèle LCM sur les périodes 1975-1992 et 1992-2002
- 8 Les résultats des différents traitements par télédétection ont servi à alimenter la base de données SIG (Idrisi). Le calage du modèle a été réalisé en quatre étapes :
- L'extraction du modèle numérique de terrain à partir des fichiers SRTM 30, corrigé (comblement des trous à l'aide du module esrihydrologique) et transformé pour couvrir le secteur des lacs dans un système de projection Lambert II carto. Le recours au modèle numérique de terrain a permis d'abord son intégration dans le modèle LCM, comme

contrainte permettant d'apprécier l'impact de la pente sur l'évolution de l'occupation de sols puis d'estimer les débits aux différents exutoires des lacs à l'aide du modèle WARMF. La pente ainsi que d'autres facteurs physiographiques sont des paramètres de base du modèle WARMF.

- La numérisation du réseau routier sous ArcGIS et sa transformation au format image pour être conforme aux autres données cartographiques,
- Une conversion des résultats de traitement par télédétection en format image. Les images d'une résolution de 30 m ont été géoréférencées et adaptées pour couvrir le même secteur que les données cartographiques précédentes (MNT et Routes).
- La création d'une série de cartes de distances pour les routes et les rivières, considérées comme variables par le modèle LCM, basé sur le principe d'un calcul probabiliste selon la méthode de Markov qui consiste à évaluer la probabilité qui caractérise au mieux la substitution d'un type d'occupation à un autre type. Globalement, plusieurs étapes sont nécessaires pour l'établissement de cartes prédictives à l'aide du modèle LCM (Land Cover Modeling) qui a besoin en entrée des paramètres suivants : des images d'occupation du sol (données d'occupation du sol en format image) de deux périodes. Dans le cadre de cette étude, nous avons pris en considération les images de 1975 et de 1992, l'image du réseau routier et finalement le MNT (Modèle Numérique de Terrain). Le modèle construit la matrice de transformation sur la base des images précédentes avec, en cas de besoin, des actions de mise au point à l'aide des graphiques résultats (calage). La vérification se fait sur la base de l'image de 2002, considérée comme témoin. La seconde étape consiste à choisir la méthode adéquate pour la transition potentielle qui peut être l'une des cinq méthodes suivantes : la Probabilité de preuve, l'Exponentiel, la Déroute carrée, le Logarithme naturel, et le Logit. Un test rapide de la puissance potentielle des variables explicatives qui permet de valider le modèle est fait à chaque phase de calage. Il permettra, entre autres, l'ajustement des données supplémentaires concernant la carte de tendance spatiale du changement, les données du réseau hydrographique, la position des villes, etc. Une fois le modèle calé, un calcul prédictif sera effectué avec le choix préalable de la date concernée.

Figure 1 : Démarche méthodologique appliquée au bassin versant du Hérisson



9 3 – Modélisation prévisionnelle de 2015 et de 2030

- 10 Pour les besoins de la modélisation de l'évolution de l'occupation des sols pour les vingt prochaines années, l'utilisation du module LCM (Land Cover Modeling) permet d'établir des cartes prédictives sur la base de plusieurs paramètres et de règles de décision. Ces paramètres peuvent être soit des contraintes, soit des facteurs pouvant limiter, ou au contraire permettre, les changements et donc l'évolution de l'occupation des sols. Ainsi et

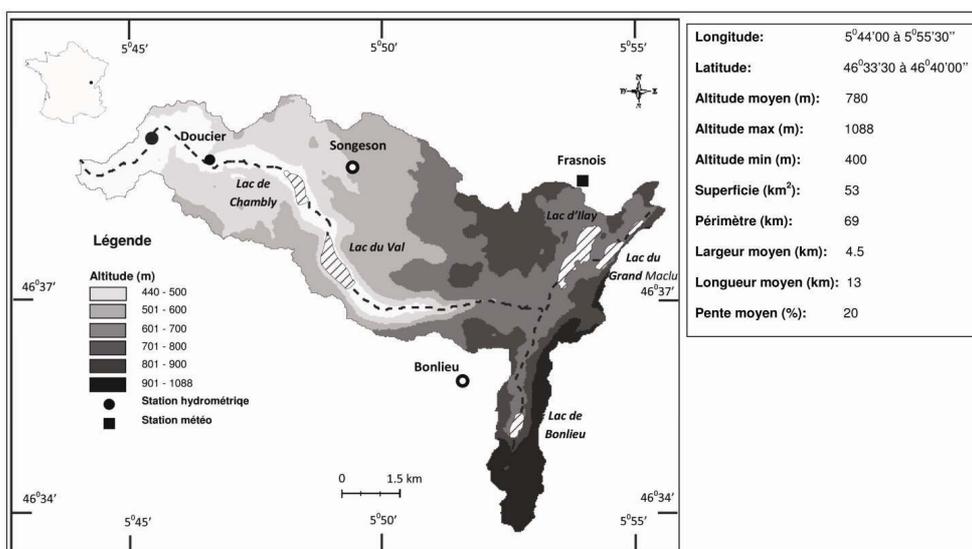
à titre d'exemple, une contrainte de premier ordre a été prise en compte dans le traitement qui consiste à interdire la substitution des plans d'eau et rivières par du bâti.

- 11 Le calage du modèle a été réalisé en deux étapes :
 - Une première étape basée sur les missions satellitaires de 1975 et 1992, avec la création de la carte prédictive de 2000. Cette carte a été comparée aux résultats de traitement de l'image de 2002 afin d'évaluer les écarts et donc la pertinence du calage du modèle. Ces derniers gravitent autour de 15%.
 - Une seconde analyse de l'occupation des sols du bassin versant du Hérisson similaire à la précédente a été réalisée sur les missions de 1992 et de 2000. Cette période reste globalement similaire à la précédente dans son évolution, avec cependant une légère décroissance des espaces agricoles et ouverts. Les écarts calculés entre la carte prédictive de 2006 et la carte de l'occupation des sols issue de la télédétection de 2006, sont légèrement inférieurs à 15%. Nous avons considéré ces résultats comme acceptables en dépit du fait qu'ils demandent un peu plus de précision.
- 12 Les résultats de cette première phase de modélisation servent à alimenter un second modèle relatif à la caractérisation hydrogéochimique des lacs et des rivières WARMF. Développé par la société américaine Systech, c'est un modèle logistique d'aide à la gestion et à la décision, dédié à la gestion de la ressource en eau des grands bassins versants (Chen et *al.*, 2010). Doté d'une base de données chimique conséquente, il permet d'évaluer les tendances physico-chimiques d'un plan d'eau ou d'une rivière à des pas de temps journaliers. Plusieurs paramètres relatifs à l'hydrométéorologie (P, T, Humidité, Débits, ...), à la chimie de l'air et des eaux (N, S, majeurs, traces, ...), aux sédiments (Matière organique, Majeurs, traces, ...) et au bassin versant (S, P, Pente, occupation des sols, type de sols, caractéristiques hydrodynamiques, ...) sont nécessaires pour le calage du modèle et pour son fonctionnement.

Cadre géographique

- 13 La zone d'étude se trouve dans le département du Jura, plus exactement à mi-distance entre Saint-Laurent-en-Grandveaux à l'est, et Clairvaux-les-lacs à l'ouest. Le bassin versant du Hérisson s'étend sur les plateaux intermédiaire et bas et couvre une superficie d'environ 50 km². Il regroupe les communes du Frasnois à l'est, de Bonlieu à l'ouest et de Songesson au sud. Son extrémité ouest coïncide avec la limite communale de Doucier. Au total, il englobe six lacs dont quatre se situent sur le plateau moyen (Petit et Grand Maclu, Illay et Bonlieu) et deux dans le bas (Val et Chambly) (Figure 2).

Figure 2 : Cadre géographique du bassin versant du Hérisson (Jura)

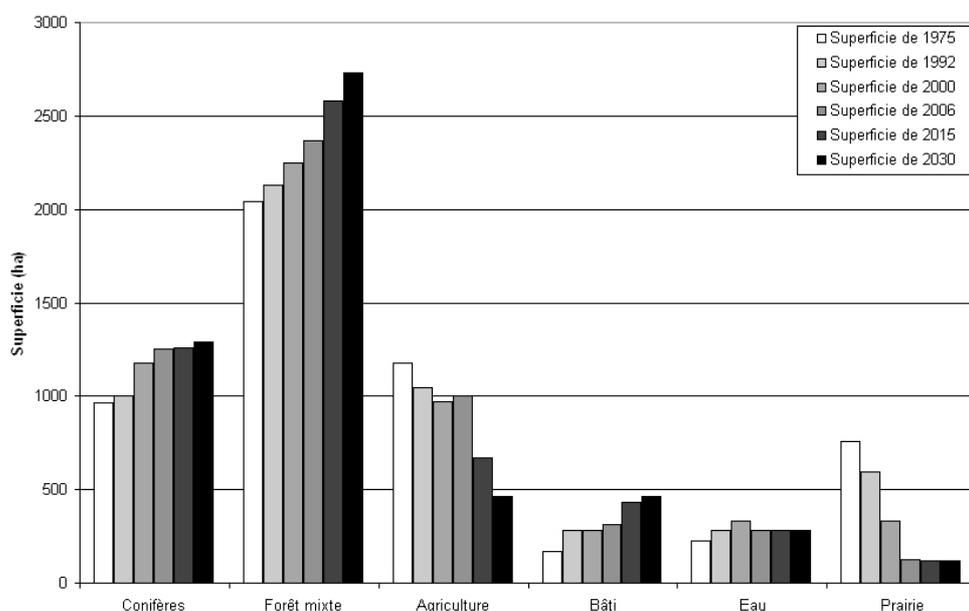


- 14 Sur le plan économique, la zone est à caractère agricole avec, comme activité prédominante, l'élevage. L'espace bassin versant est marqué globalement par la prédominance des prairies à proximité des plans d'eau et des forêts sur les massifs et dans les secteurs à forte pente.

Analyse des résultats

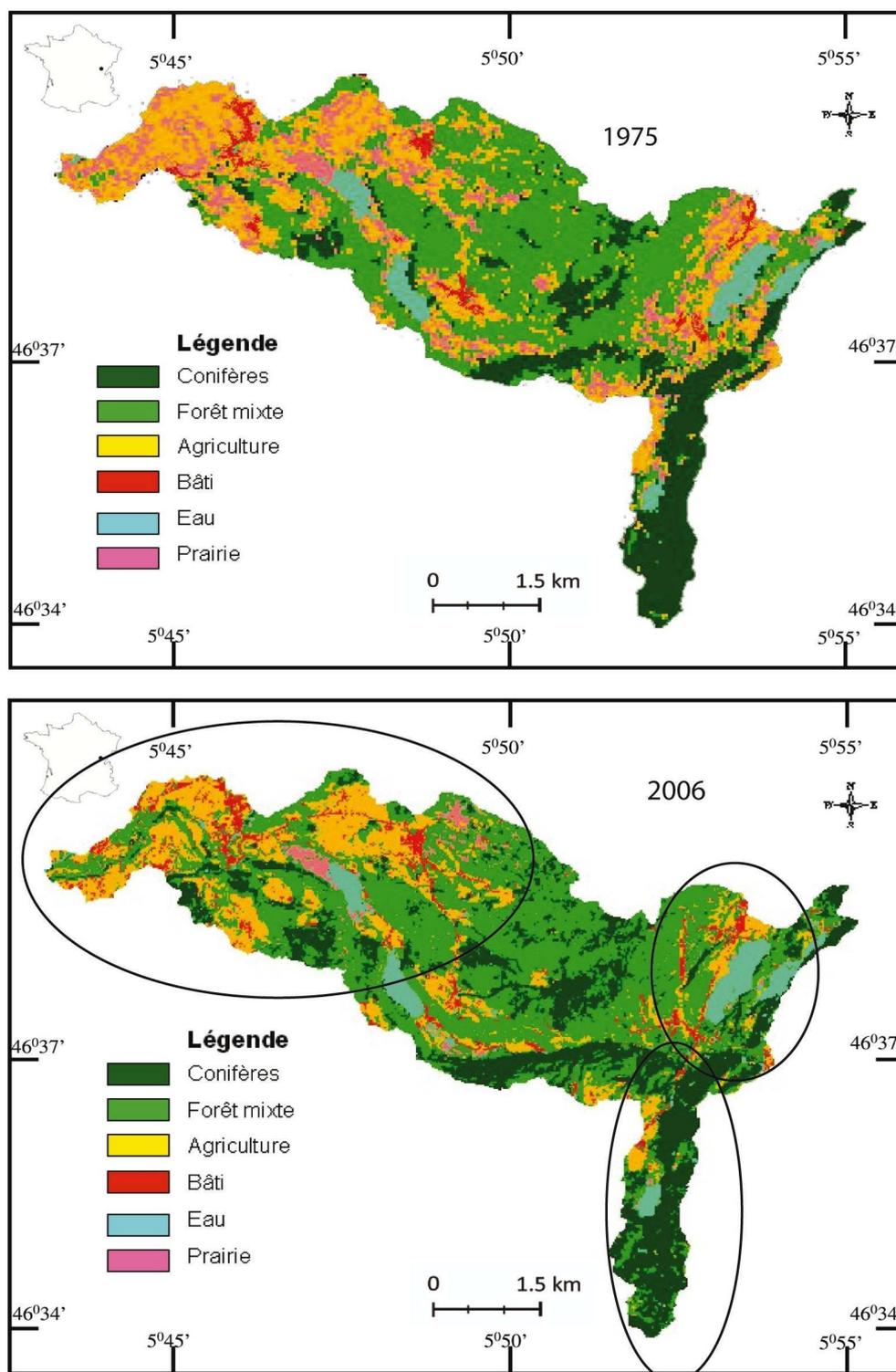
- 15 L'analyse comparative des résultats précédents fait ressortir deux éléments fondamentaux quant à l'évolution de l'occupation des sols du bassin versant du Hérisson (Figure 3) :
- Une baisse assez nette des surfaces agricoles sur la période 1975-1992. Celle-ci a été confirmée par les enquêtes de terrain, effectuées dans la commune du Frasnois en avril 2011. Cette baisse est rentrée probablement dans une phase de stabilité dès le début des années 90, phénomène très perceptible lorsqu'on compare les images de 1992 et 2000. Il se confirme sur la période 2000 et 2006 mettant clairement en évidence un processus rapide sur la période d'avant 2000 et un ralentissement après cette période.
 - Trois types d'occupation des sols ont été affectés par cette baisse des surfaces agricoles. Il s'agit tout d'abord des forêts mixtes, qui ont tendance à s'étendre dans la partie nord et ouest du bassin versant, puis des conifères dans toute la partie amont et enfin du bâti. Ce dernier a pratiquement doublé en quarante années autour des villages existants et plus particulièrement dans le secteur aval du bassin à proximité de Doucier.

Figure 3 : Évolution de l'occupation des sols entre 1975 et 2006



- Cette tendance se poursuit et s'accroît nettement en 2000, mettant clairement en évidence la prépondérance des espaces couverts par les forêts mixtes. Les conifères n'affichent en revanche qu'une faible extension, toujours dans les secteurs sud, plus précisément dans le bassin versant de Bonlieu.
 - Le bâti montre cependant une évolution nettement plus élevée dans la partie aval du bassin versant du Hérisson, dans le secteur de Doucier. Les surfaces bâties ont quasiment doublé entre 1975 et 2006.
 - Les prairies enregistrent globalement une diminution assez forte et donnent une indication assez précise sur la fermeture des espaces qui affecte le bassin versant et plus largement les massifs jurassiens. Cette baisse s'est traduite par l'extension des espèces mixtes (feuillus, pins, ...) ou par du bâti, comme l'atteste de nombreux villages où la part des constructions récentes a sensiblement augmenté.
- 16 Globalement et comme nous avons pu le constater sur le graphique précédent, les plus fortes pertes sont attribuées à l'agriculture et aux espaces ouverts, généralement exploités par les agriculteurs. Ces pertes de surface s'élèvent respectivement à 8% pour la première catégorie et à 5% pour la seconde. Elles ont profité essentiellement aux forêts mixtes et aux conifères, en particulier dans la partie haute du bassin versant, comme le montre la figure 4 (voir les cercles), et secondairement, d'une façon localisée au bâti.
- 17 Les changements s'observent nettement dans trois secteurs du bassin versant. Tout d'abord dans le secteur des lacs du plateau intermédiaire, plus précisément dans le bassin versant du lac d'Ilay, où la multiplication des constructions récentes est très nette. Le même phénomène est enregistré également dans le secteur aval, non loin de l'exutoire du Hérisson sur la commune de Doucier ainsi que dans la commune de Songesson, propriétaire du lac du Val.

Figure 4 : Évolution de l'occupation des sols du bassin versant du Hérisson entre 1975 et 2006



- 18 A l'inverse, la baisse des espaces ouverts est très nette dans les mêmes secteurs, marquée par la progression forestière à dominante mixte.
- 19 Le secteur aval se distingue également par la réduction des espaces urbains, très dominants à la fin des années 1970 et relativement très morcelés en 2006. Cette tendance confirme l'exode massif vers les villes de Clairvaux et de Champagnole, devenues de

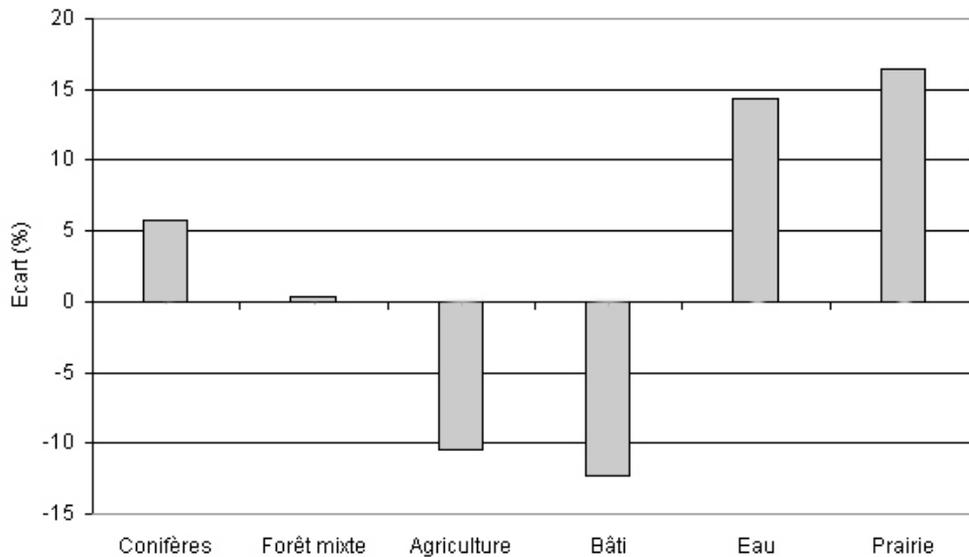
véritables pôles urbains depuis près d'une vingtaine d'années, et la substitution des surfaces à des espèces forestières mixtes.

- 20 Au sud, dans le secteur de Bonlieu, ce sont les conifères qui restent dominants avec l'apparition de quelques îlots de forêt mixte (conifère et feuillus) dans la zone sud-ouest du lac. Cette extension de conifères se poursuit le long de la rivière du Hérisson, regagnant progressivement de l'espace sur la forêt mixte dans le secteur de Songesson.
- 21 Donc, globalement, le contraste est assez remarquable entre une partie basse (aval) marquée par le maintien des espaces ouverts et un bâti dense, et une partie haute (amont) qui se distingue par la densification des forêts (conifères au sud et mixte au nord).

La modélisation de l'occupation des sols : prédiction pour les vingt années futures

- 22 La question récurrente, posée par les gestionnaires, est celle relative au devenir de ces espaces sur les vingt prochaines années, et surtout à la nature des espèces végétales qui les occuperaient, dans l'optique de mesurer l'influence de ces dernières sur la qualité des milieux aquatiques (lacs). Ces derniers sont très sensibles aux apports organiques qui affectent manifestement les paramètres physico-chimiques et altèrent globalement la qualité chimique des eaux (relargages de métaux, composés organométalliques, ...). Le recours aux modules LCM (Land Cover Modeling) (CLARK, 2010 ; Gilmore, 2006) nous a permis donc de calculer les probabilités de changement de l'occupation des sols et de procéder à une cartographie prédictive pour les vingt prochaines années. La fonction d'évolution sélectionnée est de type sigmoïdale décroissante, dans la mesure où la baisse a été rapide entre 1975 et 2000, et s'est considérablement ralentie dès 2006.
- 23 Un premier calage du modèle a été effectué par la prise en compte des cartes d'occupation des sols de 1975 et 1992, et de 1992 et 2000. Les résultats de chaque étape ont servi à la réalisation de cartes prédictives correspondant à une des dates dont on dispose de la carte issue de la télédétection. Ainsi, la période 1975-1992 a abouti à la carte prédictive de l'année 2000. Celle-ci a été comparée à la carte de 2000 issue du traitement par télédétection. Le même procédé a été reproduit pour la période 1992-2000 et la carte prédictive de 2006 qui a été comparée à celle de 2006 issue de la photo satellite de 2006. Les écarts obtenus (Figure 5) montrent globalement un calage satisfaisant au vu de l'erreur enregistrée qui varie entre 2 et 15%, ce qui reste acceptable.

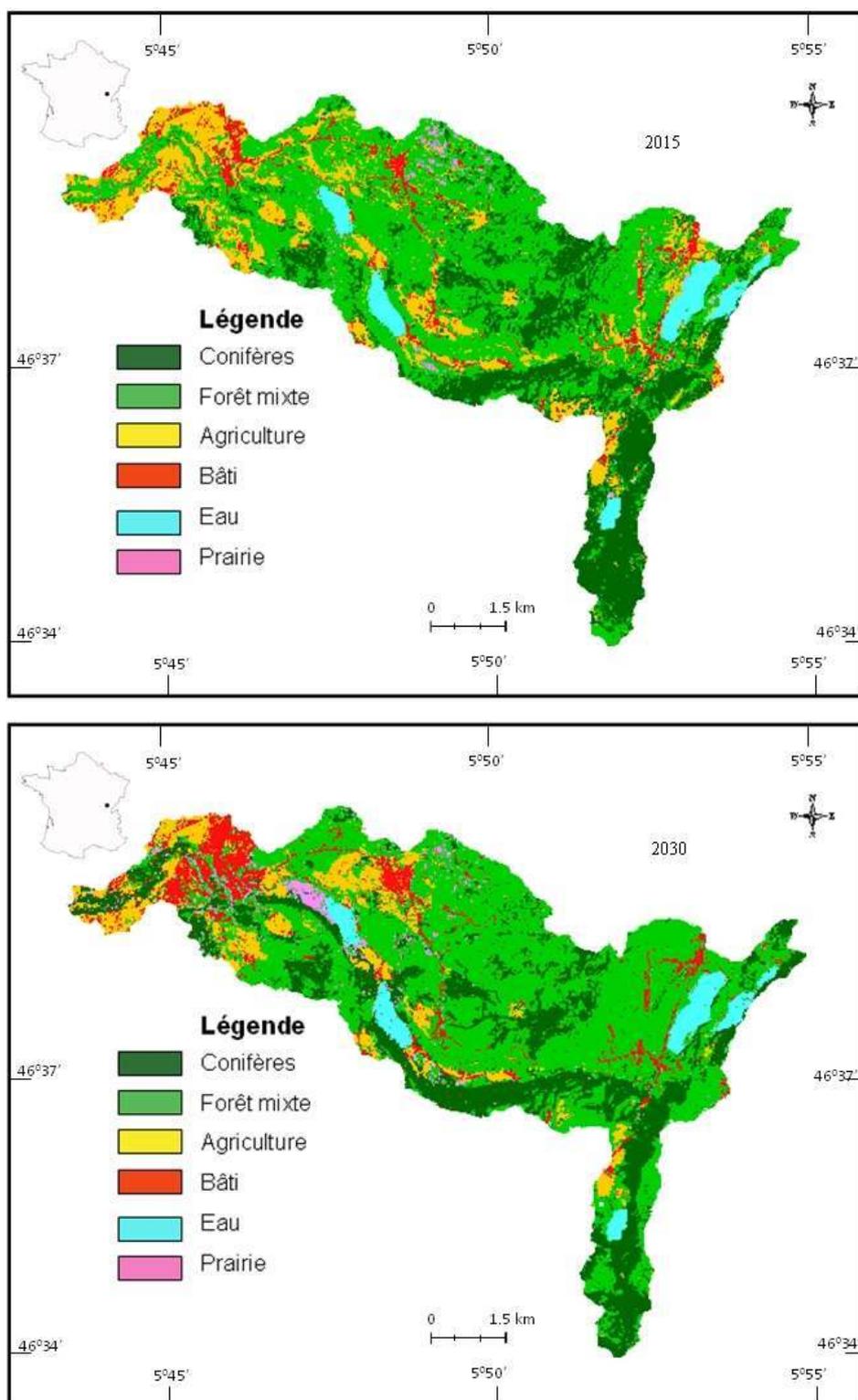
Figure 5 : Écart résiduel (en %) entre les résultats obtenus par télédétection de la photosatellite 2006 et la carte prédictive de 2006



24 La réalisation des simulations a permis la création des cartes prédictives de 2015 et 2030. L'analyse de celle-ci fait ressortir plusieurs remarques quant à l'évolution de l'occupation des sols du bassin versant du Hérisson (Figure 6) :

- Une densification du tissu urbain dans la partie basse (aval) du bassin versant, aux alentours du village de Doucier. Ce constat est prévisible dans la mesure où la proximité de la ville de Champagnole favorise ce type d'évolution. Cette extension gagne du terrain sur les hauteurs, plus précisément sur le plateau de Ménétrux, qui se distingue actuellement par des espaces à caractère fortement agricole (maïs essentiellement).
- Le même phénomène tend à se reproduire, mais à un degré faible, en amont, dans le village du Frasnois, ainsi qu'à Bonlieu. Dans ce dernier village, c'est plutôt la proximité de la ville de Clairvaux qui exerce son influence.

Figure 6 : Cartes prédictives de l'évolution de l'occupation des sols du bassin versant du Hérisson en 2015 et 2030

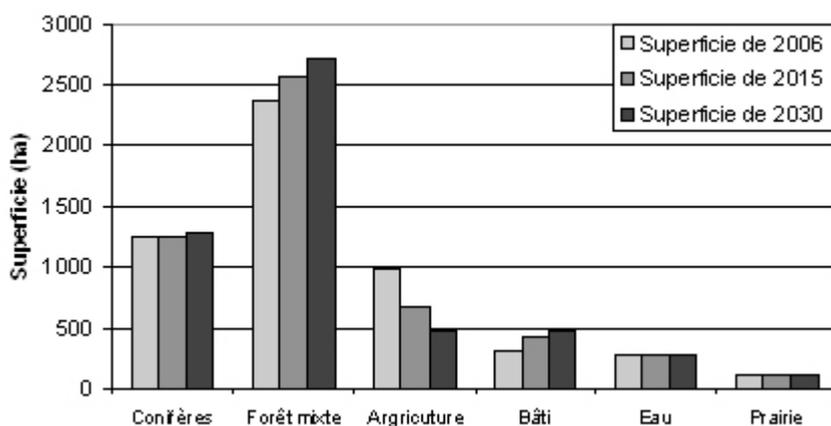


- 25 Sur le plan forestier, une tendance inverse à la tendance actuelle émerge, avec la nette réduction des surfaces de conifères dans le bassin versant du lac de Bonlieu. Ce processus prend effet dès 2015 pour s'amplifier en 2030. Pratiquement les deux tiers de l'espace sont

occupés par des espèces mixtes. Cette tendance s'amenuise le long de la reculée du Hérisson où les versants ont tendance à subir un sensible développement des conifères, ainsi que sur la partie amont du plateau de Songeson.

- 26 Plus au nord, le secteur du lac d'Ilay montre également une extension des espaces couverts par les conifères, en particulier dans le secteur ouest, encadré par les falaises calcaires du Jurassique (Figure 6 a et b).
- 27 La comparaison des surfaces obtenues par simulation avec les surfaces extraites des images satellites de 2006 permet de mesurer cette évolution et d'individualiser les secteurs affectés par ces changements.
- 28 Globalement deux types d'occupation gardent la même tendance, en l'occurrence une hausse lente mais réelle de leurs espaces ; il s'agit des espaces forestiers mixtes et du bâti (Figure 7).
- 29 A l'inverse, les espaces occupés par les conifères, les prairies et l'eau, n'affichent aucune évolution et gardent ainsi des surfaces pratiquement constantes.
- 30 Au total, les forêts mixtes occupent près de 2 500 hectares sur l'ensemble du bassin, suivies par les conifères, avec 1 200 hectares. L'agriculture et le bâti affichent une tendance inverse. Ainsi, les surfaces agricoles ont tendance à décroître, alors que le bâti voit ses surfaces croître.

Figure 7 : Évolution de l'occupation des sols entre 2006 et 2030 du bassin versant du Hérisson



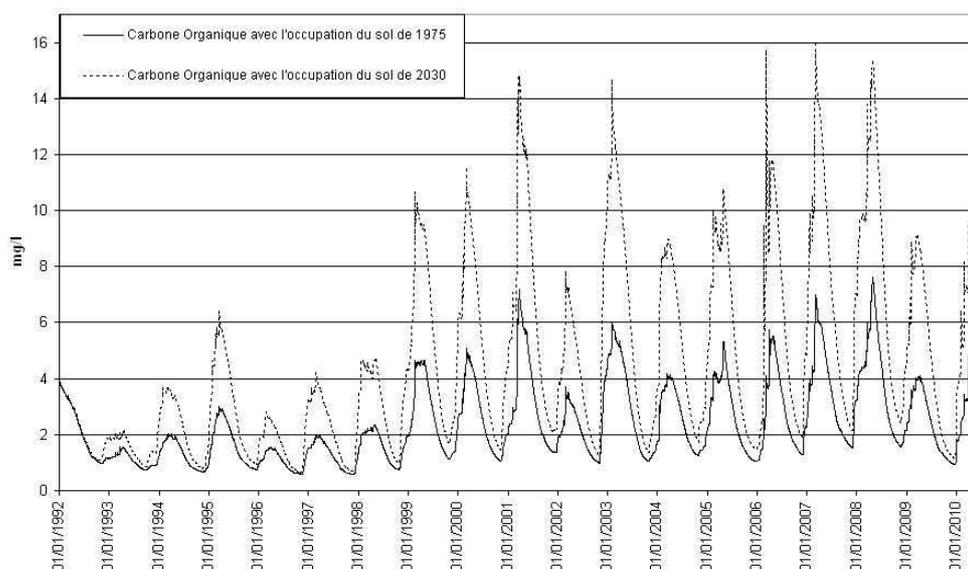
- 31 Ces mutations de l'espace et surtout du type d'occupation des sols, en particulier par des espèces végétales formées essentiellement de feuillus et de conifères, n'est pas sans conséquence sur les eaux des lacs en particulier des niveaux profonds. En effet, des études chimiques (Martin, 1990 ; Nedjai et al., 2010 ; DIREN ; 1999, 2004) et biologiques récentes effectuées sur les différents lacs ont montré l'appauvrissement en faune et plus particulièrement en faune benthique (Verneaux et al., 2004). Parallèlement à ce constat, des hausses sensibles de matière organique ont été enregistrées dans les dix premiers centimètres de sédiments, confirmant par là l'augmentation des flux organiques issus essentiellement des versants boisés et des zones humides périlacustres (Nedjai 2010). La détermination du taux de matière organique dans les sédiments par chauffage à 550°C pendant 6 heures a donné une valeur d'environ 40% du poids total de l'échantillon, alors que celle-ci n'était que d'environ 20% à la fin du XIX^e siècle, voire au début du XX^e siècle. Pour tenter de matérialiser cette hausse, nous avons modélisé les flux de carbone organique, d'oxygène et de pH sur la période 1992-2010, par l'introduction des données de

l'occupation des sols de 1975 et de 2030 sur la base des conditions hydrométéorologiques actuelles. Ce choix repose sur le fait que notre objectif est d'apprécier l'impact du changement d'occupation de sols sans effet des changements climatiques. Il est certain que ces derniers sont très fortement liés à cette dynamique à la fois végétale et physico-chimique.

Conséquence de l'évolution de l'occupation des sols sur les milieux aquatiques : lacs du Hérissou

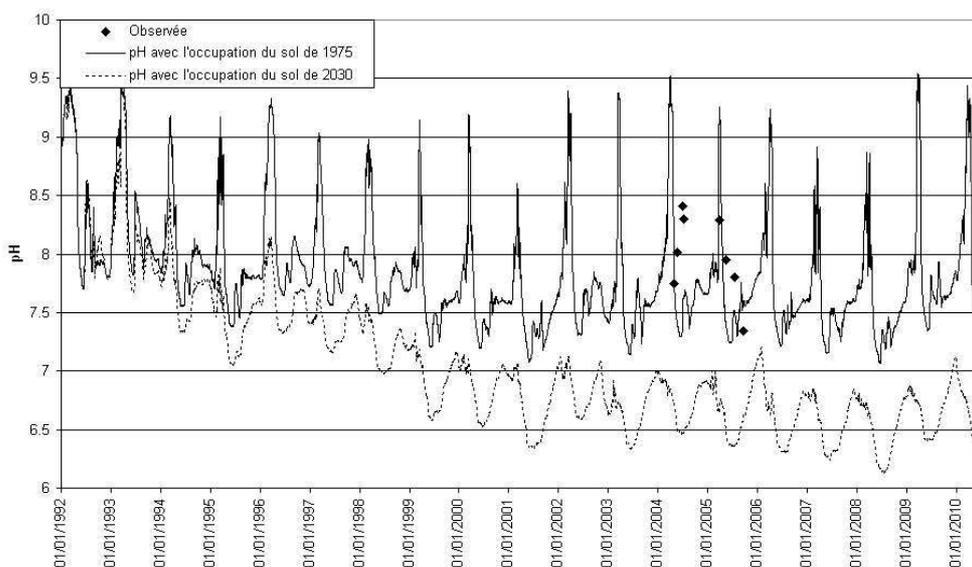
- 32 L'introduction des données de pédologie (caractéristiques hydrodynamiques : conductivité hydraulique, de l'occupation des sols), des données hydrométéorologiques (station météorologique du Frasnais, des débits de la station du Hérissou), hydrochimiques (données propres, 2010, DIREN 1999, 2004, 2005, Verneaux J. 1984) et géochimiques, issues des mesures de la DREAL (ex. DIREN) et de nos propres analyses, a permis d'établir des simulations à l'échelle des lacs et des rivières du bassin versant. Celles-ci ont été effectuées à des pas de temps journaliers sur toute la période considérée. Les calages ont été réalisés sur la base des résultats hydrologiques (débits observés à la station du Hérissou) et l'ajustement des variables du modèle a été fait sur la période 2000-2010. Nous disposons pour cette période de chroniques hydrométéorologiques assez complètes et continues ainsi que de plusieurs séries d'analyses chimiques des eaux des lacs et des sédiments. Nous avons focalisé nos simulations sur deux niveaux : la surface et la base de l'hypolimnion pour tenter de matérialiser l'ampleur des perturbations des paramètres physico-chimiques et donc leur intensité, et l'appréciation des flux de matière organique en provenance des versants. Les simulations ont été effectuées pour les années 1975 et 2030 afin d'observer les dérives potentielles des paramètres physico-chimiques et de mesurer les écarts causés par l'évolution de l'occupation des sols sur cette période. Nous considérons dans ce cas l'année 1975 comme année de référence, tout en sachant que le phénomène de perturbation et plus précisément d'acidification est plus ancien si l'on se base sur les analyses géochimiques que nous avons effectuées sur les sédiments des différents lacs. En effet, la réduction des flux cationiques, essentiellement de calcium, confirme bien cette tendance et la rétention de ces éléments par les dépôts organiques sous forêt (litière).
- 33 Globalement et sur le plan des apports organiques, nous assistons à une accentuation des flux de carbone organique durant la période 1992-2010 (Figure 8). En effet, la fermeture des espaces et l'extension du couvert forestier, essentiellement par des forêts mixtes, se traduit par une production organique relativement élevée. Celle-ci pourrait être estimée à environ 70%, avec des pics pouvant atteindre les 100% durant les années à fortes précipitations.

Figure 8 : Comparaison de l'évolution des taux de carbone organique durant la période 1992-2010 avec les modes d'occupation des sols de 1975 et de 2030



- 34 Cette augmentation des apports organiques s'est traduite par la perturbation des principaux paramètres physico-chimiques et plus particulièrement du pH, qui a vu son niveau baisser sur la même période. Comme nous pouvons le constater sur la figure 9, les mesures effectuées entre 2004 et 2005 confirment cette baisse.
- 35 La modélisation de ce paramètre et l'intégration de l'occupation des sols de 1975 et de 2030 a permis de confirmer cette tendance. En effet, l'occupation des sols de 1975 affiche un état relativement stable, caractéristique des milieux carbonatés, en l'occurrence des pH qui varient entre 7.5 et 8. A l'exception d'une baisse relativement faible au début de la période, les variations du pH restent globalement stables en dehors des périodes de fusion nivale, qui se distinguent par le lessivage des sols altérés et donc par des apports carbonatés conséquents.
- 36 Inversement, l'introduction de l'occupation des sols de 2030 montrent une acidification assez nette et une décroissance d'environ 2 unités pH, faisant descendre celui en dessous du seuil de 6,5. Une atténuation des pics de pH est également perceptible, faisant état d'une réduction des apports carbonatés en raison d'un épaissement de la litière et/ou de la couche organique sous-lacustre, réduisant ainsi l'effet tampon des dépôts à caractère carbonaté.

Figure 9 : Évolution du pH des eaux du lac d'Illay durant la période 1992-2010 avec les modes d'occupation des sols de 1975 et 2030



Conclusion

- 37 Comme nous pouvons le constater à partir des résultats obtenus par des mesures directes et complétés par la modélisation hydrogéochimique, le changement de l'occupation des sols a un effet direct sur la qualité des eaux, plus particulièrement les niveaux profonds, qui rentrent dans une phase d'asphyxie. Les lacs se distinguent globalement par une circulation très lente de leurs eaux, qui se traduit par des échanges chimiques conséquents avec l'encaissant. L'exemple du Jura et plus exactement celui du bassin versant du Hérisson confirme globalement ce phénomène induit par la fermeture paysagère. Celle-ci est la conséquence directe de la réduction de l'activité agricole et du regain des espaces ouverts par de la forêt constituée essentiellement de conifères et d'espèces mixtes. Cette abondance s'est traduite par la hausse de la production organique et par le développement des litières. Cette dernière forme un écran vis-à-vis des écoulements des écoulements de surface et réduit considérablement les échanges cationiques, principalement avec les formations calcaires du bassin versant. Les apports solides, à dominante organique, forment une couche écran et limitent les échanges entre eau profonde et roche et donc l'effet tampon des dépôts carbonatés. Les pH affichent une baisse sensible sur les trente dernières années, faisant rentrer les lacs dans une phase d'acidification réelle. Parallèlement à ce phénomène, une baisse équivalente du potentiel redox est enregistrée, qui pourrait se traduire par le relargage (remise en solution) de métaux lourds (mercure, zinc, chrome, ...) (Charlet et *al.*, 2003) et dont les teneurs relativement élevées en aluminium constatées en profondeur (hypolimnion) sont les témoins directs de cette situation. Parallèlement à ce premier phénomène, une baisse de qualité se manifeste par l'appauvrissement du milieu en faune, principalement la faune benthique, comme cela a été confirmé par les travaux de Verneaux (2004), et par la réduction des espèces nobles (Corégone).

BIBLIOGRAPHIE

- AGENCE DE L'EAU RHONE MEDITERRANEE ET CORSE. LES LACS DU FRASNOIS 2004. – *Ilay, Narlay, Petit et Grand Maclu. Synthèse de données. Rapport interne.* 109 p.
- AGENCE DE L'EAU RHONE MEDITERRANEE ET CORSE 2008. – *Etude paléolimnologique sur 8 lacs du district Rhône-Méditerranée. Mise en place d'éléments de référence pour les lacs des 9 Couleurs, d'Anterne, de Chalain, de Lauvitel, Nègre, de Rémoray, du Vallon et de Vens* 1er. p. 144.
- AKGUN A., A. HUSNU ERONAT A. AND TURK N. 2000. – *Comparing different satellite image classification methods: An application in Ayvalik District, Western Turkey.* XXth ISPRS Congress Istanbul, pp. 24.
- BARBIERI A. AND MOSELLO R., 2000. – « Recent trends in chemistry and mass budget of a high altitude lake in the southern Alps (Laghetto Inferiore, Canton Ticino, Switzerland) », *Journal of Limnology*, 59(2), pp. 103-112.
- BATTARBEE R.W., MASON J. RENBERG I., AND TAILING J.F., 1990. – « Paleolimnology and lake acidification », *Book of Royal Society of London*, pp. 339-347.
- BOULAHOUAT N. ET NAERT B., 1996. – « Télédétection des ressources en sols des zones arides », *Revue étude et Gestion des sols*, pp. 7-26.
- CHARLET L., G. ROMAN-ROSS, L. SPADINI AND G. RUMBACH, 2003. – « Solid and aqueous mercury in remote river sediments (Litany River, French Guyana, South America) ». *Journal of Phys. IV France* 107.
- CHEN-TUNG A. CHEN, WU J.-T., WANG B.-J., HUANG K.-M., 2004. – « Acidification and Trace Metals of Lakes in Taiwan », *Scholar portal journal/ Special issue of Aquatic Geochemistry*, pp. 33-57.
- CHEN CARL W. AND HERR J., 2010. – « Simulating the Effect of Sulfate Addition on Methylmercury Output from a Wetland », *Journal of Environmental Engineering*. Vol. 136, n°4, pp 354-362.
- CLARK LABS, 2010. – « Modeling REDD Baselines using IDRISI's Land Change Modeler ». *Clark Labs publishers new focus paper*, p. 2.
- DIREN FRANCHE-COMTE, 1999. – *Les lacs du département du Jura et leur bassin versant. Synthèse des données et propositions de gestion.* Rapport interne. 212 p.
- DIREN FRANCHE-COMTE 2004. – *Les lacs du Frasnois Ilay, Narlay et Grand Maclu ; Synthèse des données*, p. 108.
- EK ANNA S., INGEMAR RENBERG, 2001. – « Heavy metal pollution and lake acidity changes by one thousand years of copper mining at Falun, central Sweeden », *Journal of Paleolimnology*, 26, p. 89-107.
- GILMORE P., JR R. AND HAO C., 2006. – *Land Change Modeling with GEOMOD*, Book of Clark University, p. 44.
- MARTIN C. 1990. – *Lacs de Franche-Comté (massif du Jura), Recherches sur le seston, plus particulièrement sur le trypton organique.* Thèse de doctorat. Université de Franche-Comté.
- NEDJAI R., 2010. – *Les lacs dans leur bassin versant : de l'évaluation à la gestion environnementale.* Habilitation à diriger les recherches en géographie. Université Joseph Fourier.

NEDJAI R., MESSAOUD-NACER N., LANSON M., 2010. – « A history of lead pollution in nine lakes in the Franche-Comté region, eastern France, through the analysis of lakebed sediment », *International Journal of water Resources and Environment management*, Volume 1, n°1, January-June 2009, pp 103-116.

NGUYEN D. D., 2000. – « Land cover category definition by image invariants for automated classification. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing », XIXth ISPRS Congress, Amsterdam, pp 986-990.

SMOL J.P., 2008. – *Pollution of lakes and rivers. A paleoenvironmental perspective*. Blackwell publishing Second edition.

VERNEAUX V., VERNEAUX J., SCHMITT, LOVY C., LAMBERT J.C., 2004. – « The lake biotic index (LBI) : an applied method for assessing the biological quality of lakes using macrobenthos ; the Lake Chalain (French Jura) as an example », *J. Lim.* n°40.

RÉSUMÉS

La question de l'acidification des eaux des lacs a fait l'objet de nombreux travaux scientifiques dans les pays du nord de l'Europe et d'Amérique du Nord. Cet intérêt scientifique a, depuis peu, gagné l'Europe du Sud et l'Asie, en raison de symptômes similaires (baisse du pH et potentiel Rédox, accompagnée le plus souvent d'une déplétion oxygène). Tous les projets scientifiques consacrés à la question s'accordent sur le fait que le phénomène est général et affecte à des degrés différents les lacs de basse et moyenne montagne (les Vosges, et plus récemment le Jura). Cette différence est souvent interprétée comme étant le résultat d'une combinaison de trois sources qui sont : les précipitations acides, les rejets polluants directs et finalement le développement forestier (résineux essentiellement). Si les deux premières sources sont avérées, la troisième est peu perceptible en raison de la lenteur des phénomènes.

L'analyse et la modélisation de l'évolution de l'occupation du sol du bassin versant du Hérisson dans le Jura, à dominante carbonatée, a confirmé l'impact direct du couvert forestier sur la qualité physico-chimique des eaux des lacs, en particulier des niveaux profonds (*hypolimnion*), sur les trente dernières années. Celui-ci est renforcé par la présence et l'importance des ceintures tourbeuses périlacustres, qui par moments participent activement durant les périodes de hautes eaux à la mobilisation d'importantes quantités de matière organique dissoute et particulaire.

Dans le cadre de ce travail, l'objectif visé est de démontrer l'impact direct de la fermeture paysagère enregistrée sur les plateaux jurassiens et provoquée par la nette réduction de l'activité agricole sur les trente dernières années. Nous allons par conséquent nous focaliser sur l'analyse du mode d'occupation (végétation), sur la base de quatre images satellites, couvrant la période 1975-2006 et, par recours à la modélisation hydrogéochimique (WARMF), évaluer l'évolution de la qualité physico-chimique et plus précisément le degré d'acidification des eaux en profondeur. Cette première étape sera suivie d'une phase prédictive dans la perspective de mesurer l'intensité de la dérive physico-chimique (pH et Redox) sur les vingt prochaines années (2030). L'existence de ce phénomène confirmera alors les relargages massifs de métaux lourds constatés récemment et l'appauvrissement biologique enregistrés sur certains lacs, notamment la faune benthique.

INDEX

Mots-clés : bassin versant, forêt, lacs, modélisation, physico-chimie, prédiction

AUTEURS

VAN TUAN NGHIEM

Institut de Géographie Alpine, Grenoble
tuan.nghiem.rsc@gmail.com

RACHID NEDJAI

Institut de Géographie Alpine, Grenoble
nedjai@ujf-grenoble.fr

NACER NASREDDINE MESSAOUD

Maître de Conférence à l'Université Mentouri, Blida, Algérie