HAL
open science

Changement de productivité des forêts: diagnostics et théories

François Houllier, Jean-Daniel Bontemps, Jean-François Dhôte

To cite this version:

François Houllier, Jean-Daniel Bontemps, Jean-François Dhôte. Changement de productivité des forêts: diagnostics et théories. Forêt et pollution. Journée d'Etudes Environnement, Forêt et Société, XVI-XXe siècles, Apr 2006, Paris, France. pp.55-60. hal-00994332

HAL Id: hal-00994332

https://hal.science/hal-00994332v1

Submitted on 21 May 2014

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.

CHANGEMENT DE PRODUCTIVITÉ DES FORÊTS : DIAGNOSTICS ET THÉORIES

par François HOUILLIER, Jean-Daniel BONTEMPS**, Jean-François DHÔTE****

Dans son introduction à l'une des premières synthèses sur l'évolution de la productivité forestière en Europe, Heinrich Spiecker rappelle que : « Even without human influences forests have always been exposed to environmental changes. As a result, growth rates have always been changing over time ». Bien que l'assertion soit exacte, la détection des changements de productivité forestière intervenus au XXe siècle est un fait scientifique majeur.

Ce paradoxe a des origines conjoncturelles : en France, c'est en étudiant un phénomène de dépérissement que Michel Becker constata, à la fin des années 1980, une augmentation tendancielle de la croissance du Sapin pectiné dans les Vosges. Ce paradoxe résulte aussi de raisons plus profondes. A l'époque, les échanges entre les approches sylvicoles, dendrochronologiques et écophysiologiques étaient faibles, alors qu'elles abordaient les mêmes phénomènes sous des angles différents. Bien qu'ayant prouvé leur capacité à détecter l'impact de fluctuations climatiques interannuelles et à repérer des variations de croissance de portée décennale voire séculaire, les approches dendrochronologiques étaient mal connues des dendrométriciens. Les modèles de production ligneuse faisaient référence à la stabilité séculaire de l'environnement, au travers de la notion de station. De plus, il n'existait pas de cadre théorique permettant d'étudier des modifications graduelles de la productivité en réponse aux changements environnementaux. Enfin, le concept même des changements globaux était peu répandu[1]. La détection et l'évaluation de tendances à long terme n'étaient pas une question relevant des recherches forestières.

L'objectif de cette communication est de fournir des éléments de synthèse sur le diagnostic actuel, sur l'ampleur du phénomène et sur ses causes possibles ou avérées, mais surtout de remettre ce diagnostic en perspective. On le situera par rapport au cadre théorique et méthodologique initial et à ses évolutions

---

* INRA, UMR 931 AMAP, Montpellier.
** ENGREF, UMR 1092 LERFOB, Nancy.
*** INRA, UMR 1092 LERFOB, Champenoux.

1. Une interrogation du site http://scholar.google.com/ au 31/01/2006 indique que le nombre de documents référencés ayant *Global change* dans leur titre a augmenté au milieu des années 1980 : 22 en 1975-79, 25 en 1980-84, 135 en 1985-89, 1 600 en 1990-94, 5 750 en 1995-99, 14 000 en 2000-04. C'est à la fin des années 1980 que paraissent les premiers ouvrages généralistes sur les changements climatiques (cf. Duplessy et Morel, 1990).

ultérieures d'une part, par rapport à ses conséquences et ses implications, d'autre part.

I – PROBLEMES METHODOLOGIQUES

Par changements de productivité, on entend des évolutions de la production courante ou annuelle d'un peuplement. Elles sont liées à l'environnement. Elles ne sont pas imputables aux facteurs contrôlés par les sylviculteurs et réputés modifier la croissance des arbres. Outre qu'il s'agit de quantifier la dérivée seconde d'un phénomène, en l'occurrence l'accélération ou le ralentissement de la croissance, l'évaluation de tels changements rencontre trois grands types de difficultés.

En premier lieu, il faut pouvoir séparer les effets de la date et de l'âge. Il est connu que la croissance d'un arbre ou la production d'un peuplement équienne évoluent avec l'âge. L'analyse d'une seule cohorte ne saurait renseigner sur une dérive liée à la modification des facteurs environnementaux. Que les mesures portent sur des arbres ou des peuplements, il convient d'étudier plusieurs générations. Le problème est qu'à moins de disposer de données historiques, les arbres et les peuplements existants ne permettent pas de croiser complètement les facteurs âge et date.

La seconde difficulté reflète la multiplicité et la diversité des modes d'action des facteurs biotiques et abiotiques susceptibles d'influencer la croissance des arbres. Ces facteurs peuvent être directs ou indirects, par exemple, la densité du peuplement, l'action de défoliateurs *vs.* l'altitude qui intervient au travers de facteurs bioclimatiques telle la température, la pluviométrie ou l'ensoleillement. Ils peuvent être locaux ou globaux, par exemple, une pollution ponctuelle *vs.* l'augmentation du taux de CO_2 atmosphérique, temporaires ou durables, par exemple, une sécheresse *vs.* le génotype ou la roche-mère. De plus, les effets sont parfois différés, souvent cumulatifs. Les facteurs sont susceptibles d'évoluer au cours du temps, par suite d'une baisse des densités de plantation ou d'une variation des dépôts azotés atmosphériques, ce qui aggrave le risque de confusion entre âge et date.

Enfin, les connaissances sur la croissance des arbres révèlent que leur réponse individuelle aux conditions environnementales dépend des essences, tout en dépendant de la densité et de la structure du peuplement forestier. Sauf précautions particulières, la croissance individuelle des arbres ne renseigne donc pas seule sur la productivité des peuplements.

Ainsi la détection de tendances à long terme interpelle notre capacité à séparer l'effet d'un nombre de facteurs qui évoluent et interagissent. Cela suppose de disposer simultanément de jeux de données, où ces facteurs soient croisés de façon indépendante et exhaustive, et de modèles qui permettent d'extraire les effets propres à chaque facteur et de quantifier leurs interactions.

II – SOURCES ET DONNEES

Hormis les approches écophysiologiques consacrées au comportement des arbres vis-à-vis de tel ou tel facteur, aux combinaisons de ces facteurs, les stratégies d'observation et d'expérimentation visant les changements de production ligneuse sont regroupées en trois grandes classes.

Les approches rétrospectives sont centrées sur la capacité à reconstruire la croissance individuelle des arbres grâce aux cernes annuels d'accroissement diamètral ou, plus rarement, des pousses annuelles d'accroissement en hauteur. Aux difficultés méthodologiques citées s'ajoute le fait que la croissance individuelle n'est qu'un indicateur indirect de la production par unité de surface, que les conditions passées de croissance des arbres sont inconnues, que l'on ne dispose pas de cadre théorique pour filtrer leurs effets. Les premières études sur les changements de productivité ont essayé de concevoir des plans d'échantillonnage afin de croiser les différents facteurs et de limiter les biais dus aux effets de la sylviculture passée.

La seconde approche analyse la production de peuplements homogènes, c'est-à-dire de peuplements monospécifiques et équiennes où la répartition spatiale des arbres est régulière et le milieu, localement homogène. Elle dévoile l'intérêt, la production. Elle repose sur la théorie, décrite plus bas, qui permet de filtrer les effets de la sylviculture. Afin d'éviter la confusion des effets, plusieurs stratégies existent : l'analyse de la croissance en hauteur de générations successives sur un même site ; l'étude de couples de peuplements installés sur un même type de station et soumis à une même sylviculture, mais ayant des âges distincts ; l'analyse de réseaux de placettes permanentes installées à des fins d'expérimentation sylvicole, observées pendant plusieurs dizaines, voire une centaine d'années et couvrant une large gamme d'âges et de dates.

La troisième approche étudie les données produites par les inventaires forestiers successifs. Elle procure des informations représentatives sur l'évolution de la ressource à une échelle régionale ou nationale. Lorsqu'on se limite aux données issues de peuplements homogènes, elle peut exploiter la théorie décrite ci-dessous. Par contre, elle est limitée par la nature des données disponibles : faible nombre d'inventaires successifs, changements de méthodes entre pays ou au cours du temps dans un même pays, absence de contrôle, au sens expérimental, des facteurs qui déterminent la production ligneuse.

III – CADRE THEORIQUE DISPONIBLE DANS LES ANNEES 1980

La production ligneuse est un objet classique de recherches. Jusqu'à la fin des années 1980, les progrès tinrent aux données dendrométriques, issues d'observations ou d'expérimentations, à l'amélioration des méthodes statistiques, au perfectionnement d'une théorie phénoménologique consacrée aux peuplements homogènes. Les origines en remontent aux travaux des dendrométriciens et des sylviculteurs d'Europe centrale. Très tôt, ils avaient entrepris de construire des

tables de production pour différents couples « espèce x région » et d'installer des réseaux de placettes permanentes. A cette époque, ils s'intéressaient principalement à l'effet du milieu sur la production ligneuse. La problématique de l'amélioration génétique n'existait pas. La plupart des peuplements étaient très denses. Les éclaircies consistaient à prélever des arbres dominés. Ces peuplements étaient qualifiés de « normaux ». A partir des années 1930, le thème des relations entre sylviculture, densité du peuplement et production émergea. Il suscita de nombreuses expérimentations qui enrichirent la théorie.

Cette théorie comprend trois principes : la possibilité de distinguer et d'étudier séparément les effets de la sylviculture et de la station ; le fait que les peuplements hyper-denses – ou, à l'opposé, les peuplements formés d'arbres en croissance libre – constituent une référence pour l'étude des peuplements gérés ; la possibilité de reconstituer l'évolution du peuplement installé sur une station donnée à partir d'une approche synchronique basée sur l'observation de peuplements d'âges variés installés sur des stations de même fertilité. Cela a permis de dégager des invariants : la sous-population des arbres dominants, définis comme les cent plus gros arbres par hectare ; l'ensemble des relations allométriques caractérisant des peuplements hyperdenses ou des arbres en croissance libre. Cela a permis enfin de dégager variables et concepts pertinents : la hauteur dominante, fonction de la station mais indépendante de la densité du peuplement ; la fertilité de la station, supposée invariante, qui rend compte de l'effet qu'a le milieu sur la production ligneuse ; la densité du peuplement qui rend compte de l'effet moyen de la sylviculture. Au XIXe siècle, travaux évoqués ont porté sur la définition d'indices et classes de fertilité. A partir de la première moitié du XXe siècle, ils ont conçu des indices de densité et d'indices de compétition qui mesurent l'impact de la densité sur la croissance individuelle des arbres.

Cette théorie intègre les variations spatiales des conditions de croissance. Elle procure un cadre qui permet de filtrer les effets qu'ont la sylviculture et la fertilité de la station sur les variations de production. En revanche, elle ne renseigne pas sur la croissance individuelle des arbres. Pourtant, celle-ci dépend fortement de la densité du peuplement, surtout en ce qui concerne l'accroissement en grosseur. Malgré la construction de plusieurs modèles de croissance individuelle, aucun ne permet de filtrer *a posteriori* les effets de la sylviculture sur la croissance des arbres. Ils n'aident donc guère les approches dendrochronologiques.

En outre, cette théorie suppose que le matériel génétique soit invariant entre stations ou d'une génération à la suivante et, surtout, que l'environnement soit immuable, qu'il s'agisse de fluctuations inter-annuelles ou de dérives tendancielles. Cette hypothèse fut remise en cause quand émergèrent les changements de productivité et, plus généralement, les changements globaux à la fin du XXe siècle. Afin d'incorporer l'environnement à ces modèles, une autre classe de modèles, fondée sur des connaissances et des principes écophysiologiques, fut développée à partir des années 1980. Les premiers modèles disponibles n'intégraient pas tous les facteurs écologiques mis en jeu par les changements de productivité.

IV – ELEMENTS DE DIAGNOSTIC

La multiplicité des facteurs et les risques de confusion d'une part, la référence à un cadre théorique fondé sur l'invariance de la station et, donc, de la production de site d'autre part, expliquent pourquoi la détection des changements de productivité donna lieu à débats méthodologiques. Les difficultés compliquent la quantification des changements. On doit accumuler un grand nombre de résultats à propos de différentes espèces, de différentes régions, par différentes méthodes avant d'aborder la réalité du phénomène.

Les résultats obtenus par diverses équipes européennes convergent. Que l'on s'intéresse à l'accroissement annuel en volume ou en biomasse par unité de surface, aux indicateurs indirects de cet accroissement, telle la croissance individuelle en diamètre, en surface terrière, en hauteur des arbres dominants, la production ligneuse augmente depuis le début du XXe siècle. Selon les méthodes, les espèces, les régions, cela varie de quelques pour cents à plus de cent pour cents sur un siècle. En France, les premiers résultats obtenus par approches dendroécologiques indiquent une augmentation de 50 % à 160 % pour le Sapin, l'Epicéa commun, le Hêtre, le Chêne sessile et le Chêne pédonculé dans le Nord-Est de la France sur 140 ans. Des résultats plus récents obtenus par des méthodes plus pointues ont confirmé la tendance tout en réduisant son ampleur : 30 à 50 % de 1930 à 1990 pour l'accroissement en surface terrière pour le Chêne sessile dans la moitié nord de la France, sur la base d'un réseau de placettes permanentes observées pendant 60 ans ; 50 % et 30 % sur un siècle pour la croissance en hauteur dominante du Hêtre dans le Nord-Est et dans le Nord-Ouest. L'ampleur de cette augmentation de la productivité ligneuse fluctue selon les espèces et les régions. Pour le Hêtre, on observe des variations régionales entre Nord-Est et Nord-Ouest, ainsi que des changements de rythme dans la productivité du XXe siècle.

Si le diagnostic du phénomène global est assuré, les causes demeurent mal connues. Cela repose sur deux approches complémentaires : une approche comparative ou corrélative, fondée sur la mise en rapport des écarts spécifiques, régionaux ou temporels, au schéma général avec le comportement des espèces ou avec les variations des conditions écologiques avec leurs évolutions ; la modélisation mécaniste du fonctionnement et de la production des peuplements forestiers sur la base des connaissances écophysiologiques disponibles. Les modèles à base écophysiologique qu'on développa dans les années 1980 permettent d'obtenir des outils de simulation. Ils intègrent des facteurs environnementaux comme la température, les précipitations, la teneur des sols en azote. Ils peuvent servir à tester la cohérence des hypothèses fondées sur les résultats des approches comparatives ou sur les connaissances issues des expérimentations écophysiologiques en milieu contrôlé.

Les résultats soulignent le rôle majeur des dépôts azotés. Les autres facteurs environnementaux, dont la progression du CO2 et de la température, ou techniques, comme la sélection du matériel génétique, la modification des pratiques

sylvicoles, la gestion de la végétation herbacée et le ramassage du petit bois, ne peuvent pas être écartés, mais leur contribution semble moindre.

POUR EN SAVOIR PLUS

LE DEPERISSEMENT DES FORETS DES ANNEES 1980 : ROCHE-MERES, PLUIES ACIDES ET CLIMAT

par Maurice BONNEAU

– BECKER M., « Le dépérissement des forêts : importance du climat et de la sylviculture », Comptes rendus de l'Académie de l'Agriculture de France, n° 75, pp. 1110-1117.
– BECKER M., « Incidence des conditions climatiques, édaphiques et sylvicoles sur la croissance et la santé des forêts », Programme DEFORPA, 2e rapport, ENGREF, 1991, pp. 25-41.
– BONNEAU M., « Évolution sur dix ans de la fertilité minérale d'un sol acide des Vosges », *Revue forestière française*, 2000, vol. LII, n° 6, pp. 519-529.
—, « Evolution of the mineral fertility of an acidic soil during a period of ten years in the Vosges mountains ». *Ann. For. Sci.,* 2005, n° 62, pp. 253-260.
– BONNEAU M., LANDMANN G., ADRIAN M., « La fertilisation comme remède au dépérissement des forêts en sol acide : essais dans les Vosges », *Revue forestière française,* 2005, XLVI, pp. 207-223.
– DEVÈVRE O., GARBAYE J., LE TACON F., PERRIN R., ESTIVALET D., « Role of the rhizosphere microfungi in the decline of Norway spruce in acidic soils », dans G. Landmann, M. Bonneau (eds), *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French Mountains*, Springer, pp. 331-352.
– LANDMANN G., BONNEAU M., « Le dépérissement du sapin pectiné et de l'épicéa commun dans le massif vosgien est-il en relation avec l'état nutritionnel des peuplements ? » *Revue forestière française,* XXXIX, n° 1, pp. 5-11.
– HILDEBRAND E.E., « Zustand und Entwicklung der Austauscheigenschaften von Mineraböden an Standorten mit erkrankten Waldbestand », *ForstCbl.,* n° 105, 1986, pp. 60-76.
– LEVY G., BECKER M., « Le dépérissement du sapin dans les Vosges : rôle primordial de déficits d'alimentation en eau », *Annales des Sciences forestières*, n° 44, 4, pp. 403-416.

CHANGEMENT DE PRODUCTIVITE DES FORETS : DIAGNOSTICS ET THEORIES

par François HOUILLIER, Jean-Daniel BONTEMPS, Jean-François DHÔTE

– ASSMANN E., *The principles of forest yield study*, Pergamon Press, 1970, 506 p.
– BADEAU V., DUPOUEY J.-L., BECKER M., PICARD J.-F., 1995. « Long-term growth trends of *Fagus sylvatica* L in Northeastern France. A comparison between high and low density stands", *Acta Oecologica*, n° 16, pp. 571-583.
– BADEAU V., BECKER M., BERT D., DUPOUEY J.-L., « Long-term growth trends of trees: ten years of dendrochronological studies in France », in H. Spiecker,

K. Mielikäinen, M. Köhl & J.P. Skovsgaard (eds), *Growth trends in European forests*, European Forest Institute, Research Report 5, Springer Verlag, 1996, pp. 167-181.
– BECKER M., NIEMINEN T.M., GÉRÉMIA F., « Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO2 », *Annales des Sciences forestières*, n° 51, 1994, pp. 477-492.
– BONTEMPS J.-D., VALLET P., HERVE J.-C., RITTIE D., DUPOUEY J.-L., DHOTE J.-F., « Des hêtraies qui poussent de plus en plus vite : vers une forte diminution de leur âge d'exploitabilité ? », *Revue Forestière Française*, LVII(2), 2005.
– BUFFET M., GIRAULT D. (ed), *Station forestière, production et qualité des bois : éléments méthodologiques*. Paris, Cemagref, 1989.
– DELEUZE C., *Pour une dendrométrie fonctionnelle : essai sur l'intégration des connaissances écophysiologiques dans les modèles de production ligneuse*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon I, 1996, 305 p.
– DHOTE J.-F., DUPOUEY J.-L., BERGES L., « Modifications à long terme, déjà constatées, de la productivité des forêts françaises », *Revue Forestière Française*, numéro spécial, 2000, LII, pp. 37-48.
– DHOTE J.-F., HERVE J.-C., HOULLIER F., 2001. « Diagnostiquer les changements à long terme de la productivité des chênaies : application de la théorie dendrométrique de la production sur un réseau de placettes permanentes », in E. Malézieux et M. Jaeger (eds), *Le pilotage des agro-écosystèmes : complémentarités terrain–modélisation et aide à la décision*, Hermès, Cirad, pp. 127-141.
– DUPLESSY J.-C., MOREL P., *Gros temps sur la planète*, Paris, Éditions Odile Jacob, 1990.
– EICHHORN F., « Beziehungen zwischen Bestandshöhe und Bestandesmasse », *Allg. Forst- u. Jagd-Zeit.*, 1904, pp. 45-49.
– FRITTS H.C., *Tree Ring and Climate*, London, Academic Press, 1976.
– FRITTS H.C., SWETNAM T.W., « Dendroecology : a tool for evaluating variations in past and present forest environments », *Advances in Ecological Research*, 19, 1989, pp. 111-118.
– GUIOT J., « ARMA techniques for modelling tree-ring response to climate and for reconstructing variations of paleoclimates », *Ecological Modelling*, n° 33, 1986, pp. 149-171.
– HOULLIER F., *Analyse et modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : applications à la gestion des ressources forestières*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Claude Bernard-Lyon I, ENGREF, Nancy, 1992, 67 p.
– HOULLIER F., PIGNARD G., SCHMITT F., BERTRAND P., « Medium term evolution of forest productivity: the use of national forest inventory data », in G. Landmann et M. Bonneau (eds), *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1995, pp. 157-173.

– HOULLIER F., *Support de cours : Evaluation et modélisation de la production ligneuse d'une forêt homogène*. UMR Botanique et Bioinformatique de l'Architecture des Plantes, Montpellier, 2004, 50 p.
– HUFFEL G., *Les arbres et les peuplements forestiers*, Nancy, Berger-Levraut, 1893, 200 p.
– KAUPPI P.E., MIELIKÄINEN K., KUUSELA K., « Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990 », *Science*, 256, 1992.
– KARJALAINEN T., SPIECKER H., LAROUSSINIE O. (eds), *Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe*, EFI Proceedings, 27, European Forest Institute, Joensuu, Finlande, 1999, 286 p.
– KARJALAINEN T., SCHUCK A., PRIETZEL J., MELLERT K.-H., KAHLE H.-P., SPIECKER H., ÅGREN G., van OIJEN M., KELLOMÄKI S. (eds), *Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe. Results of the recognition Project*, European Forest Institute, Research Report, Springer Verlag, Berlin, Germany, à paraître.
– Kellomäki S., VÄISÄNEN H., « Modelling the dynamics of the boreal forest ecosystems for climate change studies in the boreal conditions », *Ecological Modelling*, 1997, pp. 121–140.
– KELLOMÄKI S., PELTOLA H., RYYPPÖ A., « Implications and consequences », in T. Karjalainen et al. (eds), *Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe. Results of the RECOGNITION Project*, European Forest Institute, Research Report, Springer Verlag, Berlin, Germany, à paraître.
– LOUSTAU D. (ed), *Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles*. Rapport final du projet GICC 2001 « Gestion des impacts du changement climatique » et Convention GIP ECOFOR n°3/2001, Juin 2004, INRA, Bordeaux-Pierroton, 137 p.
– PRESSLER R., *Das Gesetz der Stammbildung*. Arnoldische Buchhandlung (Leipzig), 1865, 153 p.
– Spiecker H., « Introduction », in H. Spiecker et al. (eds), *Growth trends in European forests. Studies from 12 countries*, European Forest Institute, Research Report 5, Springer Verlag, Berlin, Germany, 1996, pp. 1-6.
– SPIECKER H., MIELIKÄINEN K., KÖHL M., SKOVSGAARD J.-P. (eds), *Growth trends in European forests. Studies from 12 countries*. European Forest Institute, Research Report 5, Springer Verlag, Berlin, Germany, 1996, 372 p.
– SKOVSGAARD J.P., HENRIKSEN H.A., « Increasing site productivity during consecutive generations of naturally regenerated and planted Beech (*Fagus silvatica* L.) in Denmark », in H. Spiecker et al. (eds), *Growth trends in European forests. Studies from 12 countries*, European Forest Institute, Research Report 5, Springer Verlag, Berlin, Germany,1996, pp. 89-98.
VAN OIJEN M., ÅGREN G.I., CHERTOV O., KELLOMÄKI S., KOMAROV A., MOBBS D., MURRAY M., « Application of process-based models to explain and predict changes in European forest growth », in T. Karjalainen et al. (eds), *Causes*

and Consequences of Forest Growth Trends in Europe. Results of the recognition Project, European Forest Institute, Research Report, Springer Verlag, Berlin, Germany, à paraître.

LES TROIS AGES DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE
par Michel DUPUY

– BRÜGGEMEIER F.-J., *Das unendliche Meer der Lüfte. Luftverschmutzung, Industrialisierung und Risikodebatten im 19. Jahrhundert*, Essen, Klartext, 1996, 344 p.
– CHOI S.-W., *Von der Dissidenz zur Opposition. Die politische alternativen Gruppen in der DDR von 1978 bis 1989*, Köln, Verlag Wissenschaft und Politik, 1999, 238 p.
– DUPUY M., « Historique des pluies acides, pollution atmosphérique et forêts en Allemagne (1850-1914) », in A. Corvol, *La forêt malade. Débats anciens et phénomènes nouveaux XVIIe-XXe siècles*, Paris, L'Harmattan, 1994, pp. 89-114.
– Dupuy M., « Des " Rauchschäden " (dommages par les fumées) au " Waldsterben " (dépérissement des forêts) en Allemagne de 1880 à nos jours : Hypothèses, certitudes et doutes », *Allemagne d'aujourd'hui*, 150, 1999, pp. 85-105.
– DUPUY M., *Histoire de la pollution atmosphérique en Europe et en RDA au XXe siècle*, Paris, L'Harmattan, 2003, 157 p.
– FUCHSLOCH N., *Sehen, riechen, schmecken und messen als Bestandteile der gutachterlichen und wissenschaftlichen Tätigkeit der Preußischen Landesanstalt für Wasser-, Boden- und Lufthygiene im Bereich der Luftreinhaltung zwischen 1920 und 1960*, Freiberg, TU Bergakademie, 1999, 403 p.
– MARON M., *Flugasche*, Frankfurt am Main, Fischer, 1996, 243 p.
– MÖLLER D., LUX H. (Hg.*), Deposition atmosphärischer Spurenstoffe in der ehemaliger DDR bis 1990. Methoden und Ergebnisse*, Bd 18 Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIW, Düsseldorf, 1992, 308 p.
– RAJANOV S., *Geschichte der Tharandter Immissionsforschung 1850-2002*, Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt, Beiheft 3, 2002, 169 p.
– WENTZEL K.-F., *Was bleibt vom Waldsterben ? Bilanz und Denkanstöße zur Neubewertung der derzeitigen Reaktion der Wälder auf Luftschadstoffe*, Hamburg : Hochschulverlag, 2001, 167 p.

POLLUTIONS, RECHAUFFEMENT, TEMPETES. COMMENT AMELIORER LA RESILIENCE DES FORETS ?
par Alain PERSUY

– PERSUY A., *Guide de la forêt en Poitou-Charentes et en Vendée*, Geste Éditeur, 2003.
—, *Le coteau calcaire*, Belin, Coll. « Éveil nature », 2004.
—, *L'écosystème forestier*, Belin, Coll. « Éveil nature », à paraître en 2006.