

L'ACV dans les choix technologiques

La préservation de l'environnement est une préoccupation croissante de la société. À travers l'évaluation des impacts environnementaux générés lors de la réalisation d'un produit ou d'un service, l'Analyse de cycle de vie (ACV) permet d'identifier les principaux postes de pollution et les leviers potentiels d'amélioration. L'application de cet outil est ici illustrée par différents projets contribuant à définir des systèmes innovants de production d'énergies.

L'Homme et ses impacts sur l'environnement

Les impacts environnementaux liés à l'activité humaine occupent une place croissante sur le devant de la scène. L'hypothèse d'une croissance sans limite basée sur l'utilisation de ressources finies est de plus en plus remise en cause. L'épuisement des ressources et la capacité de l'environnement à absorber les effets de l'activité humaine posent aujourd'hui des limites au développement de nos sociétés.

Ces impacts peuvent être considérés comme étant la conséquence du produit de trois grandes variables :

- la population ;
- la consommation par habitant ;
- les impacts environnementaux par unité de consommation.

L'Analyse de cycle de vie (ACV) est un outil d'évaluation qui se focalise sur la troisième variable. Cette approche permet de déterminer les priorités d'action à mener pour diminuer les impacts liés à la satisfaction d'un besoin unitaire (unité de produit ou service).

Définition de l'ACV

L'ACV est une méthode normalisée (ISO 14040 et 14044, 2006) d'évaluation d'un système (produit mais aussi

service par exemple). La définition fournie par la norme est la suivante :

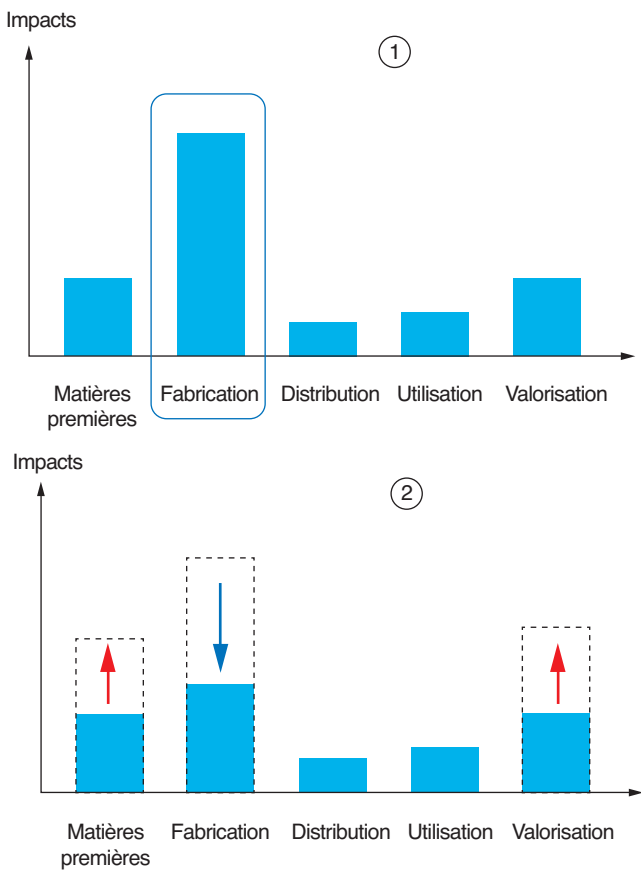
« L'ACV est un outil d'évaluation des impacts sur l'environnement d'un système incluant l'ensemble des activités liées à ce système depuis l'extraction des matières premières jusqu'au dépôt et traitement des déchets. »

Tous les impacts potentiels sur l'environnement sont quantifiés, depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement des déchets ("du berceau à la tombe" selon l'expression consacrée). Il s'agit donc d'une approche globale. Elle est multi-étape (l'ensemble du cycle de vie associé au produit ou service étudié est considéré), ce qui permet d'identifier les transferts éventuels de pollution entre différentes étapes. Dans l'exemple de la figure 1, le processus le plus impactant dans la configuration (1) est la fabrication. La diminution de son impact dans la configuration (2) entraîne un transfert d'impact entre le processus "fabrication" et les processus "extraction de matières premières" et "valorisation", mais pas nécessairement une amélioration du bilan global.

Cette approche est aussi multicritère (plusieurs catégories d'impact sur l'environnement sont évaluées). La comparaison entre deux technologies remplissant une même fonction dans la figure 2 permet également d'identifier, et éventuellement d'éviter, les transferts de pollution entre différents impacts.

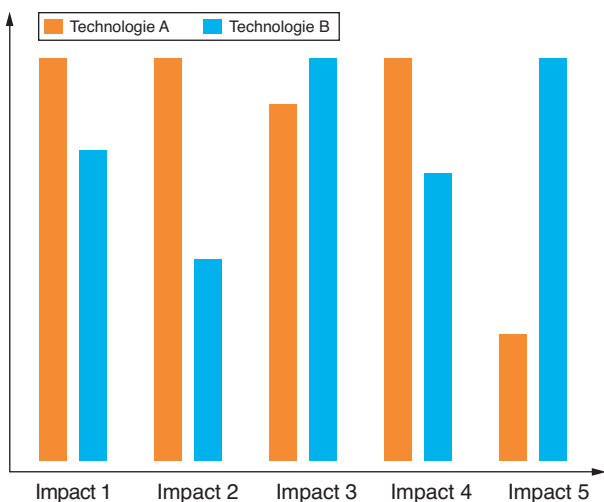
L'ACV dans les choix technologiques

Fig. 1 – Transfert de pollution entre différents processus



Source : ADEME, 2005

Fig. 2 – Transfert de pollution entre différents impacts



Source : INRA

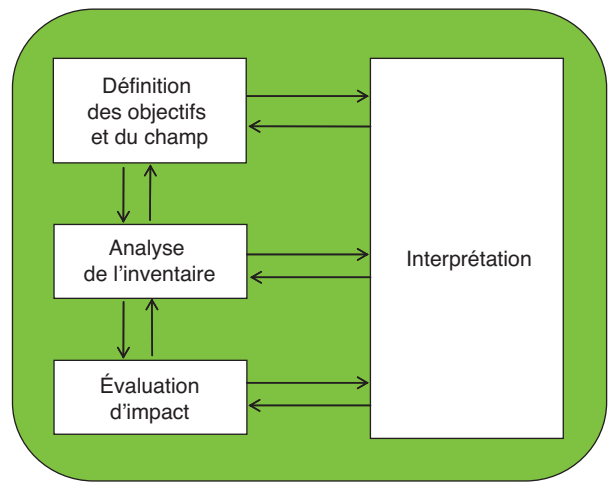
Aujourd'hui les principaux domaines d'application de l'ACV sont les suivants :

- la quantification de l'impact environnemental lié à un choix stratégique d'entreprise ;

- la comparaison des charges environnementales de différents produits, processus ou systèmes entre eux ou au sein des différentes étapes du cycle de vie d'un même produit ;
- l'amélioration de la performance environnementale d'un système.

Une ACV se déroule suivant les quatre phases décrites sur la figure 3.

Fig. 3 – Cadre méthodologique de l'ACV



Source : ISO 14040

La première phase est la définition des objectifs et du champ d'étude. Cette étape consiste tout d'abord à formuler de façon claire et précise la ou les questions auxquelles l'étude doit répondre. Ceci est primordial car la nature de l'objectif conditionne en grande partie les choix et hypothèses qui seront retenus par la suite. Les limites du système sont ensuite établies, en précisant l'ensemble des flux pris en compte dans le système, ainsi que les impacts considérés dans l'étude. L'unité fonctionnelle y est aussi définie : il s'agit d'une grandeur de référence adaptée à la fonction du produit évalué et à laquelle tous les flux et tous les résultats (impacts environnementaux) sont rapportés. En effet, il est plus souvent pertinent d'évaluer la fonction d'un produit plutôt que le produit en tant que tel. Cela permet de garantir, lorsque l'on compare des systèmes, que les alternatives considérées rendent bien le même service. Par exemple, au lieu de comparer une voiture avec un train, l'ACV s'attachera à comparer la fonction "transporter une personne sur 100 km", à l'aide du train ou de la voiture.

Ensuite l'inventaire des émissions et des extractions est réalisé. Il consiste à quantifier les flux élémentaires entrant et sortant du système considéré, soit :

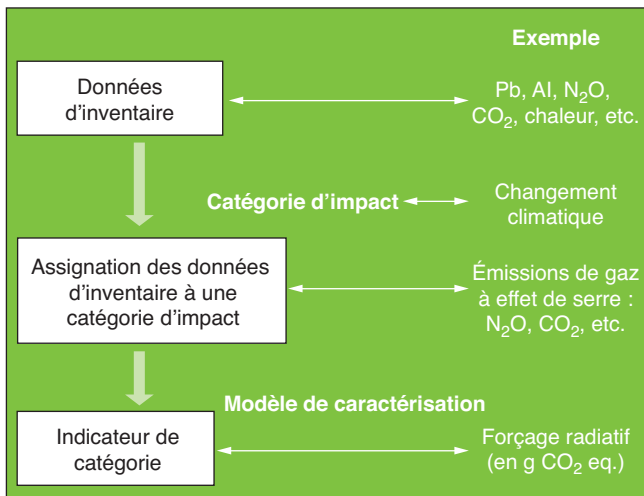
- les ressources (matière et énergie) puisées dans l'environnement sans transformation humaine préalable ;

L'ACV dans les choix technologiques

- les émissions polluantes et déchets ultimes rejetés dans l'environnement (air, eau, sol) sans transformation humaine ultérieure.

La troisième étape permet d'évaluer les impacts environnementaux des émissions et des extractions inventoriées précédemment. L'ensemble des flux environnementaux est alors converti en un nombre limité d'indicateurs (ou impacts) au moyen de modèles de caractérisation (fig. 4).

Fig. 4 – Démarche de l'évaluation des impacts



Source : ISO 14044

Les principaux indicateurs d'impacts utilisés en ACV font référence à des impacts environnementaux ou de type toxicologique :

- des impacts globaux comme le changement climatique, l'épuisement de ressources non renouvelables, ou la destruction de la couche d'ozone par exemple ;
- et des impacts plus locaux comme l'eutrophisation aquatique, l'acidification ou encore la toxicité et l'éco-toxicité des milieux récepteurs (sol, eau) ;
- mais il en existe d'autres pas toujours faciles à caractériser : biodiversité, sociaux, etc.

Enfin, l'interprétation des résultats est réalisée, permettant ainsi de dresser les conclusions et d'établir les recommandations attendues tout en explicitant bien les limites de l'étude.

La démarche mise en œuvre se veut également cyclique et itérative, avec de nombreux retours à chacune des étapes pour affiner les différentes hypothèses en fonction de leur influence sur les résultats de l'étude.

Depuis ses débuts dans les années 1980, la pratique des ACV se développe considérablement à l'échelle internationale. Cette tendance est encore plus marquée ces dix

dernières années, notamment du fait de la volonté des pouvoirs publics d'utiliser l'ACV pour supporter de nouvelles normes ou réglementations (affichage environnemental des produits, certification de la durabilité des filières biocarburants, etc.). Cet essor, ainsi que l'identification de nouveaux besoins et applications de l'ACV, ont ouvert la voie à de nombreux développements méthodologiques. Le cadre et les principes généraux de l'ACV demeurent (démarche itérative en quatre phases définies dans les normes ISO 14040-44) mais de multiples déclinaisons de ces principes sont possibles et étudiées à l'heure actuelle, par exemple, pour tenir compte de spécificités régionales ou sectorielles (évaluation des filières de production ex-biomasse, etc.). Le développement de méthodologies basées sur l'ACV est aujourd'hui porté à la fois par des instances publiques internationales (Organisation des Nations Unies, par exemple), européennes et nationales, ainsi que par la communauté scientifique et les industriels. De nombreuses structures partenariales public-privé, dédiées au développement de l'ACV, se sont d'ailleurs montées.

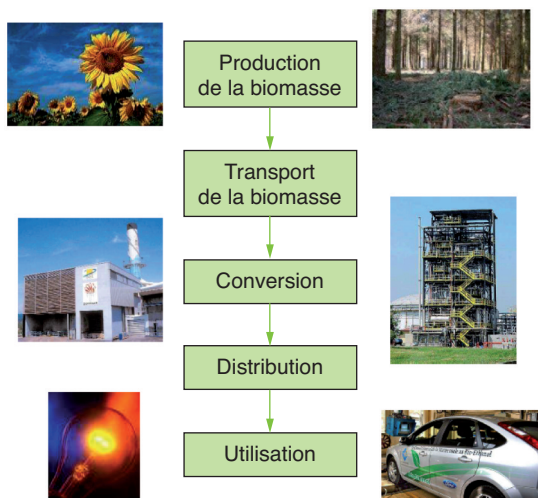
IFP Energies nouvelles, une implication historique dans le développement de l'ACV dans l'énergie

Depuis les années 90, IFP Energies nouvelles (IFPEN) applique et développe les méthodologies ACV pour évaluer les performances de filières et systèmes (secteurs énergie et transports essentiellement), en particulier ceux développés dans ses propres projets de recherche. Ces travaux sont aussi réalisés dans le cadre de thèses et de projets collaboratifs.

Créée en 2005, l'Agence nationale de la recherche (ANR) a pour vocation de financer la recherche publique et partenariale en France. IFPEN, dans le cadre du premier programme national de recherche sur les bioénergies de 2005, a coordonné le projet ANABIO d'ANALYse environnementale et socio-technico-économique des filières de production d'énergie ex-BIOmasse — préconisations pour l'évaluation des bioénergies. En partenariat avec les différents acteurs du projet, un guide méthodologique basé sur l'ACV a été rédigé pour permettre l'évaluation multicritère (technico-économique, environnementale, sociale et risques industriels) et la comparaison de différentes filières bioénergies, de la production de la biomasse jusqu'à l'utilisation finale (fig. 5).

L'ACV dans les choix technologiques

Fig. 5 – Vision filière de l'évaluation des impacts dans le projet ANR ANABIO



Source : IFPEN

Dans la continuité de ce projet, IFPEN a coordonné le projet BIOMAP, ayant pour objectif de mettre en œuvre la méthodologie préconisée dans ANABIO en la testant sur sept filières de production de bioénergie. Ce projet a ainsi permis de constituer une base de connaissances sur les filières bioénergies évaluées dans les études de cas (impacts associés, description des technologies et liste de références bibliographiques relatives à leur évaluation).

Les partenariats menés dans ces projets avec des structures publiques et des centres techniques (CEA, INERIS, FCBA, etc.) ainsi que des industriels (PSA Peugeot Citroën, Renault, Suez-SITA France, EDF, etc.) ont contribué à accroître et structurer la communauté ACV en France dans le domaine des bioénergies. De plus, les résultats de ces deux projets, tant du point de vue de la production de données que de la création de cadres méthodologiques cohérents, ont permis de faire évoluer les connaissances sur l'ACV des différentes filières bioénergies étudiées.

L'ACV, un support en évaluation environnementale dans les développements R&D de futures technologies

IFPEN participe à de nombreux projets de recherche permettant le partage de compétences en évaluation environnementale dans les domaines des énergies alternatives et de la chimie verte. Dans un contexte de changement climatique et de raréfaction des ressources fossiles, la diversification des sources d'énergie et de production d'intermédiaires chimiques est en effet un enjeu majeur pour nos sociétés.

Au niveau de la production de sources d'énergie pour le transport, IFPEN est fortement impliqué dans deux projets de production de biocarburants de deuxième génération, c'est-à-dire issus de la biomasse lignocellulosique (bois, paille, déchets forestiers, etc.) : Futurol (production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique) et BioTfuel (production de biodistillats, tels que biodiesel et biokérosène, à partir de biomasse lignocellulosique). Dans ces deux projets, IFPEN et ses partenaires évaluent au moyen de l'ACV les impacts environnementaux de chaque variante procédée envisagée. Cette démarche permet d'identifier, tout au long du projet, les leviers d'amélioration des performances environnementales et donc de guider la R&D vers des technologies à moindre impact sur l'environnement. Ces travaux se font en collaboration avec les partenaires des projets, aussi bien en interne, avec les équipes de développement des procédés ou des technologies moteurs (performances, encrassement, comportement du lubrifiant, etc.) qu'en externe avec, par exemple, l'INRA ou l'ONF pour les scénarios d'approvisionnement en biomasse.

Les liens d'IFPEN avec le secteur automobile conduisent à orienter une part de l'activité d'évaluation environnementale vers l'électrification des véhicules. Ainsi, le projet européen WideMob, en collaboration avec le Centro Ricerche Fiat, vise à développer les briques technologiques élémentaires destinées à des véhicules électriques urbains multi-usages. Dans un objectif de réduction des consommations d'énergie et des émissions de CO₂ et de NO_x lors de l'utilisation, mais aussi lors des phases de fabrication et de fin de vie, la réalisation d'ACV de manière itérative permet, là encore, d'identifier les principaux leviers d'amélioration.

IFPEN s'est aussi engagé dans le domaine des énergies marines en orientant ses recherches vers les éoliennes flottantes. L'objectif du projet VertiWind est, ainsi, de concevoir, fabriquer, installer et tester un prototype pré-industriel d'éolienne offshore flottante à axe vertical. L'ACV y est utilisée pour orienter le choix des matériaux et identifier les impacts générés par cette filière de production d'électricité innovante.

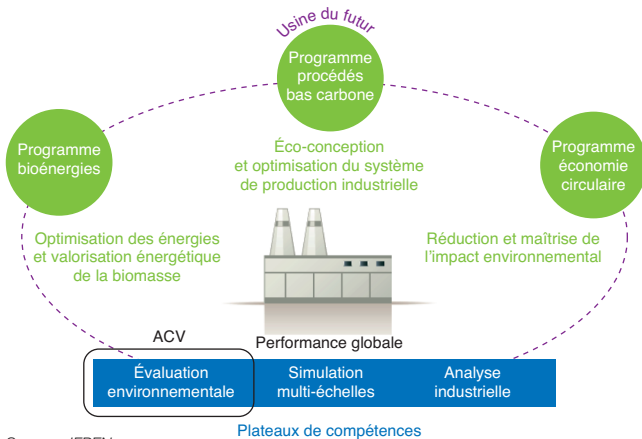
Enfin, dans le cadre du programme investissements d'avenir, deux des Instituts d'excellence dans le domaine des énergies décarbonées (IEED), dans lesquels IFPEN est impliqué, font une place essentielle à l'ACV car elle permettra d'évaluer les bénéfices sur l'environnement des différentes actions mises en œuvre. IDEEL⁽¹⁾ a pour objectif de bâtir un leadership international dans le domaine des procédés éco-efficaces au service de l'usine du futur, en particulier

(1) www.ideel-factory.fr/

L'ACV dans les choix technologiques

dans les domaines de l'énergie, de la chimie ou encore du recyclage. PIVERT⁽²⁾ est consacré à la chimie du végétal à base de biomasse oléagineuse (colza, tournesol, etc.) en utilisant les ressources agricoles et forestières locales de la région Picardie pour produire des biocarburants, des biomatériaux et des produits chimiques. Ces deux projets participent à la mise en place de bioraffineries, véritables installations industrielles transformant la biomasse en carburant, puissance, chaleur et produits chimiques à valeur ajoutée (fig. 6).

Fig. 6 – Positionnement de l'ACV dans IDEEL en interaction avec les domaines de recherche et développement



Source : IFPEN

Ces différents projets de R&D permettent d'identifier des lacunes méthodologiques dans les pratiques couramment employées en ACV. Ces questionnements de fond sont aussi à IFPEN des axes de recherche et l'objet de travaux scientifiques et académiques contribuant à l'amélioration de la méthodologie couramment utilisée en ACV. La gestion des multiples produits obtenus en sortie d'une bioraffinerie posant le problème de répartition des impacts environnementaux entre ces produits (allocation des impacts) en est une bonne illustration.

La recherche méthodologique en ACV en France

La recherche méthodologique en ACV est menée par différentes structures, de manière plus ou moins spécialisée selon leurs domaines de compétences. Ainsi la recherche en ACV de l'INRA est plutôt orientée sur la production et la valorisation de la biomasse, et celle menée par l'IRSTEA s'organise surtout autour de la gestion de la ressource en eau et le traitement des déchets. À travers les nombreux projets auxquels elle participe, l'ADEME apporte un soutien R&D aux différents utilisateurs de

l'ACV en France dans de nombreux domaines, tant sur le plan de développements méthodologiques que sur la pratique et la diffusion de cette méthodologie. Ses travaux sur la production de biocarburants de 1^{re} génération ou de produits biosourcés ont notamment permis de fédérer les connaissances et compétences de différents acteurs (pouvoirs publics, industriels mais aussi ONG).

Plus récemment, pour répondre aux besoins de développements méthodologiques et structurer ces travaux de recherche, deux nouvelles associations ont été créées :

- l'association SCORELCA⁽³⁾, montée à l'initiative de grandes entreprises françaises (EDF, GDF Suez, Renault, Saint-Gobain, Total et Veolia) avec le soutien de l'ADEME et de l'association RECORD, dont l'objectif est de promouvoir et organiser une collaboration entre les acteurs industriels, institutionnels et scientifiques afin de favoriser une évolution positive, partagée et reconnue des méthodes ACV et de leur mise en pratique ;
- l'association EcoSD⁽⁴⁾, initiative portée à la fois par des entreprises et des universitaires et soutenue par l'ADEME, vise également à favoriser les échanges entre chercheurs et industriels sur une thématique plus large : l'éco-conception de systèmes pour un développement durable. La recherche sur les méthodes et outils ACV y occupe une place importante et est conduite sous la forme de projets de recherche collaboratifs. Des actions de formation (cours doctoraux) sont également prévues afin de diffuser les connaissances et contribuer au développement des compétences des chercheurs français.

Les améliorations visées par les travaux de recherche en cours portent sur les différentes phases de l'ACV, au niveau de la définition des objectifs, de la réalisation des inventaires, du choix des catégories d'indicateurs et de l'interprétation des résultats.

Actuellement, lors de la phase de définition des objectifs et du champ d'étude, la très grande majorité des études ACV existantes repose sur l'approche classique dite ACV attributionnelle (ACV-A), qui consiste à évaluer les impacts environnementaux potentiels liés à une filière produit donnée : l'analyse est alors restreinte aux processus/étapes physiquement reliés au sein de la filière considérée. Or, cette approche ne permet pas de prendre en compte les relations de causalité dues à l'évolution du marché (comme le changement indirect d'usage des sols). Dans certains cas de figure, comme l'évaluation des impacts liés à une prise de décision ou la considération d'éventuels effets rebonds, cette

⁽³⁾ www.scorelca.org/
⁽⁴⁾ www.ecosd.fr/

⁽²⁾ www.institut-pivert.com/

L'ACV dans les choix technologiques

méthodologie présente alors des limites importantes. Une approche complémentaire à la vision classique de l'ACV est actuellement en plein essor, l'ACV conséquentielle (ACV-C), qui fait partie des premiers champs de recherche des associations SCORELCA et EcoSD. Cette approche permet en effet de considérer les impacts associés aux effets induits par des interactions économiques ("processus affectés" par la décision considérée), en plus des impacts liés aux flux physiques qui relient directement les étapes constitutives d'une filière donnée. Ces effets peuvent être directs ou indirects et amènent à une vision systémique, très différente de celle définissant l'ACV-A (vision limitée à une filière donnée). Cette approche semble notamment bien adaptée pour traiter des questions à dimensions stratégiques nécessitant une vision systémique (fig. 7).

Fig. 7 – Champs d'étude de l'ACV-C

Élargissement du champ d'étude	Aspects environnementaux
	Échelle micro (orientée produit) ACV-A Analyses Input/Output ACV hybride
	Échelle méso (évaluation territoriale et régionale) Analyses Input/Output ACV territoriale ACV-C
Échelle macro (interaction et compétition forte entre secteurs et usages) ACV-C	

Source : d'après Guinée et al., 2011

Dans cette optique, le projet ERA-NET+ SSelecTRA, coordonné par IFPEN et dont le but est d'évaluer à l'horizon 2030-2050 l'impact de la pénétration de véhicules faiblement émetteurs de CO₂ en Europe via plusieurs stratégies d'électrification du transport routier, va tester les deux approches d'ACV :

- ACV attributionnelle permettant de comparer les impacts de différents types de véhicules (différents véhicules électriques comparés à des véhicules à combustion interne) ;
- ACV conséquentielle évaluant les conséquences de différentes politiques publiques sur la pénétration de l'électromobilité en Europe, faisant appel à un modèle de prospective énergétique en équilibre partiel.

Une collaboration forte entre le monde de l'économie et celui de l'évaluation environnementale est donc indispensable pour mener à bien une ACV-C. Ce projet fera travailler des économistes et des spécialistes de l'évaluation environnementale pour contribuer à un enrichissement de la méthodologie en ACV-C.

Un autre axe de recherche méthodologique en fort développement est le couplage des outils du génie des procédés (*flow-sheeting* par exemple, qui permet de figurer l'ensemble des opérations mises en œuvre sur une installation) avec ceux de l'évaluation environnementale.

L'efficacité énergétique est un levier essentiel dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre. En effet, en France, l'industrie est le 3^e consommateur d'énergie et est à l'origine de 25 % des émissions de CO₂ (et est par ailleurs soumise aux mécanismes des quotas de CO₂ mis en place dans le cadre de la directive européenne ETS (*Emission Trading System*)).

L'objectif est donc de développer des outils d'éco-conception permettant d'intégrer directement les contraintes environnementales dans le process design. Le projet ANR CERES 2 (Chemins énergétiques pour la récupération d'énergie dans les systèmes industriels) en est une illustration. Il s'articule autour de la récupération et la valorisation de sources de chaleur perdue afin d'améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre dans l'industrie. Plus largement, la Plate-form(E)3 vise la mise au point d'une plate-forme numérique de calcul et d'optimisation de l'efficacité énergétique et environnementale à différentes échelles pour l'industrie (composant/procédé/usine/territoire). Ce projet contribue à l'optimisation de l'efficacité énergétique et environnementale de l'industrie et des territoires, en considérant les aspects thermiques mais également matières et en intégrant la dynamique des systèmes.

L'approche locale [échelle procédé/usine] est déjà abondamment traitée, alors que l'approche territoriale et l'optimisation entre industries est un point peu traité dans la littérature. Il n'existe pas à l'heure actuelle d'outil permettant de réaliser une optimisation multi-échelle de l'efficacité énergétique et environnementale capable de réaliser des économies substantielles : le projet Plate-form(E)3 se propose de répondre à cette problématique en développant une méthodologie et un outil logiciel associé. IDEEL s'inscrit aussi dans cette initiative, par une synergie forte entre les différents plateaux de compétence que sont l'analyse industrielle, la simulation multi-échelle et l'évaluation environnementale.

Bilan et perspectives

L'ACV est donc devenu un outil indispensable dans l'évaluation des impacts des nouveaux systèmes énergétiques : de nombreux progrès sont toujours nécessaires, tant au niveau de la production de données d'inventaire ou d'impacts pour les industriels que dans la recherche plus

L'ACV dans les choix technologiques

académique. Le développement de collaborations directes avec d'autres domaines de compétences complémentaires de l'ACV, notamment le génie des procédés et la modélisation économique, est donc très important. Ce regroupement des compétences est un atout dans le développement d'outils et de méthodologies permettant de créer des passerelles entre différents champs disciplinaires et d'élargir le champ d'étude de l'approche

ACV classique. La création de réseaux au niveau français visant à fédérer les actions de l'ensemble des acteurs concernés (centres de recherche, universités et industriels) comme SCORELCA ou EcoSD en est un bon exemple.

*Pierre Collet – pierre.collet@ifpen.fr
Manuscrit remis en décembre 2012*