



HAL
open science

Structuration de la Supply Chain Circulaire et positionnement vis-à-vis des filières REP

Patrick Pujo, Fouzia Ounnar, Anaïs Leblanc, François-Michel Lambert

► To cite this version:

Patrick Pujo, Fouzia Ounnar, Anaïs Leblanc, François-Michel Lambert. Structuration de la Supply Chain Circulaire et positionnement vis-à-vis des filières REP. Congrès Interdisciplinaire sur l'Économie Circulaire - CIEC 2024, Université de Toulouse [UT], Jun 2024, Montpellier, France. hal-04815556

HAL Id: hal-04815556

<https://hal.science/hal-04815556v1>

Submitted on 3 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Structuration de la Supply Chain Circulaire et positionnement vis-à-vis des filières REP

P. Pujo^a, F. Ounnar^a, A. Leblanc^b, F.-M. Lambert^c

^a *CRET-LOG - Centre de Recherche sur le Transport et la Logistique,
Aix Marseille Université (AMU)*

^b *CITWELL - Conseil en transition des opérations, Paris*

^c *SOROA - Conseil en stratégie écologique, Gers*

Auteur correspondant : patrick.pujo@univ-amu.fr

Introduction

Dans une étude publiée en 2023 [1], conduite par Citwell et Soroa avec le concours de l'INEC, il apparaît clairement que l'opérationnalisation de l'économie circulaire, approche éminemment émergente [2], doit s'appuyer sur les expertises du monde de la supply chain, laquelle doit constituer un outil de support optimisant le système en cohérence avec les objectifs publics et privés, par le biais d'incitations législatives et fiscales. Au travers de ces leviers, le monde politique vise à accélérer une transition de l'économie vers plus de résilience et plus de circularité. Les enjeux sont fondamentaux, dans la mesure où il ne s'agit ni plus ni moins de s'aligner sur l'Objectif du Développement Durable n°12 des Nations Unies, à savoir 'Faire plus et mieux avec moins de ressources'.

Le travail de réflexion présenté ici vise à montrer comment cette approche de l'économie circulaire par les flux peut se traduire par un modèle structurant, issu d'une synthèse de différentes sources bibliographiques parmi lesquelles nous trouverons le plaidoyer pour la Supply Chain Circulaire [1], la pyramide de la valeur (selon les principaux 7R) [3], et l'évolution vers les 10R [2]. Ce modèle vise à montrer les grandes structurations qui permettront à la SCC d'être le cœur opérationnel pour une « circularité haute », en assurant autant que possible la conservation maximale de la valeur de la matière durant l'usage, en poursuivant le but d'intensification du rendement d'usage des produits et de la matière, puis de limiter au maximum la perte de valeur en 'fin d'usage', quels que soient les produits et matières à considérer et leur état.

Dans un premier temps, nous nous attellerons à donner une définition consensuelle et scientifique de la Supply Chain Circulaire (SCC), puis à caractériser les besoins en SCC des filières de retraitement, y compris les filières REP. Ensuite, dans un second temps, il s'agira d'aborder le problème de la circularité des flux, au travers du prisme initial de la pyramide d'Achterberg [3], mais en essayant d'être le plus exhaustif possible vis-à-vis des impératifs 10R. L'objectif sera ensuite d'établir un lien entre les filières REP et la structuration des solutions de SCC à considérer pour réussir au mieux la transition

vers l'économie circulaire. Ceci nous permettra de mieux caractériser le pilotage de la circularité à mettre en place et les futures recherches associées à envisager.

Supply Chain Circulaire

Le concept de Supply Chain Circulaire apparaît assez récemment dans la littérature, en 2017 au travers d'un exemple d'isolation et de conductivité thermique où les approches de supply chain 'linéaire' et 'circulaire' sont comparées [4]. Différents articles complémentaires paraissent dès 2018 [5, 6, 7], mais en posant généralement le concept sur un contexte réduit ou en s'appuyant sur la notion de 'closed loop supply chain' [8]. Rappelons ici qu'une supply chain en boucle fermée est en fait une supply chain linéaire rebouclée sur elle-même, avec un seul cycle de vie des produits concernés. Il s'agit donc d'une forme restreinte de SCC, à une boucle constante. Il faut attendre l'année suivante pour que soit abordé la SCC via le prisme de son management [9] : il s'agit de faire évoluer la supply chain en y intégrant une pensée circulaire et holistique, incluant une pluralité de canaux d'approvisionnements et de traitements induisant une dimension régénérative et conservative : la conservation tout azimut de la valeur apparaît dès lors comme la raison d'être de la SCC. Par ailleurs, d'autres travaux ont abordé les effets barrières au déploiement de la SCC [10, 11] et la définition de business model pour la SCC [12]. Ceci permet de mieux en cerner les tenants et les aboutissants. Enfin, plus récemment, nous voyons apparaître les premières revues de littérature [13, 14] et les premiers ouvrages 'grand public' [15, 16].

Parallèlement à ces travaux, les autorités politiques de gouvernance ont poussé au développement du concept de 'responsabilité élargie des producteurs'. Devant l'incidence de ce concept en termes d'organisation de flux circulaires, nous pouvons nous interroger si SCC et filières REP sont ou non des concepts étroitement liés.

Filières REP

Les filières à responsabilité élargie des producteurs (REP) sont des dispositifs particuliers d'organisation de la prévention et de la gestion de déchets qui concernent certains types de produits [17]. Ces dispositifs reposent sur le principe de responsabilité élargie du producteur, selon lequel les producteurs, c'est-à-dire les personnes responsables de la mise sur le marché de certains produits, peuvent être rendus responsables de financer ou d'organiser la prévention et la gestion des déchets issus de ces produits en fin de vie. Le financement de ces dispositifs se fait selon le principe complémentaire du pollueur – payeur, avec un objectif incitatif vers moins de pollution et plus de maîtrise sur les matières à récupérer, et *in fine* plus de réussite dans la collecte. Ce type de dispositif rencontre un certain succès en France, sous la houlette volontariste des autorités : 12 filières REP existent déjà de manière opérationnelle, et 11 supplémentaires sont en cours d'être créées, suite à la loi AGECE [18, 19].

Toutefois, en comparant filière REP et SCC, il semble que cette dernière soit bien plus riche de sens et porteuse de création d'activités. Pour nous en convaincre, nous proposons d'observer la création et la maîtrise de la valeur des productions dans des contextes d'économie linéaire puis circulaire, faisant ou non référence à la SCC et

aux filières REP, et en nous appuyant sur les impératifs R qui caractérisent si bien les différentes formes de circularité.

Structuration de la SCC

Une représentation éloquentes des différences de considération de la valeur, selon que nous soyons dans une économie linéaire ou circulaire, est celle du modèle de la pyramide d'Achterberg [3] (figure 1). Pour accéder au sommet de la pyramide, où se situe l'usage des produits, il faut passer par un processus de création de valeur, qui part de l'extraction des matières premières, ce qui permet la fabrication de pièces, lesquelles seront ensuite assemblées pour constituer le produit final mis à disposition de l'utilisateur final par les activités de distribution. En économie linéaire, lorsque l'usage se termine, le produit est jeté et la valeur qu'il porte est perdue : la perte de la valeur est assimilable à la pente de la pyramide qui est dévalée sans autre solution. Au contraire, en économie circulaire, des boucles de retour permettent d'envisager de conserver un maximum de la valeur, en Réparant, Réutilisant, Rétrofitant, Refabriquant, Recyclant ou Régénérant ce qui avant était vu comme un déchet. Si on ajoute à cela une approche d'éco conception fondée sur la Réduction des moyens et matières pour réaliser le produit, nous obtenons *in fine* un modèle d'impératifs dit '7R'. Ce modèle 7R offre l'avantage de bien visualiser les boucles de circularité assurant la pleine maîtrise de conservation de la valeur et permettant la remise en jeu de tout ce qui peut l'être, selon son état de 'dégradation'.

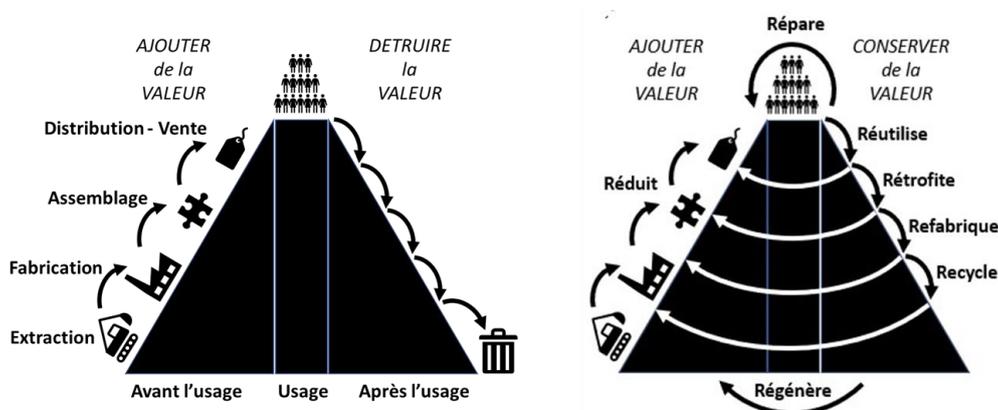


Fig. 1. De l'économie linéaire à l'économie circulaire : la pyramide d'Achterberg [3]

Depuis, ce modèle 7R a été enrichi à un modèle 10R par [20, 21, 2]. Nous donnons ici les définitions de ces impératifs 10R et des précisions complémentaires :

R0 : Refuser – a. Ne pas acheter le produit – b. Acheter moins en volume – c. Repousser les offres d'usage superflues physiques comme les suremballages ou les sacs ou servicielles comme des options inutiles – d. Refus des matières vierges/brutes, dangereuses, non issues de recyclage,

R1 : Repenser - a. Rendre l'utilisation du produit plus intensive en partageant son usage dans le temps (séquentiel) b. Rendre l'utilisation du produit plus intensive en partageant son usage dans l'instant (simultané) - c. Augmenter la durée d'usage du produit en allongeant sa durée de vie,

R2 : Réduire – a. Réduction des quantités de matières utilisées – b. Réduction de la variété de matières différentes associées dans la production du produit – c. Réduction des pertes dues à de la non qualité,

R3 : Réutiliser – a. Réutilisation directe du produit pour un usage identique, par un utilisateur tiers,

R4 : Réparer – a. Réparation de défauts mineurs par l’usager, – b. Remplacement par un spécialiste ou le fabricant de l’objet des composants défectueux,

R5 : Reconditionner – a. Rénovation du produit, en gardant sa structure globale et en remplaçant certains éléments dégradés afin que le produit fonctionne comme à neuf – b. Rétrofiter par la remise à neuf en modernisant une partie du produit à partir d’une base réemployée, ceci permettant d’obtenir de meilleures performances que celles obtenues initialement,

R6 : Remanufacturer – a. Refabriquer de nouveaux produits à partir de composants de produits usagés – b. Désassemblage de produits, contrôle de ses composants et validation de ces derniers pour réinsertion dans un processus industriel de fabrication du même modèle de produit, en remplacement de composants de première obtention,

R7 : Réorienter – a. Réaffectation de composants, vérifiés et certifiés pour une fonction donnée, dans un nouveau contexte d’usage différent de celui initialement considéré,

R8 : Recycler – a. Recyclage de chutes de postproduction – b. Recyclage de déchets triés de postconsommation – c. Recyclage de déchets ménagers (matières organiques et matériaux solides) – d. Extraction de matières à forte valeur et/ou stratégiques – f. Régénération de matières,

R9 : Récupération énergétique – a. Incinération des déchets pour la production d’énergie – b. Méthanisation de biomasse pour la production d’énergie.

Cet éventail de possibilités dépasse largement le cadre d’action des filières REP. En effet, ces dernières adressent principalement le statut de déchet, en termes de traitements, et accessoirement de préventions. Or, il faut en amont prévenir l’apparition de ce statut pour favoriser autant que possible la conservation de la valeur investie dans la fabrication des produits. Ainsi, il apparaît que la complexité des 10R nécessite une organisation inter organisationnelle sophistiquée, avec de nombreuses parties prenantes gravitant autour de chaque R, l’ensemble pouvant être répliqué en autant d’instances que de secteurs industriels et d’échelles territoriales. Pour essayer de clarifier les choses et les présenter selon une approche systémique, nous proposons de conserver l’approche illustrative du modèle pyramidal de lier les différents concepts impliqués dans le déploiement d’une Supply Chain Circulaire, en reprenant les avantages de la pyramide d’Achterberg, en y intégrant les 10R et en identifiant les différents types de flux et de parties prenantes : la ‘pyramide de la Supply Chain Circulaire’ (Figure 2). Ce modèle peut être abordé selon 3 grandes phases ayant une convergence de buts :
- la construction de la valeur, au travers de démarches d’éco conception : nous sommes là dans la phase ascendante de la pyramide, dans laquelle est ajoutée progressivement de la valeur aux produits élaborés ; nous verrons qu’au-delà des R0 & R2 (Refuser et Réduire), cette phase a un rôle primordial dans la réussite des 2 suivantes, pour augmenter les conditions d’usage et faciliter le fonctionnement de la SCC (R1c) ;
- la maximalisation de l’usage nominal : nous sommes ici au sommet de la pyramide, qui constitue la finalité objectivée de tout le travail d’élaboration, la phase d’usage, afin

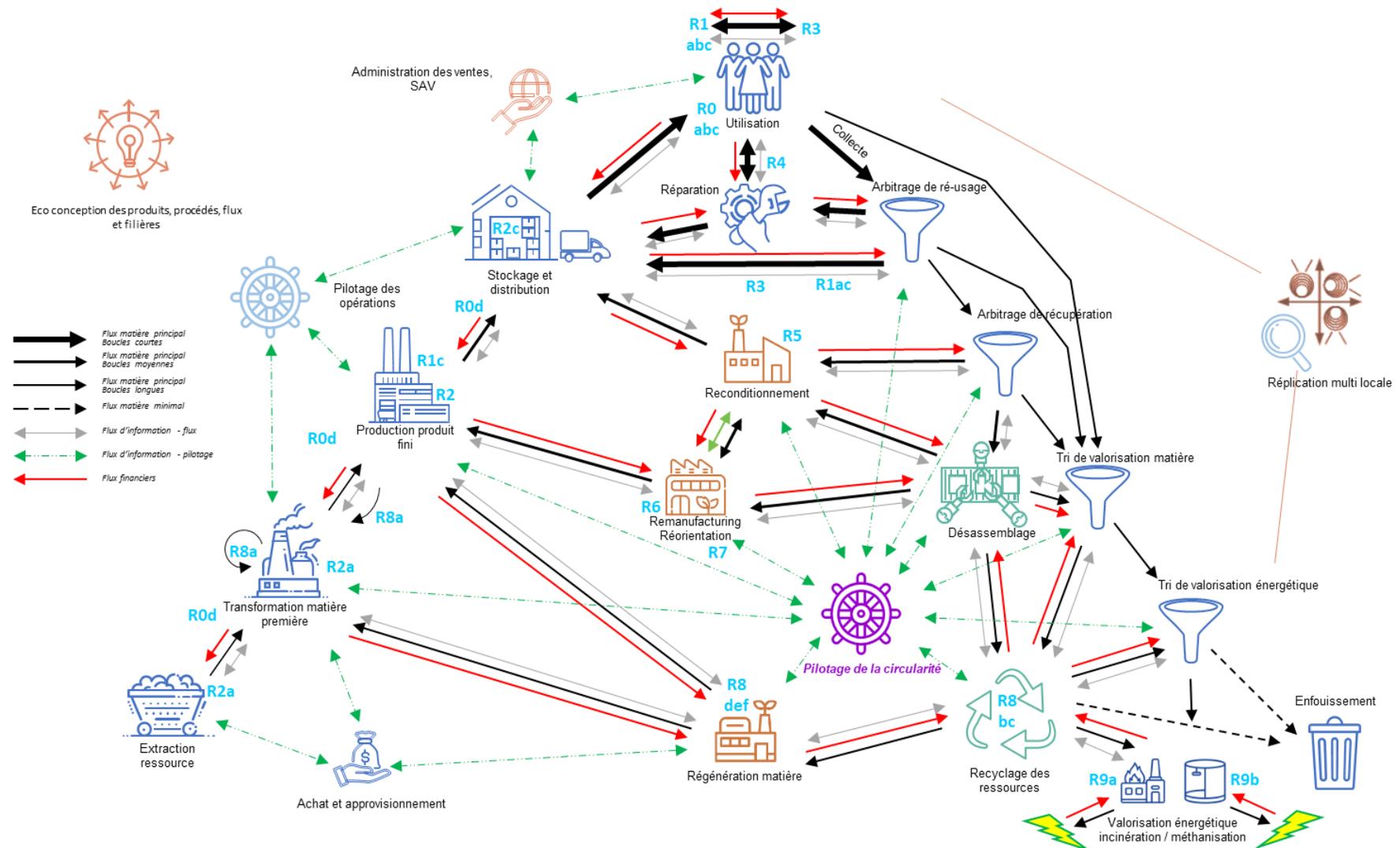


Fig. 2. Pyramide de la Supply Chain Circulaire

de répondre à un besoin exprimé par les utilisateurs ; les impératifs R1a & R3 visent à profiter au maximum des efforts d'obtention précédemment fournis, en conservant élevées les fonctionnalités du produit, en recherchant à intensifier son usage, tout en allongeant la durée de fonctionnement en conditions opérationnelles du produit ,

- la conservation maximale de la valeur : dans cette phase de déclin du produit, il est mis en œuvre des solutions pour limiter les pertes de valeur ; Nous verrons les implications sur la SCC, et en bout de chaîne l'intérêt des filières REP.

Nous allons maintenant reprendre et détailler ces 3 grandes phases.

Eco Construction de la valeur

Cette phase entend aborder l'élaboration des produits, avec en ligne de mire l'accroissement de l'usage et la facilitation des tâches des filières REP et des SCC associées.

Lors de l'élaboration des produits, les grandes étapes traversées, permettant l'obtention finale des produits, sont l'extraction et la préparation des matières premières, la fabrication de chaque élément constitutif du produit final, l'assemblage du dit produit, et enfin sa mise sur le marché (logique de distribution). Il s'agit donc d'ajouter de la valeur, dans un contexte de durabilité immédiate, de robustesse escomptée et de circularité ultérieure.

Les impératifs R0d (Refuser certaines matières) et R2 (Réduire) sont classiques en éco-conception [21, 12]. R0d anticipe l'apparition de problèmes ultérieurs, tels que des maladies ou des pollutions dus à des matières dangereuses, ou des ruptures d'approvisionnement en matières premières, tandis que R2 induit une recherche de la réduction des pertes de production (moins de matières utilisées, moins de pièces ayant des défauts, moins d'assemblages ratés, moins de produits non vendus). Ceci précède l'usage nominal du produit, durant son cycle d'utilisation. Il est également souhaitable que ce cycle d'utilisation montre une grande robustesse face aux sollicitations, de manière à réduire les occurrences de réparation et surtout à allonger la durée d'usage. En cela, la réduction des volumes de matières premières est à mettre en regard des conditions de résistance et de durée de vie, que nous qualifierons de robustesse du produit et nécessaire pour R1(Repenser) et R2 (Réutiliser-Réemployer). L'expérience a montré par exemple que le développement de l'économie de la fonctionnalité a conduit ses opérateurs à élaborer des produits plus résistants, sans obsolescence prématurée. Plus de matières peut aussi être en lien avec la performance en aval pour faciliter les phases R4 (Réparer), R5 (Reconditionner), R6 (Remanufacturer), R7 (Redéfinir).

D'autres impératifs en R1c dans l'éco conception doivent favoriser la mise en œuvre de SCC et de filières REP. Dès l'utilisation des matières premières, si l'*intrication* ou la *mixité* (le mélange) de matières est réalisée de manière irréversible, cela bloquera la possibilité de récupérer ces matières ou d'envisager un désassemblage. Par exemple, l'opercule de certains pots de yaourt est un millefeuille de couches fonctionnelles difficiles à séparer. En microélectronique, les composants comportent

tout un ensemble de matières premières, dont certaines sont rares, à haute valeur ou stratégiques. En fin de vie, à l'état de Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE), cela constitue des gisements de matières [18], qualifiés de mines urbaines. Les taux de matière y sont parfois plus importants que dans les mines géologiques naturelles. Ces taux de matière peuvent aussi être bien plus dilués dans le produit manufacturé que dans la croûte terrestre. Il est ainsi compliqué de récupérer intégralement la (les) matière(s) lors d'une phase de désassemblage. Dans le cas des batteries automobiles, la récupération de la matière nécessite de désassembler les cellules, puis de les broyer en une poudre dont on extraira et triera les différents métaux, par combustion ou par réaction chimique. Pour prévenir ces difficultés, l'éco-conception doit être dans une approche Centrée-Produit s'intéressant aux usages et à la cascade des valorisations possibles du produit dans son intégralité ou en composants, dans une approche système. De nombreuses voies sont possibles, parfois contradictoires dans les objectifs à atteindre : utiliser des matériaux recyclables, diminuer le nombre de matériaux différents, employer des matériaux avec des caractéristiques permettant de les séparer aisément lors du recyclage, réduire le nombre de composants, simplifier les processus de démontage, laisser en libre accès les composants des produits pour permettre des réparations, des reconditionnements, le up-cycling... Ainsi, lors de l'étape d'assemblage des composants du produit, il faut non seulement envisager comment faciliter le démontage, mais il est nécessaire d'aller au-delà en développant la *modularité* [4] la *standardisation* et la *lisibilité* [16] (totale transparence sur ce que fait exactement le produit/module/sous ensemble/composant). Par exemple, la technologie développée dans un FairPhone ('design for maintainability') devrait inspirer l'éco conception de tous les produits, et permettre non seulement de simplifier la réparabilité, leur maintien en condition opérationnelle et/ou leur rétrofit, mais également de faciliter le ré-usage de composants pour d'autres usages. Par exemple, un circuit électronique spécialisé pour l'alimentation d'un produit pourrait être utilisé pour alimenter un autre produit totalement différent, pour peu qu'il y ait compatibilité des caractéristiques électriques, connectiques et dimensionnelles d'un module supportant ce circuit...

Afin de renforcer la performance et la récupération composants ou matières, il est impératif de *tracer* l'usage du produit tout au long de son cycle de vie [16], afin de déterminer en fin d'usage les actions optimales à mettre en œuvre en fonction des informations retours issues de ces conditions d'usage. Ce serait par exemple juste remplacer les éléments dégradés, ou changer l'usage du produit, ou le démanteler. Ainsi les batteries automobiles peuvent changer d'usage par une seconde vie dans les habitats, pour le stockage de l'énergie dans un contexte d'autoconsommation.

Cet aspect représente un élément important pour faciliter la mise en œuvre des SCC. Une réflexion est à mener quant à l'opérationnalisation de cette traçabilité (sérialisation des composants clefs, implémentation des systèmes de traçabilité *via* des blockchains, identification matriculaire *via* des 'PUID' (Product Unique ID) intégrés dès la fabrication. Les traitements et processus mis en œuvre dans les SCC sont extrêmement dépendants de telles informations. Conjointement, de nouvelles fonctionnalités et des services innovants pourraient être apportées par les SCC en fonction du déploiement de ces outils de traçabilité.

Usage et intensification d'usage

Dans le haut de la pyramide se situent les conditions optimales d'usage du produit. Face à un besoin avéré d'usage, une solution technique a été élaborée, cela a conduit à la réalisation d'un produit qui propose un service rendu répondant au besoin exprimé lors de la conception. En phase fonctionnelle, la maximalisation d'usage permettra de rentabiliser économiquement le coût du produit pour l'acheteur. L'intensification d'usage [12, 2] s'appuie sur le partage de l'usage du produit soit dans le temps en séquentiel R1a (souvent caractérisé par l'économie de la fonctionnalité), soit dans l'instant en simultané R1b (souvent caractérisé par l'économie collaborative). Plus un produit est utilisé de manière intensive, plus le retour sur l'investissement initial (coût économique, impacts environnementaux et sociaux) généré tout au long des étapes de fabrication/distribution est bénéfique. Il s'agit de tirer le meilleur parti des produits, maximiser l'efficacité (service rendu / coût d'obtention) et/ou de réduire la valeur d'usage (coûts économiques et environnementaux d'obtention / durée d'utilisation).

En économie circulaire, selon le modèle des 10R, cette intensification d'usage renvoie au R1 (Repenser) et satisfait le R0 (Refuser) en évitant l'achat d'un nouveau produit, les besoins de l'utilisateur sont satisfaits à moindre mobilisation de produits/matières : ceci permet, de fait, un gain matière par la « non fabrication » d'un produit qui aurait offert le même usage. Dans le cadre de ces usages collectifs, la SCC doit être structurée pour organiser et opérer les maintenances préventives grâce au suivi du nombre d'usages, et pour orchestrer le rééquilibrage des produits selon les lieux d'usage afin de maximiser les chances d'utilisation.

Un autre levier pour l'intensification de l'usage est l'augmentation de la durée de vie du produit (R1c), dans le cadre d'une éco-conception pour anticiper sur la capacité à pouvoir faire une mise à niveau des performances du produit (R2), sur sa Réparabilité (R4), sur ses opportunités de Reconditionnement (R5), de Remanufacturing (R6) ou de Réorientation (R7) de l'usage de ses composants. De ce fait, le renforcement de sa robustesse impacte sur les quantités et choix de matières mises en œuvre lors de sa fabrication : l'impératif de réduction des matières premières peut s'effacer devant les gains de durée de vie. Au-delà de l'utilisation prolongée d'un produit par son détenteur, la plupart des propositions allant dans ce sens reposent sur la collaboration entre différentes parties prenantes, qui s'organisent dans l'optique d'une utilisation plus efficace des ressources et d'une réduction de l'empreinte écologique. L'économie de la fonctionnalité (R1a) est un bon exemple de maximalisation de l'usage, mais il en existe bien d'autres, comme la location, le partage, le prêt, la seconde main et le don, la multipropriété (R1b), impliquant des mécanismes spécifiques de gestion et de passation de propriété du produit et de SCC. Une réflexion est donc à mener quant à l'orchestration de boucles circulaires par la SCC, pour mettre en œuvre la logistique intra-organisation.

Si l'usage du produit ne peut plus être effectif, d'autres mécanismes de conservation d'une fraction maximale de la valeur (Remanufacturer R6 – Réorienter R7 – Recycler R8 – Récupérer l'énergie R9) sont à anticiper. L'organisation et l'agilité

du système nécessitera une approche SCC dont une partie sera intégrée dans le système organisationnel des filières REP [15].

Boucle de conservation de la valeur

Le maintien de l'usage nominal (robustesse, durabilité, réparation et seconde vie), la possible intensification de l'usage, de transmission du produit, de sa réparation et de sa mise à niveau, impliquent de multiples acteurs : utilisateurs, coordinateurs, gestionnaires des flux financiers et des flux physiques, etc... et exigent une Supply Chain de boucles entremêlées, la SCC, pour des flux physiques maîtrisés qui optimisent au plus haut l'usage du produit enserré dans une véritable « toile circulaire » qui l'empêche de devenir déchet.

La dégradation dans le temps de la performance du produit, qui ne peut plus être maintenu dans son niveau d'usage initial (réparation inaccessible, incompatibilité à une évolution de son environnement, objet dégradé à moindres performances fonctionnelles...), enclenche une démarche d'arbitrage vers la bonne filière, en conservant au maximum la valeur du produit et en évitant la destruction sans valorisation. Conserver en l'état pour quel usage ? Démontez pour récupérer les composants fonctionnels ? Recycler pour récupération matière ? pour Récupération d'énergie ? [15]. Arbitrer implique de définir au préalable le meilleur niveau de traitement : R3 (Réutiliser), R4 (Réparer) ou R5 (Reconditionner), R6 (Remanufacturer), R7 (Réorienter) ou R8 (Recycler), R9 (Récupérer l'énergie). Cette fonction 'arbitrer' peut être approfondie, et ceci structure la troisième phase dite de conservation de la valeur, qui est donc mise en œuvre au travers de 3 types de boucles de SCC : boucles courtes, moyennes et longues.

R3 et R4 impliquent des *boucles courtes préservant l'intégrité du produit et* garantissant son usage nominal, donc un maintien d'une valeur économique élevée permettant la rentabilité de ces étapes. Ces boucles imposent une organisation extrêmement efficace de la SCC pour compenser la dispersion des produits induite par la phase de production, dans laquelle les flux de produits sont maîtrisés et gérés de manière massifiée, afin de réduire les coûts d'obtention, puis l'étape de distribution qui consiste en un éclatement des produits auprès des différents clients/utilisateurs finaux. Cette dispersion spatiale devient un obstacle pour la mise en place d'un traitement de masse de la SCC dans les boucles courtes. La proximité géographique et/ou de services individualisés avec les clients/utilisateurs est le fondement de la performance. Elle implique un pilotage de la SCC basé sur une première analyse propre à chaque produit : vérification de la qualité ou de l'état du produit, estimer s'il faut une réparation simple ou si le produit peut être réinséré localement sur le marché... Cette première analyse orientera, en fonction, les flux de chaque produit vers la réparation ou la remise à niveau ou directement vers la remise sur le marché, *via* par exemple une plateforme physique et/ou virtuelle de revente en ligne, pour générer plus d'opportunités de transactions commerciales auparavant inaccessibles. Dans un contexte de généralisation de telles pratiques, les SCC associées à chaque produit/matière doivent réinventer leur management, être plus réactives, adaptatives, mutualisées et quasiment individualisées. Les volumes nécessaires à un bon fonctionnement du point de vue économique

viendront alors de la capacité à agréger et juxtaposer de très nombreux flux aux petits volumes, rejoignant ainsi certains objectifs communs aux organisations logistiques du futur, telles que définies dans le paradigme de l'Internet Physique [22, 23 & 24].

Lorsque le produit n'est plus directement opérationnel, avec des traitements tels que le démontage, le Reconditionnement (R5), le Remanufacturing (R6) et/ou la Réorientation (R7), nous entrons dans de nouveaux processus de valorisation, que nous pouvons qualifier de *boucles moyennes*. Dans ce cas, les produits font l'objet de modernisation ou de changement d'usage. Pour cela, de nouvelles parties prenantes, spécialisées dans la mise en œuvre de ces compétences spécifiques, deviennent centrales dans les SCC à déployer. S'appuyant sur des modèles inter-organisationnels avec des flux pré caractérisés (*on sait d'où ça vient, où ça va et qui fait quoi – seules les quantités peuvent fluctuer*) les SCC dédiées au pilotage de ces flux bénéficient d'un environnement d'expertises favorables garantissant un haut niveau de maîtrise. Ces *boucles moyennes* de SCC ne sont pas nécessairement sous les contraintes de délais et réactivités propres aux R3 (Réutiliser) et R4 (Réparer). Les boucles moyennes des R5 (Reconditionnement), R6 (Remanufacturer) et R7 (Redéfinir) sont plus accessibles à la massification des flux afin de conserver une valeur résiduelle importante. Les flux à opérationnaliser doivent toutefois surmonter quelques difficultés, comme par exemple lorsqu'une expertise de haut niveau est requise :

- 'Quel nouvel usage donner à un produit ?' requière l'idée d'une reconception sous contrainte, en fonction de l'état du produit, cela demande de hautes compétences,
- 'Que faire de ses composants valides ?' nécessite un savoir important en ingénierie,
- 'Comment reprendre le produit et le rétrofiter, c'est-à-dire l'upgrader pour qu'il retrouve un usage souhaité, potentiellement plus performant ?' demande un savoir-faire technique de haut niveau.

De ce fait, les SCC associées à ces boucles moyennes doivent intégrer des expertises (humaines et/ou de systèmes automatisés) sur ces arbitrages, pour des contrôles et orientations individualisés, tout en les orientant vers une mutualisation et une massification des flux.

Dans le cas où il n'y a plus d'opportunités à conserver économiquement ou techniquement la valeur fonctionnelle, y compris dégradée, du produit, l'objectif de conservation de son usage est abandonné et le produit prend le statut de déchet. Les opérations de valorisation fonctionnent selon des *boucles longues*. C'est à ce niveau que la SCC correspondante s'inscrit pleinement dans la démarche principale et structurante des filières REP : diminuer les externalités négatives générées par le déchet. Le recyclage (R8) matière, avec si besoin une régénération en un autre usage matière (déclassement de la matière, mélange de plusieurs matières, transformation...) nécessite un pilotage fin des flux par une SCC adaptée. Nous trouvons de plus en plus d'exemples de processus ingénieux innovants transformant des déchets en coproduits, permettant ainsi de recréer de la valeur. Un exemple saillant est celui d'une société récupérant les tourteaux agricoles bio issus de passage sous presse pour extraction d'huiles. Après une phase d'assèchement de ces tourteaux, ils sont réduits en farines très fines, qui restent fortement imprégnées de la (des) saveur(s) de la plante d'origine. La dernière étape consiste à confectionner avec ces farines des biscuits d'apéritifs selon

différentes recettes qui permettent de créer toute une gamme de produits extrêmement innovants. Un autre exemple de régénération matière est la transformation de vieux jeans ou de chûtes textiles en panneaux isolants thermiques et phoniques.

L'étape ultime porte sur la valorisation énergétique par incinération avec récupération d'énergie ou méthanisation (R9). La capacité à organiser la collecte, le tri et les mélanges de matières calorifiques ou méthanogènes, influe fortement la performance du résultat économique de l'opération.

Pilotage de la circularité

La pluralité des activités de conservation/valorisation de la valeur, qui constitue l'objectif global de circularité des SCC, mise en évidence dans le modèle proposé, montre la complexité du système de pilotage à envisager. En effet, toutes ces activités visant à maximiser la circularité nécessitent une coordination et une collaboration entre les parties prenantes, tout comme peuvent l'être les activités de production des produits, *via* le pilotage des opérations.

Ce pilotage de la circularité nécessiterait d'anticiper les niveaux de performances en matière d'usage attendues sur les produits/matières, dans un cadre de contraintes spécifiques et à forte variabilité :

- la non prévisibilité des flux à traiter : les différentes fins d'usage, que ce soit par renoncement de l'utilisateur (*le produit est encore utilisable*) ou par défaillance du produit (*panne, rupture...*) ont des occurrences qui sont aléatoires, exigeant une adaptation de manière décentralisée, au plus près géographiquement face à des évolutions spatiales d'opportunités fortement variables [15],
- la grande dispersion des flux d'entrée : les collectes se font au niveau des utilisateurs, ou de petits groupes d'utilisateurs, consécutifs de la dispersion due à la distribution première et la vie d'usage des produits. Pour assurer une performance économique, la massification est souhaitable, et cela nécessite d'être en capacité d'identifier et de traiter individuellement chaque élément tout en les regroupant dans des systèmes de flux efficaces, sous la coordination du management de la SCC.
- la fluctuation de la demande :
 - a- les produits ne sont pas ou peu soutenus par un marketing créant une attente, les analyses de besoins sont peu maîtrisées, les attentes consommateurs sont soumises à fortes influences (innovations, coûts, modes...) ne permettant pas de structurer une colonne vertébrale stable pour la SCC.
 - b – variabilité de la demande matière et donc de sa valeur, variabilité conjoncturelle (exemple plastique recyclé) ou structurelle (exemple : le cuivre deviendra dans les 15 prochaines années une matière en raréfaction impliquant sa récupération sur des objets pourtant fonctionnels, comme par exemple le démantèlement de tout le réseau téléphonique cuivre pour récupérer la matière),
- la recherche d'intégrations et d'interactions entre les différentes boucles amène des effets de bord positifs : lors d'une étape de reconditionnement (R5) récupérer des composants qui seront remanufacturés (R6) ou réutilisés en pièces détachées (R7), etc...

Il en résulte une grande variabilité des flux à gérer au sein des SCC, en particulier sur les boucles courtes et moyennes où l'effet de massification ne permet pas encore d'envisager une certaine stabilité, compatible avec une planification sereine des activités.

Le pilotage de la circularité pose en fait de nouvelles exigences fortes et nécessite de réfléchir en profondeur au type de pilotage souhaité. Des solutions autour du pilotage auto organisé sont sûrement à explorer [22, 24].

Conclusion

Dans cette proposition, nous avons voulu montrer d'une part la complexité des activités autour de la Supply Chain Circulaire et d'autre part donner des clefs de lecture pour une appropriation plus structurée et ainsi présenter une vision du futur possible.

En cela, la « **pyramide de la Supply Chain Circulaire** » met en exergue l'importance du sommet de la pyramide, espace où se situe la valeur d'usage pleinement opérationnelle, exigeant des moyens pour toujours mieux utiliser les produits déjà existants sans en produire de nouveaux, en intensifiant l'usage par l'augmentation de la durée de vie, avec des indicateurs comme le taux horaire d'usage et ou le nombre d'utilisateurs, en séquencés ou en simultanés.

Ceci implique la mise en œuvre de solutions techniques, organisationnelles, économiques, incluant une appropriation de la société, sur des boucles courtes de SCC, particulièrement réactives et adaptatives, au service du maintien du produit en conditions opérationnelles d'usage, en recherche d'intensification, avec un pilotage *ad hoc* qui reste essentiellement à inventer. Il s'agit de tisser une « toile circulaire » autour du produit. La SCC doit de fait être structurée pour éviter le recours aux boucles moyennes et longues qui ne ferait que solliciter les filières REP et/ou les activités en bout de chaîne dans un dernier recours.

Il est clairement démontré que la conservation maximale de la valeur nécessite en amont une éco conception anticipant les caractéristiques de la SCC et des filières REP pour plus d'efficacité. Ceci devient fondamental dans le cas de SCC polyvalentes, mais nous pourrions voir apparaître des SCC sectorisées plus spécialisées. L'exemple vient de la REP VHU (Véhicules Hors d'Usage) : Renault et Stellantis refusent d'intégrer un éco-organisme commun, choisissant d'organiser eux-mêmes la responsabilité par un maillage organisationnel répondant à l'obligation légale TOUT en leur assurant une maîtrise de la matière, des composants et des produits de seconde main AFIN de garantir l'approvisionnement de leur chaîne de production (voitures neuves et pièces de réparation) ET de développer de nouveaux business models (voitures occasions, économie de la fonctionnalité) ET d'enlever les accès à ces gisements de matières/composants/produits à d'autres acteurs économiques (guerre économique). Ceci présage peut-être du futur de la SCC pour les opérateurs importants.

Les perspectives de recherche sur la SCC sont enthousiasmantes, au service de développement de la transition environnementale du monde socio-économique, en cohérence avec l'ODD 12 de l'Agenda 2030 des Nations Unis.

Références

- [1] Citwell, Soroa, INEC (2023). La supply chain circulaire, pivot de la réindustrialisation verte, <https://institut-economie-circulaire.fr/wp-content/uploads/2023/04/Plaidoyer-Supply-Chain-Circulaire-mars-2023.pdf>
- [2] Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*, **127**, 221-232.
- [3] Achterberg, E., J. Hinfelaar, and N. M. P. Bocken. Master circular business models with the Value Hill. *White paper*, (September 2016)
- [4] Nasir, M. H. A., Genovese, A., Acquaye, A. A., Koh, S. C. L., & Yamoah, F. (2017). Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry. *International Journal of Production Economics*, **183**, 443-457.
- [5] De Angelis, R., Howard, M., & Miemczyk, J. Supply chain management and the circular economy: towards the circular supply chain. *Production Planning & Control*, **29(6)**, 425-437, (2018).
- [6] Mangla, S. K., Luthra, S., Mishra, N., Singh, A., Rana, N. P., Dora, M., & Dwivedi, Y. (2018). Barriers to effective circular supply chain management in a developing country context. *Production Planning & Control*, **29(6)**, 551-569.
- [7] Yang, M., Smart, P., Kumar, M., Jolly, M., & Evans, S. (2018). Product-service systems business models for circular supply chains. *Production Planning & Control*, **29(6)**, 498-508.
- [8] Guide Jr, V. D. R., & Wassenhove, L. N. V. (2006). Closed-loop supply chains: an introduction to the feature issue (part 2). *Production and Operations Management*, **15(4)**, 471-472.
- [9] Farooque, M., Zhang, A., Thürer, M., Qu, T., & Huisingh, D. (2019). Circular supply chain management: A definition and structured literature review. *Journal of Cleaner Production*, **228**, 882-900.
- [10] Ritzén, S., & Sandström, G. Ö. (2017). Barriers to the Circular Economy—integration of perspectives and domains. *Procedia Cirp*, **64**, 7-12.
- [11] Farooque, M., Zhang, A., & Liu, Y. Barriers to circular food supply chains in China. *Supply Chain Management: An International Journal*, **24(5)**, 677-696, (2019).
- [12] Geissdoerfer, M., Morioka, S. N., de Carvalho, M. M., & Evans, S. (2018). Business models and supply chains for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, **190**, 712-721.
- [13] Lahane, S., Kant, R., & Shankar, R. (2020). Circular supply chain management: A state-of-art review and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, **258**, 120859.
- [14] Taddei, E., Sassanelli, C., Rosa, P., & Terzi, S. (2022). Circular supply chains in the era of Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, **170**, 108268.
- [15] Dull, D. (2021). *Circular supply chain*, ISBN: 9798463191410
- [16] Orji, J. & Ojodi, F. (2023), *The Circular Supply Chain, Basic Principles and Techniques*, Taylor & Francis
- [17] Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires. *Cadre général des filières à responsabilité élargie des producteurs (REP)*.
- [18] Micheaux, H. (2020). La gestion des déchets et la responsabilité élargie du producteur, un modèle français qui fait référence. *Le journal de l'école de Paris du management*, **6**, 23-30.
- [19] Loi n° 2020-1052 du 10 août 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire, *Journal officiel de la République française*, n° **0184** du 11 août 2020, texte n° 1 <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-anti-gaspillage-economie-circulaire>
- [20] Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular economy: measuring innovation in the product chain. *Planbureau voor de Leefomgeving*, (2544).
- [21] Reike, D., Vermeulen, W. J., & Witjes, S. (2018). The circular economy: new or refurbished as CE 3.0?—exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. *Resources, conservation and recycling*, **135**, 246-264.
- [22] Ounnar, F., Pujo, P. (2010). Isoarchic and Multi-criteria Control of Supply Chain Network. In: *Artificial Intelligence Techniques for Networked Manufacturing Enterprises Management*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-119-6_6
- [23] Montreuil, B. (2011). Toward a Physical Internet: meeting the global logistics sustainability grand challenge. *Logistics Research*, **3(2-3)**, 71–87.
- [24] Pujo, P. (2012). *Pilotage isoarchique des systèmes de production*. Éditions universitaires européennes