HAL
open science

Écotechnologies et écoconception : concepts et mise en oeuvre

P. Roux, J.F. Patingre, F. Giroux, O. Naud

To cite this version:

P. Roux, J.F. Patingre, F. Giroux, O. Naud. Écotechnologies et écoconception : concepts et mise en oeuvre. Ingénieries eau-agriculture-territoires, 2005, 42, p. 55 - p. 70. hal-00477133

HAL Id: hal-00477133

https://hal.science/hal-00477133v1

Submitted on 28 Apr 2010

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.

Écotechnologies et écoconception : concepts et mise en œuvre

Philippe Roux [a], Jean-François Patingre [b], François Giroux [a] et Olivier Naud [a]

Que se cache-t-il sous le vocable « écotechnologies » et derrière la multitude de méthodes de conception (Écoconception, DFX, TRIZ, POEMS, etc.) ? Comment ces méthodes et/ou les concepts qui leur sont associés peuvent-ils être mis en œuvre et décupler la résolution de problématiques liant technologies et protection de l'environnement ?... Au travers d'une synthèse des principaux termes et concepts disponibles et d'un exemple de projet, les auteurs se proposent ici de démystifier ces concepts et d'apporter des éléments de réponses à ces questions.

L'adoption, par la commission européenne, d'un plan d'action en faveur des écotechnologies (CDCE, 2004) a mis en évidence à la fois la pertinence du concept et sa maturité. Il a en outre permis une diffusion large et l'acception du terme écotechnologies : *« Les techniques écologiquement rationnelles (écotechniques) protègent l'environnement, sont moins polluantes, utilisent de façon plus durable toutes les ressources, autorisent le recyclage d'une proportion plus importante de leurs déchets et produits ainsi qu'un traitement des déchets résiduels plus acceptable que celui que permettraient les techniques qu'elles remplacent. Les écotechniques sont, sous l'angle de la pollution, des « techniques de transformation et de production » qui engendrent des déchets en quantité faible ou nulle, en vue de prévenir toute pollution. Elles comprennent aussi les techniques de « fin de chaîne », dont l'objet est d'éliminer la pollution une fois qu'elle s'est produite. Les écotechniques ne sont pas seulement des techniques particulières, mais aussi des systèmes complets englobant savoir-faire, procédures, biens et services, matériel et procédures d'organisation et de gestion ».*

L'émergence du concept d'écotechnologies et des mesures qui lui sont associées (pour en favoriser le passage sur le marché) est susceptible de générer de multiples questions de recherche, notamment dans le domaine des agrosystèmes. Les premières, situées en amont, concernent la prise en compte des contraintes environnementales dès la conception ; c'est **l'écoconception**. Les secondes, en aval, concernent la définition et la mise en œuvre de critères d'évaluation des écotechnologies pouvant aller jusqu'à la mise en place de labels (**éco-évaluation**).

Les problématiques soulevées par l'éco-évaluation sont multiples et fortement dépendantes d'avancées scientifiques sur la compréhension des écosystèmes et la quantification des impacts. Ainsi, par exemple, pour les plastiques utilisés en agriculture, l'absence de méthode d'éco-évaluation avait abouti à une situation polémique visant à faire passer pour biodégradables des matériaux qui, bien qu'étant dégradables physiquement, ne l'étaient pas «bio-chimiquement» (Feuilloley, 2004). La mise en place de méthodes et de systèmes d'essais permettant d'évaluer leur impact environnemental devrait maintenant permettre leur développement sur de meilleures bases.

Bien que les deux aspects **éco-évaluation** et **écoconception** soient fortement imbriqués, nous nous intéresserons plus particulièrement dans cet article à ce dernier. En effet, si le coût de conception d'un équipement ne représente en général que 5 à 10 % de son coût global, c'est cependant cette étape qui va conditionner à 90 % le coût et les performances, y compris environnementales, sur l'ensemble du cycle de vie du produit.

Les contacts

a. Cemagref, CIRAD-ENSAM, unité mixte de recherche ITAP (Information et technologies pour les agro-procédés) BP5095, 34196 Montpellier Cedex 5

b. Ingénieur conseil, membre de l'APEDEC, Professeur associé université de Cergy-Pontoise, 34 rue Gaetan Pirou, 95580 Andilly

Méthodologies d'analyse et de conception : « la conception pour... »

Il paraît difficile d'aborder l'écoconception directement, sans préalablement résumer le cheminement historique des méthodes de conception qui ont abouti à sa genèse. Celles-ci se sont diffusées à partir des années 1960 comme une réponse à la nécessité de rationaliser la démarche même de conception. Ces méthodes, ayant survécu aux tâtonnements des débuts, se sont affirmées dans les années 1980 dans les domaines de l'ingénierie et de la conception de produits industriels.

Le fondement historique et le fil conducteur liant toutes les méthodes de conception est l'analyse fonctionnelle. Celle-ci consiste à « rechercher, ordonner, caractériser et hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions » (AFNOR NF X50-150) et permet donc l'établissement de cahiers des charges fonctionnels (CDCF). En particulier, l'expression « fonctionnelle » d'un besoin ne doit pas préjuger des solutions qui seront mises en œuvre pour le satisfaire. Par exemple, exprimer un « besoin de stockage de liquide » au sein d'un cahier des charges par « cuve en inox de 1 500 litres » va brider considérablement le concepteur (en l'occurrence sur le choix des matériaux), et donc avoir une incidence sur les coûts du produit final. Le même besoin, exprimé de manière fonctionnelle par « le produit doit permettre de stocker 1 500 litres d'un liquide ayant les propriétés physico-chimiques suivantes... et avoir une durée de vie de 15 ans... » conduit à un éventail beaucoup plus large de solutions potentielles et facilite donc la pleine expression de la créativité du concepteur. En ces temps de « dématérialisation » de tous les aspects de l'économie, on peut dire que l'analyse fonctionnelle en constitue la première étape par la dématérialisation de l'expression du besoin.

L'une des premières méthodes systématiques mettant en œuvre ces principes est l'analyse de la valeur. Cette méthode formalisée par L.-D. Miles dès 1947 à la compagnie américaine General Electric, vise à satisfaire les besoins exprimés par l'analyse fonctionnelle, en optimisant les solutions potentielles à travers un critère de coût en relation avec le service rendu. Ce type de méthode, largement éprouvée, est aussi basée sur la pluridisciplinarité de l'équipe de conception, ce qui n'était pas du tout évident dans les structures industrielles des années 60-70.

Longtemps considérées comme de simples sciences appliquées, les sciences de la conception vont constituer une discipline à part entière à partir des travaux d'Herbert Simon au début des années 1970 (Simon, 1969). L'objet des recherches, toujours poursuivies aujourd'hui, est à la fois de comprendre le processus cognitif mis en œuvre lors d'une conception collaborative, mais également d'intégrer le plus tôt possible tous les paramètres du cycle de vie du produit à concevoir. Sur ces bases, un certain nombre de méthodes dites « conception pour X » (« *design for X* » ou « *X-oriented design* » en anglais) ont vu le jour (Bralla, 1996). Le terme « X » désigne dans ce cas l'une des finalités recherchées (utilisateur, valeur, fabrication, assemblage, modularité, etc.).

L'essentiel de ces méthodes « analytiques » (ou méthodologies) sont du type « boites à outils » pour lesquelles tel ou tel outil est préconisé en fonction du stade d'avancement du développement. Certaines sont de portée plus générale (QFD, CCO, méthodes de Taguchi, AMDEC, etc.), mais il faut convenir qu'aucune méthode ne permet de piloter de bout en bout un projet de conception.

Plus récemment, ont été transférées depuis l'ex-URSS des méthodes d'aide à la créativité à base de connaissances. Le fondement de ces méthodes se trouve dans la théorie de résolution de problèmes inventifs (TRIZ) développée par Altshuler et son équipe (Salamatov, 1999). Partant du constat que les seules aides disponibles pour les problèmes inventifs étaient des méthodes psychologiques (du type *Brain storming*, etc.) et sur la base de l'analyse scientifique de plusieurs millions de brevets, il a développé un ensemble d'outils originaux.

Des travaux de recherche ont été conduit ces dernières années au sein de l'UMR ITAP pour intégrer et adapter ces méthodes à la fois aux problèmes spécifiques du secteur agricole et agroalimentaire, mais aussi au contexte des PME-PMI des pays du sud (Giroux *et al.*, 1999 ; Marouze *et al.*, 1998, 1999).

L'écoconception

Après ce tour d'horizon des différentes méthodes de conception, il convient de présenter la méthode qui est au cœur de notre préoccupation : l'écoconception. Celle ci correspond à l'intégration des aspects environnementaux dans la conception ou la re-conception de produits.

Encadré 1

Définition des sigles et termes utilisés en conception

ACV : analyse du cycle de vie ou LCA pour *Life Cycle Analysis*.

AMDEC : analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité.

AV – ANALYSE DE LA VALEUR : analyse détaillée des coûts pour chaque fonction d'un système.

ANALYSE FONCTIONNELLE : répondre strictement à un besoin préalablement identifié.

CCO : conception à coût objectif (reconcevoir un produit dans un objectif de coûts fixes).

CDCF : cahier des charges fonctionnel.

CEM : conception à l'écoute du client.

DFX : *Design For X* (la conception pour X...) ; par exemple, DFM : *Design For Manufacturing* (conception pour fabriquer) ; DFE : *Design for Environment*.

ESQCV : évaluation simplifiée et qualitative du cycle de vie.

INGÉNIERIE SIMULTANÉE ou *Concurrent Engineering* (CE) : approche systématique multidisciplinaire d'intégration simultanée des différentes étapes de développement d'un produit.

INTEGRATED ASSESSMENT : évaluation intégrée (KNOFLACHER, 2002).

LCM : *Life cycle Management*, gestion du cycle de vie et évaluation des coûts de chaque alternative.

MASIT : *Multicriteria Analysis for Sustainable Industrial Technologies* ; comparaison de technologies nouvelles à des technologies de référence au moyen de critères et de métriques prédéfinies par secteur.

MSP : maîtrise statistique de processus.

MSR : méthode simplifiée de re-conception.

PLANS D'EXPÉRIENCES : méthodologie d'optimisation des expérimentations et méthode TAGUCHI.

PLM : *Product Lifecycle Management*.

POEMS : *Product Oriented Environmental Management System* ou système de management environnemental orienté produit, dont l'objectif est de gérer la connaissance acquise lors de l'écoconception de produits et de procédés.

QFDE : *Quality Function deployment for environment*, déploiement de la fonction qualité pour l'environnement.

SDF : sûreté de fonctionnement.

SMEOP : système de management environnemental orienté produits.

TQM : *Total quality management* ou management par la qualité totale.

TRIZ : théorie de résolution de problèmes inventifs.

Principes de l'écoconception

L'écoconception est une démarche préventive qui consiste à prendre en compte l'environnement dès la conception. Elle recouvre un ensemble de méthodes et d'outils dont le but est la connaissance des conséquences environnementales des choix réalisés, pour en maîtriser les effets globaux (Vigneron, Patingre, 2001). Elle s'applique autant à des développements de produits, de services, de procédés qu'à la définition de filières technologiques – objet de l'exemple présenté dans

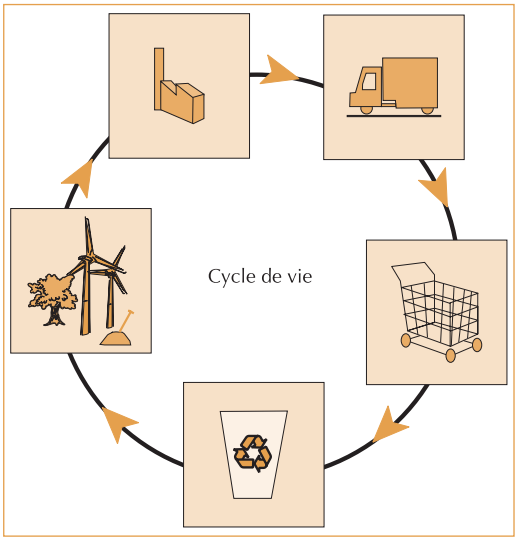


Figure 1 – Le cycle de vie du produit « du berceau... à la tombe ».

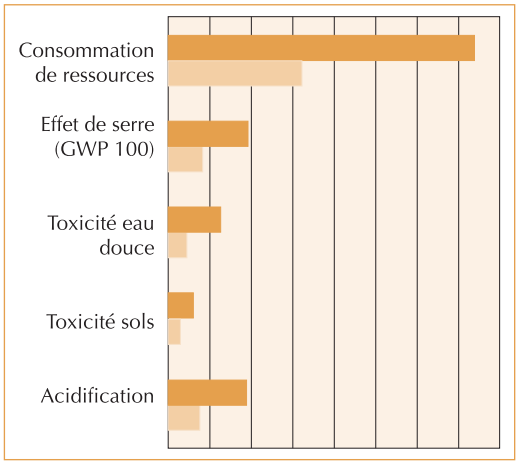


Figure 2 – L'écoconception : une approche multicritère des impacts environnementaux.

le chapitre suivant. De plus en plus souvent, les utilisateurs de l'écoconception y adjoignent une visée technico-économique : « ... à performance technique équivalente et sans augmenter notablement les coûts... ».

Son but est la réduction des impacts environnementaux sur **l'ensemble du cycle de vie** du produit. On parle alors de prendre en charge les produits « du berceau... à la tombe » (figure 1). Une bonne écoconception aura aussi comme objectif de ré-introduire dans le cycle de la consommation, les matières et énergies récupérables en fin de vie « ... pour fermer la boucle ».

D'autre part, la définition des impacts environnementaux pose toujours un problème de compréhension aux concepteurs de produits, services, systèmes ou procédés. En effet, contrairement aux dimensions économiques de coût de fabrication ou d'investissement, qui peuvent s'exprimer en unité monétaire unique, on ne peut pas facilement réduire la mesure « d'environnement » à un seul critère. On qualifie donc l'écoconception **d'approche multicritère des impacts** environnementaux (figure 2).

Il convient donc de sélectionner les impacts potentiels pertinents pour le domaine d'étude considéré. Par exemple, on ne retiendra que rarement des critères radiologiques pour des études de dispositifs mécaniques. Néanmoins, il faudra se préoccuper de la couche d'ozone, du réchauffement climatique, de la production d'ozone troposphérique, des pluies acides... car tous ces critères environnementaux sont impliqués dans les processus qui prennent place dans le cycle de vie de ces produits.

Dans toutes les actions d'écoconception, on retrouvera le même fil conducteur (Vigneron, Patingre, 2003) :

– **fixer l'objectif** de la démarche, bien définir le sujet et les limites du projet ; ce qui correspond en fait à la première étape de l'AV ;

– **analyser les impacts** sur l'ensemble du cycle de vie avec les outils appropriés ;

– **identifier les sources** d'impact et les contributions principales afin de les réduire ;

– **trouver les axes d'amélioration**, simuler les variantes, choisir les meilleurs compromis, les mettre en œuvre ;

– exploiter les améliorations ; **communiquer**, argumentaires marketing, articles, déclarations environnementales produits, écolabels...

Pour conduire ces actions de conception avec prise en compte des aspects environnementaux, des outils spécifiques sont donc nécessaires. Ils permettent d'estimer, évaluer ou quantifier – suivant leur précision et leur sophistication – les impacts potentiels et les améliorations proposées.

Les méthodes simplifiées

Point n'est besoin de mesures précises pour commencer... En effet, la prise de conscience des ordres de grandeur des conséquences environnementales est souvent le premier moteur du progrès dans ce domaine. Des outils « qualitatifs » sont développés par de nombreuses fédérations professionnelles pour guider les concepteurs vers de bonnes pratiques environnementales

(par exemple « L'écoconception pour les mécaniciens » ; Barnabe *et al.,* 2003). Ces guides se présentent le plus souvent sous forme de listes de questions à se poser aux différents stades de la conception. Elles sont accompagnées de grilles simples d'évaluation pour inciter aux améliorations pertinentes dans le secteur d'activité.

Une méthode simple, plus générale, mérite une attention particulière : l'**ESQCV** ou évaluation simplifiée qualitative du cycle de vie. Elle a été diffusée en 1998 par la parution du fascicule documentaire FD 30 310 qui était le premier document normatif sur l'écoconception. Le principe de cet outil est d'utiliser une grille d'analyse et quelques questions types pour déterminer quels sont les problèmes environnementaux potentiels du produit étudié. Cette sélection permet ensuite d'analyser un peu plus les quelques problèmes identifiés en introduisant la notion de « **contribution notable** ». Une quantification simple d'un flux représentatif du problème identifié (par exemple, la consommation d'aluminium, d'énergie, ou la quantité de déchets...) permet de calculer un ratio environnemental de ce flux, en le rapportant au flux total du secteur d'activité d'une zone géographique pertinente (région, pays, etc.). Ce ratio environnemental est ensuite comparé au ratio économique, calculé en rapportant le coût du produit (sur le cycle de vie si possible) au chiffre d'affaires du secteur ou au PIB de la zone. Si le ratio environnemental est supérieur, alors la contribution est considérée comme notable et des efforts de réduction doivent être menés. Il s'agit là d'un premier rapprochement des problématiques environnementales et économiques que l'on considère maintenant comme indispensable pour la conception compatible avec le « développement durable ».

D'autres outils ont été créés pour réaliser des **estimations rapides des impacts** environnementaux à partir d'une déclaration de nomenclature de produit, de transports, de consommation énergétique, de scénario de fin de vie. La structure de ces outils ressemble à celle des analyses de cycle de vie, mais leur rigueur, leur précision, leurs bases de données sont beaucoup moins détaillées. Il ne faut donc les utiliser que pour orienter les études d'amélioration. On citera dans cette catégorie Eco-it, un petit programme développé par *Pré Consultant* aux Pays-Bas, qui a la particularité de résumer tous les calculs en points d'environnement représentant l'impact annuel d'un citoyen « ordinaire » européen. Ceci peut être tentant pour les concepteurs, mais les pondérations qui sont réalisées en arrière plan ne font pas l'unanimité. C'est pourquoi, l'université de Cergy-Pontoise a développé un outil, encore expérimental, UCPE, qui exprime les indicateurs d'impacts potentiels habituels à partir d'une nomenclature simple du produit ou du service. Là encore, le « profil environnemental » qui résulte ne doit être considéré que comme indicatif pour travailler aux améliorations sur les impacts principaux et leurs causes.

L'analyse de cycle de vie comme outil de quantification des impacts environnementaux

Afin de rendre plus précises les quantifications des impacts et plus rigoureuses les analyses, la méthode d'analyse de cycle de vie (ACV) a été mise au point et diffusée depuis plus d'une décennie (Jolliet *et al.*, 2005). Elle fait l'objet d'une reconnaissance internationale et d'une normalisation ISO pour en assurer une utilisation cohérente et comparative. La figure 3 (p. 60) montre l'articulation des normes ISO 14040 (2000) et le principe de calcul des impacts environnementaux.

L'ACV est fondée sur la quantification de tous les flux entrants et sortants des éléments analysés. Un bilan complet de ces flux est effectué sur la totalité du cycle de vie. C'est « l'inventaire du cycle de vie » (ISO 14041). Il nécessite une définition rigoureuse des limites du produit ou système étudié, une expression claire des hypothèses retenues pour la prise en compte de certains éléments comme les produits secondaires issus de mêmes procédés de production, des modèles de transports, des modèles énergétiques, etc. Ceci explique que le recours à des experts (à la fois de ces méthodes, mais aussi des bases de données qui leur sont associées) a été longtemps indispensable pour mener à bien une ACV. Depuis, de nombreuses formations à l'écoconception ont diffusé ces savoir-faire et des logiciels ont rendu ces analyses beaucoup plus conviviales et pratiques.

En ACV, la première référence à créer est la définition de **l'unité fonctionnelle,** qui sert de base à la comparaison de produits ayant le même service rendu dans un contexte analogue. Ainsi, on ne compare pas les impacts d'un véhicule automobile et d'un train ; mais plutôt ceux du service rendu pour le voyageur dans des conditions précises : « km transporté » pour un type de

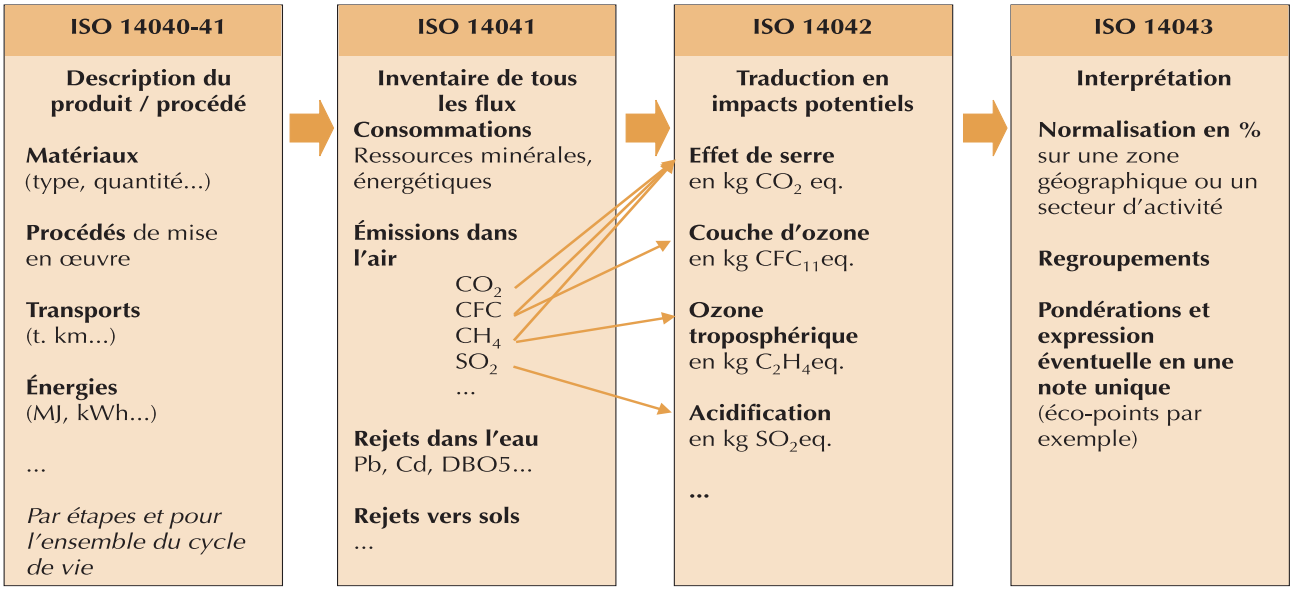


Figure 3 – Principe de calcul des impacts environnementaux.

trajet (inter-urbain, inter-régional, inter-pays, professionnel, touristique, etc.). Le « Mwh d'énergie renouvelable » produite a été choisi dans l'exemple de projet présenté au chapitre suivant.

Cependant, la difficulté principale d'une ACV réside toujours dans la qualité des données qui sont utilisées pour les calculs. Elles proviennent de deux sources principales : d'abord, **les mesures** que l'on réalise sur les machines, les procédés, les installations et qui servent à alimenter la quantification des flux sur les aspects très spécifiques du produit étudié (par exemple la pollution horaire des machines d'exploitation forestière dans l'exemple du projet FORENERGY).

Ensuite, le recours aux **bases de données** permet de quantifier tous les flux standards sur les matériaux et les procédés classiques de transformation, sur les transports et les énergies.

Pour un problème donné, le choix des impacts environnementaux pertinents pour les calculs (ISO 14042) constitue une étude en soi. Si pour étudier une comparaison de solutions d'emballages, il est généralement admis de se préoccuper de l'effet de serre et du réchauffement terrestre associé, de l'acidification, de l'eutrophisation, de la production d'ozone troposphérique qui génère des pics de pollution en zone urbaine, il est souvent plus difficile de caractériser les problèmes liés à la dissémination des OGM, de prendre en compte les problématiques des déchets nucléaires, d'érosion des sols, etc. Des universités travaillent depuis longtemps sur les sélections et les caractérisations des impacts généraux et ce sont ceux-là qui doivent être évalués en priorité. On adjoint généralement un ou plusieurs impacts très spécifiques au problème étudié (exemple : impact des matériels d'exploitation sur les sols forestiers dans l'exemple présenté au chapitre suivant).

La phase d'interprétation des résultats (ISO 14043) est la plus intéressante dans les études de choix d'écotechnologies. En effet, plusieurs scénarios peuvent être modélisés et les comparaisons qui sont réalisées sont rigoureuses, dans la mesure où elles sont effectuées dans des conditions similaires de définition de limites et de calcul. Il n'est pas utile, en effet, de définir un système très complet et lourd pour simuler des comparaisons de matériels. C'est l'option qui a été choisie dans l'exemple ci-après. On ne modélise pas les « infrastructures », c'est-à-dire les usines et outillages qui ont servi à la fabrication des machines, par exemple. Cette hypothèse n'altère en rien la qualité des comparaisons de scénarios technologiques.

Les résultats d'ACV sont le plus souvent exploités pour choisir entre plusieurs solutions. Ils peuvent servir, comme dans l'exemple ci-après, à la mise au point de méthodes de choix de système d'exploitation, de conditionnement, de logistique... On notera que de plus en plus d'études d'ACV sont réalisées pour communiquer sur les performances environnementales des produits.

Encadré 2

Les normes ISO

ACV (analyse des cycles de vie) :

– ISO 14040 : principes et cadre (1997).

– ISO 14041 : définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire (1998).

– ISO 14042 : évaluation d'impact du cycle de vie (2000).

– ISO 14043 : interprétation du cycle de vie (2000).

Prise en compte de l'environnement dès la conception :

– ISO 14063 : management environnemental – communication environnementale – lignes directrices et exemples (projet).

– FDX 30-310 : prise en compte de l'environnement dans la conception des produits – principes généraux et application (1998).

La norme ISO 14025 impose que les données publiées sous forme d'une « déclaration environnementale produit » soient obtenue par une ACV contrôlée par des experts. Certaines déclarations certifiées sur le kilowatt-heure électrique (par type de filière : hydraulique, nucléaire...) ont déjà été publiées dans les pays nordiques.

Les stratégies d'amélioration des produits/systèmes

L'écoconception constitue une dimension d'attaque supplémentaire pour l'amélioration des produits. Ainsi, des stratégies d'amélioration se dessinent en fonction de caractéristiques propres aux systèmes étudiés. L'École Polytechnique fédérale de Lausanne – structure d'enseignement et de recherche suisse – propose une typologie fondée sur les deux couples : actif/passif et mobile/fixe. On imagine bien qu'un produit « mobile » sera l'objet d'attention pour réduire les masses afin de diminuer les impacts dus aux transports. S'il est actif, on insistera sur les possibilités de gains (énergie, consommables...) lors de l'usage du produit. Pour un produit fixe, les problématiques de choix de matériaux, de filière de recyclage... seront prépondérantes.

D'autres stratégies de progrès apparaissent quand on utilise les approches d'analyse de la valeur pour l'étude environnementale. En effet, la répartition fonctionnelle des impacts (par exemple pour l'impact principal « effet de serre », ou pour un indicateur global de type points) permet des raisonnements à la fois sur les contributions principales par type de sous-système, mais aussi par type de fonction rendue par le système matériel étudié. Cette approche contributive fonctionnelle vient induire des pistes transversales de progrès qui s'ajoutent aux remises en causes plus directes fondées sur l'analyse typologique précédente.

Les évolutions récentes pour l'intégration des dimensions du développement durable et des outils classiques de conception assistée par ordinateur

Les aspects techniques, pour satisfaire le besoin des utilisateurs et obtenir de bonnes performances, sont au cœur du travail de conception. Depuis longtemps, les préoccupations économiques sont venues ajouter une dimension importante à cette tâche de conception (conception à coût objectif, etc.), et ainsi des outils spécifiques se sont ajoutés aux outils techniques habituels. L'écoconception vient rajouter une batterie supplémentaire de contraintes telles que les substances interdites, les objectifs de « bilan carbone », les filières de fin de vie, les déclarations environnementales, etc. La tendance actuelle est donc de rassembler tous ces outils afin de rendre service aux concepteurs et obtenir l'exploitation réelle des opportunités liées aux remises en causes environnementales.

Plusieurs outils logiciels commencent à intégrer des indicateurs économiques, sociaux et sociétaux. Citons en particulier le logiciel d'ACV Gaby4, qui permet tous ces calculs avec les mêmes travaux de définition du produit. D'autres travaux sont en cours dans plusieurs pays européens pour intégrer dans l'outil traditionnel de travail du concepteur – la CAO : conception assistée par ordinateur – les outils spécifiques de calcul des impacts environnementaux. Gageons que quelques systèmes complets apparaîtront bientôt, intégrant toutes les facettes de la conception au service des acteurs du développement de produits et systèmes qu'ils travaillent en structure collaborative, en groupe de projet, ou plus simplement en bureau d'étude de petite entreprise.

Encadré 3

Le projet FORENERGY :
Forest Energy – A solution for the future power needs

Projet européen financé par la commission européenne dans le cadre du 5e programme cadre de recherche et développement (réf. NNE5/2000/395).

Les partenaires du projet et leur rôle principal :

– AFOCEL (France) : foresterie, analyse de chantiers,

– ARCS (Autriche) : *integrated assessment* ou évaluation intégrée,

– Cemagref (France) : conception et évaluation d'équipements, scénarios technologiques,

– IVALSA (Italie) : foresterie, analyse de chantiers,

– Timberjack (Finlande) et sa filiale Plustech : concepteur et constructeur de matériel forestier, leader et initiateur du projet Forenergy,

– UPM-Kymmene (Finlande) : utilisateur final de bois énergie, conception de la chaîne logistique complète.

Ce projet a bénéficié d'un co-financement français de l'ADEME.

L'évaluation intégrée : l'exemple « FORENERGY »

Dans ce qui suit, nous allons illustrer notre propos à l'aide d'un projet de recherche, auquel a récemment participé l'UMR ITAP : le projet « FORENERGY » (encadré 3). L'objectif, à travers cet exemple, est de présenter la démarche globale ainsi que les différentes méthodes et outils utilisés. Le détail des résultats obtenus et des multiples hypothèses qui les sous-tendent n'est pas l'objet du présent article.

Le problème initial posé dans ce projet était basé sur un double constat. Tout d'abord, pour différentes raisons liées au développement durable (accords de Kyoto, etc.) les États européens se sont engagés à augmenter la part des énergies renouvelables. Le principal problème posé par celles-ci est leur stockage pour une utilisation pendant les pics de consommation. À ce titre, le bois énergie est l'une des rares énergies renouvelables qui autorise intrinsèquement le stockage (« puits de carbone ») et qui est, sous certaines conditions de sylviculture, neutre en émission de gaz à effet de serre (CO_2). D'autre part, parmi la ressource en bois énergie, il existe un potentiel énorme non exploité que sont les gisements de « petits bois ou de taillis » (essentiellement feuillus) et les rémanents d'exploitation forestière (il reste entre 20 et 50 tonnes par hectare de bois après coupe rase sous forme de branches, cimes, etc.).

Le projet a donc consisté à évaluer des scénarios (dits « scénarios technologiques ») permettant de mobiliser cette ressource en bois énergie. Dans la mesure où cette énergie doit se substituer à des énergies fossiles, la productivité et le prix de revient sont des critères importants, mais qui ne sauraient être évalués sans une analyse concomitante des effets socio-économiques et environnementaux des technologies en question. L'approche retenue (figure 4), résumée sous le vocable anglais *Integrated assessment* (Knoflacher, 2002), consiste à évaluer les effets de différents scénarios, afin d'aboutir à une solution adaptée aux conditions envisagées.

Une gestion de projet autour de la conception de scénarios technologiques

Le projet a débuté par la définition d'objectifs (figure 4, flèche en haut à gauche) qui peuvent être résumés par : un coût objectif de bio-énergie produite, une technologie créatrice d'emplois en particulier en zones rurales, une neutralité en balance CO_2, un bon ratio « énergie fossile consommée » sur énergie renouvelable produite » et l'absence d'impacts négatifs sur les arbres restants.

Les conditions (figure 4, flèche en bas à gauche) ont aussi été clairement définies : description de l'état du potentiel en bois énergie (type de sylviculture, état initial de la forêt, etc.), infrastructure routière, répartition géographique des utilisateurs finaux de bois énergie, gestion renouvelable de la ressource forestière, contraintes liées à l'exploitation simultanée de bois énergie et de bois de trituration (par exemple, les résidus de plastique perturbent la fabrication de papier), etc.

Au cœur de la démarche de conception menée durant le projet, on trouve la recherche de solutions technologiques aux échelles croissantes ci-dessous :

– à l'échelle d'un **procédé élémentaire** : par exemple, dans ce projet, le procédé de mise

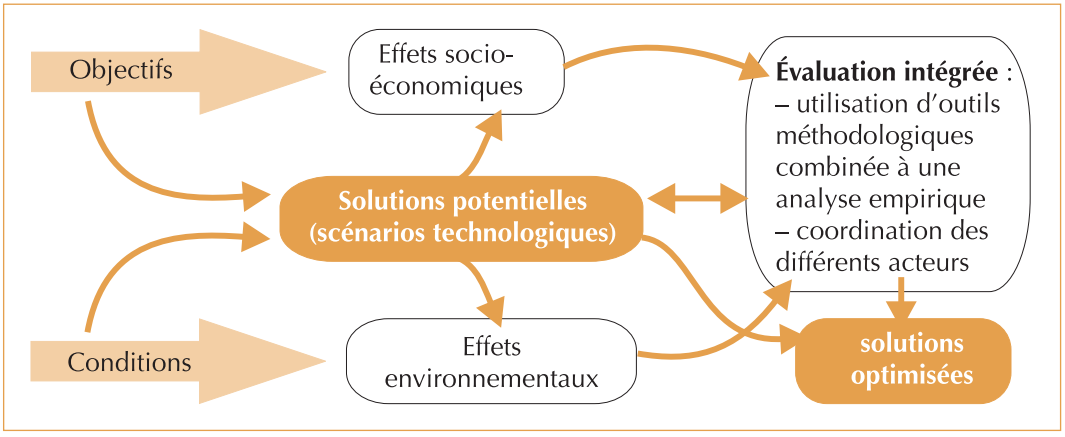


Figure 4 – Démarche d'évaluation globale (Knoflacher, 2002).

en fagots des rémanents forestiers ou celui de récolte de petits bois à l'aide d'une tête accumulatrice ;

– à l'échelle d'un **équipement** (intégration d'un ou de plusieurs procédés élémentaires sur une machine mobile) ;

– à l'échelle d'un **scénario** de la chaîne logistique complète.

La figure 5 (p.64) présente quelques exemples de scénarios du projet, en partant de la forêt (en haut) jusqu'à l'utilisateur final (en bas). La branche verticale de gauche représente l'exploitation des rémanents d'exploitation forestière (branches, cimes, etc.) qui peuvent, soit être transportés tels quels en forêt par un porteur forestier, soit être mis en fagots (branche verticale centrale). La première solution propose un déchiquetage en forêt, suivi d'un transport des plaquettes par camion « benne » spécifique, alors que la seconde autorise le transport des fagots par des camions identiques à ceux transportant les grumes. Elle permet d'autre part un séchage aisé des fagots en bord de piste, alors que la durée de stockage des plaquettes est forcément limité à cause des phénomènes de pourrissement et de fermentation des tas. La branche de droite de la figure 5 présente, quant à elle, la récolte sur pied de petits bois ou de taillis qui peuvent suivre deux scénarios comparables aux précédents. Il est important de bien réaliser que les trois exemples de scénarios présentés dans cette figure sont adaptés à des massifs forestiers relativement accessibles et à des régions où la mécanisation est avancée. D'autres scénarios ont été générés durant le projet, en combinant d'autres équipements tels que par exemple des débardeurs (ou « débusqueuses ») qui traînent les perches au lieu de les porter, pour les régions très montagneuse avec un débardage « aérien » au câble, ou par exemple par le regroupement des rémanents et l'utilisation de la fagoteuse non plus en forêt mais en bord de piste, à poste semi-fixe sur un camion.

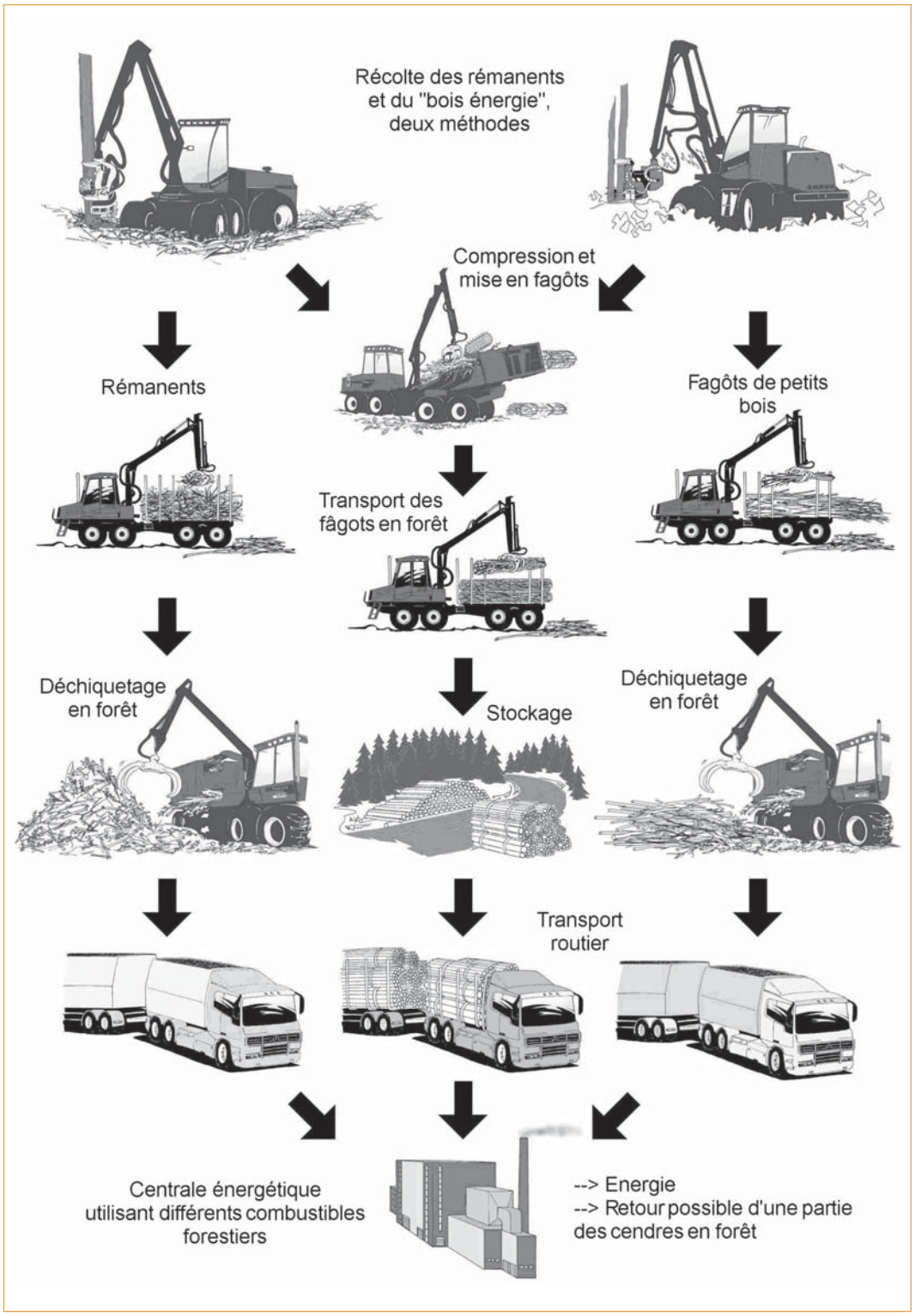
La gestion et l'organisation du projet, autour des « scénarios technologiques », a donc été basée sur une tâche horizontale *Integrated assessment*, et un certain nombre de tâches techniques qui s'articulaient entres elles suivant le schéma de la figure 4. Ces différentes tâches sont présentées dans ce qui suit.

Conception mécanique

Cette tâche repose sur une expertise produit (agro-équipements) ainsi que sur un savoir-faire en conception mécanique (CAO, simulations dynamiques, calcul de structure, etc.). La génération de scénarios technologiques a été conduite parallèlement aux travaux sur les procédés élémentaires et aux différents essais de prototypes qui ont eu lieu. Les méthodologies mises en œuvre allaient de **l'analyse fonctionnelle**, **l'analyse de la valeur** et les méthodes de créativité du type ***brainstorming***. Par ces méthodes, il a par exemple été rapidement mis en évidence que la marge de manœuvre en termes de productivité sur la récolte de petits bois se situait dans l'optimisation des mouvements de grues. La solution optimum a donc été une tête permettant de récolter plusieurs tiges (figure 6, p. 65) avant de réaliser leur empilage au sol par « petits fagots ».

Dans un second temps, mais toujours avec des boucles d'optimisation entres les phases de conception, il a fallu intégrer ces dispositifs dans des machines mobiles en recherchant l'optimum entre « une machine par fonction » et une

Figure 5 – Exemple de scénarios technologiques (Source Timberjack).



machine « multifonction », tel que par exemple le concept scandinave du *Forwester,* qui est une machine regroupant les fonctions d'un *Harvester* (machine de bûcheronnage) et d'un *Forwarder* (porteur forestier pour débarder les bois en dehors des routes et chemins carrossables). S'est posée alors la question de la recherche d'optimum, par exemple en termes de largeur de traitement (longueur de la grue) ou de taille des fagots ayant une incidence sur le porteur lui-même, mais aussi sur toute la chaîne logistique aval. La figure 7 présente deux exemples d'agencement de la machine complète de fagotage basés sur des tailles de fagots différentes. Ainsi, au fur et à mesure de l'avancement de ces tâches élémentaires, de nouveaux scénarios complets impliquant plusieurs machines ont pu être envisagés.

Système d'information et logistique

La logistique influe de façon significative sur la performance environnementale d'un scénario technologique, et notamment dans le cas présent, dans la mesure où elle permet de réduire les distances parcourues sur route avec un véhicule consommant de l'énergie fossile. La gestion de stocks doit prendre en compte non seulement les volumes, mais aussi les classes de valeur énergétique et la durée de séchage des stocks. Dans le cas de l'utilisateur final partenaire du projet, une infrastructure d'information géographique et de planification existait pour le bois destiné à la trituration ou au sciage. Un certain nombre de modules logiciels spécifiques au bois énergie ont été intégrés à cette infrastructure, ainsi que des équipements mobiles embarqués (GPS et cartographie, mesure des quantités produites, etc.). Ce système d'information sophistiqué permet de délocaliser une partie de la gestion de l'approvisionnement énergétique, en la déléguant aux transporteurs en lien avec la planification des équipes forestières.

Si cette intégration verticale offre *a priori* de bonnes possibilités de gestion des ressources énergétiques, différents scénarios de collecte de bois énergie restaient à étudier. Le projet visait aussi à évaluer qualitativement la pertinence de variantes de ces scénarios dans des contextes économiques moins intégrés. La méthode de modélisation UML (*Unified Modeling Language* ; OMG, 2003) a été utilisée, car elle est bien adaptée à cette problématique multidisciplinaire. Elle offre en effet plusieurs points de vue sur le système considéré, et différents niveaux de détails. Trois diagrammes ont été principalement utilisés : les « cas d'utilisation » qui précisent les différents utilisateurs du système d'information et les fonctionnalités attendues ; le diagramme « déploiement » qui montre les composants logiciels, les unités physiques qui les implémentent, et leurs interactions ; le diagramme « d'états-transition » (Statechart, initialement proposé par Harel, 1987) qui précise le fonctionnement du système dans le temps (dynamique). Ce dernier diagramme apporte une contribution essentielle à l'évaluation du système étudié, car il permet d'appréhender les phénomènes « transitoires » (mise en place et montée en puissance du système, pannes, ruptures d'approvisionnement, etc.).

Après avoir repéré les nombreux intervenants en présence (propriétaires, acheteurs, planificateurs, équipes forestières, camionneurs, opérateurs de la centrale thermique...) et les principaux composants du système d'information, un jeu de rôles a été organisé avec des cadres techniques afin d'identifier les principes de gestion mis en œuvre (figure 8, p. 66). Un modèle de simulation complexe a ensuite été réalisé. L'utilisation du jeu de rôle s'est avérée fructueuse et efficace. Cette démarche peut être appliquée à différentes phases de la modélisation, à des niveaux de détail crois-

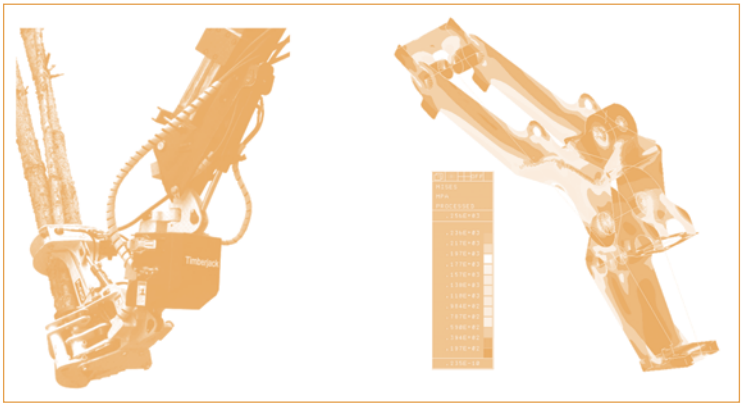


Figure 6 – Tête de récolte de petit bois (source Timberjack) et optimisation de la structure de la tête (source Cemagref).

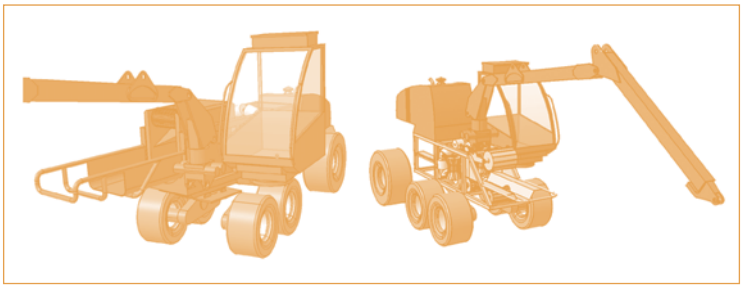


Figure 7 – Exemples de recherche de solution d'agencement de la machine complète (source Cemagref).

Figure 8 – Les cartes d'un participant au jeu de rôle.

sants, ou dans une vision prospective. La modélisation peut ainsi s'inscrire dans une recherche participative ou de médiation socio-économique entre acteurs comme dans Barreteau (1999).

Évaluation et essais de terrain

Dans la première partie de l'article, nous avons vu qu'une ACV faisait largement appel à des bases de données permettant un inventaire des flux standards pour les matériaux et les procédés classiques. Dans le cas d'un équipement nouveau, le recours à des essais et/ou des modèles est un passage obligatoire pour évaluer ces flux. Une tâche importante et particulièrement gourmande en ressources humaines a consisté en des essais de terrain à la fois de prototypes, mais aussi d'engins existants lorsque ceux-ci étaient utilisés dans un contexte spécifique au projet tel que par exemple le chargement, le transport et le déchargement de fagots avec un porteur classique (Cuchet *et al.,* 2003 et 2004).

L'objet de ces essais était dans un premier temps de fournir des données fiables en termes de productivité (figure 9) et de qualité des produits et ceci pour des conditions parfaitement décrites.

Ils ont concerné d'autre part **l'éco-évaluation** des procédés en forêt, avec en particulier l'évaluation des consommations, de l'impact au sol du passage des engins, les blessures aux arbres restants, l'étendue des exportations de minéraux, l'impact potentiel sur la gestion patrimoniale et les aménités liées à la forêt, etc. En particulier, dans le cas de la récolte de petits bois de taillis, l'exploitation sélective de ceux-ci pour le bois énergie peut dans certains cas permettre à long terme la reconversion de ces taillis en forêts beaucoup plus valorisables économiquement et socialement (tourisme vert, etc.).

Cette tâche d'éco-évaluation a nécessité la définition de protocoles d'essais précis et reproductibles. Lorsque cela était possible, des référentiels existants (description de la forêt, catégorie de terrain, dégâts au sol, blessures aux arbres) ont été utilisés. Par contre, il a été nécessaire de créer des protocoles d'évaluation spécifiques et leurs critères associés : évaluation fiable de la quantité de rémanents disponible au sol et du pourcentage de prélèvement après exploitation, qualité des combustibles en particulier dans les fagots (hygrométrie, présence de terre, etc.).

Évaluation intégrée (*integrated assessment*)

Cette tâche transversale a débuté par la définition des **limites du système** et du **contexte** d'application, afin que le champ d'investigation de l'évaluation intégrée soit en adéquation avec les ressources humaines disponibles dans le cadre du projet de recherche Forenergy. Dans ce contexte, il a donc rapidement été décidé de focaliser l'analyse sur la **séquence d'utilisation** des technologies. En effet, la valeur ajoutée de l'équipe pluridisciplinaire constituée dans le cadre de Forenergy paraissait moindre sur les aspects impacts amont et aval du cycle de vie ; sachant qu'il s'agit d'un problème ayant une composante plus industrielle et mettant en jeu des outils existants du type ESQCV ou ACV, que l'on pouvait appliquer *a posteriori* en utilisant des

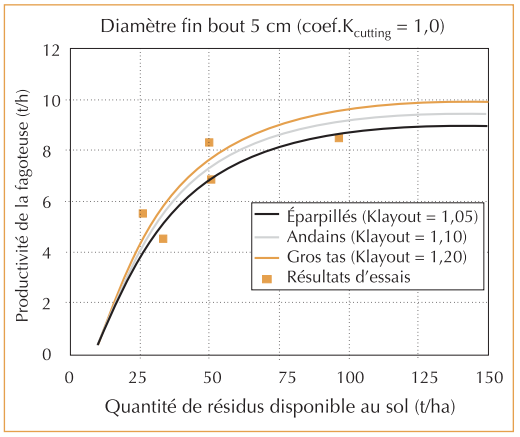


Figure 9 – Exemple de modèle de productivité de la fagoteuse en t/h de bois frais en fonction de la répartition au sol des rémanents (éparpillés, en andains, en gros tas).

bases de données disponibles sur les matériaux de fabrication. L'éco-évaluation conduite peut donc se résumer d'une part, à la modélisation du bilan énergétique et économique pour un certain nombre de scénarios technologiques, et d'autre part, à l'analyse de leurs effets respectifs sur les émissions et sur la productivité.

Sur ces bases, **l'analyse fonctionnelle** du système a été mise en œuvre, avec comme préalable à toute quantification, la définition de **l'unité fonctionnelle** (quantification du « service rendu ») : le « Mwh d'énergie renouvelable produite ». Quand on traite le cas du bois énergie, le problème du passage des différentes unités utilisées au Mwh n'est pas trivial. Il faut en effet tenir compte du coefficient de foisonnement[1] dans les piles de combustible, de l'humidité, du taux d'écorce, etc. Si l'unité de transaction avec l'utilisateur final peut être basée sur l'unité fonctionnelle, celle-ci n'est pas mesurable directement sur le flux de bois énergie entrant. La mesure sur flux matière est le volume apparent (par exemple le stère) ou le poids, accompagné d'une catégorisation approximative en qualité énergétique (souches, petits bois, rémanents...) et d'une mesure d'humidité par prélèvement. Toute étude comparative basée sur des données de clients finaux doit donc être faite avec précautions.

Une fois l'unité fonctionnelle définie, il a fallu décrire et quantifier les impacts potentiels écologiques, économiques et sociaux en définissant pour chacun des **indicateurs spécifiques**. Concernant les impacts environnementaux, le premier critère qui a été retenu (tout au moins pour la séquence d'utilisation de la technologie) est celui des émissions vers l'air (effet de serre, acidification, eutrophisation, formation photochimique d'ozone et émissions toxiques) liées essentiellement à l'utilisation d'énergie fossile, de lubrifiants (y compris pour les tronçonneuses), etc. La figure 10 présente un exemple de quatre scénarios différents pour une distance de transport de 80 km jusqu'à l'utilisateur final. Pour chaque scénario, les émissions sont quantifiés en g/t FW et en 100g/t FW pour le CO_2 (grammes par tonne de bois énergie ; FW = *Fuel Wood*). Une correspondance est alors possible avec les Mwh, avec tous les problèmes de changement d'unités mentionnés ci-avant.

Le second critère environnemental concernait le ratio entre « énergie fossile consommée » et « énergie renouvelable » produite. Si on prend l'exemple de la fagoteuse, celle-ci a une productivité d'environ 8 à 10 tonnes de « bois frais » par heure. L''équivalent énergétique est de 18 à 22 Mwh/h, en considérant une valeur moyenne de 2,2 Mwh/h produite par tonne de « bois frais ». Sa consommation d'énergie fossile (gasoil) est de 10-12 litres/h environ, soit 0,094 à 0,14 Mwh/h (pour 42 MJ/litre de gasoil). Le ratio [énergie fossile consommée/énergie renouvelable produite] est donc de 0,5 à 0,8 % environ. En combinant ce type d'évaluation pour un scénario complet impliquant plusieurs machines, on obtient un ratio global de l'ordre de 5 %. Il convient de préciser que cette évaluation ne concerne pas le cycle de vie complet, mais uniquement la séquence d'utilisation des équipements. Notons cependant que l'ordre de grandeur obtenu est conforté par les résultats d'une ACV complète réalisée en 2002 aux États-Unis (Mann *et al.*, 2002) qui évalue les consommations d'énergie non renouvelable de 125 à 231 Kj_{fossil}/Kwh pour la biomasse brûlée directement ; soit un ratio de 3,5 à 6,4 %.

D'autres indicateurs, spécifiques aux impacts directs sur le milieu forestier ont été analysés tels que l'impact au sol du passage des engins en forêt, les blessures aux arbres restants, l'étendue des exportations de minéraux, etc.

Pour ce qui concerne l'indicateur d'impact **économique** (€/Mwh produite), sa simplicité apparente ne doit pas masquer la complexité de son évaluation pour des scénarios combinant un nombre important d'équipements. Pour ce faire, un modèle de simulation économique (figure 11, page 68) a été élaboré. Celui-ci comportait plu-

1. Foisonnement : augmentation apparente du volume des matériaux au moment de leur extraction.

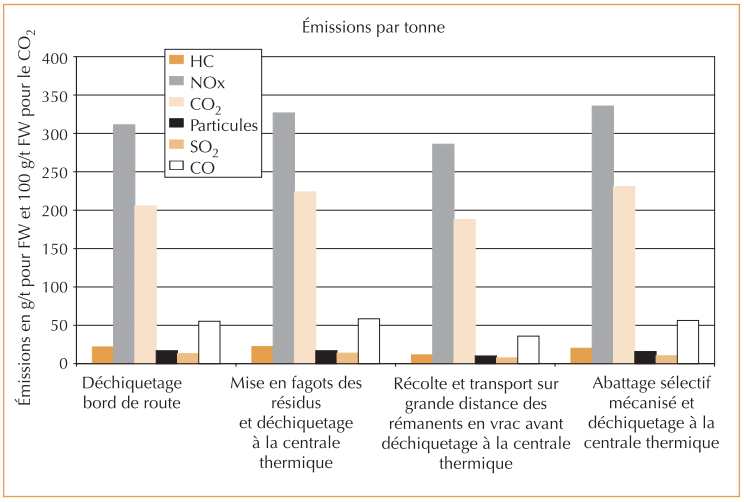


Figure 10 – Émissions pour 4 exemples de scénarios par tonne de bois énergie mobilisé pour une distance de transport de 80 km (source ARCS).

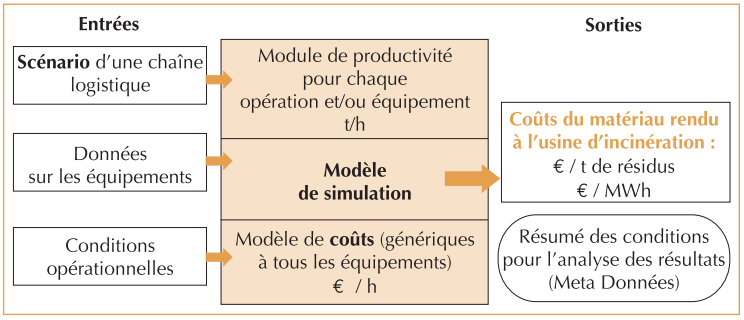


Figure 11 – Structure du modèle de simulation « économique » (source Cemagref).

sieurs entrées, dont un générateur de scénarios permettant de définir une séquence complète d'intervention de différents équipements depuis la forêt jusqu'à l'usine de production d'énergie. Ces scénarios pouvaient être crées à partir d'une base de donnée d'équipements contenant pour chacun d'entre eux, non seulement un modèle de productivité, mais aussi un modèle économique intégrant coûts d'exploitation, amortissements, main d'œuvre, etc. Ces modèles ont été crées à partir des essais de terrain pour les technologies nouvelles (fagotage, récolte avec tête accumulatrice) et à partir de données existantes disponibles au sein des différents partenaires du projet. Enfin, toujours dans les entrées, il fallait décrire les conditions opérationnelles qui vont de l'état de la forêt (accessibilité, type de sylviculture, densité, peuplement, etc.) en passant par la distance de celle-ci par rapport à l'utilisateur final et le type d'infrastructure entre les deux.

En dehors de la représentation des transactions entre intervenants (*cf.* page 66, « Système d'information et logistique »), l'impact social local n'a été abordé que de façon qualitative. Les scénarios de bois énergie étudiés créent de l'activité économique supplémentaire en zones rurales, sans avoir d'effets environnementaux significativement négatifs. Si la mise en plaquettes en bord de route mobilise une main d'œuvre plus importante que le broyage en usine, la mise en fagots respecte mieux les fonctions récréatives et touristiques de la forêt, en termes de bruit et d'esthétique.

Un des résultats de l'évaluation intégrée a été de montrer que la fonction de mise en fagots, en bonnes conditions d'accessibilité, ne pouvait pas être motivée par la seule compatibilité avec la chaîne logistique de transport du bois d'industrie. La valeur ajoutée du fagot est en effet essentiellement valorisée par la fonction de stockage et de séchage qu'il représente. L'évaluation globale a permis de valider différents scénarios, basés sur des équipements actuellement commercialisés, adaptés à la diversité des conditions européennes (économiques, géographiques...).

Figure 12 – Fagoteuse FIBERPAC 370B en action et empilage de fagots, stockés à coté des billons (source Timberjack).

Conclusion, perspectives

Un nombre croissant de problèmes environnementaux est fortement lié à une activité humaine, dans laquelle la composante technologique ne peut pas être occultée, quand on revendique de contribuer à la diminution des impacts. Aborder un problème environnemental impliquant des activités humaines et des technologies peut se faire de deux façons. La première, souvent adoptée par la recherche, est centrée sur une analyse environnementale et sociale et se restreint bien souvent à une démarche descriptive ou d'évaluation d'impact. Lorsque les activités économiques elles-mêmes ne sont pas remises en question, la seconde consiste au contraire à inscrire les technologies nécessaires au cœur d'un processus d'évaluation intégré. Une démarche de recherche participative peut alors être construite sur la base d'une évaluation de scénarios technologiques et d'innovation pour lesquels une marge d'action est souvent disponible. Les connaissances environnementales et la prise en compte de paramètres sociaux, tels que par exemple la multifonctionnalité de l'agriculture,

sont alors les points d'entrée et les indicateurs du processus de conception.

Une telle démarche, utilisant des méthodes de conception éprouvées, et en particulier l'écoconception, est à même de faire progresser sensiblement la résolution des problèmes qui nous sont posés. Enfin, si les exemples illustrant cet article sont issus de domaines d'applications spécifiques (forêt, bois énergie, etc.) et concernent essentiellement des équipements mobiles, les méthodes mises en œuvres peuvent s'appliquer à d'autres domaines du génie rural et environnemental ainsi qu'à des équipements ou des procédés fixes. L'écoconception peut englober savoir-faire, procédures, services, gestion, etc. ❐

Résumé

Les écotechnologies (ou technologies écologiquement rationnelles) ont moins d'impact sur l'environnement, utilisent de façon plus durable les ressources et autorisent le recyclage de tout ou partie de leur déchets de façon plus acceptable que les technologies qu'elles remplacent. Les problèmes méthodologiques qui se posent alors se situent en amont ; c'est l'écoconception ; et en aval pour ce qui concerne la mise en place de critères d'évaluation d'impact ; c'est l'éco-évaluation. Le présent article met l'accent sur les techniques d'écoconception, avec une synthèse préalable des différentes méthodologies de conception qui ont contribué à sa genèse. Les principes, ainsi que les méthodes à la disposition des concepteurs sont passés en revue. La démarche est illustrée par un exemple de projet de recherche qui concerne la récolte de bois énergie. Au cours de ce projet ont été mises en œuvre quelques unes de ces méthodes, au travers du concept « d'évaluation intégrée » et de l'analyse de « scénarios technologiques ».

Abstract

The ecotechnologies (or ecologically rational technologies) have less impact on the environment, use in a more durable way the resources and authorize the recycling of whole or part of their waste in a more acceptable way than technologies they replace. The methodological problems raised by those are both upstream; it is the eco-design; and downstream, when concerning the definition of impact assessment criteria; it is the eco-assessment.This article focuses on eco-design techniques with a prior synthesis of various design methodologies which contributed to its genesis. Principles, as well as the methods at the disposal of the designers, are reviewed. The approach is illustrated with a research project example about energy wood harvesting. During this project were implemented various methods within the concept framework of "integrated assessment" and analysis of "technological scenarios".

Bibliographie

BARNABE, F. *et al.*, 2003, *L'écoconception pour les mécaniciens*, fascicule, Centre technique des industries mécaniques (CETIM), ISBN 2-85400-546-5, 51 p.

BARRETEAU, O., BOUSQUET, F., 1999, Jeux de rôles et validation de systèmes multi-agents, *7es journées francophones d'intelligence artificielle et systèmes multi-agents*, Saint-Gilles La Réunion, p. 12.

BRALLA, J.-G., 1996, *Design for excellence*, New York, McGraw Hill, Inc., 326 p.

CDCE (Commission des communautés européennes), 2004, *Promouvoir les technologies au service du développement durable : plan d'action de l'Union européenne en faveur des écotechnologies*, communication de la Commission au Conseil et au Parlement européen, Bruxelles.

CUCHET, E., ROUX, P., SPINELLI, R., 2003, Récolte de rémanents pour le bois énergie avec le Fiberpac, *Informations Forêt*, Afocel, n° 2-2003, fiche n° 669, ISSN 0336-0261, p. 6.

CUCHET, E., ROUX, P., SPINELLI, R., 2004, Performance of a logging residue bundler in the temperate forests of France, *Biomass & Bioenergy*, Elsevier Science, volume 27, issue 1, p. 31-39.

FEUILLOLEY, P., 2004, Ces plastiques faussement biodégradables, *La Recherche*, n °374, p. 52-56.

GIROUX, F., GUEYE, M., MAROUZE, C., 1999, Conception Intégrée au Service de l'Innovation Produit dans les Pays en Développement, *3e Congrès International de Génie Industriel*, Montréal, Canada.

HAREL, D., 1987, Statecharts : a visual formalism for complex systems, *Science of Computer Programming* (8), p. 231-274.

JOLLIET, O., SAADE, M., CRETTAZ, P., 2005, *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, Collection Gérer l'environnement, Presses Polythechniques et Universitaires Romandes, ISBN 2-88074-568-3, 242 p.

KNOFLACHER, M., 2002, A Conceptual Model for Integrated Assessment, *IEMS Congress (International Environmental Modelling and Software Society)*, Lugano, ISBN 88-900787-0-7.

MANN, M.-K., SPATH, P.-L., 2002, *Life cycle assessment comparisons of electricity from biomass, coal and natural gas*, Annual meeting of the American Institute of Chemical Engineers, nov. 2002.

MAROUZE, C., 1999, *Proposition d'une méthode pour piloter la trajectoire technologique des équipements dans les pays du Sud. Application au secteur agricole et agroalimentaire*, thèse de doctorat, département Génie industriel, ENS d'Arts et Métiers, Paris, France

MAROUZE, C., GIROUX, F., 1998, *Méthode CESAM : conception d'équipements dans les pays du Sud pour l'agriculture et l'agroalimentaire, méthode. Évolution du premier modèle, modèle1.2*, Montpellier (FRA), CIRAD-SAR, ATP Méthode de Conception d'Équipements.

OMG, 2003, *Unified Modeling Language* (UML), voir spécification sur lien internet : http://www.omg.org/cgi-bin/doc?formal/03-03-01

SALAMATOV, Y., 1999, *TRIZ : The right solution at the right time. A guide to innovative problem solving,* Hattenm, Insytec B.V., Pays-Bas.

SIMON, H.-A., 1969, *The Sciences of the Artificial,* The MIT Press, Cambridge, Mass. (réédition 1996), 231 p.

VIGNERON, J., PATINGRE, J.-F. *et al.*, 2001, *Écoconception : concept, méthodes, outils, guides et perspectives*, Economica, ISBN 2-7178-4311-6 (br.), 205 p.

VIGNERON, J., PATINGRE, J.-F. *et al.,* 2003, *Écoconcevoir : appliquer et communiquer,* Economica, ISBN : 2-7178-4718-9 (br.), EAN : 9782717847185, collection : Écologie, environnement industriel et développement soutenable, ISSN 1762-7176, 215 p.