



RE.CO.R.D.

ETUDE N° 99-1004/1A

SYNTHESE DE L'ETUDE

FRANÇAIS / ANGLAIS

**ANALYSE CRITIQUE DES INDICATEURS DE CATEGORIES D'IMPACT
SUR L'ENVIRONNEMENT DANS LES ACV :
TOXICITE HUMAINE - ECOTOXICITE - POLLUTION PHOTOCHEMIQUE**

octobre 2000

E. LABOUZE - BIO Intelligence Service

CONTEXTE

La conversion des résultats d'inventaire de cycle de vie en "indicateur de catégorie" (par exemple kg de CO₂ équivalent pour l'effet de serre) est admise pour un certain nombre d'impacts environnementaux : épuisement des ressources énergétiques non renouvelables, augmentation de l'effet de serre, déplétion de la couche d'ozone, augmentation de l'acidification, augmentation de la quantité de déchets ultimes mis en décharge. En revanche, la quantification d'impacts comme la formation de photo-oxydants, la toxicologie humaine et l'écotoxicologie ne bénéficient pas à ce jour d'indicateurs largement reconnus.

OBJECTIF DE L'ETUDE

Cette étude a pour objectif de travailler sur trois indicateurs de catégories d'impact sur l'environnement:

- la formation de photo-oxydants,
- la toxicité humaine,
- l'écotoxicité.

Afin d'analyser dans un premier temps l'existant puis de parvenir à des propositions d'améliorations ou de modification des méthodes actuellement utilisées afin qu'elles entrent dans le cadre de la norme ISO/14042 et soient les plus représentatives possible de phénomènes réels.

DEROULEMENT DE L'ETUDE

Cette étude s'est appuyée sur une analyse bibliographique et sur la collaboration avec des experts scientifiques et des praticiens des ACV. Deux groupes d'experts pluridisciplinaires ont été constitués, l'un a réuni des scientifiques spécialistes des problèmes environnementaux en question (écotoxicologie, toxicologie et chimie de l'atmosphère); l'autre a mobilisé des praticiens des ACV :

| Expert | Organisme | Domaine |
|------------------|----------------------------|---------------------|
| Gérard BLAKE | Université de Savoie | Ecotoxicologie |
| Jacques FONTAN | Observatoire Midi-Pyrénées | Chimie des aérosols |
| Gérard MEGIE | Université Paris 6 | Aéronomie |
| Eric VINDIMIAN | INERIS | Ecotoxicologie |
| André PICOT | ICSN-CNRS | Risque Chimique |
| Patricia CORTIJO | ECOBILAN | ACV |
| Khalil KHALIFA | ACV Conseil | ACV |
| Eric LABOUZE | BIO Intelligence Service | ACV |

Le rôle des experts mobilisés a été de procéder à l'analyse critique de méthodes sélectionnées et de proposer des améliorations pertinentes.

EVENEMENTS SURVENUS AU COURS DE L'ETUDE

L'évaluation des catégories d'impact "toxicité et écotoxicité" dans les ACV est un sujet de débat. Des méthodes sont en plein développement, et des événements importants sont survenus au cours de l'étude :

- **SETAC** (Society of Environmental Toxicology and Chemistry): un groupe de travail a été composé en vue de définir la "politique" Setac pour chacune des catégories d'impact suivantes : toxicité, écotoxicité, pollution photochimique, impacts globaux et régionaux, ressources naturelles. BIO IS a reçu (mai 2000) les versions préliminaires de tous ces rapports, destinés à être

rendus publics en 2001-2002. Comme la plupart des travaux de la SETAC en matière d'ACV, ces rapports devraient exercer une forte influence sur l'évolution future des normes internationales de la série ISO 14040 relatives aux ACV.

- **Nouvelle méthode CML** (Université de Leiden, Pays-Bas, dans la continuité de la méthode mise au point dès 1992, et qui était jusque là l'approche la plus citée dans les ACV) attendue dans les prochains mois.
- Publication de la méthode "**Eco-Indicator 99**" (Pré-Consultants, Pays-Bas - décembre 1999). Cette nouvelle méthode d'évaluation des impacts sur l'environnement dans les ACV est la première à s'appuyer sur l'European Union System for the Evaluation of Substances (EUSES).

TOXICITE ET ECOTOXICITE

1. L'état de l'art dans le contexte des ACV

Pour la toxicité et l'écotoxicité, la définition d'un indicateur de catégorie d'impact repose pour chaque substance, sur la connaissance :

- d'un **facteur de devenir** : qui relie la quantité émise, exprimée en masse, à une variation transitoire de concentration dans l'environnement,
- d'un **facteur d'exposition** : qui relie la variation transitoire de concentration à une dose d'exposition,
- d'un **facteur d'effet** : qui relie la dose susmentionnée à un certain nombre d'effets définis comme le nombre et le type de cancers, etc.

Dans les ACV, les indicateurs correspondant sont calculés à partir d'une formule générique :

$$S_i^{mn} = E_i^m \times F_i^m \times M_i^m$$

Le score de l'impact (S) est présenté comme le produit d'un facteur d'effet (E), d'un facteur de devenir (F, fate factor) et de la charge massique totale des émissions (M). L'index i représente la substance chimique, n le compartiment de l'environnement (air, eau, ou sol) où l'émission a lieu et m la voie d'exposition de l'écosystème ou de l'homme.

L'impact total de toutes les émissions inventoriées tout au long du cycle de vie ou à une étape donnée du cycle de vie, est obtenu simplement en additionnant les scores des impacts individuels pour les substances chimiques, les compartiments d'émission et les voies d'exposition :

$$S = \sum_{i,m,n} S_i^{nm}$$

2. Les développements récents au sein de la communauté des experts ACV

Dans le cas de la toxicité (santé humaine), la SETAC recommande de considérer le nombre d'années de vies perdues (YLL : years of life lost) et le nombre de jours de vie dégradés (YLD pour years of life with disability).

Dans le cas de l'écotoxicité, la SETAC recommande de considérer le nombre d'espèces disparues au sein d'un écosystème (PAF, pour potentially affected fraction of species).

Les marqueurs YLL et YLD ont été utilisés dans l'étude ExternE (calcul des coûts externes associés aux filières de production d'énergie), et ils sont employés dans la méthode Eco-Indicator 99. Leur chiffrage repose sur la définition d'un certain nombre de facteurs d'effet tels que : le nombre de jours d'hospitalisation associés à un épisode de pollution photochimique, le nombre de consultations pour problèmes respiratoires, le nombre de jours d'arrêt de travail ... Les données épidémiologiques et cliniques permettent de disposer d'un certain nombre de courbes dose - réponse reliant ces indicateurs à un accroissement transitoire et modéré de la concentration atmosphérique en ozone, poussière ou oxydes de soufre. Des modèles permettent de définir des scénarios d'exposition des populations en partant de données d'émission issues des inventaires de cycle de vie. Il est donc possible de relier les données d'inventaire à ces catégories d'impact. Le problème majeur est le manque de données épidémiologiques : jusque là, ces indicateurs n'ont pu être appliqués qu'à un nombre très limité de polluants : SOx, NOx, particules, ozone photochimique. Aucune donnée ne permet d'établir les fonctions dose - réponse pour les émissions atmosphériques de métaux lourds par exemple. Aucun indicateur de ce type n'a été proposé pour les rejets liquides.

3. L'état actuel du consensus scientifique

Les émissions de polluants provoquent **un accroissement transitoire de leur concentration dans le milieu extérieur**. Cette modification va se répercuter dans les différents compartiments de l'environnement (air, eaux, sols, êtres vivants), avec des constantes de temps propres. La dynamique du système global de l'environnement suit une évolution non linéaire. **La nature réelle du danger généré par l'exposition à ces substances est donc difficile à caractériser**. En outre, la variabilité naturelle des phénomènes ne permet pas de discerner aujourd'hui l'impact directement causé par les activités humaines sur les écosystèmes, et sur l'Homme et sa descendance ; et la capacité d'adaptation des Ecosystèmes et de l'Homme n'est pas prévisible.

Les connaissances scientifiques actuelles ne permettent pas de prédire la réponse des individus à l'exposition répétée tout au long de leur vie, à de faibles doses de toxiques. Pas davantage à l'échelle des populations et des écosystèmes tout entier.

4. Recommandations dans le contexte RECORD

Cette étude a permis d'aboutir à deux conclusions importantes :

1°) l'étude de la toxicité et de l'écotoxicité associée aux émissions d'inventaires de cycle de vie doit clairement **distinguer deux catégories d'impact**, pour des raisons de pertinence environnementale des enjeux ;

2°) pour mettre au point des indicateurs valables de catégories d'impact concernant la toxicité et l'écotoxicité, **il semble raisonnable de chercher à s'appuyer sur la méthode EUSES**.

L'European Union System for the Evaluation of Substances (EUSES) est une méthode bien connue des scientifiques praticiens de l'écotoxicologie et de l'étude des risques chroniques. Son utilisation dans les ACV en est à ses tous débuts, notamment avec le développement de l'approche Eco-indicator 99.

EUSES est une méthode de caractérisation du risque toxique des émissions atmosphériques, des rejets liquides et des substances dispersées dans les sols, associés aux activités industrielles. Ce n'est pas une méthode de caractérisation d'un danger précis. EUSES ne cherche pas à quantifier l'ampleur du dommage subi par une cible donnée, du fait de l'exposition transitoire à un ensemble diversifié de polluants diffus. Les connaissances scientifiques actuelles ne permettent pas de prédire la réponse des individus à l'exposition répétée tout au long de leur vie, de faibles doses de toxiques. Pas davantage à l'échelle des

populations et des écosystèmes tout entier. EUSES évite ainsi bien des difficultés d'interprétation.

EUSES permet de calculer pour chaque émission dans l'environnement, un indicateur sans dimension donné par le rapport de deux concentrations : la concentration prédite dans l'environnement (PEC) sur la concentration prédite sans effet (PNEC). Pour une quantité donnée d'émissions, ce rapport donne une indication sur les chances que la modification transitoire de l'état l'environnement ne produise aucun effet sur l'homme et sur les écosystèmes. Lorsque ce rapport est plus petit que 1, plus il tend vers 0 et plus les chances sont grandes que les émissions ne produisent aucun effet. Lorsque le rapport est supérieur à 1, plus il augmente et plus les risques sont grands que les quantités émises provoquent un effet sur les individus, les populations ou les écosystèmes. La nature réelle et l'ampleur du dommage subi ne sont pas quantifiés. En définitive, le résultat obtenu avec EUSES exprime le risque "toxique" causé par les émissions. Ce risque est évalué sur une échelle normalisée en ayant pris comme substance de référence le 1,4 dichlorobenzène. Les résultats expriment donc un risque équivalent à l'émission d'un gramme de cette substance choisie comme référence.

La méthode Eco-indicator 99 utilise les résultats obtenus avec EUSES pour quantifier ensuite des dommages bien définis (mortalité, nombre de jours de vie perdus, cancers de la peau, maladies respiratoires, ...). L'approche n'est pas simple, la robustesse des données et la cohérence des hypothèses sont difficiles à examiner. Il semble plus prudent de s'arrêter à EUSES, pour savoir dans quelle mesure l'indicateur proposé est valable d'un point de vue scientifique, pertinent dans le contexte des ACV, et compatible avec les normes ISO 14042 et 14043 relatives à la phase d'évaluation des impacts dans les ACV. Il faut aussi poser la question des améliorations à apporter à la méthode dans le but de la fiabiliser et de la rendre facilement opérationnelle pour l'exploitation des données d'inventaire de cycle de vie.

5. Les besoins en travaux de recherche pour appliquer EUSES

Validité scientifique : EUSES est une méthode reconnue au sein de la communauté scientifique. C'est aussi une méthode reconnue par les Pouvoirs publics (c'est l'un des outils d'orientation de la politique environnementale de la Commission européenne).

Pertinence environnementale : **pour une quantité donnée d'émissions, EUSES quantifie le risque toxique pour l'homme et un risque analogue pour les écosystèmes (disons le risque écotoxique)**. L'indicateur ne cherche pas à prédire l'ampleur d'un préjudice donné. Il fournit seulement **une INDICATION sur le stress subi par l'exposition aux émissions**. Les limites sont connues : l'effet d'un mélange de polluants n'est pas modélisé (et on considère simplement que les effets sont additifs, alors qu'en réalité ils peuvent être synergiques ou antagoniques) ; le devenir des émissions est modélisé comme si l'environnement était un compartiment fermé à l'échelle de l'Europe (les fuites réelles ont été estimées à environ 25% des émissions), ...

Robustesse de l'indicateur : 3 paramètres entrent dans le calcul du risque toxique dans EUSES :

- un facteur d'exposition : le PEC (concentration prévue dans l'environnement),
- un facteur d'effet : le PNEC (concentration prédite sans effet),
- un facteur d'incertitude (MOS, pour margin of safety, marge de sécurité).

a) A propos du facteur d'exposition : le PEC (concentration prévue dans l'environnement)

Les bases scientifiques utilisées pour calculer le PEC sont bien connues et valables. **Le problème qui persiste aujourd'hui tient plutôt au paramétrage du modèle permettant de convertir une quantité émise (exprimée comme une masse) en une variation transitoire de concentration** dans chaque compartiment de l'environnement au contact des systèmes cibles. C'est un premier niveau pour lancer un travail de recherche **dans le contexte RECORD : il faut déterminer les paramètres pertinents à améliorer dans EUSES**. La méthode proposée : tester EUSES sur 10-20 substances dont on connaît les effets, et identifier les paramètres sensibles de la méthode.

Les données EUSES ont besoin d'une validation expérimentale : dans le contexte RECORD, il faudrait évaluer la robustesse des données utilisées dans l'outil EUSES en utilisant des "sites ateliers" modélisés (zone urbaine, bassin versant, ...).

b) A propos du facteur d'effet : le PNEC (concentration prévue sans effet)

Les fondements toxicologiques pour déterminer le facteur d'effet de chaque substance (ie le PNEC), selon chaque type de système cible (l'homme, les écosystèmes) sont eux aussi bien connus des scientifiques. Le plus souvent, on cherche à utiliser la plus petite valeur connue (à partir de l'étude en laboratoire de quelques espèces) de concentration sans effet (NOEC, no effect concentration). Ce type de données n'est pas disponible pour toutes les substances inventoriées dans les ACV, ni pour tous les scénarios d'exposition. **Les techniques d'extrapolation sont reconnues comme très fragiles** (pour passer de données toxicologiques du court au long terme, de l'aigu au chronique, d'une espèce à une autre, de l'animal à l'homme, de quelques espèces en laboratoire à un écosystème, ...). Il apparaît à ce niveau deux problèmes importants soulevés par les scientifiques ayant participé à l'étude :

- α) un important manque de données. **Pour RECORD, il faudrait commencer par dresser un état des lieux en confrontant la liste des substances pour lesquelles existe une valeur de PNEC à la liste des flux d'inventaire les plus fréquemment quantifiés (environ 350 substances).**
- β) En ce qui concerne les données toxicologiques de EUSES, il ne serait pas raisonnable d'en envisager une validation expérimentale. Et il n'existe pas de méthode satisfaisante permettant de quantifier l'incertitude sur les données de PNEC. **Il est donc urgent de chercher à améliorer les méthodes d'extrapolation** qui permettent de prédire l'effet toxique selon divers scénarios d'exposition. Pour cela, il faudrait engager des travaux visant à **mettre au point un modèle probabiliste pour quantifier les incertitudes introduites par les méthodes d'extrapolation** (du court au long terme, de l'aigu au chronique, d'une espèce à une autre, de l'animal à l'homme, de quelques espèces en laboratoire à un écosystème entier, ...).

Adéquation dans le contexte des ACV :

- a) Dans EUSES, les scénarios d'exposition sont entièrement paramétriques. Pour utiliser la méthode dans le contexte des ACV, il est indispensable d'effectuer **un premier travail dans le but de définir un ensemble de scénarios d'exposition des populations pertinentes compte tenu de la spécificité des données d'inventaire** (les émissions étant consolidées sur l'ensemble du cycle de vie, sans qu'il soit réaliste de chercher à disposer d'une information plus précise sur leur localisation spatio-temporelle). Par défaut, EUSES considère que les émissions sont diluées de manière homogène sur l'ensemble de la région Europe, sans fuite vers d'autres régions. Dans ce but, une approche pragmatique pourrait consister à passer au crible de EUSES les résultats de quelques inventaires de cycle de vie, puis à effectuer plusieurs analyses de sensibilité de manière à identifier les paramètres les plus influents. Une fois ces paramètres influents identifiés, il devrait être possible de proposer des valeurs par défaut correspondant à différents scénarios.
- b) Rappel du point α ci-dessus : **il faut dresser un état des lieux des données disponibles dans EUSES, en confrontant la liste des substances pour lesquelles existe une valeur de PNEC à la liste des flux d'inventaire les plus fréquemment quantifiés (environ 300 substances).**

POLLUTION PHOTOCHIMIQUE

1. Les indicateurs recommandés par la SETAC

Le groupe de travail de la SETAC travaillant actuellement sur ce sujet recommande d'utiliser pour cette catégorie d'impact, **deux indicateurs distincts selon l'échelle géographique du risque d'accroissement de la pollution photochimique** associé aux émissions d'inventaire de cycle de vie:

- un indicateur (POP_{reg}) défini au niveau régional (régional signifie ici **à l'échelle de l'Europe de l'Ouest**) : il traduit à cette échelle le potentiel de formation de photo-oxydants, :
- un indicateur (POP_{loc}) défini au niveau local (local signifie ici **à l'échelle d'une zone urbaine**) : il traduit à cette échelle le potentiel de formation de smog photochimique dans les villes.

Pour ces catégories d'impact, il vaut mieux parler de risque (ou de potentiel) d'accroissement de la pollution photochimique : **il ne s'agit que d'un effet potentiel, non de la prédiction d'un phénomène réel.**

Note importante : ces indicateurs n'ont été connus que tardivement, au cours du déroulement de l'étude. Ils n'ont donc pas pu faire l'objet d'un examen critique approfondi par les experts scientifiques mobilisés dans ce projet. Ces experts ont été sollicités au cours de la rédaction finale de ce rapport.

2. Les propositions d'amélioration

Pour permettre aux membres de RECORD de mettre en œuvre sans délai les nouveaux indicateurs proposés, les facteurs de caractérisation à utiliser dans les ACV sont indiqués dans le rapport de l'étude.

Ces indicateurs nécessitent un certain nombre d'améliorations.

2.1. Fiabiliser les indicateurs proposés

2.2.1. Intégrer les variables manquantes

Les indicateurs POP_{reg} et POP_{loc} sont évalués à partir des quantités d'hydrocarbures non méthaniques (HCNM) et d'oxydes d'azote (NO_x) émises durant le cycle de vie des systèmes. Une variable clé n'est toujours pas prise en compte dans les modèles de calcul, alors qu'elle est de grande importance dans la réalité des phénomènes : il s'agit du **ratio HCNM / NO_x** . Les modèles de simulation distinguent généralement trois types de situations selon la valeur de ce ratio ; or les **politiques publiques de prévention** (cf. l'avis du Conseil Supérieur d'Hygiène Public de France de juin 1996) s'appuient sur ces modèles plus compliqués que celui proposé par la SETAC. Dans le contexte RECORD, il serait donc utile de lancer **un travail de recherche dans le but d'arriver à une meilleure prise en compte de cette variable (HCNM / NO_x)** dans la procédure de calcul des catégories d'impact dans les ACV.

2.2.2. Améliorer la représentativité géographique

La segmentation géographique proposée dans les indicateurs POP_{reg} et POP_{loc} n'est peut être pas la plus pertinente:

- à l'échelle régionale : les scientifiques et les pouvoirs publics (cf avis du CSHPF de juin 1996) utilisent a minima une segmentation plus fine en distinguant 3 zones : Europe du Nord, de l'Ouest

et du Sud (étant donnée que les conditions climatiques locales y sont très différentes, et que ces conditions affectent le potentiel de création de pollution photo-oxydante).

- À l'échelle locale : il faudrait vérifier la pertinence des facteurs de caractérisation utilisés dans différents contextes géographiques en Europe (les facteurs MIR utilisés pour calculer l'indicateur POP_{loc} ayant été mis au point pour s'appliquer à l'échelle de certaines urbaines aux États-Unis, notamment Los Angeles, où les conditions climatiques locales peuvent être très différentes de ce qui est observé en Europe).

Selon les experts scientifiques mobilisés pour cette étude, la question des échelles géographiques pertinentes est essentielle dans la mise au point d'indicateurs pour cette catégorie d'impact. Ces aspects n'ont pas été identifiés comme critiques par le groupe de travail de la SETAC devant rendre public son rapport en 2001-2002. Il ne faut donc pas attendre de nouveaux progrès émanant des experts ACV de la SETAC. C'est donc seulement dans le contexte RECORD, que l'on pourrait espérer des progrès à ce niveau. Notre recommandation est donc de lancer **dans le contexte RECORD un travail de recherche dans le but d'aboutir** :

- d'une part à une **segmentation géographique plus fine de l'indicateur POP_{reg} (avec 3 zones à l'échelle de l'Europe)**,
- d'autre part à une **validation (théorique voire expérimentale) ou à une adaptation des données utilisées pour caractériser le potentiel d'accroissement de smog photochimique à l'échelle urbaine (de manière à adapter les données valables dans le contexte des États-Unis)**.

2.2.2. Évaluer l'impact à l'échelle planétaire

L'impact environnemental associé à la formation de l'ozone troposphérique comprend aussi une dimension planétaire, du fait de l'effet indirect de l'ozone troposphérique comme gaz à effet de serre. Dans les ACV, l'indicateur d'impact relatif au réchauffement climatique est fondé sur la caractérisation du Global Warming Potential (GWP) à partir des données validées par le groupe de travail intergouvernemental sur le réchauffement climatique (IPCC, 95).

Il apparaît donc nécessaire de chercher à caractériser le GWP (indirect) des composés organiques volatils et des oxydes d'azote. Un tel travail dépasse le cadre de RECORD, mais il appartient aux membres de RECORD de rester en état de **veille sur les travaux de l'IPCC**.

2.2.3. Évaluer les dommages associés à la pollution photo-oxydante

La formation de photo-oxydants est une catégorie d'impact sur l'environnement qui décrit le risque de pollution locale et régionale dû à la formation d'ozone et d'autres photo-oxydants à partir de précurseurs quantifiés dans les inventaires de cycle de vie. Ces composés sont actifs aussi bien sur l'Homme que sur les plantes, les animaux et les écosystèmes.

Les connaissances scientifiques actuelles sont assez bien documentées et ont abouti à la caractérisation de nombreuses fonctions dose - réponse, reliant un accroissement transitoire de la concentration d'ozone troposphérique à des marqueurs de dommages réels sur l'homme (jours d'hospitalisation pour gêne respiratoire, aggravation transitoire des épisodes asthmatiques, surmortalité, ...), **les plantes et certains écosystèmes** (modification des rendements agricoles, ...). Ces fonctions dose- réponse sont à la base du travail ExternE effectué par un groupe international composé de chercheurs et d'industriels, à la demande de la Commission européenne.

Il semble donc tout à fait possible de caractériser les marqueurs de dommage préconisés par la SETAC pour évaluer la toxicité et l'écotoxicité : YLL (années de vies perdues), YLD (année de vie avec une gêne), PAF (fraction d'espèces potentiellement affectées).

Assez curieusement, alors que la méthode Eco-indicator 99 (cf plus haut) a cherché à estimer les valeurs d'YLL, YLD et PAF pour les principales substances chiffrées dans les inventaires de cycle de vie, elle n'a pas cherché à évaluer l'impact causé par la pollution photochimique sur la santé et sur la qualité des écosystèmes, en ces termes.

On ne peut donc pas s'attendre à disposer prochainement d'une évaluation de l'impact toxique et écotoxique induit par la pollution photochimique, alors que les données disponibles sont de meilleure qualité que dans le cadre de l'évaluation de l'impact toxique ou écotoxique d'autres substances.

Il serait par conséquent possible de décliner ici l'approche préconisée par la SETAC pour la toxicité et l'écotoxicité. **Un tel travail permettrait à RECORD de publier de nouveaux résultats, en se distinguant des autres travaux actuellement en cours en Europe.**

AUTRES RECOMMANDATIONS POUR RECORD

1. Développer une méthode de caractérisation de la qualité des indicateurs

Il faut commencer à réfléchir à la mise au point d'indicateurs de qualité (robustesse, pertinence, transparence...) relatifs au choix des indicateurs de catégorie d'impact dans les ACV (toxicité, écotoxicité, pollution photochimique, mais aussi aux autres catégories quantifiées dans les ACV : acidification, eutrophisation, effet de serre, destruction de la couche d'ozone stratosphérique, épuisement des ressources, occupation des sols). Les méthodes de caractérisation des catégories "toxicité et écotoxicité" devraient en effet continuer à se développer au cours des prochaines années, en se complexifiant (pour se rapprocher davantage de la description de phénomènes réels). Il paraît donc utile de pouvoir à terme, comparer les différentes approches. **Dans la continuité des travaux RECORD en matière de qualification des données d'inventaire, il faudrait donc lancer un travail dans le but de mettre au point une telle méthode de qualification des indicateurs de catégorie d'impact dans les ACV.**

2. Explorer une approche simplifiée pour la toxicité et l'écotoxicité

Les indicateurs de catégorie d'impact relatifs à la toxicité et à l'écotoxicité sont aujourd'hui essentiellement définis à l'aide de méthodes quantitatives ordinales. Comme nous l'avons indiqué plus haut, ces méthodes introduisent une incertitude élevée, non quantifiée aujourd'hui. En outre, les indicateurs proposés (notamment avec EUSES) ne permettent pas d'aboutir à l'évaluation de l'ampleur d'un dommage bien défini. Il n'est donc pas certain que le paradigme actuel soit le bon, et il est possible d'envisager la mise au point d'une autre famille d'indicateurs, fondée exclusivement sur une approche qualitative.

Ce type d'approche a été soumis à l'examen des scientifiques et experts ACV mobilisés pour cette étude. Il en ressort un grand intérêt partagé. Mais à ce niveau, tout reste à faire.

Pour avancer dans cette direction **dans le contexte RECORD, il est possible d'envisager de lancer une étude visant à mettre au point une approche simplifiée de l'évaluation de l'impact toxique et écotoxique des données d'inventaire de cycle de vie.**

Cette étude consisterait d'abord à effectuer une classification multicritère des substances de l'inventaire fondée sur des caractéristiques physico-chimiques déterminantes. Cette classification serait ensuite soumise à un panel d'experts dans le but de hiérarchiser le(s) danger(s) selon différentes échelles de temps et différentes échelles de valeur (dans la continuité de la méthode Scan'Actor mise au point par BIO IS / EDF, et modifiée dans le contexte RECORD).

L'avantage de cette piste de recherche, par rapport à toutes les autres présentées ci-dessus, est la simplicité et le pragmatisme, **dans la continuité du travail actuel.** Ce travail permettrait en outre de mieux bénéficier des compétences des experts du groupe pluridisciplinaire constitué à l'occasion de cette étude, en organisant des retours d'expérience, maintenant que chacun a appris le langage de l'autre.

CONTEXT

The conversion of the results of the life cycle inventory in "category indicators" (for example kg CO₂ equivalent for greenhouse effect) is allowed for some environmental impacts : abiotic resources depletion, increase of greenhouse effect, ozone layer depletion, acidification, increased landfill wastes. However, other impacts like photo-oxidant formation, human toxicity and ecotoxicity are not quantified by generally well accepted indicators.

AIM OF THE STUDY

The purpose of the study is to work on three environmental impact categories :

- photo-oxidants formation,
- human toxicology,
- ecotoxicology.

The aim is to make first the state of the art and secondly to make improvements to the methods actually used in LCA, so that they be compatible with the ISO/14042 and representative of the actual phenomena.

PROGRESS OF THE STUDY

The study involved an analyse of published papers and the collaboration with multidisciplinary group of scientific experts and LCA practitioners. Two groups of experts have been constituted. In one of them scientific experts of environmental questions have been invited (ecotoxicology, human toxicology and atmosphere chemistry) in the second group LCA practitioners.

| Expert | Organism | Field |
|------------------|----------------------------|--------------------|
| Gérard BLAKE | Université de Savoie | Ecotoxicology |
| Jacques FONTAN | Observatoire Midi-Pyrénées | Aerosols chemistry |
| Gérard MEGIE | Université Paris 6 | Aeronomy |
| Eric VINDIMIAN | INERIS | Ecotoxicology |
| André PICOT | ICSN-CNRS | Chemical hazard |
| Patricia CORTIJO | ECOBILAN | LCA |
| Khalil KHALIFA | ACV Conseil | LCA |
| Eric LABOUZE | BIO Intelligence Service | LCA |

The work of the experts was to make the critical analyse a set of selected methods and to suggest relevant modifications.

THE EVENTS IN THE COURSE OF THE STUDY

The assessment of the impact categories "toxicity et ecotoxicity" in the LCA is largely discussed. Some methods are actually developed and important events occurred in the course of the study :

- **SETAC** (Society of Environmental Toxicology and Chemistry): the aim of one of the working groups is to define the SETAC "policy" for the impact categories : toxicity, ecotoxicity, photochemical pollution, regional and global impacts, natural resources. BIO IS received (may 2000) the drafts of the reports that will be published in 2001-2002. As most of SETAC's works in LCA, these reports may probably exert a strong impact on the evolution of international standards like ISO 14040 related to LCA.

- **The new CML method** (University of Leiden, Netherlands, improvement of the method published in 1992, which is the most used method for LCA) will be published next months.
- Publication of "**Eco-Indicator 99**" method (Pré-Consultants, Netherlands - December 1999). This new method on impacts assessments in LCA is the first method that is based on the European Union System for the Evaluation of Substances (EUSES).

TOXICITY AND ECOTOXICITY

1. State of the art in LCA context

For toxicity and ecotoxicity, the definition of impact category indicator needs to know for every substance :

- a **fate factor** : which links the emitted mass to the transient variation of concentration in the environment,
- an **exposition factor** : which links the transient variation of concentration to an exposition dose,
- an **effect factor** : which links the dose to effects defined as a number and kind of cancers, etc.

In LCA, the related indicators are calculated from the following framework :

$$S_i^{mn} = E_i^m \times F_i^m \times M_i^m$$

The impact score S is presented as the product of an effect factor (E), a fate factor (F), and the total mass loading of the emissions (M). The index (i) represents the chemical, (n) the environmental compartment (air, water, soil) to which the emission is released, and (m) the route of exposure of the ecosystem or the human.

In order to obtain the total impact score within an impact category for all emissions in the life cycle or life cycle step, the individual impact scores are summarised across chemicals, compartments of release, and routes of exposure:

$$S = \sum_{i,m,n} S_i^{nm}$$

2. The recent developments within LCA experts community

According to the SETAC's recommendations it is possible to consider, in the case of toxicity (human health), the number of years of life lost (YLL) and the number of years of life with disability (YLD); and in the case of ecotoxicity, the number of affected species in the ecosystem (PAF : potentially affected fraction of species).

The YLL and YLD indicators are used in the ExternE study (evaluation of the costs associated to energy production), and in the Eco-Indicator 99 method. The evaluation of these indicators is based on the definition of effect factors like : number of days at hospital after a photochemical pollution episode, number of medical consultations for respiratory problems, ... Clinical and epidemiological data give dose-response curves which link these indicators to a transient and moderate increase of atmospheric concentration in ozone, dust, sulphur oxide. Number of models can define population exposition scenario since LCI emission data. It is then possible to make a link between LCI data and the impact categories. The prominent problem is the lack of epidemiological data : from now, these

indicators have been used only for limited : SO_x, NO_x, particles, photochemical ozone. Not any data permit to establish dose-response curves for atmospheric heavy metals for example. Not any indicator is suggested for fluid emissions.

3. State of the actual scientific consensus

The emissions of pollutants induce **a transient increase of their concentrations in the external medium**. This modification has repercussions on the different compartments of the environment (air, waters, soils, animals and plants). The dynamic of the environment is modified in a non linear way. Therefore, the nature of the hazard induced by the exposition to the substances is difficult to characterise. Also, the natural variability of the phenomena don't allow to assess today the impact directly induced by human activities on the ecosystems, and on the humans and their descendants , and the ability of the humans and ecosystems to adjust is not foreseeable

The actual scientific knowledge don't allow to predict easily the response of individuals, populations or ecosystems to a repeated exposition to small doses of toxics along the life.

4. Recommendations for RECORD

This study allow two important conclusions :

1°) the study of the toxicity and the ecotoxicity induced by LCI emissions has to clearly distinguish between **two impact categories**, because the relevance of environmental stake;

2°) with the aim to develop good impact category indicators in the case of toxicity and ecotoxicity, **it is a reasonable to base on EUSES method**.

The European Union System for the Evaluation of Substances (EUSES) is a well known method. Its use in the LCA is at the beginning, in particular with the development of The Eco-indicator 99 method.

EUSES is a characterisation method of the toxic hazard induced by atmospheric emissions, waterborne and soil emissions, associated to human activities. It is not a method used to characterise a precise hazard. The aim of EUSES is to quantify the magnitude of the damage induced by a transient exposition to a panel of pollutants. Due to the actual scientific knowledge, it remains quite difficult to predict the response of individuals, populations or ecosystems to a repeated exposition to small doses of toxics along the life. Therefore, EUSES avoid the problems linked to interpretation.

EUSES allows to calculate, for every emission in the environment, an indicator from the ratio of two concentrations : the predicted effect concentration (PEC) and the predicted no effect concentration (PNEC). This ratio give an indication about the possibility that the transient modification of the state of the environment may induce an effect on humans and on ecosystems. Less is the ratio, greater is the chance that the emissions do not produce none effect. When the ratio is up than 1, the risk that the emissions induce an effect is greater.

The nature and the magnitude of the damage are not quantified. Then, EUSES can just assess the toxic hazard induced by the emissions. This hazard is assessed on a normalised scale with 1,4 dichlorobenzene as a reference substance. The results are expressed as the hazard induced by the emission of one gram of the reference substance.

The Eco-indicator 99 method is based on the results obtained by EUSES with the aim to quantify therefore precise damages (mortality, years of life lost, skin cancers respiratory illness, ...). This method is complicated, the data quality and the relevance of the hypothesis are difficult to examine. It seems well advised to focus on EUSES with the aim to analyse the relevance and the compatibility with ISO 14042 et 14043 of the impact category indicators in a

scientific point of view. The question is also : what kind of the modifications are useful to make the method more relevant, reliable and more operational in the context of LCA ?

5. The need in research works for the application of EUSES

Scientific validity : EUSES is a well known method by the scientific community and the public policies (it is a tool used by the European Commission with the aim to take decisions in the field of environmental policy).

Environmental relevance : **EUSES quantify the toxic hazard for humans and ecosystems**. The indicator don't predict the magnitude of the damage. It just gives **an indication on the stress induced by the emissions**. The limits are known : there is no model for the effect produced by a mixture of substances (the potentially synergetic or antagonistic effects are not considered); the fate of the emissions is modelled as the environment is a closed compartment at the scale of Europe (the actual leaks are estimated at about 25% of the emissions), ...

Indicator reproducibility: 3 parameters are taken into account in the calculation of the toxic hazard in EUSES :

- an exposition factor : PEC (predicted environmental concentration),
- an effect factor : PNEC (predicted no effect concentration),
- an uncertainty factor (MOS : margin of safety).

a) About the exposition factor : the PEC

The scientific bases used to calculate PEC are known and valid. **The remaining question today is how to turn an emitted quantity (in grams) into a transient variation of concentration in every compartment of the environment ?** This question may be a subject of research supported by RECORD : **which relevant parameters need to be improved in EUSES**. The method suggested : choice 10-20 substances which effects are known and analyse them in EUSES in the goal to identify the sensitive parameters of the method.

EUSES needs the experimental validation of its data : in the context of RECORD, it is possible to assess the reproducibility of the data used in EUSES in modelled mesocosmes.

b) About effect factor : the PNEC

The toxicological basis to determine effect factors for each substance (ie PNEC) according to humans or ecosystems are also well known by the scientists. Usually, we want to use the smallest known value (from laboratory studies for some species) of no effect concentration (NOEC). This kind of data does not generally exist for all the substances of the LCA. The extrapolation techniques are weak (from short term to long term, from acute to chronic, from one specie to another, from animal to human, from some species in laboratory to an ecosystem,...). At this level, the experts invited to participate in this study raise two important problems :

- α) an important lack of data. **For RECORD, it may be possible to make the state of the art comparing the lists of substances for which exists PNEC value with the lists of substances frequently present in the LCA inventory (about 350 substances).**
- β) About the toxicological data of EUSES, it is not a reasonable idea to consider an experimental validation. And there is no satisfactory method which can quantify the uncertainty of PNEC data. **Then, it is urgent to try to improve extrapolation methods** which can predict the toxic effect according to different exposition scenario. In this aim, it is possible to support works with

the objective to develop probabilistic models for quantifying the uncertainty introduced by the extrapolation methods.

Adaptation in the LCA context:

- a) In EUSES the exposition scenarios are entirely parametric. For a use of this method in an LCA context, it is essential to make a preliminary work with the aim to define some exposition scenarios for the appropriate populations considering the specificity of the inventory data (no space-temporal information). EUSES consider that the emissions are diluted in an homogeneous way in the region Europe without leaks in other regions. A pragmatic method may consist in testing the results of the inventories and then to identify the most sensitive parameters in EUSES. It will be then possible to suggest default values corresponding to various scenarios.
- b) Reminding the point α above : **we have to make the state of the art comparing the lists of substances for which exists PNEC value with the lists of substances frequently present in the LCA inventory (about 350 substances)**

PHOTOCHEMICAL POLLUTION

1. The indicators recommended by the SETAC

The SETAC's working group recommends for this impact category the use of **two indicators** according to the geographic scale of the increase of the photochemical pollution induced by the emissions :

- An indicator (POP_{reg}) at the regional scale (regional means here **at the scale of Western Europe**): it shows the potential formation of photo-oxidants.
- An indicator (POP_{loc}) at the local scale (local means here **at the scale of urban area**) : it shows the potential formation of photochemical smog in towns.

For these impact categories, it should be better to talk about the possibility (or potential) of photochemical increase of pollution : **the question is about a possible effect not on the prediction of an actual phenomenon .**

2. Improvement propositions

To allow the members of RECORD to use as soon as possible these new indicators, the characterisation factors in an LCA context are indicated in the report of this study. These indicators have to be improved.

2.1. Improving indicators reliability

2.2.1. Introducing the lacking variables

The indicators POP_{reg} et POP_{loc} are assessed from non methane hydrocarbons(NMHC) and (NO_x) emitted during the life cycles of the systems. The **ratio HCNM / NO_x** is a key variable which is not considered in calculation models. This variable is important in the description of the actual phenomenon. The simulation models generally distinguish three types of situations according to the value of this ratio, but the **public prevention policies** (cf. advise of the Conseil Supérieur d'Hygiène Public de France, june1996) are based on these models which are more complicate than the model

suggested by the SETAC. In the context of RECORD, it will be more useful to support a **research work aimed to introduce the HCNM/NOx in the methods** for the calculation of the impact categories in the LCA.

2.2.2. Improve the geographical representativeness

The geographical segmentation suggested by POP_{reg} et POP_{loc} indicators may be not the more relevant:

- at the regional scale : the scientists and the public policies (cf. advice of CSHPF, June 1996) use at minima a segmentation distinguishing 3 areas : North, Western and Eastern Europe (because the climate conditions are different and these conditions induce a different potential creation of photo-oxidant pollution).
- At the local scale : we have to check if the characterisation factors used in Europe are relevant (the MIR factors used for the calculation of POP_{loc} are based on the condition observed in urban areas in the USA and particularly in Los Angeles, in Europe the climatic condition are different).

According to the experts invited at this study, the question about the choice of the geographical scale is relevant and fundamental. These aspects are not yet identified as fundamental by the members of the SETAC's working group (this group will publish a report in 2001-2002). Then, we can wait for a progress at this level only in the context of RECORD. Our recommendation for RECORD is to support work with the aim to lead :

- In one hand, to a **geographical segmentation for the POP_{reg} indicator (with 3 areas in Europe)**
- In the other hand, to a **validation (theoretical or experimental) or an adaptation of the data used for the characterisation of the potential of photochemical smog increase at the urban scale (after adaptation of the data obtained in the USA conditions).**

2.2.3. Assess the impact at the global scale

The environmental impact associated with the formation of tropospheric ozone involves a global dimension because the tropospheric ozone is a greenhouse effect gas. In LCA, the global warming indicator is based on the characterisation of Global Warming Potential (GWP) from data agreed by the inter-government panel on climate change (IPCC, 1995).

It seems then necessary to try to characterise the GWP (indirect) for COV and NOx. It is not a feasible work for RECORD, but the members of RECORD have to make a **continuous survey of the IPCC work**.

2.2.4 Assessment of the damage associated to photo-oxidant pollution

The photo-oxidant formation is an impact category that gives description of the possible pollution at the local and regional scale induced by ozone and other photo-oxidants quantified in the life cycle inventories. These components have an action on humans, plants, animals and ecosystems.

According to the actual scientific knowledge it is possible to characterise some dose-response functions which make a link between a transient increase of tropospheric ozone and damage indicators on humans (hospital consultation days, respiratory problems, asthma...), **on plants and some ecosystems** (modification of agricultural yield, ...). The ExternE study is based on these dose-response functions. The members of the international ExternE group are researchers and industrialists.