



HAL
open science

Eco-technologies, éco-concction, évaluation intégrée

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

► **To cite this version:**

P. Roux, J.F. Patingre, F. Giroux, O. Naud. Eco-technologies, éco-concction, évaluation intégrée. Académie d'Agriculture de France, May 2005, PARIS, France. 31 p. hal-00468030

HAL Id: hal-00468030

<https://hal.science/hal-00468030>

Submitted on 19 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.

ECO-TECHNOLOGIES, ECO-CONCEPTION, EVALUATION INTEGREE

Philippe ROUX^a, Jean-François PATINGRE^b, François GIROUX^a, Olivier NAUD^a

^a Cemagref – CIRAD - ENSAM, Unité Mixte de Recherche ITAP, BP5095, 34196 Montpellier cedex 5

^b Ingénieur conseil, membre de l'APEDEC¹, Professeur associé Univ. de Cergy-Pontoise, 34 rue Gaetan Pirou, 95580 Andilly

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'éco-conception ; et en aval pour ce qui concerne la mise en place de critères d'évaluation d'impact ; c'est l'éco-évaluation. La présente communication met l'accent sur les techniques d'éco-conception, avec une synthèse préalable des différentes méthodologies de conception qui ont contribué à sa genèse. 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 intégré » et de l'analyse de « scénarios technologiques ».

Abstract

Title: *Environmental technologies, Eco-design, Integrated assessment*

The environmental technologies (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 upstream; it is the eco-design; and downstream, when concerning the definition of impact assessment criteria; it is the eco-assessment. This communication focuses on eco-design techniques with a prior synthesis of various design methodologies which contributed to its genesis. 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".

1 Introduction

1.1 Eco-technologies

L'adoption, par la commission européenne d'un plan d'action en faveur des écotechnologies (3) a mis en évidence à la fois la pertinence du concept et sa maturité. Il a en outre permis une diffusion large et l'acceptation du terme éco-technologies². Tous les secteurs d'activités sont concernés par celles ci; mais le domaine de l'agriculture et de l'environnement est caractérisé par le fait que les technologies doivent être intégrées dans des systèmes biologiques et socio-économiques en interactions complexes.

L'émergence du concept d'éco-technologies et des mesures qui lui sont associés (pour en favoriser le passage sur le marché) est susceptible de générer de multiples questions de recherche.

¹ APEDEC : Association professionnelle d'experts pour le développement de l'éco-conception

² "... 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 ..." cf. référence (3).

Les premières, situées en amont, concernent la prise en compte des contraintes environnementales dès la conception ; c'est l'**éco-conception**. Les secondes, en aval, concernent la définition et la mise en œuvre de critères d'évaluation des éco-technologies 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'avancés 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 biodégradable des matériaux qui bien qu'étant dégradables physiquement ne l'étaient pas «bio-chimiquement» (6). 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.

Prenons un autre exemple de problématique posée par l'éco-évaluation. Imaginons un pulvérisateur qui effectuerait l'application de produits phytosanitaires non plus en dose par hectare mais en ajustant celle ci, grâce à des capteurs, à la densité de végétation de la plante à traiter. Un tel équipement, passé au crible de la plupart des normes d'essais existantes aurait de fortes chances de ne pas être reconnu meilleur que les systèmes classiques. En effet, la plupart des critères d'évaluation d'équipements sont basés sur les technologies actuelles et font trop souvent appel à des essais de sous composants tels que, dans cet exemple du pulvérisateur, des tests de buses, de pompes, d'homogénéité de répartition spatiale sous rampe, etc.

Bien que les deux aspects **éco-évaluation** et **éco-conception** soient fortement imbriqués nous nous intéresserons plus en détail dans cette communication 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% son coût et ses performances y compris environnementales sur l'ensemble de son cycle de vie.

1.2 Méthodologies de conception : «la conception pour ... »

Il paraît difficile d'aborder l'éco-conception 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. 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 1500 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 1500 litres d'un liquide ayant les propriétés physico-chimiques suivantes ... et avoir une durée de vie de 15 ans ...» va permettre de rechercher au sein d'un éventail beaucoup plus large de solutions potentielles.

L'une des premières méthodes systématiques mettant en œuvre ces principes est l'analyse de la valeur. Cette méthode 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.

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 (9) . 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 (2). Le terme « X » désigne dans ce cas l'une des finalités recherchées (utilisateur, valeur, fabrication, assemblage, modularité, , etc.).

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 (8).

2 Eco-conception

2.1 Principes de l'éco-conception

L'éco-conception, ou « eco-design », est une démarche de création ou d'amélioration des produits qui recouvre un ensemble de méthodes et outils dont le but est la connaissance des conséquences environnementales des choix réalisés pour en maîtriser les effets globaux (10) : « L'éco-conception est une démarche préventive qui consiste à prendre en compte l'environnement dès la conception ». 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 le chapitre suivant - et y adjoignent souvent 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 éco-conception 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 ».

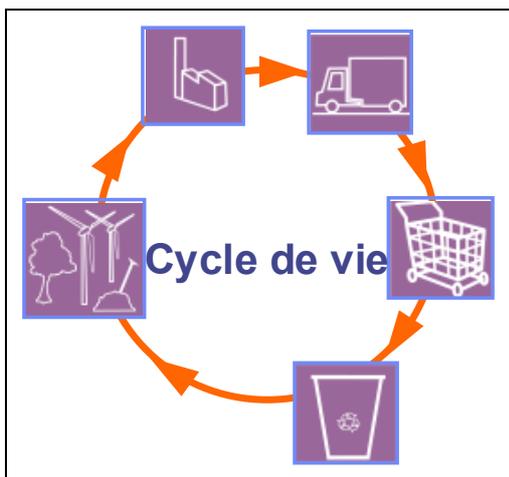


Figure 1 : Le cycle de vie du produit : « Du berceau ... à la tombe ».

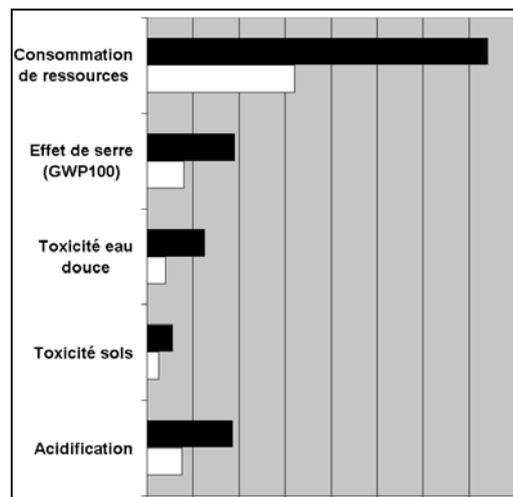


Figure 2 : L'approche multicritère des impacts environnementaux :

La définition des impacts environnementaux pose toujours un problème de compréhension aux concepteurs. En effet, si on peut exprimer les dimensions économiques de coût de fabrication ou d'investissement en unité monétaire unique, il est difficile de réduire facilement la mesure « d'environnement » à un seul critère. On qualifie donc l'éco-conception **d'approche multicritère des impacts** environnementaux (cf. Figure 2).

Il convient donc lors d'une étude de sélectionner les impacts potentiels pertinents pour le domaine 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'éco-conception, on retrouvera le même fil conducteur (11) :

- **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'analyse de la valeur;

- **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.

2.2 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 tel que par exemple « L'éco-conception pour les mécaniciens » (1). 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 d'être soulignée : L'**ESQCV** « Evaluation Simplifiée Qualitative du Cycle de Vie ». Elle a été diffusée par la parution en 1998 du Fascicule documentaire FD 30 310 qui était le premier document normatif sur l'éco-conception. Le principe de cet outil est d'utiliser une grille d'analyse et de quelques questions types pour déterminer quels sont les problèmes environnementaux potentiels du produit étudié. Cette sélection permet ensuite d'analyser plus en détail 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 sur une zone géographique pertinente (région, France, Europe, 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 dans le cadre du « 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 pour ces calculs 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.

2.3 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. Elle fait l'objet d'une reconnaissance internationale et d'une normalisation Iso pour en assurer une utilisation cohérente et comparative. La Figure 3 montre l'articulation des normes ISO 14040 (2000) et le principe de calcul des impacts environnementaux.

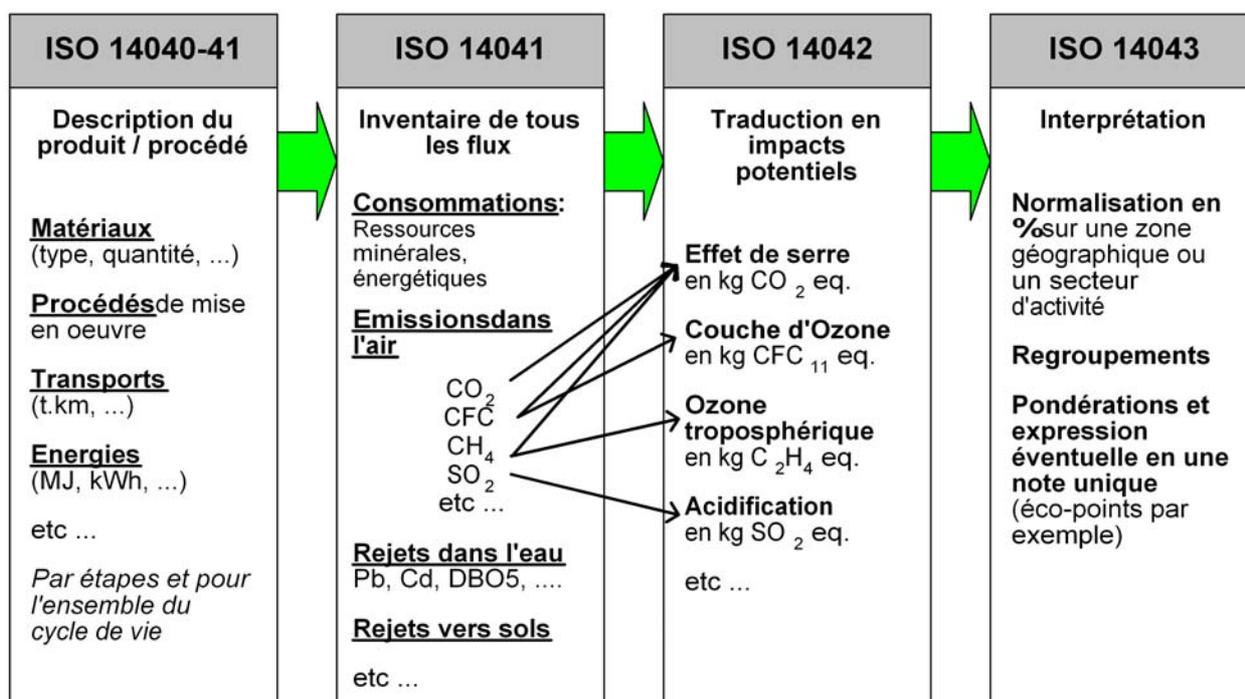


Figure 3 – Principe de calcul des impacts environnementaux

L'ACV est fondée sur la quantification de tous les flux entrants et sortants des éléments analysés 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 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.

En ACV, la première référence à créer pour les quantifications est la définition de **l'unité fonctionnelle**. En effet, la validité des choix de conception, des comparaisons de produits, etc. dépend d'une définition précise des limites du système, des unités fonctionnelles et d'un contexte d'application comparable. 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 trajet (de travail, inter-urbain, inter-régional, inter-pays, professionnel, touristique, etc.).

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. Ces sources permettent d'intégrer plus facilement les informations recherchées sur les fournitures

utilisées et pour lesquelles les fournisseurs ne savent pas toujours fournir les renseignements pertinents.

Le choix des impacts environnementaux pertinents pour les calculs (ISO 14042) constitue une étude en soi. Il est indispensable de représenter les impacts potentiels adaptés au problème étudié. Si pour étudier un choix 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'éco-technologies. 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 et 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 ; et sont aussi utilisés pour communiquer sur les performances environnementales des produits. La norme ISO 14025 impose dans ce cas 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. On peut imaginer que la production de chaleur de type bois-énergie fasse aussi l'objet de telle déclaration environnementale.

3 Evaluation Intégrée : l'exemple « FOREENERGY³ »

Dans ce qui suit, nous allons illustrer notre propos à l'aide du projet de recherche « FOREENERGY » auquel a récemment participé l'UMR ITAP. 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 de la présente communication.

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 ces énergies est leur stockage pour une utilisation pendant les pics de consommation. A 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 (CO₂). D'autre part, parmi la ressource en bois énergie, il existe un potentiel énorme et 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.). Deux technologies innovantes ont été

³ Projet Européen financé par la commission Européenne dans le cadre du 5ème programme cadre de Recherche et Développement (réf. NNE5/2000/395). Partenaires du projet : AFOCEL (France) : Foresterie, analyse de chantiers ; ARCS (Autriche) : évaluation intégrée ; Cemagref (France) : Conception et évaluation d'équipements, IVALSA (Italie) : Foresterie, analyse de chantiers ; Timberjack (Finlande): constructeur de matériel forestier ; UPM-Kymmene (Finlande) : utilisateur final de bois énergie. Ce projet a bénéficié d'un co-financement ADEME.

conçues et évaluées durant le projet ; à savoir un système de mise en fagots (cf. Figure 5) et une tête de récolte accumulatrice spécifique.

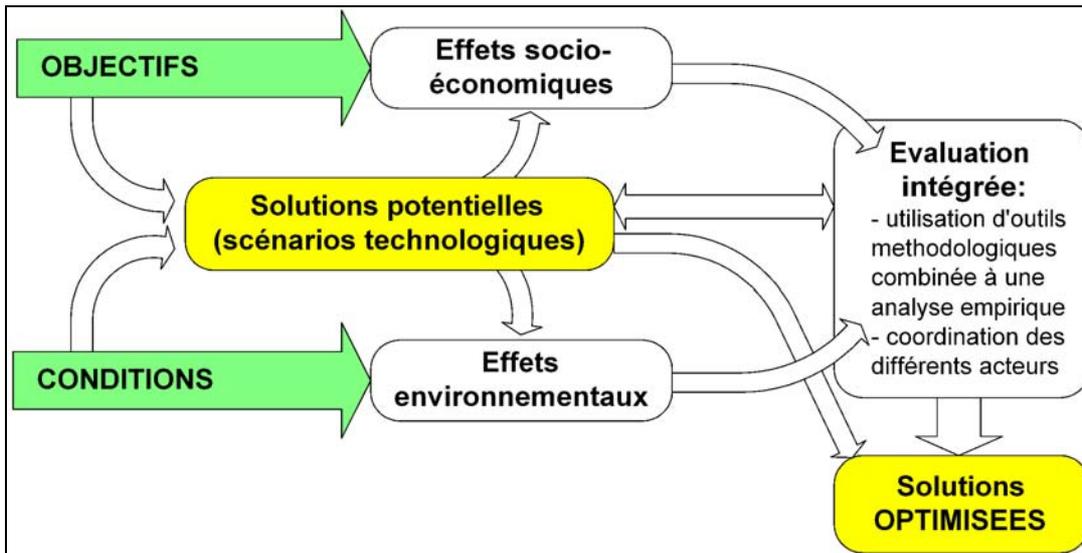


Figure 4 – Démarche d'évaluation globale (KNOFLACHER, 2002)

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, résumée sous l'appellation anglophone « Integrated assessment » (7) est présentée en Figure 4. Elle 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 CO2 - un bon ratio « énergie fossile consommée » sur énergie renouvelable produite » - l'absence d'impacts négatifs sur les arbres restants. Il a ensuite fallu définir les **limites du système** et son **contexte** d'application. Ainsi, il a 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 données disponibles sur les matériaux de fabrication.



Figure 5 : Fagoteuse FIBERPAC 370B en action et empilage de fagots, stockés à côté des billons (source Timberjack).

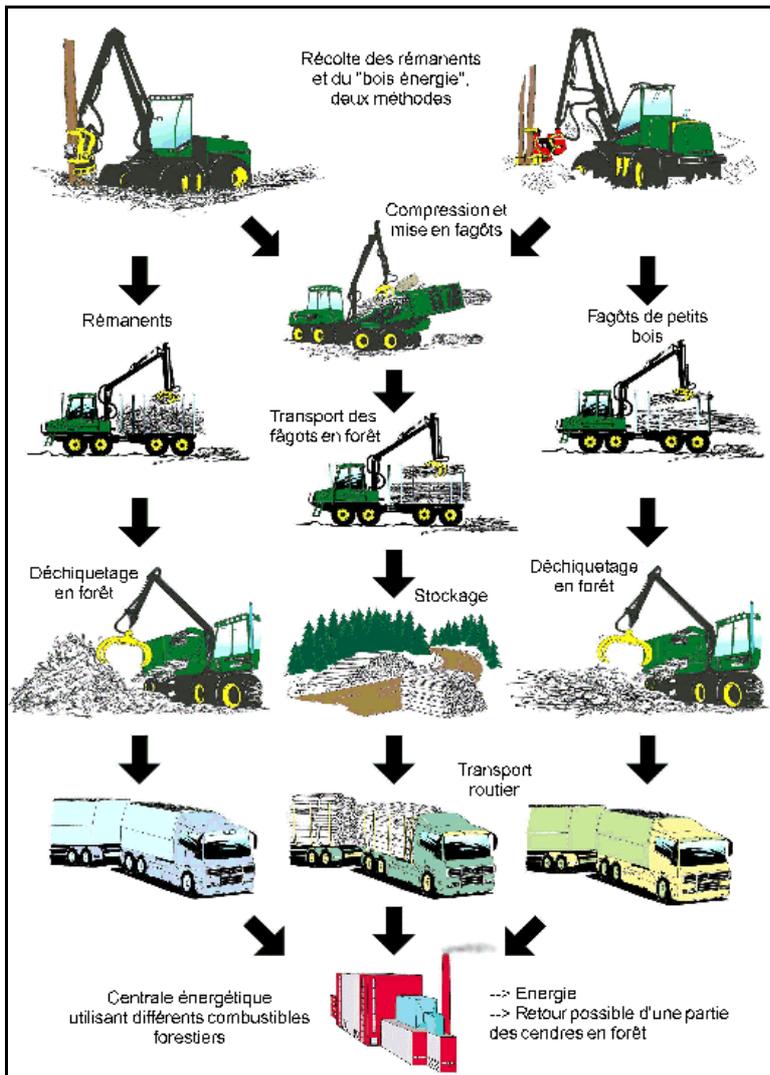


Figure 6 – Exemple de scénarios technologiques (Source Timberjack)

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 ex., les résidus de plastique perturbent la fabrication de papier), etc.

La Figure 6 présente quelques exemples de scénarios combinant différents équipements existants (déchetuse, porteur forestier, etc.) ou à concevoir (fagoteuse, et tête de récolte accumulatrice). D'autres scénarios ont été générés durant le projet tels que, par exemple, le regroupement des résidants et l'utilisation de la fagoteuse non plus en forêt mais en bord de piste, à poste semi-fixe sur un camion.

Le projet a donc combiné des phases de conception mécanique, d'essais de terrains (cf. (4)et(5)) et de conception du système d'information gérant la logistique. L'évaluation intégrée 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. Celle ci, représentant « l'unité d'utilité du produit » (quantification du « service rendu »), a été le **Mwh d'énergie renouvelable** produite. Lorsque l'on traite le cas du bois énergie, le problème du passage des différentes unités utilisées au Mwh n'est pas trivial. En effet, il faut passer d'unités volumiques (m^3) parfois spécifiques au monde sylvicole tel que le stère (st) et prendre en compte des coefficients de foisonnement⁴ (sf/m^3), voire éventuellement des taux d'écorces, pour remonter, au travers de la densité de tel ou tel essence de bois, à l'information massique (la tonne selon un taux d'humidité moyen dans notre cas). Entrent alors en jeu le pouvoir calorifique du bois ainsi que son taux d'humidité qui sont susceptibles de varier entre l'abattage et l'utilisation finale du produit.

⁴ Foisonnement : Augmentation apparente du volume des matériaux au moment de leur extraction

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**.

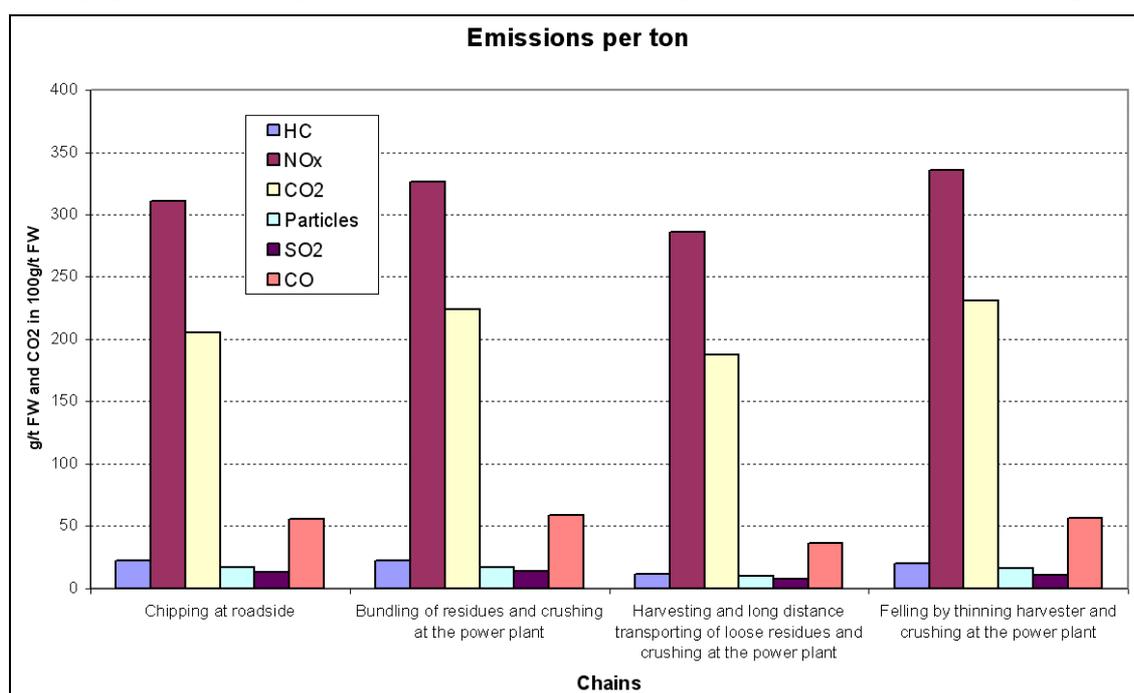


Figure 7 : Emissions pour 4 exemples de scénarios par tonne de bois énergie mobilisé pour une distance de transport de 80km (source ARCS)

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 et de lubrifiants (y compris pour les tronçonneuses). La Figure 7 présente un exemple de bilan d'émissions pour quatre scénarios différents et pour une distance de transport de 80 km jusqu'à l'utilisateur final. Celles ci sont quantifiées en g/t FW et en 100g/t FW pour le CO₂ (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 « Energie fossile consommée » et « Energie renouvelable » produite. Si l'on prend l'exemple de la fagoteuse, celle ci a une productivité d'environ 8 à 10 tonnes de « bois frais » par heure et consomme environ 10-12 l/h de gasoil. Le ratio [Energie fossile consommée / Energie 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 USA (12) 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 **économique** (€/Mwh produite) ; celui ci a été évalué à partir d'un modèle de simulation économique qui permettait de combiner pour un contexte sylvicole donné plusieurs équipements au sein d'un scénario.

4 Conclusion, perspectives

Un nombre croissant de problèmes environnementaux sont fortement liés à une activité humaine, dans laquelle la composante technologique ne peut pas être occultée, lorsque que l'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'éco-conception, est à même de faire progresser sensiblement la résolution des problèmes qui nous sont posés. Enfin, si les exemples illustrant cet communication 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'éco-conception peut englober savoir-faire, procédures, services, gestion, etc.

5 Bibliographie

- (1) BARNABE, F. et al., 2003, L'éco-conception pour les mécaniciens, Fascicule, Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM), ISBN 2-85400-546-5, p. 51
- (2) BRALLA J.G., 1996, Design for excellence, New York, McGraw Hill, Inc., p. 326
- (3) C. D. C. E. (Commission Des Communautés Européennes), 2004, Promouvoir les technologies au service du développement durable: plan d'action de l'Union européenne en faveur des ecotechnologies, Communication de la Commission au Conseil et au Parlement Européen, Bruxelles.
- (4) 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
- (5) 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
- (6) FEUILLOLEY, P., 2004, Ces plastiques faussement biodégradables, La Recherche, N° 374, p. 52-56
- (7) KNOFLACHER, M., 2002, A Conceptual Model for Integrated Assessment, IEMS Congress (International Environmental Modelling and Software Society), Lugano, ISBN 88-900787-0-7
- (8) SALAMATOV Y., 1999, TRIZ: The right solution at the right time. A guide to innovative problem solving, Hattenm, Insytec B.V., The Netherlands
- (9) SIMON H.A., 1969, The Sciences of the Artificial, The MIT Press, Cambridge, Mass. (réédition 1996), p. 231
- (10) VIGNERON, J., PATINGRE, J.F., et al., 2001, Éco-conception : concept, méthodes, outils, guides et perspectives, Economica, ISBN 2-7178-4311-6 (br.), p. 205
- (11) VIGNERON, J., PATINGRE, J.F., et al., 2003, Éco-concevoir: appliquer et communiquer, Economica, ISBN : 2-7178-4718-9 (br.), EAN : 9782717847185, collection: Écologie, environnement industriel et développement soutenable, ISSN 1762-7176, p. 215
- (12) 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

ECO-TECHNOLOGIES

ECO-CONCEPTION

ECO-TECHNOLOGIE

ECO-EVALUATION



Méthodologies de conception

- Analyse fonctionnelle
- Analyse de la valeur:

$$\text{Valeur} = \frac{\text{Fonction(s)}}{\text{coût}} = \frac{\text{Satisfaction du besoin}}{\text{coût}}$$

- « Conception pour X » (« *X oriented design* »)
X = utilisateur, valeur, fabrication, assemblage, maintenance, modularité, etc.

Méthodologies de conception

- Eco-conception :

$$\text{"Eco – efficacité"} = \frac{\text{Satisfaction du besoin}}{\text{impacts}}$$

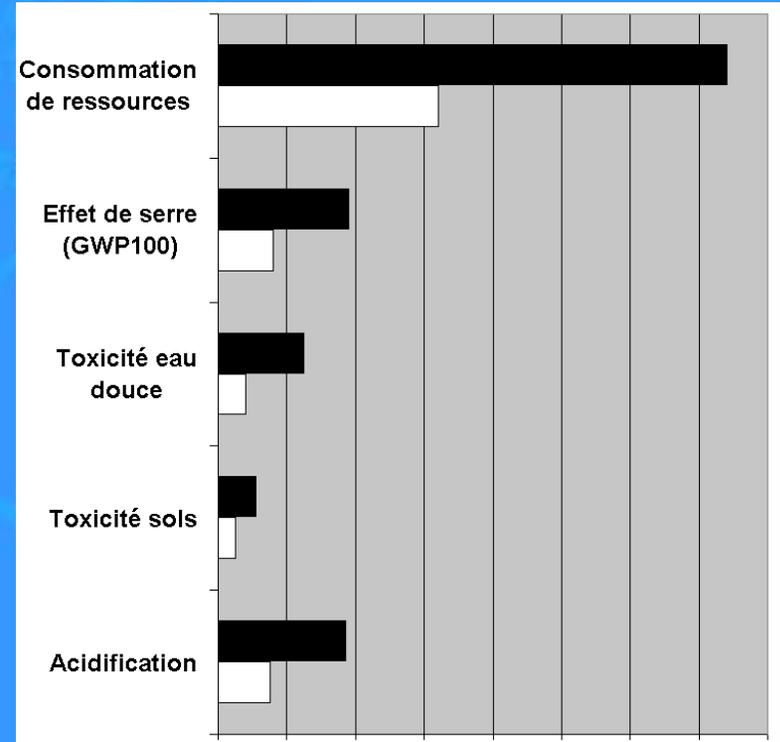
Applicable à un produit, un service,
un système ou un procédé

Filter possible: fonctions élémentaires du système

ECO-CONCEPTION



Analyse du cycle de vie
du produit (ACV):
« du berceau ... à la tombe »



Approche multicritère des
impacts
environnementaux

ECO-CONCEPTION

Définition de l'Objectif et des limites du projet ainsi que
de **l'unité fonctionnelle**

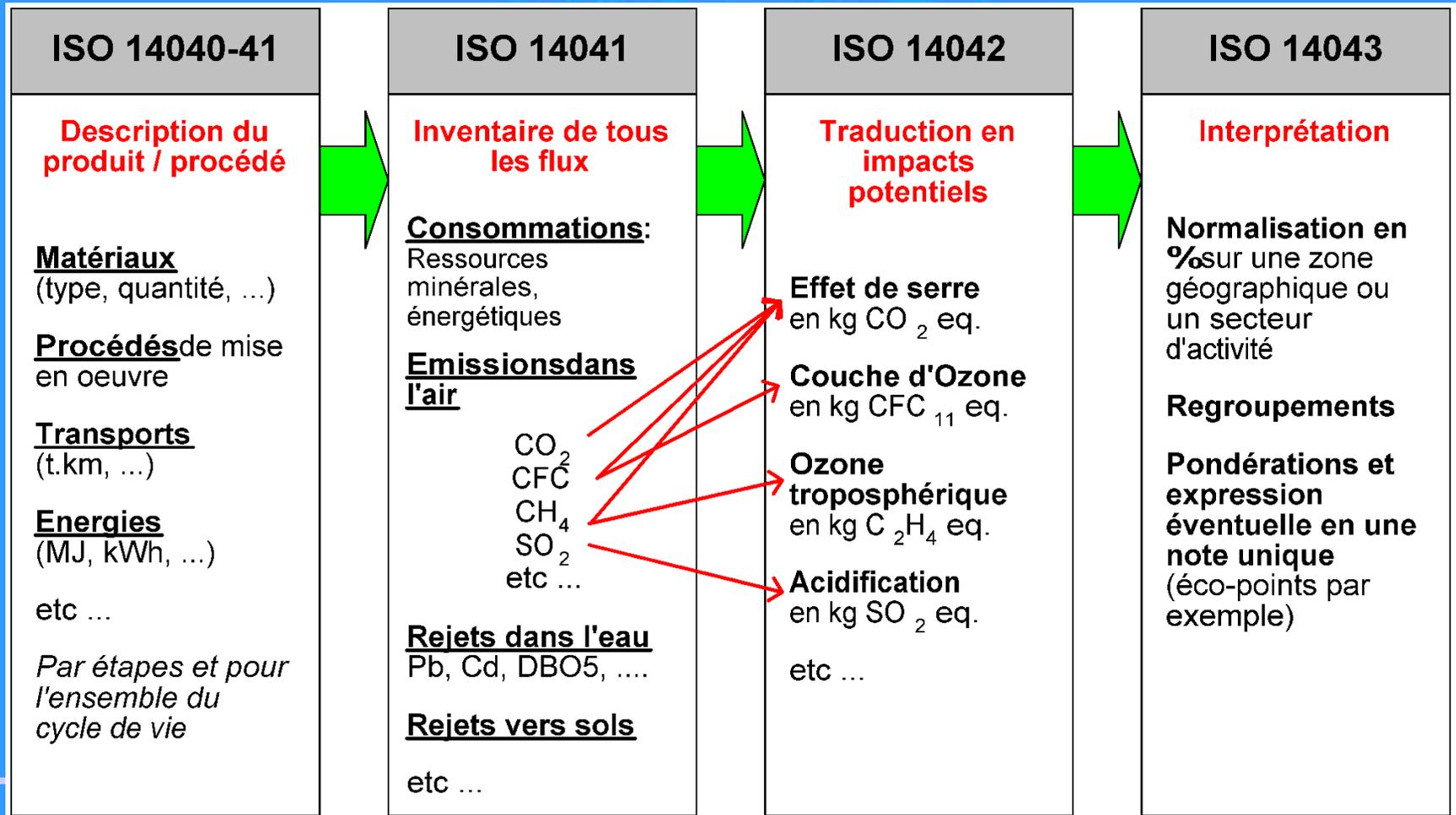


IMPACTS



« km transporté » pour un type de trajet:
Local, inter-urbain, inter-régional, inter-pays,
professionnel, touristique, etc.

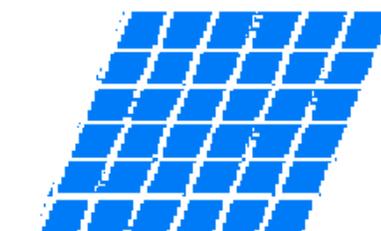
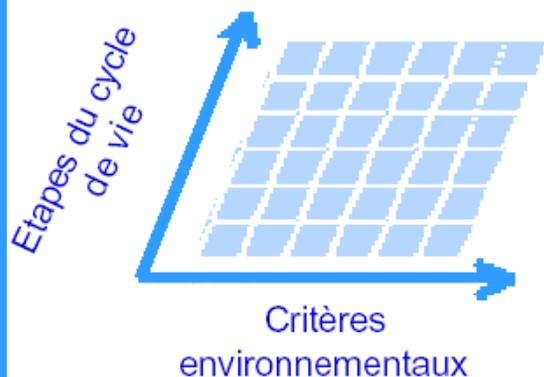
ACV: Principe de calcul des impacts environnementaux



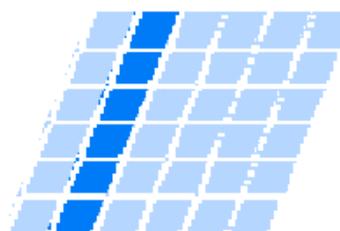
ECO-CONCEPTION



- 2 types de **démarche** : exhaustive / sélective



Investigation sur :
- toutes les étapes
- tous les critères



Investigation sur :
- toutes les étapes
- un seul critère



Investigation focalisée :
certains critères à
certaines étapes



- Outils **synthétiques** : Check-listes,



*Source ADEME

ESQCV: notion de notabilité

- Calcul de 2 ratios:
 - Environnemental (R_{ENV}) :
flux par produit / flux national*
 - Économique (R_{ϵ}) :
prix de vente / PIB
- Si $R_{ENV} > R_{\epsilon}$: le cas est dit notable
- Éco-efficacité = R_{ϵ} / R_{ENV} (notable si < 1)

Notion de notabilité: Exemple

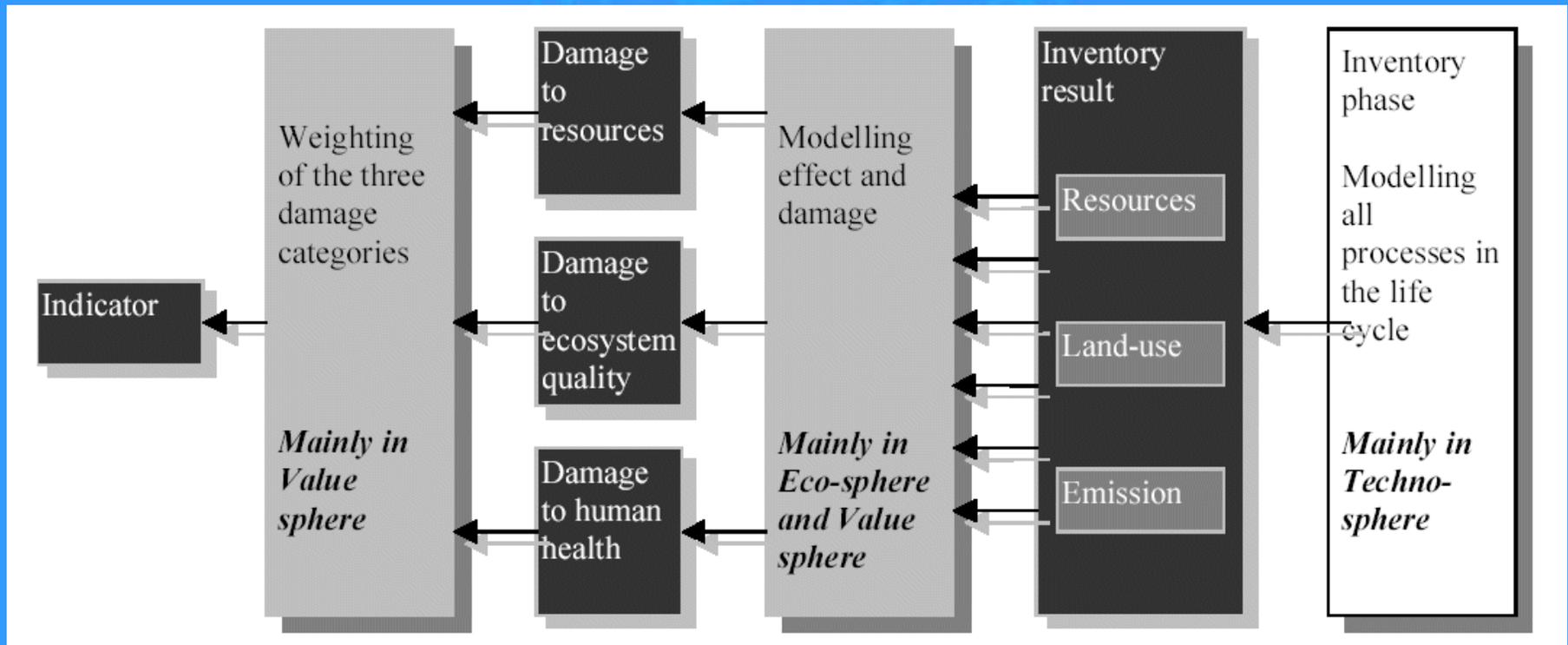
- Ressource naturelle considérée: OR
 - Or par PC: 0.8 g
 - Consommation d'or en France: 40 t/an
 - Coût annuel PC (sur 5 ans): 1598 F
 - PIB France 1997: 8 137 Milliard F
- Contribution environnemental:
 - $REN_{V} = (0.8E-3) / (40.E3) = 2.E- 8$
- Contribution économique:
 - $R_{\epsilon} = (\text{coût PC} / \text{PIB}) = 2E-10$
- Ratio de « notabilité »: $R_{EN_{V}} / R_{\epsilon} = 100$



La consommation en or est donc notable: des travaux de R&D sont nécessaire pour la réduire

Exemple de méthode quantitative globale

Eco-indicator 99*: Approche orientée dommages



*Source: Pré-consultant (NL)

PROJET FORENERGY 2001 - 2003

BOIS ENERGIE:

Valorisation de rémanents et de petits bois:



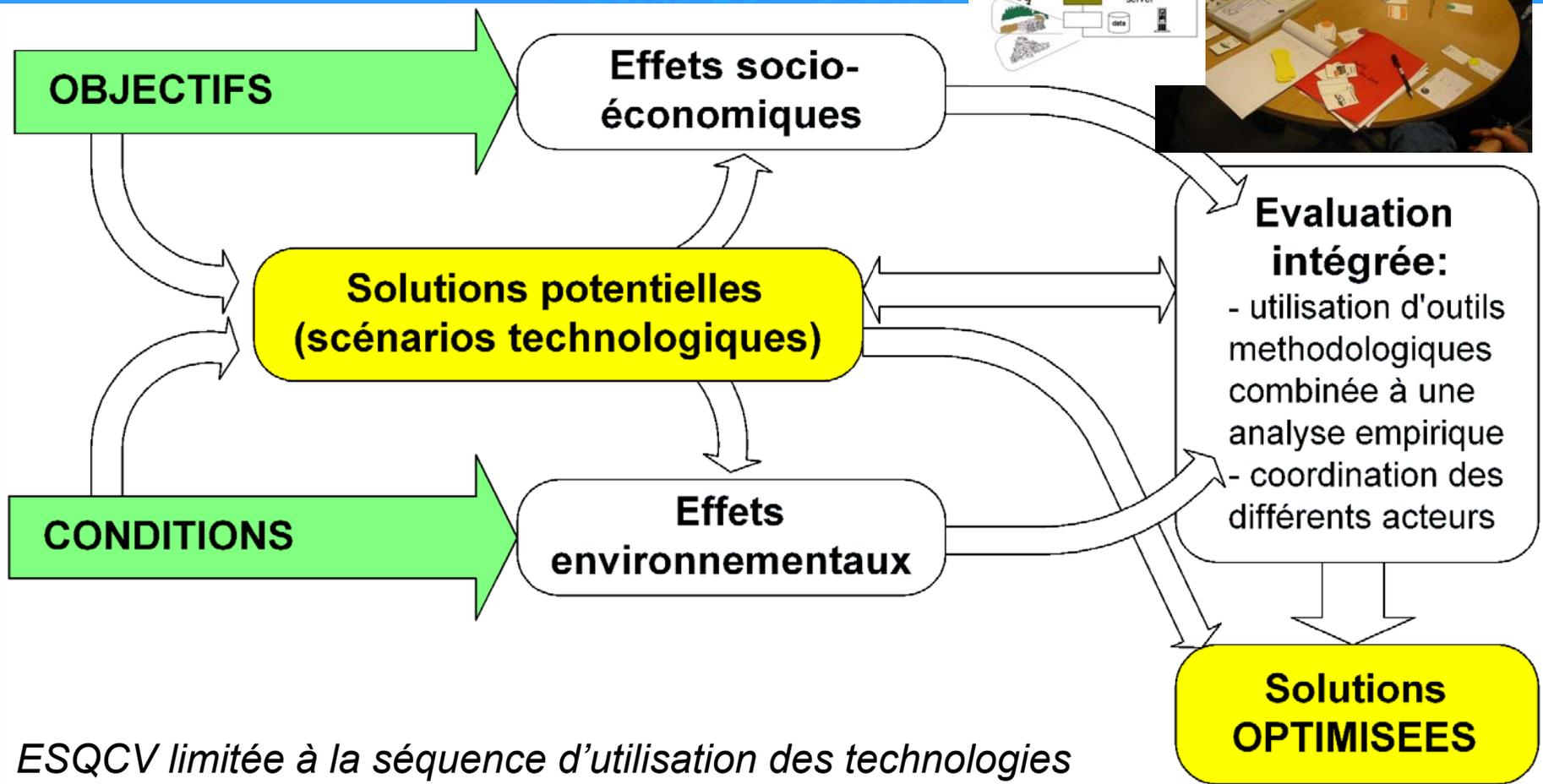
Des ressources inexploitées



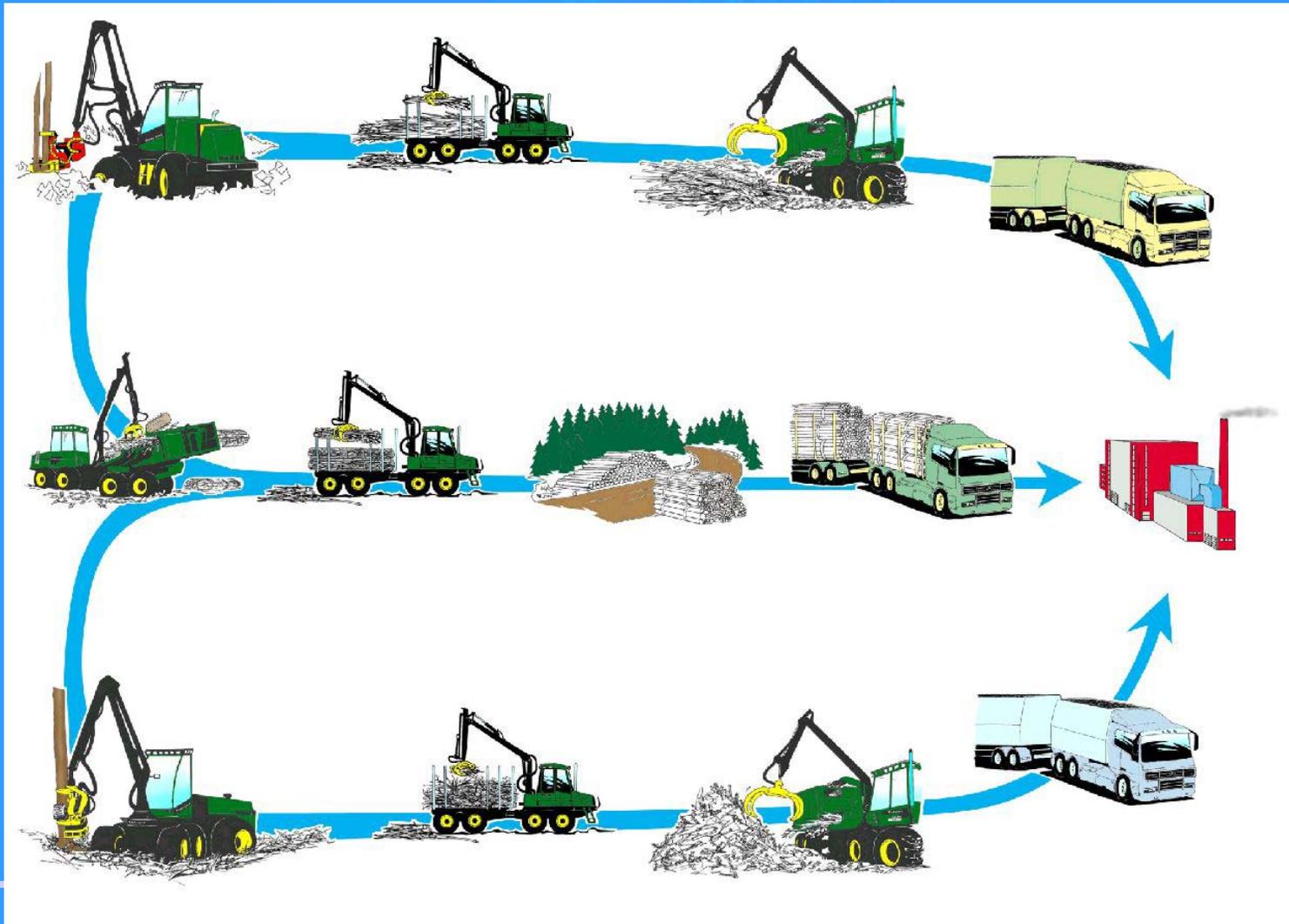
Problème de transport de biomasse



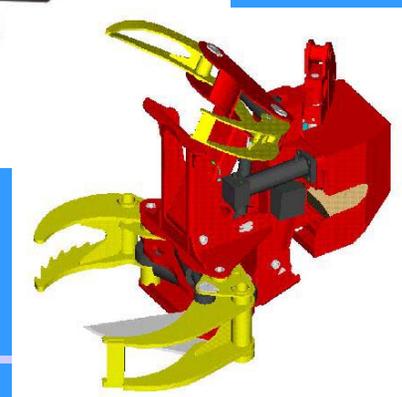
Évaluation intégrée



Analyse de scénarios technologiques



Concepts technologiques développés et mis en oeuvre

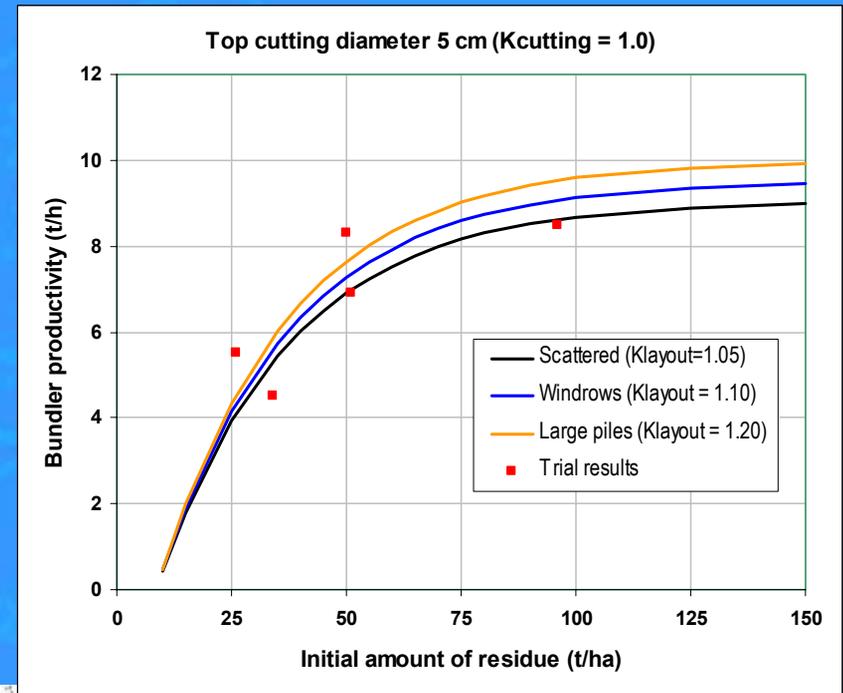


Essais de terrain

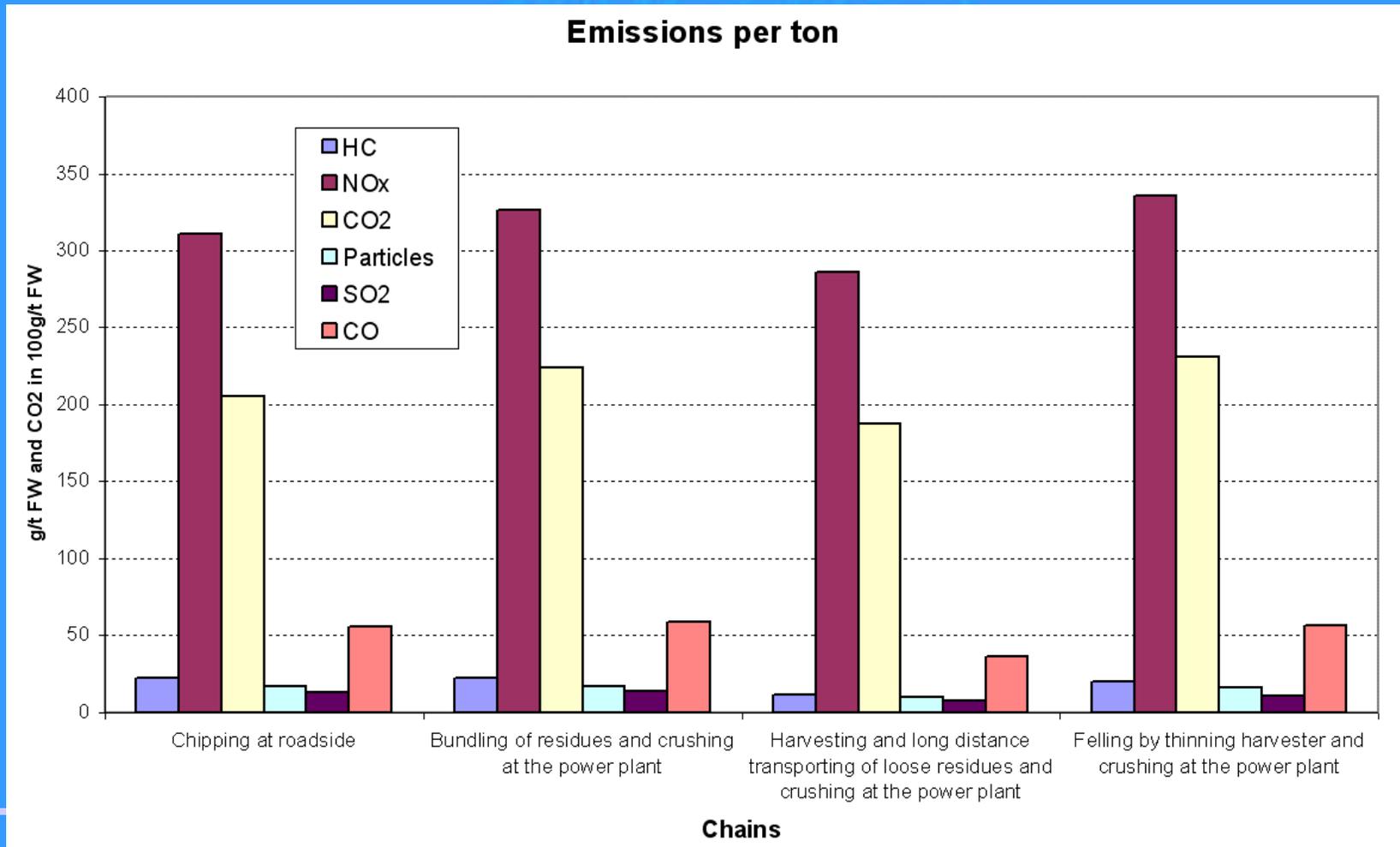


Définition des protocoles,
Évaluation et analyse

- cycles de travail, productivité, organisation de chantier,
- impact sur l'environnement



Évaluation des émissions vers l'air



Évaluation du bilan énergétique

- Exemple de la fagoteuse:
 - Production énergétique: 8-10 t/h de bois frais
 - Équivalent énergétique en **énergie renouvelable**:
 - 2.2 Mwh par tonne de bois frais, soit 18 à 22 Mwh/h
 - Consommation **énergie fossile**: 10-12 l/h
 - 1 litre de gasoil = 42 MJ, soit 0.094 à 0.14 Mwh/h
 - Ratio [énergie consommée / produite] = 0.5%- 0.8%
- pour un scénario complet $\approx 5\%$

FORENERGY

