

# ACV et valorisation des produits en fin de vie - Affectation des impacts environnementaux des cycles de vie amont et aval

Par Philippe OSSET\*, Catherine CLAUZADE\*\*, Charlotte HUGREL\*\*\* et Magali PALLUAU\*\*\*

**Dans cet article, le point est fait sur les différentes alternatives méthodologiques envisageables face à cette question de l'affectation des impacts environnementaux entre plusieurs cycles de vie qui se succèdent, en insistant sur les implications industrielles.**

**Des alternatives méthodologiques qui marquent le passage d'une comptabilisation des opérations de valorisation par la méthode des stocks (la méthode « historique ») à une comptabilisation par extension des frontières du système étudié (laquelle semble aujourd'hui plus adaptée) sont présentées.**

**Le propos est illustré en s'appuyant sur l'exemple des pneumatiques usagés non réutilisables (PNUR) et de leurs différentes voies de valorisation.**

## Introduction

Différentes voies de valorisation des pneumatiques usagés non réutilisables (PNUR) ont été évaluées à l'aide de la méthode des Analyses du Cycle de Vie (ACV) dans le cadre d'une étude commanditée par Aliapur. L'application de la méthode développée dans les normes ISO 14040 et 10044 a ainsi permis de quantifier les bénéfices environnementaux associés à la valorisation des PNUR, notamment sous la forme de nouveaux produits (tels que les granulats pour sols « sportifs »).

Du point de vue méthodologique, la réalisation de ces travaux a été l'occasion de s'interroger sur un certain nombre de points (comme la complémentarité entre les études de risques et les Analyses du Cycle de Vie, ou les règles qui doivent présider aux questions d'affectation des impacts environnementaux entre plusieurs cycles de vie qui se succèdent : par exemple, la question de l'affectation des impacts entre le cycle de vie du pneumatique lui-même et le cycle de vie d'un produit intégrant un matériau fabriqué à partir des PNUR (par exemple, les sols sportifs dont le matériau de remplissage (lestage et amortissement) est constitué de granulats de PNUR).

Dans cet article, nous nous proposons de faire le point sur les différentes alternatives méthodologiques envisageables face à cette question d'affectation, en insistant sur les implications industrielles – parfois différentes – entraînées par ces alternatives.

Cet article se veut être une contribution utile à destination des praticiens et des utilisateurs des travaux d'ACV, notamment si ces travaux doivent aider à identifier les actions d'éco-conception apportant les pistes d'amélioration les plus significatives et les plus robustes.

Cette présentation fait ainsi un lien explicite entre la réalité industrielle et la modélisation ACV. Le raisonnement qui est réalisé dans les paragraphes suivants est progressif et vise à décomposer les bases des raisonnements clefs des praticiens d'ACV. L'exemple de la valorisation des pneus est retenu pour illustrer la démarche.

## Problématique

Dans la plupart des études d'ACV, le praticien est de manière incontournable confronté à la délimitation des frontières du système, qu'il se doit d'étudier pour répondre à la question de l'évaluation environnementale d'un service donné ; la délimitation des frontières du système consiste à définir l'ensemble des opérations et des étapes qui doivent être prises en compte pour prétendre à une vision « cycle de vie » de l'impact environnemental de ce service : par exemple, les différentes étapes qui permettent d'assurer le service pneumatique ou les différentes étapes qui permettent d'assurer la valorisation d'une quantité donnée de PNUR, ou encore les différentes étapes qui permettent d'assurer le service « sols sportifs à base de PNUR ».

Dans le cadre de cet exercice de délimitation, certaines étapes paraissent d'évidence s'imposer comme devant être incluses dans les frontières du système étudié ; ainsi, aucun praticien ne saurait sérieusement envisager de ne pas prendre en compte l'étape de fabrication d'un pneumatique, dans le cadre d'une ACV portant sur le service associé à l'usage du pneumatique lui-même.

En revanche, le positionnement d'autres étapes par rapport aux frontières du système apparaît d'emblée comme plus délicat ; c'est notamment le cas des étapes qui se situent à l'interface entre deux cycles de vie successifs, par exemple, les étapes qui se situent à l'interface entre le cycle de vie associé au service pneumatique et le cycle de vie d'un sol sportif à base de PUNR. De manière typique, les opérations permettant de passer de la collecte d'un produit ayant atteint sa fin de vie à une matière régénérée entrant dans un nouveau cycle (étapes de collecte, de tri, de transport intermédiaire, de stockage, de préparation (comme le broyage ou la granulation permettant la séparation en phases homogènes), ...) se situent dans cette zone d'interface entre deux services, entre deux produits ou entre deux cycles de vie successifs : en d'autres termes, se pose la question de savoir si la collecte des PUNR, leur tri, leur broyage, leur granulation... doivent être considérés comme constituant les étapes ultimes du cycle de vie du pneumatique ou, *a contrario*, comme les étapes initiales de fabrication d'un nouveau produit. Confronté à ces étapes d'interface, le praticien est contraint d'opérer des choix ; il procède alors, d'une manière qui peut s'avérer plus ou moins explicite, à une allocation des impacts environnementaux (qui peuvent d'ailleurs consister en des bénéfices environnementaux) associés à ces étapes « frontières » entre le cycle de vie amont et le cycle de vie aval. Cette question d'affectation aux frontières directes (historiquement appelée « allocation ») est aujourd'hui relativement bien identifiée par les praticiens et les commanditaires des ACV.

Toutefois, au-delà de la problématique de l'allocation des étapes « frontières », une autre question nous paraît devoir être soulevée, celle de l'affectation des impacts environnementaux qui sont associés à des étapes ou à des opérations plus éloignées de cette zone traditionnelle d'interface :

- ✓ Q1. L'évaluation d'une voie de valorisation matière d'un produit en fin de vie ne doit-elle pas également prendre en compte une partie des impacts associés au cycle de vie du produit aval dans lequel ce déchet est recyclé ? Appliquée au cas de la valorisation des granulats de PUNR dans des sols sportifs, cette question consiste à se demander si le bilan environnemental de cette opération de valorisation (qui constitue par ailleurs une des étapes ultimes possibles du cycle de vie des pneumatiques) ne doit pas se voir alourdir d'une partie des impacts environnementaux qui sont associés au cycle de vie des sols sportifs eux-mêmes.
- ✓ Q2. L'évaluation d'un système ou d'un service qui utiliserait un produit en fin de vie ne doit-elle pas également prendre en compte une partie des impacts associés au cycle de vie de ce produit, plutôt que de considérer que ce déchet constitue systématiquement

une matière « gratuite » du point de vue environnemental ? Appliquée au cas de la valorisation des granulats de PUNR en sols sportifs, cette question consiste à se demander si le bilan environnemental du service associé aux sols sportifs ne doit pas se voir alourdi d'une partie des impacts environnementaux du cycle de vie des pneumatiques, dès lors que ceux-ci utilisent des granulats de PUNR qui sont une matière générée en fin de cycle de vie des pneumatiques.

Cette question de l'affectation des impacts entre des cycles de vie successifs lorsque l'on cherche à établir le profil environnemental d'un service ou d'un produit ou lorsque l'on cherche à évaluer l'intérêt d'une filière de valorisation a d'ailleurs été posée par le panel de revue critique de l'étude réalisée par Aliapur.

### Étude fonctionnelle et considérations préalables

Du point de vue méthodologique, il est possible de « découper » le système industriel à différents niveaux afin d'en isoler des fonctionnalités (voir l'encadré de la page suivante). Le principe, en matière d'ACV, selon ISO 14040, reste d'avoir aux frontières des systèmes étudiés, en amont comme en aval, des flux élémentaires (un flux élémentaire, selon ISO 14040, est un flux qui n'a pas encore été transformé par l'homme ou qui ne le sera plus).

Les seuls flux qui ne sont pas élémentaires aux frontières d'un système étudié sont :

- ✓ les flux fonctionnels ;
- ✓ les flux pour lesquels aucune étape amont ou aval n'a été caractérisée afin de limiter l'ampleur du travail à réaliser et de centrer les efforts, ce qui s'avère strictement nécessaire pour répondre aux objectifs.

Il convient de souligner que la somme des flux pour lesquels aucune étape amont ou aval n'a été caractérisée ne doit pas généralement excéder 2 à 5 %, en masse, l'ensemble des flux fonctionnels dans une ACV détaillée ; cela revient, en d'autres termes, à devoir respecter un seuil de coupure fixé entre 95 et 98 %.

**A noter :** le lieu de « coupure » doit se faire en lien avec le système industriel. L'arrêt sur la matière correspond au fait d'associer la transformation d'une matière  $M_i$  (amont) en une matière  $M_{i+1}$  (aval, après valorisation) à un usage donné  $U_j$ . La matière  $M_i$  provient d'un système antérieur, la matière  $M_{i+1}$  va être utilisée par un système ultérieur.

Le tableau 1 ci-après illustre cette analyse fonctionnelle des systèmes appliquée au cas des pneumatiques.

Il importe tout d'abord de souligner que les différents systèmes  $S_i$  sont d'évidence multifonctionnels, dès lors que  $i \geq 2$  : ils remplissent différents services d'usage (les fonctionnalités  $U_j$ ) ; on constate dans le tableau 1 que  $S_2$  permet d'assurer le service associé à l'usage automobile d'un pneumatique, ainsi que le service associé à l'usage d'un sol sportif. On note, par ailleurs, que de la matière est produite à l'aval de chacun des systèmes (matière  $M_2$  à l'aval du système  $S_1$  – par exemple, des matériaux à base de PUNR – et matière  $M_3$  à l'aval du système  $S_2$  – par exemple, des matériaux qui seraient

**Illustration dans le cas des pneumatiques**

Les PUNR peuvent être valorisés de multiples manières :

- ✓ en valorisation matière, par exemple dans la production d'objets moulés à partir de granulats de PUNR ou de matériaux de remplissage pour les gazons synthétiques ;
  - ✓ en valorisation énergétique, par exemple via l'utilisation de broyats en chaufferie urbaine ou en cimenterie.
- Certaines voies de valorisation peuvent en outre être destructives (c'est notamment le cas de la valorisation en aciérie) ou non destructives (comme la valorisation en sols destinés à l'équitation).

Du point de vue conceptuel, la succession entre le cycle de vie associé à l'usage du pneumatique et le(s) cycle(s) de vie des produits et services utilisant les matériaux issus des PUNR peut être représentée selon la figure ci-dessous :

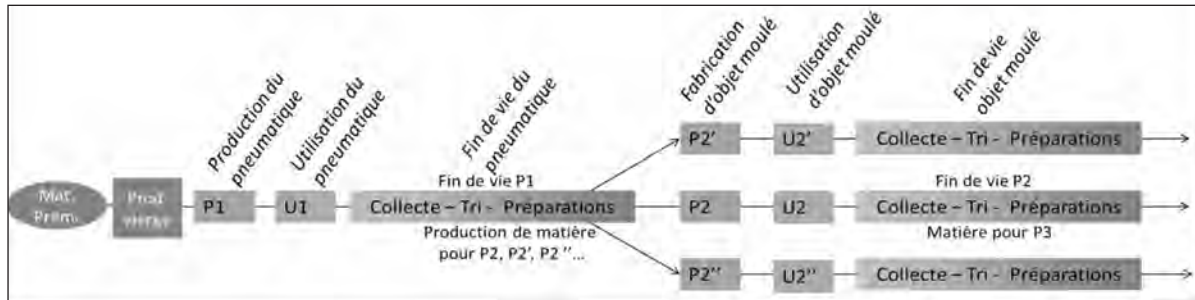


Figure 1 : Symbolisation du système industriel multifonctionnel associé aux pneus.

On retrouve dans la figure 2 ci-contre les éléments suivants :

- ✓ **L'étape de production de la matière première vierge initiale** : par exemple, les matières premières qui vont entrer dans la fabrication des pneumatiques (caoutchouc, textiles, fils d'acier notamment).
- ✓ **L'étape de production du produit initial** : le pneumatique neuf, dans le cas d'espèce de cette illustration.
- ✓ **L'étape d'utilisation du produit initial** : l'utilisation du pneumatique pour son usage dans le transport.
- ✓ **Les étapes de gestion de fin de vie** qui constituent des étapes intermédiaires entre le cycle de vie du pneumatique neuf et le cycle de vie des produits dans lesquels sont utilisés les matériaux issus de PUNR : ces étapes sont présentées en dégradés de manière à symboliser leur rôle d'interface entre la fin de vie du cycle du premier produit et la production de matériaux pour les différents cycles qui le suivent. Dans une optique de simplification de la figure, seuls trois cycles de vie sont présentés comme succédant au cycle de vie du pneumatique neuf ; dans la réalité, ces options sont beaucoup plus nombreuses puisque les PUNR peuvent être valorisés selon des voies très diversifiées (voir ci-dessous).

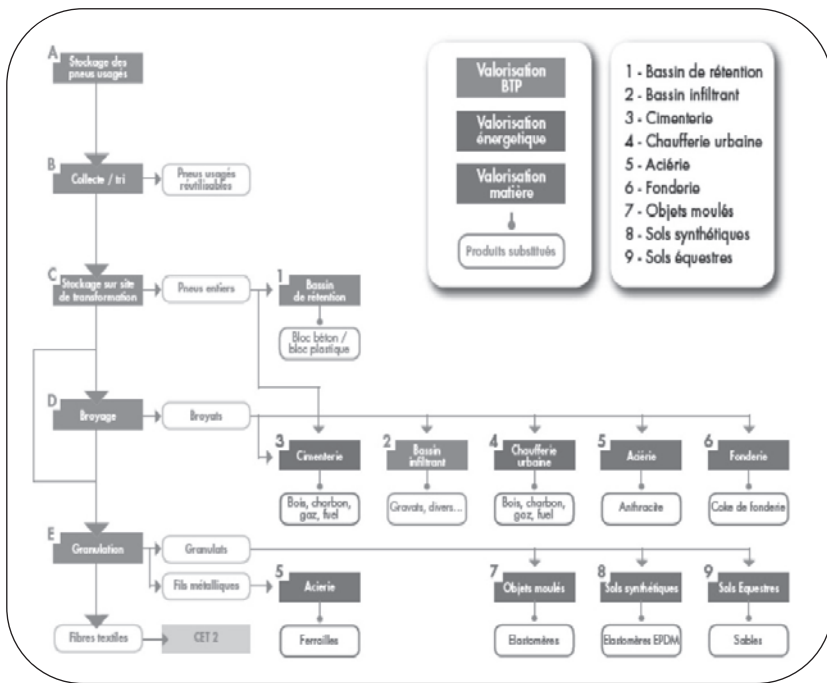


Figure 2 : Les différentes voies de valorisation des PUNR

- ✓ **Les étapes de production des produits dans lesquels sont utilisés les matériaux à base de PUNR** : ces étapes de production sont différentes selon la voie de valorisation qui est envisagée ; dans le cas des PUNR, ce pourrait être la production d'objets moulés, la réalisation de sols sportifs, la production de ciment...

L'étude ACV des voies de valorisation des PUNR a porté sur 9 voies de valorisation différentes qui sont rappelées dans le schéma ci-dessus.



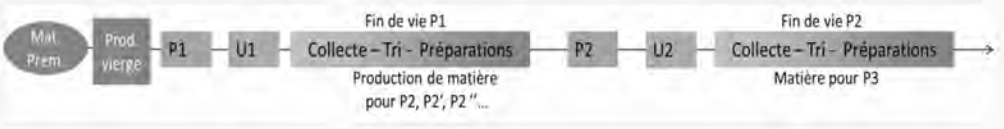
Index du système	Fonctionnalités du système	Fonctionnalités : application au cas des pneus
$S_0$		
	Production des matières $M_1$ destinées à un premier usage $U_1$	Production des matières utilisées pour la fabrication des pneus, en amont du procédé de fabrication $P_1$
$S_1$		
	$U_1$ : Usage Production des matières $M_2$ destinées aux différents usages ultérieurs	Usage automobile des pneus ( $U_1$ ) Collecte et préparation de la matière pour les usages ultérieurs aux pneus ( $M_2$ )
$S_2$		
	$U_1$ : Usage des pneus $U_2$ : Usage d'un produit ou service autre que $U_1$ Production de $M_3$ destiné aux différents usages	Usage automobile des pneus ( $U_1$ ) Usage des sols sportifs (exemple d'utilisation des sous-produits de PUNR) (exemple possible de $U_2$ ) Collecte et préparation de la matière ( $M_3$ ) pour des usages de troisième vie (aujourd'hui, il s'agit essentiellement de la valorisation énergétique).

Tableau 1 : Les systèmes identifiés et leurs fonctionnalités dans le cas d'un usage de la matière en boucle ouverte.

issus des sols sportifs) ; cette production de matière peut également être assimilée à la fourniture d'un service.

On constate ainsi qu'à tout système  $S_i$  se rattache un nombre  $i$  de fonctionnalités  $U_i$  et une fonctionnalité potentielle de production de matière associée à la gestion du dernier produit ou service de  $S_i$  (la réalité est plus complexe, car il peut y avoir également d'autres fonctionnalités de production de matières, associées aux différentes étapes que comporte le système  $S_i$  – par exemple, des fonctionnalités qui seraient associées à la valorisation des sous-produits de transformation de l'hévéa utilisé dans la fabrication du caoutchouc).

Cette analyse fonctionnelle met ainsi en perspective la nécessité qu'il y a de s'interroger sur la façon dont doit être conduite l'affectation des impacts environnementaux associés à l'intégralité du système  $S_i$ , entre les différentes fonctionnalités d'usage  $U_i$  qui lui sont associées et la fonctionnalité de production de matière  $M_{i+1}$  située en aval de ce système ; cela renvoie à la question Q2 pointée dans la problématique, c'est-à-dire à celle du granulat issu de PUNR : ne doit-il pas être pénalisé d'une partie du coût environnemental du cycle de vie du pneu, lorsqu'il est comparé au gra-

nulat d'éthylène-propylène-diène monomère (EPDM), pour établir l'intérêt environnemental de son utilisation pour la réalisation de sols sportifs ?

### La méthode des stocks : gratuité environnementale du déchet

La première approche pour connaître le bilan d'un usage  $U_i$  donné, est de considérer que les matières  $M_i$  ( $i \geq 2$ ) sont des flux élémentaires, ce qui revient à ne pas considérer la fonctionnalité « production de matière », qui est située en aval du système rattaché à  $U_i$ .

Le bilan (ICV<sub>i</sub>) d'une fonctionnalité  $U_i$  ( $i \geq 2$ ) est alors :

$$ICV_i = S_i - S_{i-1}$$

Cette approche est communément appelée « méthode des stocks » par les praticiens d'ACV.

Dans ce cas, aucun impact environnemental n'est associé à la production de matières en aval du système  $S_{i-1}$  ; par effet de réciprocité, aucun impact environnemental n'est associé aux opérations de gestion des matières générées en aval du système  $S_{i-1}$ , (ces opérations étant assurées par le système  $S_i$ ).



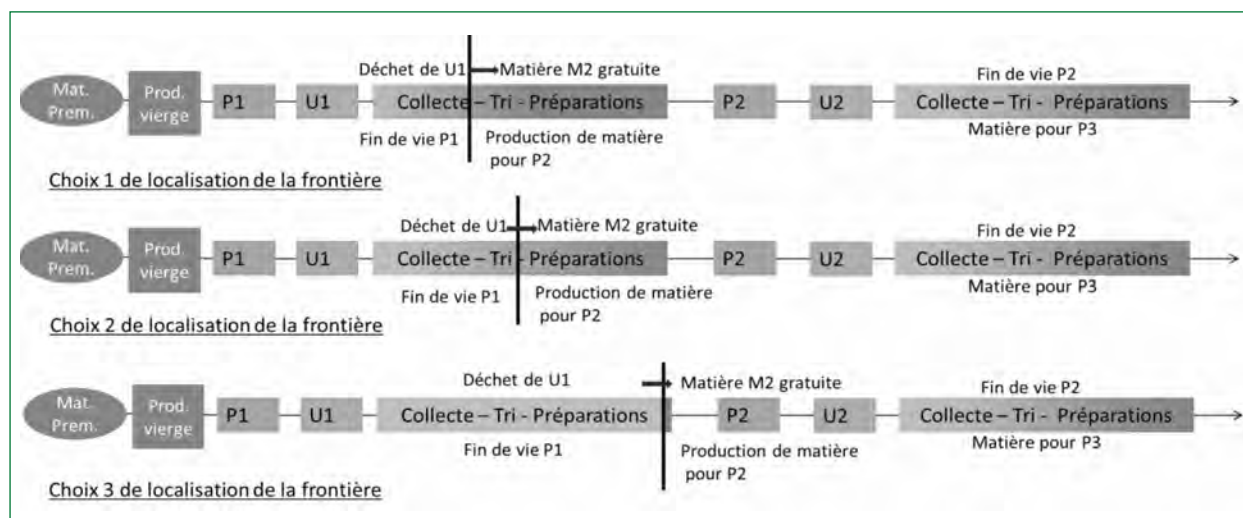


Figure 3 : Différents choix de mise en œuvre de la méthode des stocks.

Appliquée au cas des pneumatiques usagés, la méthode des stocks revient, par exemple, à considérer que l'utilisation de granulats de PUNR dans les sols sportifs se fait de manière gratuite, c'est-à-dire qu'aucun impact environnemental n'est associé aux granulats qui sont utilisés pour ces sols ; par voie de réciprocité, elle revient également à considérer que la gestion des granulats à base de PUNR dans les sols destinés à la pratique des sports est effectuée gratuitement, c'est-à-dire qu'aucun des impacts environnementaux qui pourraient être générés par le service « sols sportifs » ne sera affecté au service d'usage des pneumatiques dans l'automobile.

**A noter :** l'application de la méthode des stocks aux opérations de valorisation revient ainsi à considérer que :

- ✓ les matériaux issus d'un déchet sont gratuits pour ceux qui les utilisent ;
- ✓ la gestion des matériaux issus d'un déchet est gratuite pour ceux qui produisent ce déchet.

Cela constitue une réponse, par la négative, aux questions Q1 et Q2 identifiées en fin de problématique.

Il importe également de noter que la méthode des stocks conduit elle aussi à considérer que  $ICV_1 = S_1$ , c'est-à-dire que les impacts environnementaux associés à la production, à l'usage et à la gestion en fin de vie des pneus sont intégralement affectés à l'usage des pneus  $U_1$ . En d'autres termes, les usages  $U_i$  sont traités comme s'ils étaient totalement indépendants les uns des autres : ce qui revient, par exemple, à considérer que les opérations de production des caoutchoucs utilisés dans les pneumatiques participent de manière exclusive au service rendu par le pneumatique, mais ne participent pas au service rendu par les sols destinés à la pratique des sports, qui utilisent des granulats à base de PUNR.

**A noter :** la méthode des stocks ne permet pas de s'affranchir des questions relatives à l'affectation des opérations de collecte, tri, broyage, préparation... situées à l'interface entre deux cycles de vie successifs.

Comme évoqué dans la première partie de la problématique, la méthode des stocks laisse cependant des marges

d'interprétation dans sa mise en œuvre : on peut en effet relever dans la littérature des différences dans la localisation précise de cette frontière où l'on considère que la fin de vie du premier produit se termine et que la phase de production du second produit débute. Comme l'illustre la figure 2, différentes possibilités s'offrent dans la mise en œuvre de cette méthode :

- ✓ Certains praticiens placent cette frontière après la phase de collecte (choix 1 de localisation de la frontière) : dans ce cas, le pneu usagé (PU) serait considéré comme une matière gratuite pour ses futurs utilisateurs et seule l'étape de collecte serait allouée au cycle de vie du pneumatique ;
- ✓ D'autres la situent après la phase de tri (choix 2 de localisation de la frontière) : dans ce cas, le pneu usagé trié (PU), c'est-à-dire le pneu usagé non réutilisable (PUNR) serait considéré comme une matière gratuite pour ses futurs utilisateurs et les étapes de collecte et de tri seraient allouées au cycle de vie du pneumatique ;
- ✓ D'autres encore la localisent après les étapes de préparation (choix 3 de localisation de la frontière) : dans ce cas, les broyats ou les granulats ou les fils d'acier seraient considérés comme une matière gratuite pour leurs futurs utilisateurs et les étapes de collecte, de tri et de préparation seraient allouées au cycle de vie du pneumatique.

Ces différents choix ne sont pas sans incidence sur le bilan environnemental de la fonctionnalité  $U_1$  (le pneumatique) et de la fonctionnalité  $U_2$  (le sol sportif, les objets moulés, le ciment...) (voir la figure 3 ci-dessus).

Tant que l'on considèrerait que la gestion des PUNR ne consistait qu'à traiter des déchets, c'est-à-dire à assurer la maîtrise des risques environnementaux associés aux PUNR (et non pas à apporter le maximum de valeur ajoutée au produit en fin de vie), le choix de la méthode des stocks pouvait paraître justifié : l'utilisation de cette méthode s'avèrait ainsi relativement pertinente, dans une société où la problématique déchets était, pour l'essentiel, une problématique de maîtrise des risques, il y a de cela vingt ou trente ans.

Toutefois, le contexte a évolué et, à l'heure actuelle, la gestion des déchets (tout au moins en ce qui concerne les déchets banals) consiste prioritairement en des opérations de valorisation, comme en témoigne la hiérarchie énoncée dans le cadre de la directive Déchets, la multiplication des catégories de produits couverts par une REP (Responsabilité Élargie du Produit), ainsi que les différents objectifs qui ont pu être énoncés en termes de recyclage ou de valorisation (objectifs en matière de valorisation des emballages, des déchets ménagers, des VHU...). Dans ce contexte, il devient de moins en moins évident de continuer à soutenir une méthode qui repose sur « la gratuité environnementale » du déchet, par exemple la gratuité du granulat de PUNR qui sert de remplissage à un gazon synthétique (notamment si ce gazon doit être comparé à un gazon utilisant pour son remplissage des granulats d'EPDM) ; il apparaît de plus en plus clairement que la valeur ajoutée introduite à l'étape  $S_0$  par la création de la matière  $M_1$  est utile (ou, au contraire, pose des contraintes) à l'ensemble des usages ultérieurs  $U_1, U_2, \dots$  qui sont rendus possibles par les opérations de valorisation successives.

Les usages ultérieurs sont à la fois rendus possibles et contraints du fait des propriétés de la matière  $M_1$  ou du produit  $P_1$  initialement constitué.

Il peut donc être considéré comme à la fois plus « pertinent », d'un point de vue industriel mais également en cohérence avec le développement des procédés de valorisation dans notre société, de mieux appréhender l'affectation des impacts associés à l'intégralité d'un système  $S_i$  entre les différentes fonctionnalités d'usage  $U_i$  qui lui sont associées et la fonctionnalité de production de matière  $M_{i+1}$  située en aval de ce système. C'est pour répondre à ce besoin que d'autres approches sont développées.

**A noter :** en optant pour une méthode alternative à la méthode des stocks, on considère d'une certaine façon que  $M_i$  n'est plus un flux élémentaire, mais un coproduit de la fonctionnalité  $U_i$  issu de système  $S_{i-1}$ .

### L'extension des frontières du système appliquée aux opérations de valorisation

*Le principe initial de l'extension des frontières du système : le passage du statut de « déchet » au statut de « coproduit »*

L'usage réalisé du déchet dans différentes applications situées en aval du système qui le génère transforme de fait ce déchet en un coproduit de la filière amont : le granulat à base de PUNR ou le broyat de PUNR calibré pour être envoyé en cimenterie doivent être considérés, du point de vue de la comptabilisation environnementale, non plus comme des déchets, mais bien comme des coproduits de l'usage des pneumatiques.

Une approche plus adaptée au contexte actuel que la méthode des stocks consiste ainsi à considérer que les matières  $M_i$  ( $i \geq 2$ ) ne sont pas des flux élémentaires, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas gratuites pour les systèmes qui

les utilisent. Cette approche constitue une réponse engagée à la question Q2 présentée dans la problématique : l'évaluation d'un système ou d'un service qui utiliserait un produit en fin de vie doit d'une façon ou d'une autre prendre en compte une partie des impacts associés au cycle de vie de ce produit.

Dans la perspective de ce principe directeur, selon lequel il s'agit de reconnaître que les matériaux issus des déchets ne constituent pas une ressource gratuite, l'approche méthodologique conforme à la norme ISO 14040 consiste à répartir les impacts environnementaux du système  $S_i$  entre les différentes fonctionnalités, c'est-à-dire à attribuer à chaque fonctionnalité les impacts environnementaux qui la concernent. Dans la mesure où il n'est pas possible de subdiviser le système  $S_i$  en processus élémentaires, la mise en œuvre de ce principe nécessite d'opérer une « affectation » des impacts environnementaux entre les différentes fonctionnalités d'usage  $U_i$  qui lui sont associées et la fonctionnalité de production de matière  $M_{i+1}$  située en aval de ce système. L'affectation est cependant difficile à conduire ici en se fondant sur des critères physico-chimiques : par exemple, il n'existe pas de raisonnement physique permettant d'établir comment allouer les impacts de production du caoutchouc entre le fait d'utiliser un pneu et le fait de produire des granulats pour la réalisation de sols sportifs. De ce fait, la démarche adoptée dans cette seconde approche cherche à s'affranchir de certaines fonctionnalités (la production de matière, notamment, ou la production d'énergie), pour ne garder que la fonctionnalité principale, évitant du même coup de délicates affectations.

Afin de dépasser la problématique de l'affectation entre les différentes fonctionnalités d'usage  $U_i$  d'un système  $S_i$  et la fonctionnalité de production de matière  $M_{i+1}$  située en aval de ce système, qui est posée lorsque l'on choisit d'opter pour la non gratuité des matériaux issus des déchets, il est possible de considérer que le service de production de matière  $M_i$  ( $i \geq 2$ ) aurait pu être rendu par une filière de production de matière vierge et d'opérer de manière à « neutraliser » la fonctionnalité de production de matière  $M_{i+1}$  située en aval de ce système.

Cette approche est communément appelée « extension des frontières du système » par les praticiens d'ACV.

Dans le cadre de notre illustration, cela reviendrait, par exemple, à considérer que les services rendus par les granulats utilisés comme matériau de remplissage de sols destinés à la pratique des sports auraient pu être apportés par des granulats d'EPDM fabriqués spécifiquement pour cet usage.

En appelant  $V_i$  les impacts environnementaux associés à la production d'une quantité de matière vierge dont le service rendu serait équivalent au service rendu par  $M_i$ , le bilan environnemental associé à la fonctionnalité  $U_i$  du système  $S_i$  ( $i \geq 2$ ) peut s'écrire :

$$ICV_i = S_i - S_{i-1} - V_{i+1}$$

L'opération ci-dessus retranscrit la « neutralisation » de la fonctionnalité de production de matière  $M_{i+1}$  située en aval du système  $S_i$  : les impacts environnementaux associés à la production d'une quantité de matière vierge dont le

service rendu serait équivalent au service rendu par  $M_{i+1}$  sont déduits des impacts environnementaux associés à la fonctionnalité  $U_i$  du système  $S_i$  ( $i \geq 2$ ), système qui produit la matière  $M_i$ . Autrement dit, la fonctionnalité de production de matière est éliminée du périmètre de comptabilisation associé à la fonctionnalité  $U_i$  du système  $S_i$ .

Dans le cadre de notre illustration, cela reviendrait par exemple à dire que le bilan environnemental des pneumatiques doit être calculé par la différence entre le bilan environnemental de toutes les étapes relevant du cycle de vie des pneumatiques depuis l'extraction des matières premières jusqu'aux étapes de préparation des granulats à base de pneus usagés, et le bilan environnemental qui serait associé à la production de granulats à partir d'une matière vierge (l'EPDM, par exemple).

**A noter :** du point de vue de  $S_i$ , il ne s'agit en aucune manière d'éviter la production du matériau vierge utilisé dans ce système  $S_i$  (ce qui serait le cas dans le cadre d'une boucle fermée), mais bien d'éviter la production du matériau vierge qui aurait été utilisé dans le système  $S_{i+1}$ . Ainsi, la valorisation du PUNR ne peut être considérée comme évitant la production de matière utilisée pour la production du pneu, mais doit être considérée comme se substituant par exemple à de l'EPDM, si c'est le produit auquel se substituent les granulats de PUNR valorisés.

### La prise en compte des usages multiples de la matière secondaire

De manière générale, la matière générée en aval du système  $S_i$  est employée non pas pour un usage unique (par exemple, sous forme de granulats dans les sols sportifs), mais dans le cadre de différents usages (les granulats à base de PUNR dans les sols sportifs, les granulats entrant dans la production de terrains d'équitation ou la production d'objets moulés, les broyats de PUNR utilisés en cimenterie, en fonderie, en aciérie...); il n'y a pas un, mais plusieurs usages « j » possibles de la matière  $M_i$ ; en conséquence, il convient de considérer non pas une seule, mais plusieurs matières vierges qui rendraient un service équivalent à la matière  $M_i$  générée en aval du système  $S_i$ .

De ce fait, dans sa forme générale, la formule précédente, fondée sur l'extension des frontières du système, s'écrit de la manière suivante :

$$ICV_i = S_i - S_{i-1} - \sum_j (V_{i+1})$$

Où le terme  $\sum_j (V_{i+1})$  correspond aux impacts environnementaux associés à la production des différentes formes de matière vierge auxquelles se substitue la matière  $M_{i+1}$  générée en aval du système  $S_i$ . Le terme  $\sum_j (V_{i+1})$  doit être calculé en tenant compte de la quantité de matière  $M_{i+1}$  qui est effectivement orientée vers chacun des usages.

Il avait été précédemment pointé que dans le cas particulier de la fonctionnalité  $U_1$ , la formule de la méthode des stocks conduisait à écrire  $ICV_1 = S_1$ . Dans le cas de la méthode par extension des frontières du système, le bilan environnemental associé à la fonctionnalité  $U_1$  s'écrit, au contraire,  $ICV_1 = S_1 - \sum_j (V_2)$ . Appliqué au cas des pneumatiques, cela consiste à dire que le bilan environnemental

associé au service des pneumatiques est calculé par soustraction entre le bilan environnemental de toutes les étapes appartenant au cycle de vie de pneumatiques (depuis l'extraction des matières premières jusqu'aux étapes de préparation des granulats à base de pneus usagés) et la somme des bilans environnementaux qui seraient associés à la production de chacun des matériaux auxquels se substituent les matériaux valorisés issus des PUNR. Il convient de noter que c'est bien cette dernière démarche qui a été mise en œuvre dans le cadre de l'étude d'Aliapur sur l'évaluation du bilan environnemental des différentes voies de valorisation des PUNR.

**A noter :** cette pratique, qui consiste à prendre en compte l'ensemble des usages de la matière issue des déchets et non pas un usage unique, est rarement mise en œuvre par les praticiens. Ces derniers choisissent plutôt de prendre en compte un seul usage de la matière, en aval, même si cette démarche n'est pas optimale et si elle risque de susciter une incertitude importante, elle a en effet pour elle le mérite de la simplicité.

Dans tous les cas, si ce choix non optimal est retenu dans le cadre d'une étude, il est alors nécessaire de le tester au moyen d'analyses de sensibilité dans lesquelles un autre usage serait considéré, l'influence du choix de la filière étant ainsi évitée dans les résultats.

### L'application homogène des choix méthodologiques : amont et aval

Les parties précédentes relatives à l'application de la méthode d'extension des frontières du système se focalisaient sur le mode de comptabilisation du service de production de matière  $M_{i+1}$ , qui est générée en aval du système  $S_i$  délivrant la fonctionnalité principale  $U_i$  : elles visaient ainsi à présenter une méthode possible permettant d'établir le bilan environnemental du service associé au pneumatique sans procéder à une affectation avec le service de production de la matière issue de PUNR utilisée dans de multiples usages et cela, sans pour autant recourir à la méthode des stocks.

Par un effet de miroir, il est alors nécessaire de considérer de quelle manière doit être comptabilisée cette même matière  $M_{i+1}$ , lorsqu'elle entre dans le système  $S_{i+1}$  qui délivre la fonctionnalité principale  $U_{i+1}$ ; cela revient, par exemple, à poser la question de l'évaluation des impacts environnementaux qui doivent être associés aux granulats de PUNR lorsque l'on cherche à établir le bilan environnemental correspondant au service rendu par les sols sportifs.

On a pu voir que la réponse donnée à cette question dans le cadre de la méthode des stocks reposait sur la gratuité du déchet, c'est-à-dire que la matière  $M_{i+1}$  est considérée comme gratuite pour la fonctionnalité  $U_{i+1}$  qui en a l'usage.

*A contrario*, dans le cadre de la méthode d'extension des frontières du système, il est nécessaire de souligner que la matière  $M_{i+1}$  ne peut pas être considérée comme gratuite pour la fonctionnalité  $U_{i+1}$ . La démonstration de cette règle peut être faite en vérifiant la conservation des bilans environnementaux : la somme du bilan environnemental asso-

cié à  $U_i$  et du bilan environnemental associé à  $U_{i+1}$  devrait correspondre au bilan environnemental à l'échelle du système  $S_{i+1}$  qui englobe ces deux fonctionnalités ; si la méthode par extension des frontières du système a été appliquée pour évaluer le bilan environnemental de la fonctionnalité  $U_i$  et que la matière  $M_{i+1}$  est comptabilisée comme gratuite pour la fonctionnalité  $U_{i+1}$ , alors la somme de ces deux bilans aboutira à  $S_{i+1} - V_{i+1}$  au lieu de  $S_{i+1}$ , montrant ainsi que les règles de conservation des bilans à une échelle supérieure ne sont pas respectées.

**Très important** : un point parfois négligé par les praticiens est qu'à partir du moment où l'on considère que les matières récupérées  $M_i$  ne sont plus des flux élémentaires, ce choix méthodologique doit être appliqué à la fois pour les systèmes qui génèrent ces matières  $M_i$  (par exemple, pour le pneumatique qui génère des granulats issus de PUNR) et pour les systèmes qui utilisent ces matières  $M_i$  (par exemple, pour les sols sportifs qui utiliseraient les granulats issus de PUNR).

Ainsi, si l'on considère que le bilan environnemental des pneumatiques se calcule par soustraction entre le bilan environnemental de toutes les étapes appartenant au cycle de vie de pneumatiques (depuis l'extraction des matières premières jusqu'aux étapes de préparation des granulats à base de pneus usagés) et le bilan environnemental qui serait associé à la production de granulats à partir d'une matière vierge, alors, en contrepartie, le bilan environnemental des gazons synthétiques se doit d'être calculé en considérant que le bilan environnemental associé aux granulats à base de PUNR correspond au bilan associé à la quantité de granulats de matière vierge (EPDM, par exemple) qui rendrait le même service.

De façon plus complète, le bilan environnemental associé à la fonctionnalité  $U_i$  du système  $S_i$  ( $i \geq 2$ ) s'écrit donc :

$$ICV_i = V_i + S_i - S_{i-1} - \sum_j (V_{i+1}), \text{ pour } i \geq 2,$$

$ICV_1 = S_1 - \sum_j (V_2)$  (sans changement, par rapport au cas précédent)

On note ici que le choix méthodologique de considérer la matière régénérée  $M_i$  comme un flux élémentaire ou comme un flux non-élémentaire (en entrée et en sortie du système étudié), c'est-à-dire le choix de prendre en compte « la méthode des stocks » ou « la méthode d'extension des frontières du système », a un impact significatif sur le bilan environnemental  $ICV_i$  associé à la fonctionnalité  $U_i$ .

On constate également, dans le cadre de cette comptabilisation que si l'usage ultérieur d'une matière  $M_{i+1}$  générée en aval de  $S_i$  conduit à défalquer  $V_{i+1}$  pour le calcul du bilan environnemental associé à la fonctionnalité  $U_i$ , la consommation de  $M_{i+1}$  par la fonctionnalité  $U_{i+1}$  ne lui apporte aucun avantage en comparaison de la consommation d'une matière vierge  $V_{i+1}$  : la valorisation des granulats de PUNR dans des sols sportifs permet, dans le calcul du bilan environnemental des pneumatiques, de défalquer le bilan environnemental qui serait associé à la production d'une quantité d'EPDM qui rendrait le même service que les granulats ; en revanche, pour le sol sportif, l'utilisation de granulats de PUNR au lieu des granulats d'EPDM n'apporte aucun avantage dans son bilan comparativement à l'utilisation d'EPDM.

Cette application de la méthode d'extension des frontières du système encourage la valorisation de matières en fin de vie, mais elle n'encourage absolument pas la consommation des matières régénérées.

**A noter** : si l'ensemble des cas « j » d'usage est similaire (soit  $\sum_j (V_{i+1}) = V_{i+1}$ ) et si la quantité de matière secondaire  $M_i$  qui entre dans le système  $S_i$  est similaire à la matière secondaire  $M_{i+1}$  qui est générée en aval du système  $S_i$ , on a alors  $V_i = V_{i+1}$  ; le bilan environnemental associé à la fonctionnalité  $U_i$  s'écrit  $ICV_i = S_i - S_{i-1}$ , soit la formule d'application de la méthode des stocks.

On constate ainsi que le choix méthodologique concernant le mode de comptabilisation du service de production de matière générée en aval d'un système  $S_i$  a une influence sur le calcul du bilan environnemental de la fonctionnalité  $U_i$  quand le système engendre des pertes matières ou quand la matière secondaire sortante n'est pas de même nature que la matière entrante... (ce qui est vrai dans la plupart des cas !)

### Le cas particulier des usages destructifs de la matière

Dans le cadre d'un usage destructif de la matière, l'application de la formule vue au point précédent fournit les éléments suivants :

Pour l'usage pneu (formule non spécifique) :  $ICV_1 = S_1 - \sum_j (V_2)$ .

Pour la valorisation destructrice (pas de matière  $M_3$ , donc pas de  $V_3$ ) :

$$ICV_2 = V_2 + S_2 - S_1.$$

La formule  $ICV_1 = S_1 - \sum_j (V_2)$  traduit le fait que le matériau à base de PUNR se substitue (en partie, dans le cadre des usages destructifs) à une certaine quantité de matière qui aurait (sans lui) été utilisée ; dans le cadre d'un usage énergétique des matériaux à base de PUNR, ces matières vierges pourraient être du fioul, du gaz naturel, du charbon...

La formule  $ICV_2 = V_2 + S_2 - S_1$  traduit le fait que le matériau à base de PUNR n'est pas « gratuit » du point de vue environnemental, pour celui qui l'utilise : un amont  $V_2$  est donc associé à la consommation de matériaux à base de PUNR lorsque l'on cherche à établir le bilan environnemental de la fonctionnalité qui les utilise ; par exemple, si l'on cherche à établir les impacts environnementaux de la cimenterie, l'usage de broyats de PUNR sera comptabilisé comme le bilan environnemental associé à la production du bouquet énergétique (fioul, coke de pétrole, charbon...) qui rendrait le même niveau de service que les broyats de PUNR.

On constate en outre, dans la formule  $ICV_2 = V_2 + S_2 - S_1$ , la disparition du terme  $V_3$  qui correspond normalement au bilan environnemental de la matière vierge à laquelle se substitue la matière générée en aval de  $S_2$  : en effet, étant donné que l'usage  $U_2$  est destructif, il ne génère pas de matière  $M_3$  et ne bénéficie donc pas d'un crédit  $V_3$  qui correspondrait à cette matière  $M_3$  ; la cimenterie opère un usage destructif des broyats à base de PUNR et ne peut donc se prévaloir des bénéfices qui seraient associés à l'usage de matières à base de PUNR qu'elle conduirait à géné-



rer ; au contraire, la réalisation de sols sportifs à base de PUNR pourrait se prévaloir des bénéfices apportés par un usage ultérieur des matériaux que ces sols généreraient en fin de vie.

De manière plus générale, il apparaît ainsi que plus un usage donné conduit à perdre ou à détruire une quantité importante de la matière qu'il utilise, moins il peut espérer être crédité d'un bénéfice du fait des usages ultérieurs de la matière qu'il génère en fin de vie ; l'usage destructif d'un matériau apparaît comme « pénalisé » par rapport à l'usage non destructif de ce même matériau lorsque les matières générées en fin de vie par ce dernier font l'objet de différents usages.

**A noter :** Les modélisations exposées au sein de cet article présupposent qu'il existe effectivement une filière qui va utiliser la matière secondaire, le plus souvent à la place d'une matière vierge – à défaut, si la matière secondaire est produite sans avoir de débouché, cette matière n'est pas « secondaire », elle constitue un déchet – elle s'entasse ! Dans le cadre de la comptabilisation environnementale, le système de cycle de vie responsable de la production d'un déchet sans débouché reste responsable de ce déchet et « conserve » les impacts qui sont associés à son traitement.

### De la prise en compte du service déchet à l'allocation des « bénéfices du recyclage »

Il a été montré au début de cet article que l'application de la méthode des stocks revient à considérer que :

- ✓ les matériaux issus d'un déchet sont gratuits pour ceux qui les utilisent ;
- ✓ la gestion des matériaux issus d'un déchet est gratuite pour ceux qui produisent ce déchet.

Une première mise en œuvre de la méthode d'extension des frontières du système a permis de dépasser la « gratuité » du déchet en montrant comment il convenait de considérer la fonction de production de matière  $M_{i+1}$  qui est associée à l'aval d'un système  $S_i$  donné. Concernant la méthode, telle qu'elle a été exposée dans les paragraphes précédents, il a toutefois été noté que les règles de comptabilisation auxquelles elle aboutit tendent à encourager la valorisation de matières en fin de vie, mais n'encouragent absolument pas la consommation de matière régénérée.

Il convient de ce fait de remarquer que cette première mise en œuvre de la méthode d'extension des frontières du système s'est focalisée sur la prise en compte de la fonction de production de matière  $M_{i+1}$  qui est délivrée par  $U_i$  à l'égard de  $U_{i+1}$  et qu'elle n'a pas considéré en retour la fonction de gestion des matières  $M_{i+1}$  en fin de vie qui est délivrée par  $U_{i+1}$  à l'égard de  $U_i$ .

En conduisant pour la fonction traitement des déchets une analyse équivalente à celle qui a précédemment été conduite dans le cas de la fonction de production de matière et en considérant que  $D_i$  est le bilan traditionnel de fin de vie des matières  $M_i$ , on peut établir que le bilan environnemental associé à la fonctionnalité  $U_i$  du système  $S_i$  ( $i \geq 2$ ) s'écrit :

$$ICV_i = V_i - D_i + S_i - S_{i-1} - \sum_j (V_{i+1}) + D_{i+1}, \text{ pour } i \geq 2$$

$$ICV_1 = S_1 - \sum_j (V_2) + D_2$$

Cette formule plus générale d'application de la méthode d'extension des frontières du système aux opérations de valorisation permet d'établir le bilan environnemental de la fonctionnalité  $U_i$  en tenant compte :

- ✓ de la fonctionnalité de production de la matière  $M_{i+1}$  générée en aval de la fonctionnalité  $U_i$  ;
- ✓ de la fonctionnalité de service de gestion de la matière  $M_i$  qui est assurée par la fonctionnalité  $U_i$ .

On constate que cette formule propose également une règle d'attribution des bénéfices qui résultent des opérations de valorisation :

- ✓ Le bénéfice de l'évitement de production de la matière première, soit le terme  $-\sum_j (V_{i+1})$ , est systématiquement attribué à la fonctionnalité qui fournit la matière régénérée  $M_{i+1}$  qui se substitue à la matière première  $V_{i+1}$  ;
- ✓ Le bénéfice d'évitement de la gestion des matières  $M_{i+1}$  en fin de vie, soit le terme  $-D_{i+1}$ , qui serait comptabilisé pour la fonctionnalité  $U_{i+1}$ , est systématiquement attribué à la fonctionnalité qui utilise la matière régénérée  $M_{i+1}$  qui se substitue à la matière première  $V_{i+1}$ .

Il est à noter que cette répartition des bénéfices associés aux opérations de valorisation reste arbitraire. De ce fait, d'autres règles d'attribution des bénéfices sont envisageables ; par exemple, en suivant ce qui a été fait dans le cadre de l'élaboration du BP X30-323, les deux bénéfices associés à l'évitement de la production de matière première et à l'évitement de la gestion des déchets étant regroupés de manière à calculer un bénéfice global de l'opération de valorisation  $(-\sum_j (V_{i+1}) - D_{i+1})$  ; ce bénéfice global est alors réparti selon diverses proportions possibles (50/50 ; 100/0 ou 0/100) entre les fonctionnalités  $U_i$  et  $U_{i+1}$ .

Dans le cas d'une répartition 50/50 des bénéfices associés aux opérations de valorisation, le bilan environnemental associé à la fonctionnalité  $U_i$  du système  $S_i$  ( $i \geq 2$ ) s'écrit :

$$ICV_i = V_i - (\sum_j (V_{i+1}) + D_{i+1}) / 2 + S_i - S_{i-1} + D_{i+1} - (\sum_j (V_{i+1}) + D_{i+1}) / 2 \text{ pour } i \geq 2$$

### Conclusions - Perspectives

La réalisation des travaux d'ACV sur les différentes voies de valorisation des PUNR a été l'occasion d'aborder différents points méthodologiques (notamment les questions relatives à la comptabilisation des opérations de valorisation).

La comptabilisation des opérations de valorisation est toujours une démarche délicate, dans le cadre des ACV, alors que les choix qu'elle conduit à faire, ont souvent une incidence notable sur les résultats. Cet article souhaitait faire le point sur le processus qui conduit à passer de la comptabilisation par la méthode des stocks à une comptabilisation par extension des frontières du système, en illustrant les différents aspects du raisonnement par le cas des pneumatiques et de leurs sous-produits.

Historiquement, la comptabilisation des opérations de valorisation dans les ACV a longtemps été effectuée en ayant recours à la méthode des stocks. Cette méthode conduit à considérer que les matériaux issus d'un déchet

sont gratuits pour ceux qui les utilisent, et que la gestion des matériaux issus d'un déchet est gratuite pour ceux qui produisent ce déchet ; elle paraît donc de ce fait de moins en moins adaptée à notre contexte industriel, dans lequel la création de valeur ajoutée par la valorisation n'est plus l'exception, mais devient le principe directeur de la politique de gestion des déchets.

La comptabilisation des opérations de valorisation par extension des frontières du système apporte une réponse qui semble aujourd'hui plus adaptée ; elle offre notamment la possibilité de prendre en compte le service rendu par la matière produite en aval d'une fonctionnalité : les matériaux issus de déchets ne sont plus fatalement gratuits pour ceux qui les utilisent. La mise en œuvre de cette méthode reste cependant multiforme, pouvant aller d'une comptabilisation articulée autour de la reconnaissance d'une fonctionnalité unique de production de matière à la reconnaissance conjointe des diverses fonctionnalités de production de matière et de gestion des déchets, cette dernière option éclairant *in fine* les principes de comptabilisation retenus dans le cadre du référentiel méthodologique BP X30-323 de l'affichage environnemental des produits de grande consommation.

En conclusion de cet article, il importe de souligner que, si les règles de comptabilisation des opérations de valorisation restent totalement « ouvertes » dans le cadre des normes ISO 14040/44, elles sont néanmoins de plus en plus encadrées, dans la pratique, par les recommandations qui peuvent être faites en France et au niveau international (Europe) tant au sein des réglementations qu'au sein des normes, notamment sectorielles (par exemple, dans le secteur du bâtiment). Le référentiel méthodologique BP X30-323 de l'affichage environnemental des produits de grande consommation présente ainsi de manière détaillée les formules de fin de vie recommandées dans le cadre de l'affichage environne-

mental en France ; les travaux actuels visent progressivement à fixer tous les aspects nécessaires à la mise en œuvre de ces calculs, notamment la nature des filières évitées. La Commission européenne est elle-même en train d'élaborer des règles de comptabilisation des opérations de valorisation dans le cadre de son « *Product Environmental Footprint Guide* ».

*In fine*, les règles gouvernant la comptabilisation des opérations de valorisations matières et énergies se construisent progressivement et de manière consensuelle ; il importe donc pour les praticiens et pour les utilisateurs des travaux d'ACV de tenir compte de ces avancées méthodologiques. En effet, bien que les règles en cours d'élaboration pour certains domaines d'application (affichage environnemental des produits de grande consommation ou *Product Environmental Footprint*) ne s'imposent à proprement parler que pour ces domaines, elles doivent cependant constituer des points de référence généraux dans la pratique ACV.

Dans tous les cas, la détermination de règles de comptabilisation environnementale des opérations de valorisation qui doivent être utilisées dans une ACV mérite d'être guidée par la volonté de représenter de façon la plus pertinente qui soit les systèmes industriels étudiés ; elle doit également être guidée par la nécessité de porter sur le système industriel un éclairage environnemental permettant d'identifier les actions d'éco-conception les plus bénéfiques et les plus robustes, ce qui suppose, dans la plupart des cas, de recourir à des analyses de sensibilité portant sur ces règles de comptabilisation.

### Notes

\* Expert en ACV, Président co-fondateur de Solinnen.

\*\* Directeur du Développement d'Aliapur.

\*\*\* Experts en ACV, co-fondatrices de Bleu Safran.

**Annexe – Table de correspondance**

Le tableau ci-dessous fournit les définitions des différentes abréviations utilisées dans le présent article.

Nom	Définition	Nom	Définition
$P_i$	Phase de production du produit dans le système $i$ (et, par extension, les impacts environnementaux de cette production $i$ )	$M_i$	Matière consommée par le système $i$ et produite par le système $i-1$ .
$S_i$	Système $i$ permettant notamment de remplir la fonctionnalité $i$ (et, par extension, les impacts environnementaux de ce système $i$ ).	$V_i$	Impact environnemental de la production de matière vierge $i$ , dont l'usage est équivalent à celui de la matière $M_i$ en entrée du système $S_i$ .
$U_i$	Phase d'usage du produit permettant de remplir la fonctionnalité $i$ (et, par extension, les impacts environnementaux de cet usage $i$ ).	$\sum_j(V_{i+j})$	Somme des impacts environnementaux évités par le système $i$ grâce à la production de la matière $M_i$ en fonction de l'ensemble des filières de valorisation de $M_i$ .
$ICV_i$	Inventaire du cycle de vie associé à la fonctionnalité $i$ .	$D_i$	Impact environnemental de fin de vie des matières $M_i$ en l'absence de valorisation.