



HAL
open science

Analysis and management of ecological risks : interests of PRA.

Sebastien Delmotte, Florent Arrignon, Maya Gonzalez

► **To cite this version:**

Sebastien Delmotte, Florent Arrignon, Maya Gonzalez. Analysis and management of ecological risks : interests of PRA.. 17e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Oct 2010, La Rochelle, France. hal-00999828

HAL Id: hal-00999828

<https://hal.science/hal-00999828v1>

Submitted on 4 Jun 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.

Analyse et gestion des risques écologiques : apports de l'APR

Analysis and management of ecological risks : interests of PRA.

Sébastien Delmotte, Florent Arrignon
MAD-Environnement
Allée des Demoiselles
33170 Gradignan
delmotte@mad-environnement.com
06.69.71.91.54

Maya Gonzalez
Ecole Nationale des Ingénieurs
des Travaux Agricoles de Bordeaux
UMR ENITAB-INRA « Transfert sol-
plante et Cycles des Eléments
Minéraux dans les Ecosystèmes
Cultivés »
1, cours du Général de Gaulle
CS 40201
33175 Gradignan CEDEX
m-gonzalez@enitab.fr

Résumé

L'augmentation croissante des activités humaines et de l'exploitation des ressources naturelles met en péril la stabilité écologique de la planète et la pérennité de ces ressources. La prise de conscience récente des enjeux liés à l'érosion de la biodiversité, notamment pour l'ensemble des biens et des services qu'elle rend à la Société, s'accompagne de la nécessité de développer des outils d'analyse des risques écologiques. Aborder l'analyse et la gestion de ces risques nécessite de pouvoir appréhender la complexité inhérente au fonctionnement écologique des systèmes naturels, la diversité des échelles spatio-temporelles et la diversité des dangers rencontrés. Dans le présent travail, nous démontrons que la méthodologie APR, récemment mise à jour par Desroches et al. (2009), est particulièrement adaptée à cette problématique et permet l'analyse globale et systémique des systèmes vivants qui sont par nature multidimensionnels et multifonctionnels. La transposition de la méthodologie est illustrée par deux exemples à des niveaux d'organisation variés : (i) une espèce animale, le saumon atlantique ; (ii) un écosystème fortement anthropisé, la forêt landaise. Pour chacun d'eux, les différentes étapes de l'APR ont été réalisées avec succès : (i) l'APR Système qui permet de cartographier les situations dangereuses comme interactions entre les dangers et les éléments vulnérables du système étudié ; (ii) la définition des échelles de vraisemblance et de gravité, ainsi que du référentiel d'acceptabilité du risque ; (iii) la construction des scénarios aboutissant à un risque initial et résiduel quantifié grâce aux éléments précédents ; (iv) la cartographie des risques (diagrammes de Kiviat et de Farmer) comme synthèse statistique et graphique de l'analyse. Cet outil montre un grand potentiel d'application à de nombreux systèmes écologiques.

Summary

Increasing intensity of human activities and natural resources exploitation threaten Earth ecological stability and resource durability. The recent understanding of the stakes linked with biodiversity erosion, especially for the goods and services given back to the society, rises the need for tools able to tackle ecological risks analysis. Addressing such analyses leads to be able to apprehend the inherent complexity of the natural ecosystems functioning, the diversity of spatio-temporal scales and the diversity of the encountered hazards. In this current work, we show that the Preliminary Risk Analysis (PRA) methodology, recently updated by Desroches et al. (2009), suits well this problematic and allows to perform such global and systemic analyses of systems that are alive, multidimensional and multifunctional. The adapted methodology is illustrated by 2 examples at various organization levels: (i) an animal species, the Atlantic Salmon; (ii) an strongly anthropized system, the Forest of Landes. For each one, we performed the several steps of the PRA: (i) the PRA System which maps the hazardous situations as interactions between hazards and vulnerable elements of the studied system; (ii) the definition of likelihood and gravity scales and finally the referential for risk acceptability; (iii) the building of scenarios giving an initial and a residual risk quantified with the former elements; (iv) the mapping of the risks (Kiviat and Farmer diagrams) as a statistic and graphic synthetic view of the analyses. This tool shows a great potential for many ecological systems.

1. Introduction

L'augmentation croissante des activités humaines et de l'exploitation des ressources naturelles met en péril la stabilité écologique de la planète et la pérennité de ces ressources. De la conférence de Rio de 1992 a émergé une prise de conscience des enjeux économiques majeurs liés à la crise écologique actuelle. Le préambule de la Convention sur la Biodiversité (ONU, 1992) rappelle la valeur intrinsèque de la biodiversité sur les plans environnemental, génétique, social, économique, scientifique, éducatif, culturel, récréatif et esthétique. Il souligne également la faible connaissance scientifique du rôle de la biodiversité et des conséquences de son érosion. Dès lors, la recherche fondamentale, en particulier dans les disciplines de l'Ecologie Fonctionnelle et de la Biologie de la Conservation, s'est appliquée à améliorer ces connaissances et à proposer des outils de gestion de la biodiversité.

L'Ecologie Fonctionnelle aborde la connaissance fondamentale des espèces, des écosystèmes et de leurs relations par le biais des fonctions qu'ils réalisent. Par exemple, les écosystèmes de type « zones humides » sont connus pour leurs fonctions d'épuration des eaux et de régulation des crues. La Biologie de la Conservation, axée sur la pratique de la conservation de la biodiversité, aborde en partie le rôle de la biodiversité par le biais des services rendus à l'Homme. Les services écologiques sont définis comme l'ensemble des bénéfices tirés par la Société de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes (Diaz *et al.*, 2006), notamment les services de soutien, de régulation, d'approvisionnement et culturels (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Ces disciplines tentent de répondre aux questions suivantes :

- quel est le rôle de la biodiversité dans le fonctionnement des écosystèmes ?
- quelles sont les fonctions écologiques des espèces et des écosystèmes et sont-elles menacées ?
- quelles sont les causes de la dégradation ou de la perte des fonctions écologiques ?

- quelles sont les conséquences de la dégradation ou de la perte de ces fonctions sur le fonctionnement des écosystèmes et les services rendus à l'Homme?

Si la Science s'attache de manière objective à répondre à ces interrogations, la Société et ses décideurs posent la question suivante : quelles fonctions écologiques faut-il maintenir en priorité et comment ? Cette question introduit à la fois la notion d'utilitarisme par le biais des services rendus, dont les aspects autres qu'économique sont à prendre en compte, et celle de l'interventionnisme de la société pour gérer les conséquences des nuisances qu'elle engendre. Emerge alors un besoin d'instruments d'analyse et de gestion des risques écologiques pour :

- synthétiser les connaissances scientifiques, identifier, quantifier et hiérarchiser les risques ;
- aider à la décision relative à l'acceptation de la prise du risque notamment en définissant son seuil d'acceptabilité ;
- construire de nouveaux outils de gestion des risques et améliorer l'existant, qu'ils soient du domaine technique (e.g. études d'impact, bioindicateurs, ingénierie écologique...) ou politique et réglementaire (e.g. Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques, 2006).

Aborder l'analyse et la gestion des risques liés à l'érosion de la biodiversité nécessite de pouvoir appréhender la complexité inhérente au fonctionnement écologique des systèmes naturels, la diversité des échelles spatio-temporelles et la diversité des dangers rencontrés (Allen et Starr, 1982). Une approche macroscopique globale et systémique est alors nécessaire. L'Analyse Préliminaire des Risques (APR), dont une mise à jour importante a été proposée par Desroches *et al.* (2009), est une méthodologie qui se prête particulièrement à ce type d'approche.

L'objectif du présent travail est de montrer que, même si l'APR a été conçue à l'origine pour être appliquée à des systèmes industriels, elle est conceptuellement et pratiquement transposable à l'analyse des risques écologiques. Notre démarche de mise en œuvre est présentée au travers deux exemples choisis pour illustrer les larges possibilités d'application de la méthode: (i) le cas d'une espèce animale, le saumon atlantique (*Salmo salar*), espèce aquatique emblématique, ressource alimentaire au niveau mondial, mais largement menacée par les activités humaines; (ii) le cas d'un écosystème, la Forêt Landaise, fortement anthropisé pour la fonction de production de bois, qui assure plusieurs fonctions de régulation (stockage carbone, qualité de s eaux de surface), et pour lequel se pose la question du maintien durable de la productivité dans un contexte de changements globaux.

2. Démarche

2.1. Hypothèse sous-jacente à l'analyse des risques écologiques

Pour un système stationnaire ou dans un environnement stationnaire, la gravité des conséquences d'un risque et sa loi de vraisemblance ne varient pas dans le temps. La gravité et la vraisemblance sont donc définissables, en utilisant les informations du passé lorsqu'elles sont disponibles ou par extrapolation de l'expérience de systèmes plus ou moins similaires. Le risque comme fonction de la gravité et de la vraisemblance est donc définissable. Pour un système biologique ou écologique, ce sera par exemple le risque lié à un rejet accidentel d'un contaminant dans l'environnement, dont on peut mesurer les effets directs sur la mortalité d'une espèce et dont on peut évaluer la fréquence d'occurrence.

Pour un système en état transitoire ou dans un environnement en état transitoire, la gravité des conséquences d'un risque et sa loi de vraisemblance peuvent varier dans le temps et il est impossible de connaître leur nature future. La gravité et la vraisemblance ne sont donc pas définissables et par conséquent le risque non plus. L'état transitoire est très souvent caractéristique des systèmes biologiques et écologiques : schématiquement, les organismes vivants s'adaptent et évoluent sous la pression de sélection d'un environnement changeant, modifiant celui-ci en retour. De fait, la structure et le fonctionnement des écosystèmes sont modifiés. Les effets d'une nuisance peuvent donc s'en trouver modifiés, qu'ils deviennent plus ou moins graves et vraisemblables.

Par ailleurs, il existe dans la nature des effets seuils, des effets de feed-back ou des relations non-linéaires dont on ne peut pas connaître la nature *a priori* en raison de la complexité inhérente aux systèmes écologiques.

Dans ces conditions, faut-il renoncer à toute analyse de risques pour les systèmes biologiques et écologiques? La réponse est non. En effet, on pose l'hypothèse qu'au moment de l'analyse, le système et son environnement sont dans un état pseudo-stationnaire, c'est-à-dire que les lois qui gouvernent leur fonctionnement seront invariantes sur la période de temps implicitement considérée. Une analyse de risques écologiques ne portera que sur une période de temps future de l'ordre de la vie humaine ou moins. Au-delà, elle serait largement spéculative, ne serait-ce qu'en terme de projection des effets attendus des actions de gestion. A cette échelle de temps, il est raisonnable de penser que les connaissances actuelles sont extrapolables et les modèles de simulation numérique implémentant les lois connues de fonctionnement des systèmes sont des outils précieux pour identifier et quantifier les risques. Il est cependant primordial de réévaluer en permanence les analyses de risques à la lumière des nouvelles connaissances scientifiques afin de prendre en compte les variations éventuelles dans les fonctions de gravité et de vraisemblance.

2.2. L'APR : une Analyse Globale des Risques

2.2.1. Généralités

L'APR est une méthode d'identification et d'évaluation globale des risques. A partir de l'ensemble des dangers auxquels le système est susceptible d'être exposé tout au long de son existence, l'APR a pour objectif: l'identification, l'évaluation, la hiérarchisation et la maîtrise des risques qui en résultent.

La méthodologie APR, à l'origine développée dans les années 60, a été réactualisée et complétée par Desroches *et al.* (2009). Cette mise à jour introduit notamment :

- la formalisation de la structure du système
- la formalisation et l'élaboration de la cartographie des dangers
- la formalisation de la cartographie des situations dangereuses associées
- les paramètres des risques résiduels
- le format de l'APR générique permettant de réaliser facilement l'APR par danger et l'APR par éléments du système
- la construction de la cartographie des risques (diagrammes de Kiviat et de Farmer)

2.2.2. Les différentes étapes de l'APR

La première étape est la réalisation de l'APR Système. Elle a pour but d'identifier l'ensemble des situations dangereuses résultant de l'exposition du système étudié aux dangers auxquels il est confronté. Cette étape, exploratoire et qualitative,

comprend quatre parties : (i) description du système ; (ii) élaboration de la cartographie des dangers ; (iii) évaluation des interactions dangers/système ; (iv) construction de la cartographie des situations dangereuses.

La seconde étape est l'APR Scénarios. Les éléments d'évaluation du risque sont d'abord définis : ce sont les échelles de vraisemblance et de gravité, constituées chacune de 5 niveaux. Ensuite, sont établis l'échelle de criticité comme mesure du risque à 3 niveaux, et le référentiel d'acceptabilité du risque définissant le niveau de criticité en fonction du niveau de gravité et de vraisemblance. Enfin, pour chaque situation dangereuse identifiée dans l'APR Système, un ou plusieurs scénarios de risque sont décrits suivant le formalisme introduit par Desroches et *al.* (2009), permettant de quantifier les criticités initiale et résiduelle grâce aux éléments d'évaluation et de décision précédents et de proposer des actions de réduction des risques initiaux et de gestion des risques résiduels.

La dernière étape est la construction de la cartographie des risques, au niveau global, par danger générique et par élément du système. Un certain nombre de calculs sont effectués pour établir la synthèse statistique de l'ensemble des scénarios et les représentations graphiques matérialisant les risques, notamment les diagrammes de Kiviat et de Farmer.

2.2.3. En quoi l'APR est-elle *a priori* adaptée à l'analyse des risques écologiques ?

L'APR débute par l'identification des interactions entre des dangers et des éléments d'un système. La structure du système étudié est décrite comme un ensemble d'éléments et de sous-éléments, qui peuvent être des phases, des fonctions ou des processus. Toute entité biologique ou écologique répond parfaitement à la définition de système, en tant qu'ensemble d'éléments organisés et en interaction dynamique en fonction d'une finalité (par exemple le maintien de la structure du système). Il est relativement aisé d'en décrire la structure et/ou le fonctionnement. Plusieurs approches de description sont alors possibles.

Une espèce vivante peut être décrite par le biais :

- des différents stades de son développement ou écophases (œuf, larve, juvénile, adulte...);
- de ses différentes fonctions biologiques (croissance, respiration, photosynthèse, reproduction...);
- de ses différentes fonctions écologiques (consommation, production, prédation, bioturbation...);
- d'une combinaison des éléments précédents.

Un écosystème peut quant à lui être considéré comme:

- un ensemble de compartiments physiques (sol, eau, air, interfaces...) et de compartiments biologiques (phytocénose, microflore...)
- un ensemble de compartiments fonctionnels (compartiments trophiques, groupes fonctionnels...);
- un ensemble de flux (carbone, azote, phosphore, énergie, espèces animales et végétales, humains...);
- un ensemble de fonctions (production, consommation, recyclage, transfert...);
- un ensemble de services rendus à la société (soutien, régulation, approvisionnement, culturel);
- une combinaison des ensembles précédents.

Une fois le système étudié décrit, la cartographie des dangers est construite. Les dangers auxquels peuvent être soumis les éléments d'un système écologique sont variés et sont aussi bien intrinsèques à son fonctionnement (biologiques, génétiques...) qu'environnementaux (physico-chimiques, climatiques, économiques...). D'autre part, les échelles temporelles abordées sont diverses : court terme comme une pollution accidentelle ou un incendie, ou long terme comme des changements climatiques globaux. L'APR couvre l'ensemble de ces types de dangers.

Concernant les éléments d'évaluation des risques :

- la définition de l'échelle de gravité peut, selon l'objectif de l'analyse, être fondée sur l'état (de non-impacté à dégradé ou perdu) d'une fonction réalisée par le système écologique, par exemple la fonction de croissance végétale, la fonction de reproduction d'une espèce ou le maintien de l'intégrité du système. Cela peut également être une fonction liée à un service rendu à l'Homme comme la production alimentaire ou la dépollution d'un sol ;
- l'échelle de vraisemblance, comme mesure subjective de l'occurrence d'un événement redouté, peut être fondée par exemple sur les cycles saisonniers, sur les cycles biologiques (cycle de vie d'une espèce, cycle de révolution forestière) ou sur des distances parcourues si on traite d'espèces migratrices (occurrence par km parcourus)...

L'APR semble donc *a priori* être un outil applicable à l'analyse des risques écologiques. Cependant, les systèmes vivants sont caractérisés par des interactions dynamiques entre leurs différents éléments qui sont eux même souvent impactés par des interactions entre les différentes nuisances. Par exemple, une pollution (danger de type physico-chimique) peut favoriser l'expansion d'une espèce exotique invasive (danger de type biologique) qui perturbe le fonctionnement trophique d'un écosystème. L'APR ne couvre explicitement ni les interactions dynamiques, ni la dynamique des interactions. Néanmoins, la construction exhaustive des scénarios permet de contourner partiellement ce problème. Par exemple, dans le cas précédent :

- un scénario pour le danger « physico-chimique » avec une situation dangereuse liée à la pollution fera apparaître comme événement redouté l'expansion de l'espèce invasive ;
- un scénario pour le danger générique « biologique » avec une situation dangereuse liée à la présence d'une espèce invasive fera apparaître comme cause contact une pollution.

2.3. Les exemples

Deux exemples, le saumon atlantique et la forêt Landaise, sont choisis pour illustrer les possibilités d'application de l'APR aux risques écologiques, de l'espèce à l'écosystème. Ils sont symboliques des problématiques environnementales et écologiques actuelles, comme nous le présenterons dans la suite. Dans le cadre de ce travail préliminaire, les analyses réalisées sont fondées sur les connaissances reportées dans la littérature scientifique et sur notre propre expérience sur les sujets. Elles nécessiteront cependant d'être complétées et affinées en collaboration avec des experts des domaines concernés pour être utilisables comme outils opérationnels. L'objectif principal du présent travail est donc essentiellement de présenter la démarche de transposition et d'application d'une telle méthodologie au domaine de l'environnement.

2.3.1. Le saumon atlantique

Le saumon atlantique est un salmonidé présent à l'état sauvage dans toute la zone de l'Atlantique Nord. Sur la côte est, sa zone de répartition s'étend de l'Espagne à la Norvège entre 42° et 47° de latitude Nord. Sur la côte ouest, le saumon est présent de l'état du Connecticut aux Etats-Unis à la baie d'Ungava au Québec. En France, il est encore présent dans certains petits fleuves côtiers de Normandie et de Bretagne, et dans les grands bassins de la Loire et de l'Adour-Garonne.

C'est un poisson migrateur qui partage son cycle de vie entre les eaux douces (phase dulçaquicole) et les eaux océaniques (phase marine). Il se reproduit exclusivement en eau douce. Après un séjour en mer, il revient pour se reproduire dans la rivière de ses origines, comportement appelé « homing ». Son cycle de vie est bien connu. Les adultes se reproduisent dans les cours d'eau, dans des zones de forte pente dont l'eau est de très bonne qualité et dont la température ne dépasse pas les 20°C. La ponte a lieu entre le mois de novembre et le mois de janvier dans les zones de frayères constituées de graviers et de galets. La

mortalité des adultes après la ponte peut être plus ou moins élevée, touchant jusqu'à la totalité des effectifs. Le développement embryonnaire a lieu sous graviers jusqu'au printemps suivant, où les alevins émergent en eau libre. Ils colonisent alors un habitat de faible profondeur, à l'écoulement turbulent et au fond constitué de graviers. Après un à deux ans de croissance en eau douce, les juvéniles migrent vers la mer entre avril et juin, après un bouleversement physiologique qui leur confère la capacité de vivre en eau salée (smoltification). Une fois en mer, ils entament une longue migration vers le nord de l'Atlantique pendant laquelle ils grossissent. Après 1 à 3 ans passés en mer, ils reviennent en eau douce pour se reproduire.

Les populations de saumon sauvage ont fortement décliné ces deux derniers siècles et beaucoup d'entre elles ont disparu, en particulier en Espagne et en France. La première cause est l'aménagement des cours d'eau dès le 19^{ème} siècle, par la construction d'ouvrages hydrauliques interdisant l'accès aux zones amont des cours d'eau permettant la reproduction. A cela s'est ajouté au fil du temps la dégradation de la qualité des eaux et des habitats ainsi que la surexploitation par la pêche. En France, les populations résiduelles sont fragiles et des extinctions locales ne sont pas improbables, d'autant que la qualité des eaux se dégrade encore et que le parc de microcentrales hydroélectrique s'agrandit. Sur la liste rouge des espèces menacées de l'UICN, elle est classée comme « Vulnérable » au niveau national mais le risque d'extinction au niveau mondial est jugé faible. La conservation de cette espèce, et des espèces aquatiques migratrices en général, fait l'objet de nombreuses attentions depuis les dernières décennies. L'Organisation de Conservation du Saumon de l'Atlantique Nord (OCSAN) est une organisation intergouvernementale créée en 1984 pour contribuer à la conservation, la restauration et la gestion rationnelle des populations de saumon sauvage. Ses parties contractantes sont les pays d'Amérique du nord et de Scandinavie, la Fédération Russe et l'Union Européenne. En France, l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), mandaté par le MEEDDAT, a établi fin 2007 un plan français qui présente un bilan de l'état des stocks et de leur diversité, les modes de gestion, ainsi que 20 actions à réaliser d'ici à 2012 en matière de gestion des pêches, de protection des habitats, de restauration des stocks et d'élevage (ONEMA, 2007). On peut également citer pour la France l'existence de rivières ateliers consacrées à l'étude des salmonidés migrateurs (e.g. la rivière Bresle, Seine Maritime, ONEMA) et des COGEPOMI (comités de gestion des poissons migrateurs), dont la mission porte notamment sur l'élaboration, le suivi et la révision d'un plan quinquennal de gestion de ces poissons migrateurs. Enfin, le Code de l'Environnement et en particulier la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques édictent des réglementations censées protéger les espèces migratrices et plus globalement les milieux aquatiques.

L'exemple du Saumon Atlantique a été choisi ici pour plusieurs raisons :

- la biologie et l'écologie de cette espèce sont bien connues tant elle a été étudiée depuis les 50 dernières années ;
- c'est une espèce connue du grand public comme emblématique de la bonne qualité des cours d'eau. C'est aussi une ressource halieutique de premier plan : sa pêche professionnelle représentait encore il y a peu une ressource économique locale importante et sa pêche sportive représente une forte valeur récréative et génère une économie touristique non négligeable ;
- c'est une espèce dite « parapluie ». Cela signifie que l'ensemble des mesures prises pour sa conservation et sa protection bénéficient à toute une cohorte d'autres espèces aquatiques et sont un gage de la restauration des écosystèmes aquatiques ;
- c'est une espèce menacée, dont les stocks mondiaux ne cessent de décliner depuis deux siècles (ICES, 2002) ;
- c'est un poisson migrateur, et la diversité des milieux qui constituent son habitat durant son cycle de vie permet d'illustrer dans ce travail la diversité des dangers potentiellement rencontrés.

L'analyse a pour but d'évaluer les risques pesant sur la pérennité des populations de saumon en France, et donc en particulier sur le maintien de la fonction de reproduction des individus au sein de ces populations. Elle se fonde sur l'analyse du cycle biologique au niveau de l'individu, considérant que c'est un individu moyen qui est soumis aux différents dangers lors de son cycle de vie.

2.3.2. La forêt landaise

La forêt landaise est un écosystème forestier d'origine anthropique (création datant du XIX^{ème} siècle) composé essentiellement de futaie monospécifique équienne de Pin maritime (*Pinus maritima*). Elle représente le plus grand massif forestier résineux artificialisé d'Europe occidentale (environ 639 000 ha de peuplements purs de Pin maritime, source : IFN). Son étendue correspond à celle de la formation géologique sur laquelle on la trouve, appelée « les Sables des landes » (Jolivet *et al.*, 2007). Les sols sur lesquels sont cultivés cette essence sont acides et très pauvres en éléments minéraux (notamment azote et surtout phosphore). La sylviculture actuellement pratiquée, qualifiée de ligniculture, fait appel à une forte mécanisation des différentes opérations pratiquées. Les itinéraires sylvicoles font appel au drainage des parcelles en landes humides, au travail mécanique du sol (labour), au débroussaillage, à l'emploi de variétés de Pin améliorées et à la fertilisation phosphatée à la plantation. Ce mode d'exploitation permet une production de bois élevée, malgré des sols pauvres. En effet, les « Landes de Gascogne », qui peuvent être considérées comme le cœur de la filière Pin maritime française, en assuraient en 2005 d'après l'IFN plus de 70 % de la production. Par ailleurs, les fonctions remplies par les forêts françaises, autre que la seule production de bois, ont été récemment évaluées économiquement (« L'approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes », coord : B. Chevassus-au-Louis). Si on ramène les valeurs moyennes trouvées pour la forêt française pour les services de régulation (fixation du carbone, stockage de carbone et qualité de l'eau) à la surface couverte par la forêt landaise, cela représente un gain annuel d'environ 40 millions d'euros.

L'EFI (European Forest Institute) a lancé, en 2009, le projet européen *REINFORCE* (« REsource INFrastructure for monitoring and adapting European Atlantic FORests under Changing ClimatE »). L'objectif de ce projet est d'apporter des outils pour mesurer sur une vingtaine d'année les impacts du changement climatique sur les forêts atlantiques et en parallèle tester des solutions techniques pour limiter les risques liés à ce réchauffement en forêt : adaptation de nouvelles essences, sécheresse et canicules, risques liés aux incendies ou au vent, apparition de nouveaux parasites. Par ailleurs, suite à la dernière tempête de 2009, une expertise collective a été confiée au GIP-ECOFOR afin de « fournir un état des connaissances existantes ou restant à acquérir pour caractériser les différents itinéraires sylvicoles envisageables et évaluer les services de production, de régulation et culturels qu'ils sont susceptibles d'apporter. Il importe à chaque fois de préciser les territoires potentiels pour leur mise en œuvre et l'évaluation des risques qui y sont attachés » (extrait de la lettre de mission, mai 2009).

L'exemple de la Pinède landaise a ainsi été choisi pour plusieurs raisons :

- c'est un écosystème très anthropisé et fortement lié à une filière industrielle avec une analyse et une gestion des risques associés déjà bien développée (ex : gestion du risque incendie mise en œuvre avec succès) ;
- il est relativement simple par rapport à d'autres écosystèmes forestiers plus hétérogènes en terme de structure et de composition, ce qui est un avantage pour mener une première transposition de la méthodologie APR à l'étude d'un écosystème ;
- ce système traverse une crise au niveau de sa gestion avec la succession à 10 ans d'intervalles de deux tempêtes majeures (Lothar en 1999, Klaus en 2009) qui ont fortement touché le massif et qui posent à l'ensemble de la communauté forestière (scientifiques, politiques, propriétaires, industriels...) des questions sur son avenir à court et long termes ;

- le massif forestier correspond en termes d'étendue et de volume de bois produit à une part importante de la surface forestière productrice française.

L'analyse porte sur la fonction de production de bois de l'écosystème forestier pinède landaise, décrit comme un ensemble de compartiments fonctionnels comprenant à la fois les principaux compartiments du Pin maritime (racines, tronc, canopée) qui est l'essence de production mais également les autres compartiments biotiques et abiotiques de cet écosystème qui peuvent être affectés par les risques étudiés. Elle a pour but d'évaluer les risques pesant sur la pérennité de la production de bois à l'échelle de la Forêt landaise.

2.4. Logiciel

Les analyses sont réalisées avec le logiciel StatCart APR qui implémente la méthodologie APR proposée par Desroches *et al.* (2009).

3. Résultats et discussion

3.1. Construction de la cartographie des situations dangereuses

3.1.1. Description des systèmes

Le « système » saumon a été décrit selon 3 phases principales de son cycle de vie (figure 1) : (i) phase dulçaquicole pour la vie en eau douce ; (ii) phase marine pour la vie en milieu marin ; (iii) phase migratoire pour les transitions entre les deux phases précédentes.

Phase dulçaquicole				Phase Marine	Phase Migratoire		
Reproduction	Stabulation pré- et post-reproductive	Adultes		Adultes	Devalaison des smolts	Amontaison des reproducteurs	Transition entre zones de grossissement et cours d'eau
		Juvéniles					
	Phase sous graviers et émergence						
	Croissance			Croissance			

Figure 1. Description du cycle de vie du saumon en différentes phases/fonctions

Des sous-phases correspondant aux écophases « adultes » et « juvéniles » et différentes fonctions réalisées par les individus viennent compléter et préciser la description du système. Une telle description permet de bien identifier les différents éléments du système vulnérables à des dangers de natures diverses selon la zone géographique où sont présents les poissons au cours de leur cycle, mais aussi selon le stade de développement dont dépend la vulnérabilité.

L'écosystème forestier est pour sa part décrit comme un ensemble de compartiments fonctionnels ayant trait à la production de bois : (i) le Pin, comme unité principale de production ; (ii) et (iii) le sous-bois et le sol comme environnements du pin (figure 2).

PIN			SOUS-BOIS		SOL		
Racines	Tronc	Canopée	Compartiment racinaire	Compartiment aérien	Physico-chimie	Compartiment microbien	Faune

Figure 2. Description de l'écosystème forestier en compartiments fonctionnels

Chacun de ces grands compartiments est ensuite décrit comme un ensemble de sous-compartiments fonctionnels. L'écosystème est ainsi décrit dans l'objectif d'une analyse des risques pesant sur la production de bois, en tenant compte à la fois de l'espèce productrice et de son environnement direct, tous deux susceptibles d'être impactés par des nuisances.

Dans un cas comme dans l'autre, il est tout à fait envisageable d'affiner encore la description du système. Par ailleurs, les descriptions choisies ne sont pas les seules possibles et seraient différentes selon les objectifs de l'analyse. Dans le cas du saumon, la description choisie permet d'identifier toutes les phases cruciales pour la survie de l'espèce. On aurait pu dans la même optique décrire directement le système par écophases ou stades de développement (embryonnaire, larvaire, juvénile, smolt, adulte). L'avantage ici est que chacune des phases décrites correspond *a priori* à des grands types d'action potentielle de réduction des risques : actions sur le domaine continental (eau douce), actions sur le domaine marin et actions sur la continuité de la migration. Dans le cas de la forêt landaise, une approche décomposant le système en fonction des différents stades sylvicoles correspondant aux étapes clés d'une révolution forestière (plantation, dépressage, 1^{ère} éclaircie, 2^{ème} éclaircie, récolte) aurait également été appropriée. En effet, pour les risques liés aux tempêtes par exemple, les questions posées actuellement à la communauté scientifique forestière par les pouvoirs publics suite à la tempête Klaus (2009), est d'évaluer si les stades jeunes sont plus vulnérables que les peuplements plus âgés. De même, la sensibilité aux différents ravageurs et pathogènes n'est probablement pas la même selon le stade de développement des arbres. Cependant, l'approche fonctionnelle présentée ici a l'avantage de rester écosystémique et globale. Une telle décomposition de l'écosystème en compartiments fonctionnels serait également adaptée pour une approche multifonctionnelle de la forêt : prise en compte de la fonction de production mais également des fonctions de régulation (cycle du carbone, qualité de l'eau) et culturelle (préservation de la biodiversité, loisirs). Un autre type de description possible est une approche par flux. Il s'agirait dans ce cas de définir le massif landais en termes de flux de carbone, d'eau, de nutriments, de bois produits, d'espèces animales et végétales et de touristes. Une telle description se prêterait également bien à une analyse multifonctionnelle de cet écosystème en biens et services rendus.

3.1.2. Cartographie des dangers

Dans les deux cas, les dangers génériques identifiés sont : (i) Physico-chimique ; (ii) Climatique ; (iii) Biologique ; (iv) Economique ; (v) Social (uniquement pour la forêt). A titre d'exemple, la figure 3 présente le détail pour le danger générique Physico-chimique dans le cas du saumon.

DANGERS GENERIQUES	Dangers spécifiques	Evénements ou éléments dangereux
PHYSICO-CHIMIQUE	Habitat	Seuil ou barrage
		Chenalisation-recalibrage-curage
	Transport solide	Turbidité
		Bouchon vaseux estuarien
	Pollution chimique	Rejets ponctuels de contaminants
		Rejets chroniques de contaminants
	Pollution lumineuse	Eclairages nocturnes
	Thermique	Gel
		Réchauffement des eaux douces en saison estivale
		Différence de T° entre eau douce et eau marine
Réchauffement ponctuel/localisé des eaux douces lié aux activités humaines (barrages, gravières....)		
Hydraulique	Débits réservés	

Figure 3. Danger générique Physico-chimique pour le saumon

3.1.3. Situations dangereuses

Les situations dangereuses sont identifiées aux intersections entre les éléments vulnérables du système et les dangers, et matérialisées par un ordre de priorité de traitement (1, 2 ou 10). La figure 4 présente un extrait de la cartographie des situations dangereuses pour la forêt landaise.

Forêt Landaise - production			PIN		
p1 = 3	p2 = 3	p10 = 0	Racines	Tronc	Canopée
DANGERS GENERIQUES	Dangers spécifiques	Evénements ou éléments dangereux			
BIOLOGIQUE	Prédation	Chenille processionnaire (défoliateur)			1
		Cochenille du Pin maritime (<i>Matsucoccus feytaudi</i>)	2		
	Compétition	Espèces végétales du sous-bois	1		
	Parasitisme	Champignon pathogène (<i>Armillaire</i> et <i>Fomes</i>)	2		2
	Invasion pathogène	Nématode du Pin (<i>Bursaphelenchus xylophilus</i>)	1		

Figure 4. Extrait de la cartographie des situations dangereuses pour la forêt Landaise.

3.2. Définition des éléments d'évaluation et de décision

3.2.1. Echelle de vraisemblance

Les échelles de vraisemblance sont dans les deux cas fondées sur l'unité temporelle d'un cycle : (i) cycle biologique de l'espèce dans le cas du saumon ; (ii) cycle de révolution forestière dans le cas de la forêt landaise. Les différentes classes de vraisemblance sont fondées sur une période de retour exprimée en nombre de cycles, permettant de définir une fréquence d'occurrence par cycle. Le tableau 1 présente l'échelle de vraisemblance adoptée pour les deux exemples.

Tableau 1. Echelle de vraisemblance dans les deux exemples. L'unité de temps est le cycle biologique de l'espèce pour le saumon et le cycle de révolution forestière pour la forêt.

Classe de Vraisemblance	Intitulé de la classe	Intitulés des vraisemblances	T (Périodes de retour)
V1	Impossible à improbable	Moins de 0,01 fois par cycle	
T1			100 cycles
V2	Très peu probable	Entre 0,01 et 0,25 fois par cycle	
T2			4 cycles
V3	Peu probable	Entre 0,25 et 0,5 fois par cycle	
T3			2 cycles
V4	probable	Entre 0,5 et 1 fois par cycle	
T4			1 cycle
V5	Très probable à certain	1 fois ou plus par cycle	

Concernant le saumon, l'échelle de vraisemblance représente implicitement la part de la population qui est concernée par l'événement redouté. En effet, l'analyse porte sur l'individu. Si par exemple un événement redouté est associé à une vraisemblance V5, cela signifie qu'un poisson verra l'événement se produire une fois ou plus lors de son cycle de vie. Pour une période donnée d'une durée correspondant à un cycle, c'est donc l'ensemble des individus des cohortes (ensemble d'individus de même âge) en présence qui sera touché, et donc une grande partie de la population. Si par contre la vraisemblance est de niveau V1, cela signifie qu'au sein d'une population lors d'un cycle donné, un faible nombre d'individus d'une cohorte rencontrera le problème alors que la majorité ne sera pas touchée : la population sera donc faiblement impactée.

3.2.2. Echelle de gravité

La mesure de la gravité du risque est matérialisée par l'échelle de gravité à 5 niveaux, de mineure à catastrophique. Dans chacun des deux cas, les classes de conséquences ont été définies en fonction de l'objectif des analyses. Dans le cas du saumon, c'est le cycle biologique et en particulier la fonction de reproduction qui ont été choisis comme base de gravité. En effet, la pérennité de la population de saumon n'est possible que si la fonction de reproduction de l'espèce est maintenue et assurée. Pour la forêt Landaise, c'est la croissance végétale, représentant directement la production de bois, qui est retenue. Ces échelles sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2. Echelles de gravité pour les deux exemples.

Index	Classe de gravité	Intitulé des conséquences pour le saumon	Intitulé des conséquences pour la forêt
G1	Mineure	Pas d'impact sur le cycle biologique et la fonction de reproduction	Pas d'impact sur la production
G2	Significative	Perturbation du cycle biologique sans atteinte à la fonction de reproduction	Croissance légèrement ralentie
G3	Grave	Dégradation du cycle biologique, fonction de reproduction perturbée mais maintenue	Retard de croissance
G4	Critique	Dégradation du cycle biologique, reproduction incertaine	Croissance fortement réduite
G5	Catastrophique	Cycle biologique interrompu, fonction de reproduction perdue	Perte totale de production

3.2.3. Echelle de criticité

L'échelle de criticité adoptée dans tous les cas est l'échelle classique de l'APR.

Tableau 3. Echelle de criticité

Classe de criticité	Intitulé de la classe	Intitulés des décisions et des actions
C1	Acceptable	Aucune action n'est à entreprendre
C2	Tolérable sous contrôle	On doit organiser un suivi en termes de gestion du risque
C3	Inacceptable	On doit refuser la situation et prendre des mesures en réduction des risques sinon ... on doit refuser toute ou partie de l'activité

3.2.4. Référentiel d'acceptabilité du risque

De la définition de la vraisemblance et de la gravité découle la construction du référentiel d'acceptabilité du risque, présenté dans le tableau 4. Le même référentiel a été établi pour les deux exemples.

Tableau 4. Référentiel d'acceptabilité du risque

		Gravité				
		1	2	3	4	5
Vraisemblance	5	1	2	3	3	3
	4	1	2	2	3	3
	3	1	1	2	2	3
	2	1	1	1	2	2
	1	1	1	1	1	1

Pour une gravité G1, la criticité est définie comme acceptable quelque soit le niveau de vraisemblance, puisque la fonction étudiée (reproduction ou production) n'est pas impactée. Pour une gravité G5 et une vraisemblance V1, le risque est considéré comme acceptable, car l'occurrence de l'événement redouté se produit au pire tous les 100 cycles, représentant plusieurs centaines d'années dans les deux cas. Par contre, la criticité devient tolérable à un niveau V2 (période de retour entre 4 et 100 cycles) et inacceptable à partir de V3 : un événement catastrophique ayant une période de retour entre moins d'un cycle et 4 cycles doit être évité ou sa gravité doit être diminuée. Entre G1 et G5, les niveaux de criticités sont affectés de manière à ce qu'elles soient cohérentes en terme d'acceptabilité par rapport aux deux extrêmes présentés précédemment, mais aussi pour que le risque moyen associé (GxV) soit le même pour les couples (G, V) symétriques : par exemple, la criticité doit être la même pour (G3, V4) et (G4, V3), le risque moyen associé à ces couple étant de 12.

3.3. Construction de l'APR Scénarios

Dans chaque cas, un ou plusieurs scénarios sont construits pour chaque situation dangereuse, suivant le formalisme proposé par Desroches *et al.* (2009). Chaque scénario permet notamment d'identifier pour une situation dangereuse la cause contact, l'événement redouté, la cause amorce, la gravité et la vraisemblance initiales qui permettent le calcul de la criticité du risque initial à l'aide du référentiel de décision, les actions de réduction du risque, la gravité et la vraisemblance résiduelles qui donnent la criticité du risque résiduel et enfin la gestion de ce dernier. Des exemples de scénarios sont présentés en annexe.

Dans la plupart des cas, il existe déjà pour les risques identifiés des moyens de traitement et des moyens de détection, qu'ils soient d'ordre réglementaire ou liés à des études scientifiques en cours. Cependant, ces moyens ne sont pas généralement pas suffisants pour que les risques initiaux soient acceptables. On peut identifier plusieurs raisons à cela : prise en compte récente des problématiques environnementales et écologiques, manque de contrôle de l'application des lois existantes et lacunes dans les connaissances scientifiques. Les actions proposées consistent alors souvent en une meilleure application des mesures

réglementaires existantes, une amélioration de ces dernières et la mise en place d'études scientifiques visant à mieux comprendre les problèmes et à développer des solutions.

Le danger générique « Climatique » est lié à un certain nombre d'incertitudes, notamment en raison des changements globaux actuels. Si on fonde l'évaluation de la vraisemblance et de la gravité sur les observations des dix dernières années, alors elles seront fortes pour les scénarios concernés. Par exemple, pour le saumon, les modifications des températures des aires marines de grossissement entraînent non seulement une diminution de la survie marine sans qu'on en connaisse le déterminisme, mais concerne l'ensemble des individus toutes populations mondiales comprises. Il est presque certain que chaque individu soit confronté à des modifications de son environnement marin. Cependant, il est délicat de projeter les tendances observées actuellement à moyen terme, en particulier en terme de gravité des conséquences, car on ignore l'évolution future des taux de survie. Pour la forêt landaise, les dernières années ont montré une augmentation de la fréquence des tempêtes violentes dont les conséquences sur la production ont été catastrophiques. Si dans ce cas on sait que la gravité des conséquences n'évoluera pas, il est difficile de savoir si la fréquence des ces événements climatiques augmentera ou pas. C'est pourquoi il est primordial de réévaluer fréquemment les analyses de risques, comme évoqué au début de cet article.

3.4. Exemples de résultats

Une fois l'APR Scénarios construite, un ensemble de calculs visant à établir les statistiques de l'analyse est effectué. Ces statistiques sont utilisées pour construire la cartographie des risques (diagramme de Kiviat) et des risques moyens (diagramme de Farmer), par dangers génériques ou par éléments du système. Les figures 5 et 6 illustrent des sorties possibles de l'analyse pour le saumon, pour lequel 69 scénarios ont été identifiés.

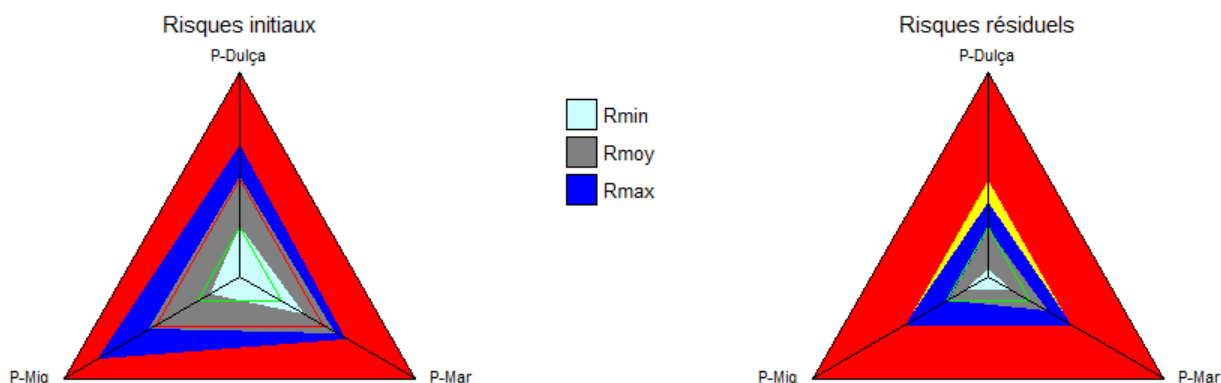


Figure 5. Cartographie des risques (diagrammes de Kiviat) pour le saumon. Analyse par éléments du système.

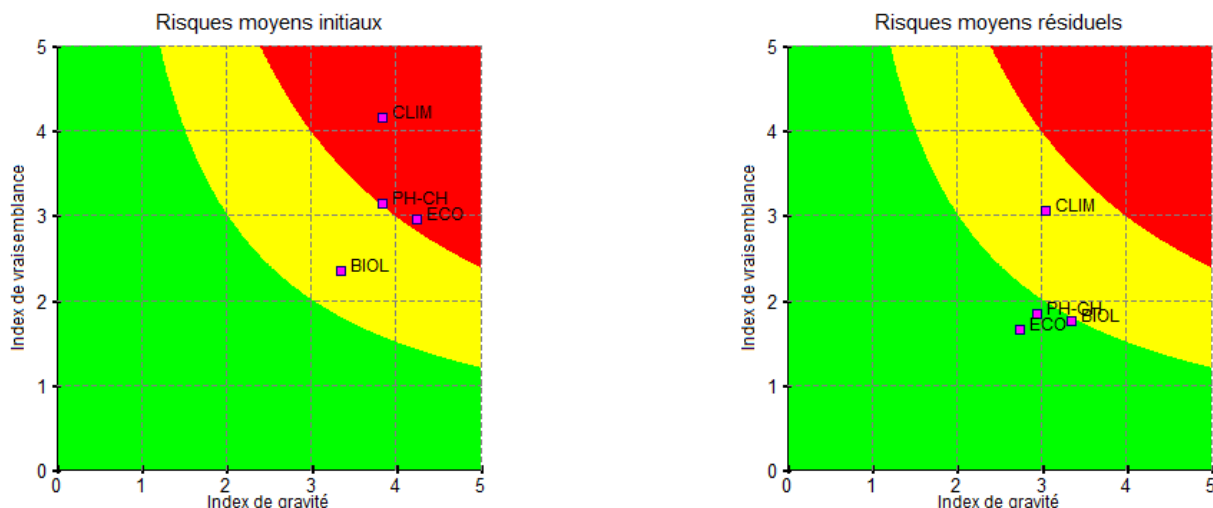


Figure 6. Cartographie des risques moyens (diagrammes de Farmer) pour le saumon. Analyse par dangers génériques.

Dans cet exemple, les trois phases (figure 5) montrent des risques initiaux moyens situés dans la zone de non acceptabilité. C'est la phase migratoire qui montre les risques initiaux maximum les plus élevés alors que la phase marine montre les risques initiaux minimum les plus importants. Cette dernière phase est celle pour laquelle les risques moyens résiduels restent les plus importants, en raison notamment des incertitudes liés aux changements globaux qui affectent le plus cette phase. Concernant les dangers génériques (figure 6), pour les risques initiaux, seul le danger « Climatique » est dans la zone tolérable alors que les autres sont dans la zone inacceptable. On voit notamment que le danger « Climatique » est en moyenne celui pour lequel la vraisemblance est la plus élevée, toujours en raison des changements globaux qui affectent l'ensemble des aires de grossissement des adultes qui ne peuvent donc pas y échapper. Pour les risques résiduels, c'est également le seul qui reste dans la zone tolérable, toujours en raison des incertitudes évoquées précédemment. Les autres se situent dans la zone acceptable. La réduction des risques se fait en diminuant à la fois la vraisemblance et la gravité, sauf pour le risque « Biologique » pour lequel c'est surtout la vraisemblance qui diminue (prévention).

Cette cartographie est donc un outil synthétique permettant de visualiser les principales caractéristiques des risques initiaux et résiduels identifiés dans l'APR Scénarios. Les diagrammes de Farmer synthétisent de manière claire les modes de réduction des risques mis en œuvre (prévention ou protection).

4. Conclusion

Ce travail démontre la pertinence de l'utilisation de la méthodologie APR pour l'évaluation des risques environnementaux et écologiques. Conceptuellement, les systèmes biologiques et écologiques sont définissables en termes de fonctions, de phases ou de processus vulnérables à différents types de dangers, et une grande part de leur complexité peut être appréhendée. Pratiquement, la description de ces systèmes est relativement aisée en s'appuyant sur les connaissances scientifiques en Ecologie Fonctionnelle et en Biologie de la Conservation. Elle peut par ailleurs prendre de multiples formes selon le système étudié et les objectifs de l'analyse. Les dangers auxquels le système est confronté sont de natures très diverses, diversité couverte par le périmètre de l'analyse. Ils sont aussi bien intrinsèques au fonctionnement du système qu'environnementaux et ont des impacts aussi bien à court terme qu'à long terme. En ce sens, l'APR est un outil utile car elle permet d'analyser de manière globale et synthétique ces systèmes, par nature multidimensionnels et multifonctionnels, et les risques auxquels ils sont soumis.

Nous avons également illustré au travers de deux exemples les larges possibilités d'application de l'APR, qui permet d'appréhender les risques écologiques à tous les niveaux d'organisation de la biodiversité, de génétique à écosystémique en passant par le niveau spécifique.

Ce travail fournit les premiers éléments de construction d'échelles de vraisemblance et de gravité, et un référentiel de décision propres à l'analyse des risques écologiques. Bien que l'acceptabilité sociétale du risque écologique soit peu connue, il est possible de la définir en se fondant la notion de perte de fonctions écologiques ayant trait aux services rendus par la nature à l'Homme. Les aspects purement éthiques liés à la perte de la biodiversité sont primordiaux pour une Société qui génère actuellement une extinction massive des espèces vivantes à l'échelle mondiale, mais l'approche utilitariste et donc économique des risques écologiques est fondamentale pour une prise de conscience et une mise en œuvre rapide d'actions de gestion de ces risques. L'APR est parfaitement adaptée à une telle approche, d'autant plus qu'elle permet également une évaluation de l'effort financier et des bénéfices/risques des actions de réduction, ces derniers aspects n'étant pas abordés ici car toujours en cours de développement.

Malgré leur étude intensive depuis un demi-siècle les systèmes écologiques restent encore mal connus. En effet, contrairement à des systèmes construits par l'Homme et dont on peut connaître ou évaluer les caractéristiques et le fonctionnement, ils sont très complexes et sont soumis à des changements environnementaux constants, notamment sous la pression anthropique. Les analyses de risques les concernant ne peuvent donc pas être statiques et définitives et doivent être constamment réévaluées à la lumière des nouvelles connaissances scientifiques.

A la suite de ce premier travail, il sera d'abord nécessaire de compléter et d'améliorer les analyses présentées ici. L'APR montrant un grand potentiel d'application, elle sera utilisée pour analyser d'autres cas. Nous militons ici pour la généralisation de son utilisation dans les études de risques environnementaux et la mise en place des tableaux de bord pour la gestion de l'environnement.

Enfin, plusieurs pistes de réflexion s'ouvrent quant aux développements futurs de la méthode dans le domaine environnemental : (i) l'évaluation des coûts et des pertes liés à la gestion des risques ; (ii) la prise en compte de l'étendue des impacts et la spatialisation des risques. Ce dernier point est primordial et fait l'objet de nombreuses études et recherches scientifiques.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement le Pr. Alain Desroches (ECP) pour ses conseils et sa disponibilité. Ils remercient également les Dr. Ir. Françoise Fournel et Gilles Euzenat de la station salmonicole ONEMA de Eu (76) pour le partage de leurs vastes connaissances des salmonidés migrateurs.

Références

- Allen, T. F. H. and T. B. Starr: Hierarchy: Perspectives for ecological complexity. Chicago: University of Chicago Press, 1982, 310 pp.
- Desroches A., Baudrin D. et Dadoun M, 2009. L'Analyse Préliminaire des risques – Principes et Pratiques, ed Hermes Science, 311 p.
- Díaz S, Fargione J, Chapin FS III, Tilman D (2006). Biodiversity Loss Threatens Human Well-Being. PLoS Biol 4(8): e277. doi: 10.1371/journal.pbio.0040277
- ICES, 2002. Report of working group on North Atlantic Salmon. www.ices.dk
- Jolivet C, Augusto L, Trichet P, Arrouays D (2007). Les sols du massif forestier des Landes de Gascogne: formation, histoire, propriétés et variabilité spatiale. Rev For Fr. LIX, p7-30.
- Lafitte JJ, Lerat JF (2009). Reconstitution des peuplements forestiers détruits par la tempête du 24 janvier 2009 dans le Massif forestier des landes de Gascogne. Conseil general de l'agriculture de l'alimentation et des espaces ruraux. 81p.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). Ecosystems and human well-being: Biodiversity synthesis. Washington (D. C.): World Resources Institute. 86 p.
- ONEMA, 2007. Plan français de mise en oeuvre des recommandations de l'OCSAN en matière de protection, de gestion et de mise en valeur du saumon atlantique et de son habitat. www.onema.fr.
- ONU, 1993. Convention sur la diversité biologique. Conclue à Rio le 5 juin 1992. Vol 1760.