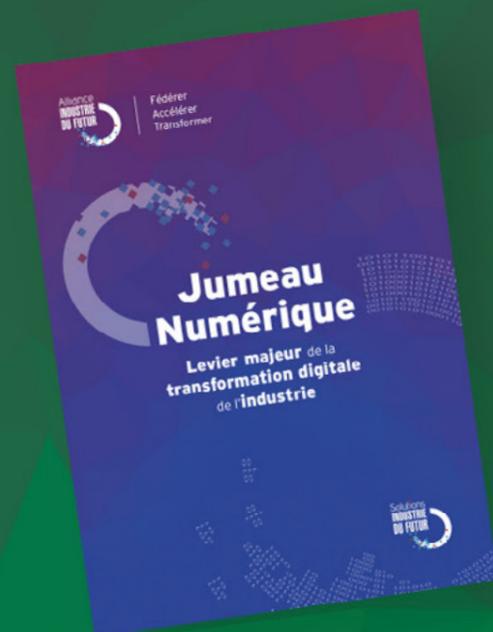


# Jumeau Numérique

**Un levier de réduction des impacts  
environnementaux de l'industrie ?**



Publiée en mars 2023, cette première contribution du Comité Technique « Jumeau Numérique » avait pour objectif d'éclairer et d'orienter les industriels dans leurs réflexions en livrant une définition du jumeau numérique et en détaillant de nombreux cas d'usage industriels.



# LE JUMEAU NUMÉRIQUE

## UN LEVIER DE RÉDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE L'INDUSTRIE?

### Cartographie des opportunités industrielles dans un contexte d'économie circulaire

Aujourd'hui, l'industrie se doit de faire face au défi du changement climatique et œuvrer pour un avenir plus durable. Dans ce document, nous explorons le potentiel du Jumeau Numérique pour favoriser le développement durable<sup>1</sup> et une économie circulaire<sup>2</sup>.

Notre précédente brochure proposait une définition du Jumeau Numérique et en détaillait 23 cas d'usage, dont certains portaient une icône en forme de feuille. Celle-ci indiquait que le cas d'usage pouvait contribuer à réduire l'impact des activités industrielles sur l'environnement. La présente brochure détaille ces différentes situations de réduction d'impact environnemental grâce au Jumeau Numérique, comme par exemple :

- la réduction de la consommation d'énergie en production,
- la limitation des gaz à effet de serre émis lors des approvisionnements ou livraisons,
- la diminution de la consommation de matières grâce à une réutilisation ou un recyclage accrus.

Ce document, à visée pédagogique, s'adresse à toutes les personnes qui désirent réduire l'impact environnemental de la production de leur entreprise, notamment dans les PME, et qui, par ailleurs, envisagent l'implémentation d'un Jumeau Numérique.

Le Jumeau Numérique peut alors s'imposer en complément d'une démarche d'Écoconception produit, laquelle est désormais intégrée dans la stratégie de 75 % des entreprises françaises et généralisée à tout le portefeuille de produits pour 21 % d'entre elles<sup>3</sup>. Le Jumeau Numérique peut aussi fournir les moyens de quantifier les émissions de gaz à effet de serre, de planifier des initiatives de développement durable et d'assurer la conformité aux normes de durabilité des entreprises industrielles.

Il nous semble important de souligner ici que la vision du Jumeau Numérique comme un moyen de réduire significativement, et dans de nombreuses situations, l'impact environnemental des activités industrielles doit être nuancée. En effet :

- 1 En premier lieu, les réductions d'impact environnemental présentées dans ce document doivent être validées au cas par cas par une Analyse de Cycle de Vie.
- 2 Une fois cette étude réalisée, il convient de mettre en balance les réductions d'impact attendues avec les impacts environnementaux directs de la technologie du Jumeau Numérique, notamment lorsqu'elle s'appuie sur une collecte massive de données et une intelligence artificielle gourmande en ressources informatiques et de communication. Cette question cruciale fait l'objet du chapitre 4 : « Impacts environnementaux du Jumeau Numérique lui-même ».

*Note : les aspects sociétaux qui complètent les aspects environnementaux en tant que piliers classiques du développement durable sont rapidement abordés à la fin de ce document.*

<sup>1</sup> «Le développement durable est un mode de développement et de gestion des ressources qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs.» Rapport Brundtland, Our Common Future, G.H. Brundtland, World Commission on Environment and Development, 1987.  
<sup>2</sup> Le concept d'économie circulaire est présenté dans le chapitre suivant.  
<sup>3</sup> Source ADEME : Gagnez en performance avec l'écoconception.

# SOMMAIRE

## 01 CONTRIBUTION DU Jumeau Numérique À L'Économie Circulaire

- 1.1 L'Économie Circulaire comme levier pour réduire les impacts environnementaux 06
- 1.2 Les 7 piliers de l'ADEME 10

## 02 PRÉSENTATION DES FICHES « OPPORTUNITÉ DE RÉDUCTION D'IMPACT »

- 2.1 Catégories d'indicateurs environnementaux pour le pilotage industriel 12
- 2.2 Opportunités de réductions d'impact cartographiées selon les différents cas d'usage du Jumeau Numérique 14
- 2.3 Cartographie des réductions d'impact selon le schéma de l'Économie Circulaire 16

## 03 OPPORTUNITÉS DE RÉDUCTION D'IMPACT

### PILIER 1 | EXTRACTION/EXPLOITATION ET ACHATS DURABLES : RÉDUCTION DE L'IMPACT DES APPROVISIONNEMENTS

- [Appro-01] Réduction de l'impact environnemental de la chaîne d'approvisionnement 18
- [Appro-02] Réduction de l'impact environnemental de l'acheminement des composants 19

### PILIER 2 | ÉCOCONCEPTION / ÉCOCONCEPTION PRODUIT

- [ÉcoDesign-01] Augmentation de la durée de vie du produit et réduction de l'impact de l'usage par l'écoconception 20

### PILIER 2 | ÉCOCONCEPTION / RÉDUCTION DE L'IMPACT DE LA PRODUCTION

- [Production-01] Réduction de la consommation d'énergie et de ressources d'une ligne de production 21
- [Production-02] Réduction de l'empreinte matière et énergétique de la production grâce à la diminution du taux de rebut 22

### PILIER 2 | ÉCOCONCEPTION / RÉDUCTION DE L'IMPACT DE L'OUTIL INDUSTRIEL

- [Outil Indus-01] Augmentation de la durée de vie d'un équipement et de ses composants 23
- [Outil Indus-02] Optimisation et adaptation dynamique de l'environnement IT/OT 24
- [Outil Indus-03] Diminution de l'impact environnemental lors de la (re-)conception ou reconfiguration d'une ligne de production 25
- [Outil Indus-04] Choix écoresponsables lors de la conception d'une usine 26

### PILIER 2 | ÉCOCONCEPTION / RÉDUCTION DE L'IMPACT DE LA MAINTENANCE

- [Maintenance-01] Diminution de la consommation d'énergie et de l'impact environnemental des déplacements des opérateurs de maintenance 27
- [Maintenance-02] Diminution de la consommation de pièces de rechange grâce à la maintenance prédictive 28

### PILIER 2 | ÉCOCONCEPTION / RÉDUCTION DE L'IMPACT DES LIVRAISONS

- [Livraison-01] Réduction de l'impact environnemental du réseau de distribution 29
- [Livraison-02] Réduction de l'impact environnemental de la distribution d'un produit 30

### PILIER 2 | ÉCOCONCEPTION / CONFORMITÉ AUX RÉGLEMENTATIONS ENVIRONNEMENTALES

- [Réglementation-01] Respect des réglementations environnementales grâce à la traçabilité 31

### PILIER 3 | ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE ET TERRITORIALE

- [Territorial-01] Optimisation des ressources d'un territoire 32

### PILIER 4 | ÉCONOMIE DE LA FONCTIONNALITÉ : RÉEMPLOI ET RÉUTILISATION

- [Réutilisation-01] Facilitation de la réutilisation de composants grâce à la traçabilité 33

### PILIER 5 | CONSOMMATION RESPONSABLE : RÉDUCTION DE L'IMPACT DE L'USAGE

- [Usage-01] Réduction de l'impact du produit en utilisation 34

### PILIER 6 | ALLONGEMENT DE LA DURÉE D'USAGE

- [Durée-01] Allongement de la durée d'usage du produit 35

### PILIER 7 | RECYCLAGE

- [Recyclage-01] Facilitation du recyclage grâce à la traçabilité 36

## 04 PRISE EN COMPTE DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU Jumeau Numérique Lui-même

- 4.1 Impact du Jumeau Numérique tout au long de son cycle de vie 38
- 4.2 Impact conséquentiel du projet Jumeau Numérique 39

## 05 ÉLARGISSEMENT À LA DIMENSION SOCIÉTALE DES ACTIVITÉS INDUSTRIELLES

- 5.1 Bénéfices sociétaux 40
- 5.2 Impacts humains du Jumeau Numérique 41

## CONCLUSION 42

## INDEX 43

01

# CONTRIBUTION DU JUMENTO NUMÉRIQUE À L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

## 1.1 | L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COMME LEVIER POUR RÉDUIRE LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

D'après le Ministère de la Transition Écologique,  
« l'économie circulaire consiste à produire des biens et des services de manière durable en limitant la consommation et le gaspillage des ressources et la production des déchets. Il s'agit de passer d'une société du tout jetable à un modèle économique plus circulaire.»<sup>4</sup>

La mise en place de la circularité dans l'économie est un levier pour diminuer ses impacts environnementaux. Ce document s'attache à donner des exemples de cas d'usage où le Jumeau Numérique peut outiller cette démarche d'Économie Circulaire et ainsi apporter des réductions potentielles d'impacts environnementaux pour l'industrie.

Le graphique ci-contre représente une vision simplifiée des différentes étapes du cycle de vie d'un produit dans une économie circulaire (d'autres représentations de ce cycle existent, elles sont globalement équivalentes). Ces étapes sont définies dans la double page suivante.

L'essence même de l'Économie Circulaire est de conserver la valeur créée le plus longtemps possible afin de minimiser les pertes de matière et d'énergie. Contrairement au modèle linéaire et au simple recyclage, il s'agit donc de mettre en place, à chaque étape du cycle de vie, des boucles de conservation de la valeur telles que présentées dans le graphique ci-contre.

Plus la boucle est courte et petite, plus la valeur est conservée, le recyclage étant le dernier levier à actionner.

Il faut noter que la circularité n'est pas un objectif en soi, mais un levier vers une économie soutenable en diminuant les besoins en ressources et en énergie. Ce sont les flux en entrée et en sortie de l'économie qui comptent pour l'environnement, et l'objectif est de réduire ces flux. La circularité est un moyen pour y parvenir, en réduisant les entrées et les sorties, à taille de l'économie constante.

<sup>4</sup> <https://www.ecologie.gouv.fr/leconomie-circulaire>

## Cycles de vie dans une économie circulaire



© Alliance Industrie du Futur

# DÉFINITIONS DES ÉTAPES



## Désassemblage

Processus de démontage d'un produit en vue de faciliter la réparation, la réutilisation, la refabrication, ou le recyclage de tout ou partie du produit.

## Refabrication<sup>5</sup>

Processus industriel permettant de remettre un élément dans un état comme neuf dans une perspective de qualité et de performance. L'élément peut précédemment avoir été vendu, loué, utilisé, usé, refabriqué ou il peut s'agir d'un produit ou d'une pièce non fonctionnels.

Un état comme neuf peut également être décrit comme étant « identique à son état d'origine » ou « mieux que son état d'origine ».

## Recyclage

Activités permettant d'obtenir des ressources valorisées destinées à être utilisées dans un processus ou un produit, à l'exclusion de la valorisation énergétique. Les activités permettant d'obtenir des ressources valorisées comprennent la valorisation, la collecte, le transport, le tri, le nettoyage et le retraitement. Le recyclage ne comprend pas la réutilisation.

## Fin de vie (d'un produit)

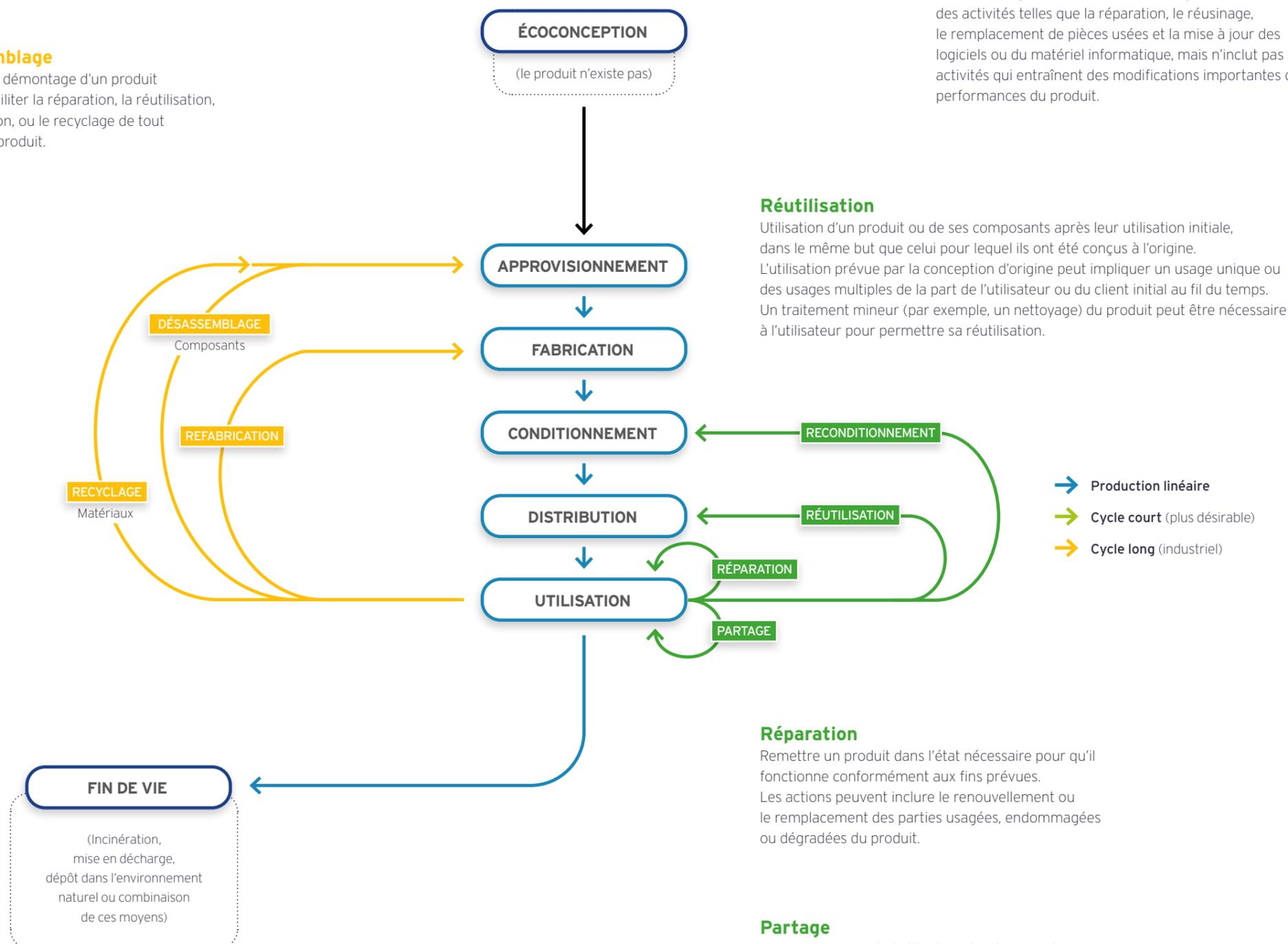
Moment où un produit est mis hors d'usage et où ses ressources sont soit récupérées pour traitement, soit éliminées. L'expression « mis hors d'usage » désigne le moment où le produit n'est plus utilisable ou cesse d'exister sous sa forme actuelle. L'élimination peut se faire par incinération, par mise en décharge, par dépôt dans l'environnement naturel, ou par une combinaison de ces moyens.

## Écoconception

Processus de conception et développement basé sur une perspective de cycle de vie et visant à soutenir le développement durable.

## Reconditionnement

Processus permettant de remettre un élément, pendant sa durée de vie prévue, dans un état utile pour le même usage et avec des caractéristiques de qualité et de performance au moins similaires. La remise en état n'inclut pas la restauration après la durée de vie prévue. La remise en état peut inclure des activités telles que la réparation, le réusinage, le remplacement de pièces usées et la mise à jour des logiciels ou du matériel informatique, mais n'inclut pas les activités qui entraînent des modifications importantes des performances du produit.



## Réutilisation

Utilisation d'un produit ou de ses composants après leur utilisation initiale, dans le même but que celui pour lequel ils ont été conçus à l'origine. L'utilisation prévue par la conception d'origine peut impliquer un usage unique ou des usages multiples de la part de l'utilisateur ou du client initial au fil du temps. Un traitement mineur (par exemple, un nettoyage) du produit peut être nécessaire à l'utilisateur pour permettre sa réutilisation.

## Réparation

Remettre un produit dans l'état nécessaire pour qu'il fonctionne conformément aux fins prévues. Les actions peuvent inclure le renouvellement ou le remplacement des parties usagées, endommagées ou dégradées du produit.

## Partage

Mise en commun de l'utilisation d'un bien ou d'un service entre personnes physiques ou morales.

<sup>5</sup> Toutes les définitions, hormis celles de Partage et Désassemblage, sont extraites de : NF ISO 59004 Économie circulaire : Vocabulaire, principes et recommandations pour la mise en œuvre, AFNOR, Juin 2024.

## 1.2

### LES 7 PILIERS DE L'ADEME

L'ADEME a défini sept piliers fondamentaux, représentés dans le graphique ci-contre, pour mettre en œuvre une économie circulaire efficace.

C'est à travers le prisme de ces sept piliers que les cas d'usage du Jumeau Numérique sont étudiés dans ce document, avec, dans le cas du pilier « Écoconception », un découpage supplémentaire.

#### Pilier 1 : Extraction/exploitation et achats durables

vise à utiliser des ressources renouvelables ou des matières recyclées dans un souci d'économie des ressources.

Nous décrivons ici des situations de réduction de l'impact environnemental des approvisionnements grâce au Jumeau Numérique.

#### Pilier 2 : Écoconception

consiste à intégrer dès la conception les impacts environnementaux tout au long du cycle de vie.

Nous considérons ici l'écoconception dans son acception la plus large, regroupant non seulement l'écoconception de produits et de services mais aussi toutes les actions qu'un industriel peut entreprendre pour réduire l'impact de ses opérations :

- Écoconception produit.
- Réduction de l'impact de la production, pouvant se traduire par une réduction de la consommation de ressources (e.g. énergie, eau, matériaux) ou par la diminution des rebuts et des pollutions.
- Réduction de l'impact de l'outil industriel (équipements, machines, bâtiments), de la fabrication ou construction jusqu'à la fin de l'exploitation.
- Réduction de l'impact de la maintenance de l'outil industriel.
- Réduction de l'impact des livraisons, autrement dit du transport des produits de l'usine vers les entrepôts ou les magasins.
- Conformité aux réglementations environnementales : il ne s'agit donc pas ici de réduire directement l'impact environnemental des activités de production mais d'aider les industriels à se conformer aux réglementations environnementales actuelles ou futures.

#### Pilier 3 : Écologie industrielle et territoriale

permet de créer des synergies entre acteurs d'un même territoire pour mutualiser les ressources.

#### Pilier 4 : Économie de la fonctionnalité

privilégie l'usage à la possession en proposant des solutions de services plutôt que des biens. Nous parlerons ici de faciliter le réemploi et la réutilisation grâce au Jumeau Numérique.

#### Pilier 5 : Consommation responsable

vise à faire évoluer les modes de vie vers une sobriété des consommations. Nous verrons comment le Jumeau Numérique peut permettre dans certaines situations de réduire l'impact de l'usage des produits.

#### Pilier 6 : Allongement de la durée d'usage

passe par une meilleure réparation et réutilisation des produits.

#### Pilier 7 : Recyclage et gestion des déchets

doit être optimisé, en fin de vie, par une meilleure valorisation matière et énergétique.



#### GESTION DES DÉCHETS

Recyclage (matière et organique)

#### OFFRE DES ACTEURS ÉCONOMIQUES

Extraction, exploitation et achats durables  
Écoconception (produits et procédés)  
Écologie industrielle et territoriale  
Économie de la fonctionnalité

#### DEMANDE ET COMPORTEMENT DES CONSOMMATEURS

Consommation responsable

- Achat
- Consommation collaborative
- Utilisation

Allongement de la durée d'usage

- Réemploi
- Réparation
- Réutilisation

02

# PRÉSENTATION DES FICHES « OPPORTUNITÉ DE RÉDUCTION D'IMPACT »

## 2.1 | CATÉGORIES D'INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX POUR LE PILOTAGE INDUSTRIEL

L'empreinte environnementale est généralement évaluée au travers d'une multiplicité d'indicateurs. Certaines méthodes telle la méthode PEF<sup>6</sup> (*Product Environmental Footprint*) standardisent les indicateurs avec un grand niveau de finesse, notamment dans le cadre des analyses de cycle de vie de produit. Dans ce document, nous avons choisi de simplifier et de rassembler ces indicateurs en dix catégories :

### Émissions GES (unité : kg eq. CO<sub>2</sub>)

Reflète l'augmentation de la concentration atmosphérique moyenne de diverses substances que l'on nomme communément les gaz à effet de serre (GES), tels que le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) ou le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>). Cette augmentation est la cause du réchauffement climatique.

### Eau (unité : m<sup>3</sup>)

Exprime la consommation des ressources en eau (douce ou de mer).

### Matière (unité : kg)

Exprime la consommation de matières premières nécessaires au procédé industriel (telles que fer, cuivre, plomb, zinc, terres rares, pétrole brut, charbon, ...). Il est également possible d'utiliser des indicateurs reflétant l'épuisement des ressources naturelles, conformément à la méthode PEF<sup>7</sup> :

- L'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables (charbon, gaz, pétrole, uranium) est prise en compte par un indicateur exprimé en Méga-joules (MJ).
- L'épuisement des ressources minérales non renouvelables : cuivre, lithium, terres rares, sable, etc. exprimé en kilogrammes équivalent antimoine (kg eq Sb). Une valeur supérieure à 1 pour une ressource indique que l'on consomme une ressource plus rare que l'antimoine.

### Transport (unité : km)

Correspond aux kilomètres parcourus pour le transport des composants, des personnes, des produits, et des équipements de production. Le transport peut se traduire par une dépense d'énergie fossile qui provoque des émissions de gaz à effet de serre.

### Énergie (unité : kWh)

Cette catégorie d'indicateurs est relative aux consommations d'énergie fossile ou non-fossile liées à la production, au transport, à l'usage des produits et des équipements de production. Cette consommation d'énergie peut provoquer des émissions de gaz à effet de serre et conduire à l'épuisement des combustibles fossiles (gaz, pétrole, charbon...) s'il s'agit d'une énergie qui en est issue. Dans le cas d'une diminution de la consommation électrique, la réduction d'impact environnemental effective dépendra grandement du mix énergétique de la zone concernée.

### Durée de vie (unité : mois)

Correspond à la durée de vie réelle ou estimée du produit. Une durée de vie courte indique une obsolescence fonctionnelle rapide, une durée de vie longue permet de diminuer la consommation de matière et d'énergie induite lors de la production de l'objet à remplacer. La réutilisation, la réparation, le reconditionnement sont par exemple des moyens d'augmenter la durée de vie.

### Rebut (unité : kg)

Correspond à la quantité de matière perdue lors de la production du produit du fait du processus de production (exemple : chutes de découpe) ou de problèmes de qualité (pièces non conformes).

### Pollution (unité : kg)

Cette catégorie d'indicateurs prend en compte l'ensemble des déchets et pollutions résultant de la production et de l'usage du produit (gaz toxiques, eau polluée, déchets plastiques), pouvant impacter négativement la santé humaine et la biodiversité.

- **Santé humaine** : il s'agit par exemple des émissions dans l'air de fines particules solides (poussières) générant des maladies cardiaques et pulmonaires chez l'humain, ou des effets cancérigènes.
- **Perte de biodiversité** : par exemple acidification des océans, eutrophisation de l'eau douce ou eutrophisation marine.

Pour plus d'informations, on pourra se reporter aux indicateurs de la méthode PEF<sup>8</sup>.

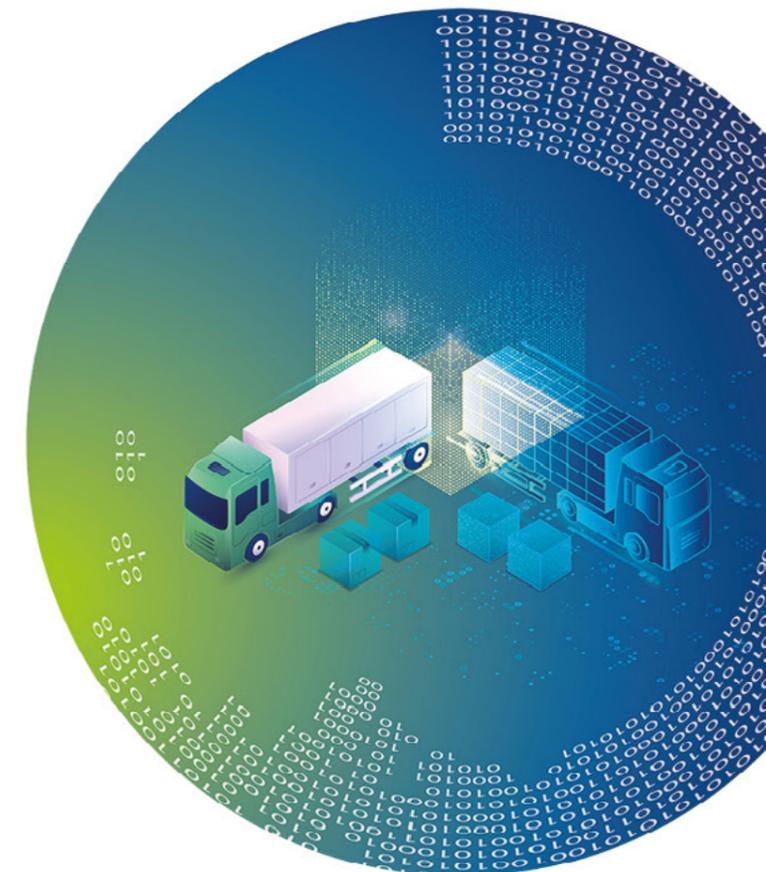
### Recyclage (unités : % ou kg de matière recyclée ou recyclable)

Cette catégorie d'indicateurs mesure :

- la quantité de matière recyclée utilisée dans la fabrication du produit.
- la quantité de matière recyclable dans le produit en fin de vie.

### Artificialisation des sols (unité : m<sup>2</sup>)

Cette catégorie d'indicateurs prend en compte l'occupation et les changements d'affectation du sol (terres arables et milieux urbains) dans le temps et mesure le risque de perte de biodiversité lié à ces changements d'affectation, en quantifiant la perte de territoires favorables à la biodiversité.



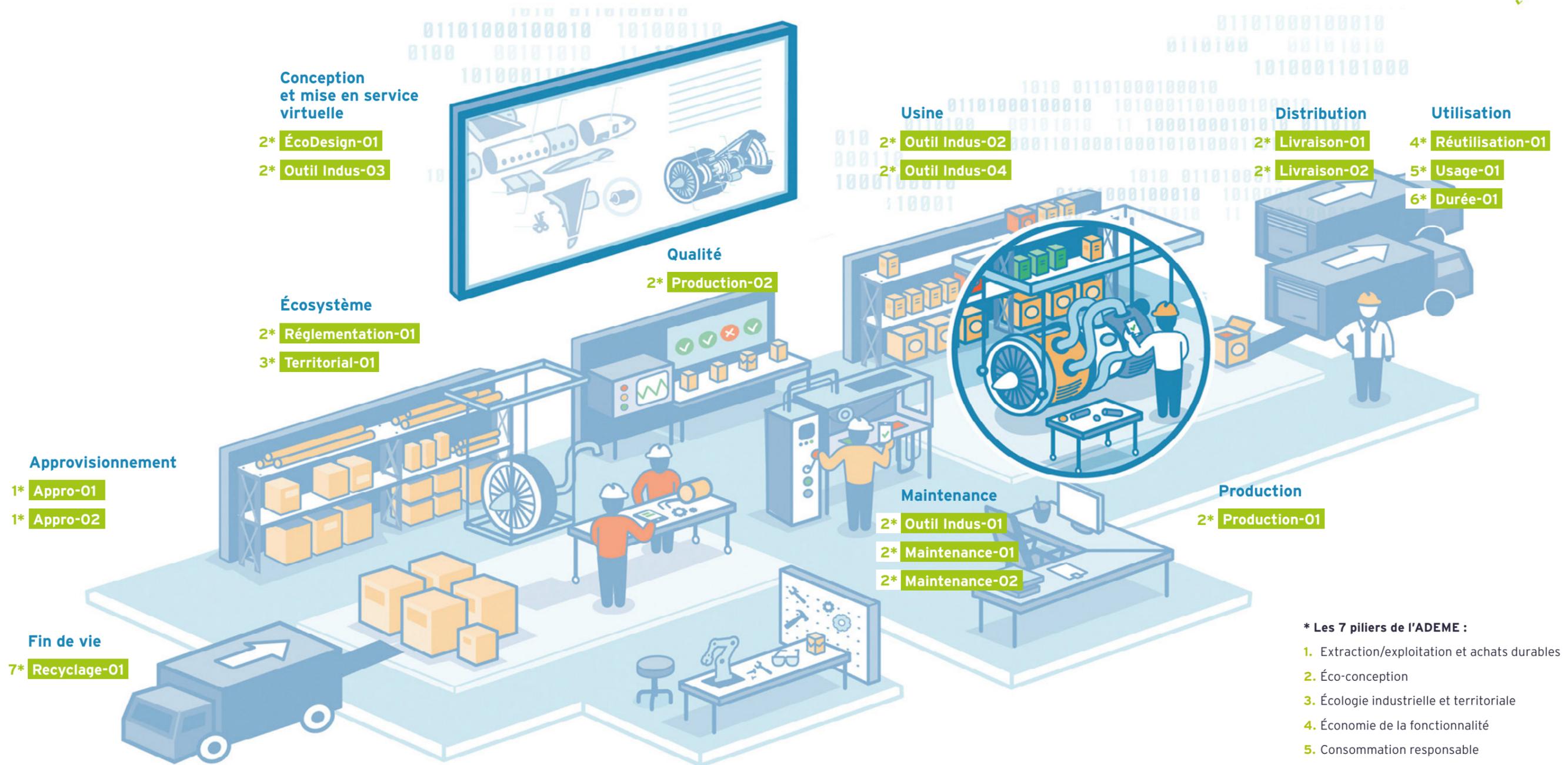
**Pour le détail des indicateurs pouvant être mesurés dans chacune des catégories et leur calcul, on pourra notamment se référer à la norme ISO 59020<sup>9</sup>**

<sup>6</sup> En savoir plus : <https://lepica.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html>  
<sup>7</sup> En savoir plus : <https://www.eco-conception.fr/static/categories-impacts-acv.html>  
<sup>8</sup> En savoir plus : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021H2279>, page 33  
<sup>9</sup> En savoir plus sur la norme ISO 59020 : [www.iso.org/standard/80650.html](https://www.iso.org/standard/80650.html)

## 2.2

### OPPORTUNITÉS DE RÉDUCTIONS D'IMPACT CARTOGRAPHIÉES SELON LES DIFFÉRENTS CAS D'USAGE DU JUMEAU NUMÉRIQUE

Le schéma ci-dessous présente les différentes opportunités de réduction d'impact environnemental, positionnées dans un contexte industriel et en lien avec les sept piliers de l'ADEME. Il est à mettre en regard de la cartographie des cas d'usage du Jumeau Numérique présentée dans notre première brochure Jumeau Numérique.

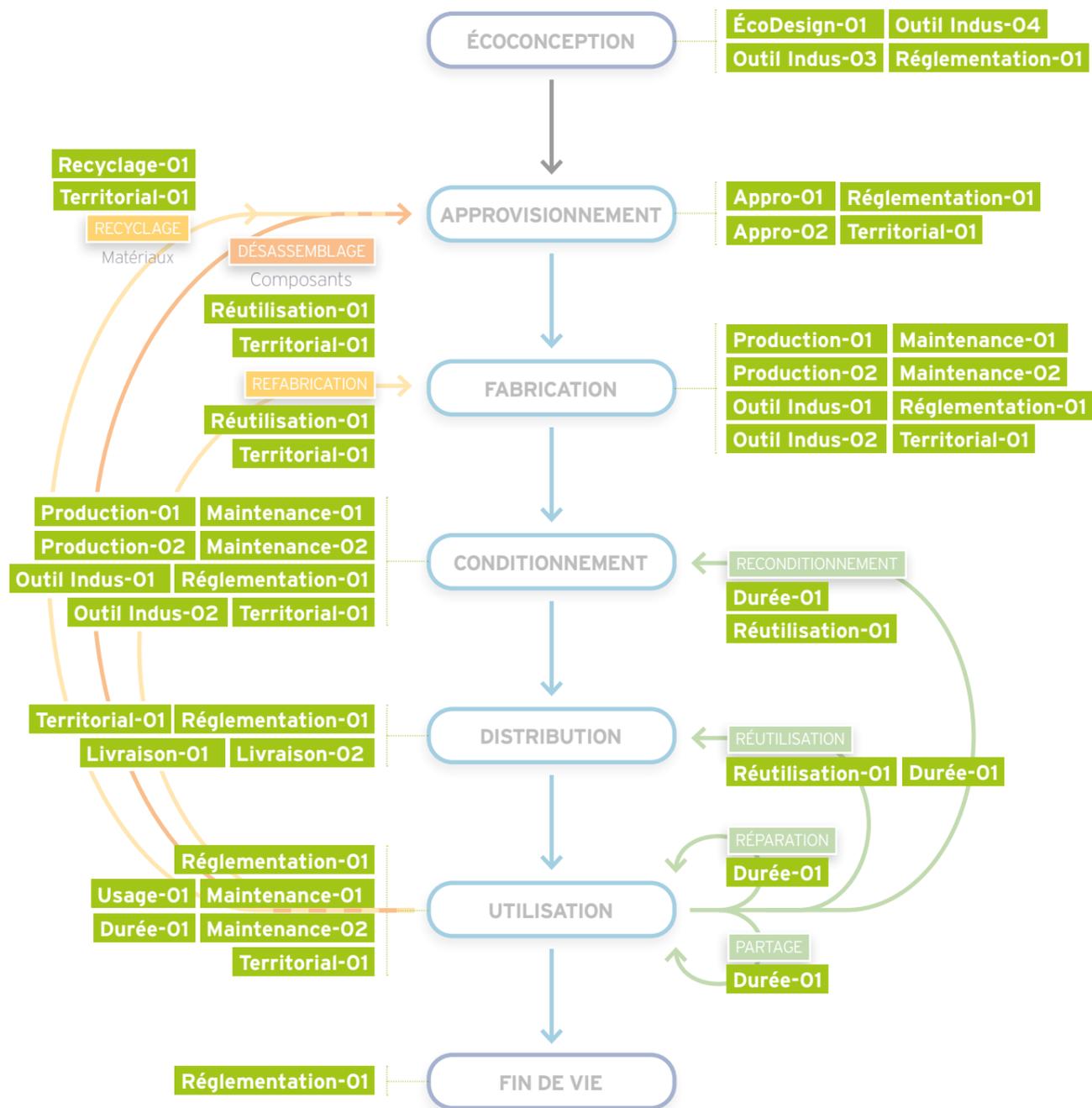


**\* Les 7 piliers de l'ADEME :**

1. Extraction/exploitation et achats durables
2. Éco-conception
3. Écologie industrielle et territoriale
4. Économie de la fonctionnalité
5. Consommation responsable
6. Allongement de la durée d'usage
7. Recyclage

## 2.3 | CARTOGRAPHIE DES RÉDUCTIONS D'IMPACT SELON LE SCHÉMA DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

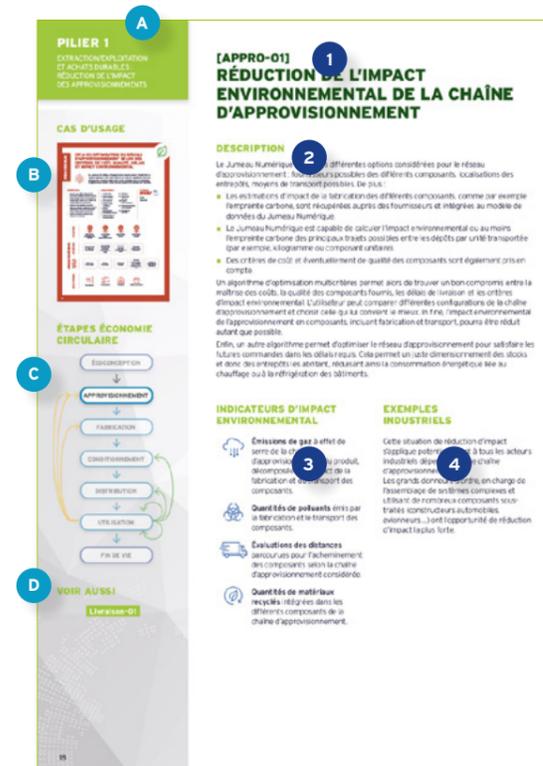
Le schéma ci-dessous présente les différentes opportunités de réduction d'impact environnemental, positionnées selon leur contribution à l'économie circulaire.



03

## OPPORTUNITÉS DE RÉDUCTION D'IMPACT

« Mode d'emploi » des opportunités



1 **Titre :** l'acronyme, par exemple [Appro-01], permet de référencer cette opportunité dans les différents index proposés en fin de document et ci-après.

2 **Description de l'opportunité :** cette partie explique en détail la façon dont le Jumeau Numérique permet les réductions d'impact. En effet, le déploiement d'un Jumeau Numérique n'est pas nécessairement synonyme de réduction d'impact ; il est nécessaire d'avoir cet objectif en tête dès le début du projet de déploiement pour pouvoir l'atteindre.

3 **Liste des Indicateurs d'impact environnemental :** quels sont les indicateurs à suivre ? Que peut-on améliorer ?

4 **Exemples Industriels :** description d'exemples de cas industriels pour se projeter plus facilement dans un déploiement. Ils visent à présenter des questionnements fréquemment rencontrés dans le milieu industriel.

A Pilier correspondant à l'opportunité.

B Liste des cas d'usage se rapportant à cette opportunité, tels que décrits dans la brochure « Jumeau Numérique, Levier majeur de la transformation digitale de l'industrie ».

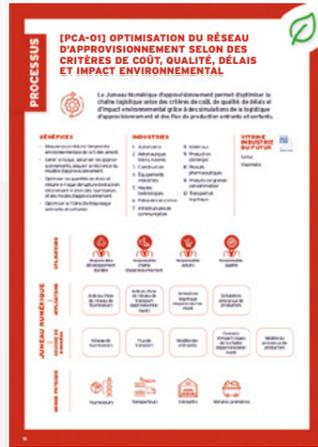
C Liste des étapes de l'Économie Circulaire se rapportant à cette opportunité.

D Section « Voir aussi » faisant le lien vers d'autres opportunités de réduction d'impact.

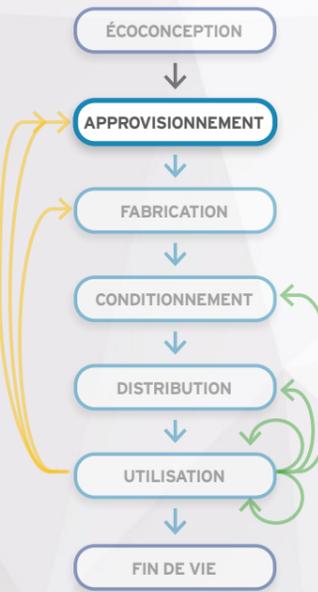
## PILIER 1

EXTRACTION/EXPLOITATION ET ACHATS DURABLES : RÉDUCTION DE L'IMPACT DES APPROVISIONNEMENTS

### CAS D'USAGE



### ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



### VOIR AUSSI

Livraison-01

# [APPRO-01] RÉDUCTION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT

## DESCRIPTION

Le Jumeau Numérique reflète les différentes options considérées pour le réseau d'approvisionnement : fournisseurs possibles des différents composants, localisations des entrepôts, moyens de transport possibles. De plus :

- Les estimations d'impact de la fabrication des différents composants, comme par exemple l'empreinte carbone, sont récupérées auprès des fournisseurs et intégrées au modèle de données du Jumeau Numérique.
- Le Jumeau Numérique est capable de calculer l'impact environnemental ou au moins l'empreinte carbone des principaux trajets possibles entre les dépôts par unité transportée (par exemple, kilogramme ou composant unitaire).
- Des critères de coût et éventuellement de qualité des composants sont également pris en compte.

Un algorithme d'optimisation multicritère permet alors de trouver un bon compromis entre la maîtrise des coûts, la qualité des composants fournis, les délais de livraison et les critères d'impact environnemental. L'utilisateur peut comparer différentes configurations de la chaîne d'approvisionnement et choisir celle qui lui convient le mieux. In fine, l'impact environnemental de l'approvisionnement en composants, incluant fabrication et transport, pourra être réduit autant que possible.

Enfin, un autre algorithme permet d'optimiser le réseau d'approvisionnement pour satisfaire les futures commandes dans les délais requis. Cela permet un juste dimensionnement des stocks et donc des entrepôts les abritant, réduisant ainsi la consommation énergétique liée au chauffage ou à la réfrigération des bâtiments.

## INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

**Émissions de gaz** à effet de serre de la chaîne d'approvisionnement du produit, décomposées en impact de la fabrication et du transport des composants.

**Quantités de polluants** émis par la fabrication et le transport des composants.

**Évaluations des distances** parcourues pour l'acheminement des composants selon la chaîne d'approvisionnement considérée.

**Quantités de matériaux recyclés** intégrées dans les différents composants de la chaîne d'approvisionnement.

## EXEMPLES INDUSTRIELS

Cette situation de réduction d'impact s'applique potentiellement à tous les acteurs industriels dépendant d'une chaîne d'approvisionnement. Les grands donneurs d'ordre, en charge de l'assemblage de systèmes complexes et utilisant de nombreux composants sous-traités (constructeurs automobiles, avionneurs....) ont l'opportunité de réduction d'impact la plus forte.

## PILIER 1

EXTRACTION/EXPLOITATION ET ACHATS DURABLES : RÉDUCTION DE L'IMPACT DES APPROVISIONNEMENTS

### CAS D'USAGE



### ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



### VOIR AUSSI

Livraison-02

# [APPRO-02] RÉDUCTION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE L'ACHEMINEMENT DES COMPOSANTS

## DESCRIPTION

Contrairement au cas précédent, on suppose ici que les caractéristiques de la chaîne d'approvisionnement ont été déterminées : les fournisseurs, entrepôts et flottes de véhicules sont connus. Le Jumeau Numérique du réseau logistique d'approvisionnement reflète l'ensemble des entrepôts des fournisseurs, les usines à livrer, ainsi que les différents trajets possibles pour la livraison de chaque type de composant, que ce soit par voie terrestre, aérienne ou ferroviaire. Le profil des routes et le poids des marchandises à livrer sont également pris en compte.

Selon le degré de transparence accepté par les fournisseurs et transporteurs, des informations complémentaires peuvent permettre d'affiner le calcul d'impact du transport, comme la capacité de transport des véhicules ou leur consommation nominale en carburant ou électricité.

En fonction du besoin en composants issu du carnet de commandes, un algorithme d'optimisation cherche à établir le meilleur compromis entre coût du transport, minimisation de l'impact environnemental et délais d'approvisionnement. Le résultat est un ensemble de commandes de composants aux différents fournisseurs sélectionnés.

Une fois les commandes passées, si les transporteurs le permettent, l'industriel a la visibilité complète des livraisons en cours et peut demander des changements d'itinéraires en fonction de différents critères, dont certains sont liés à l'impact environnemental.

Il est également possible de rechercher une vision fine des consommations de matières. Une intégration donnant aux fournisseurs une visibilité sur l'état des stocks du donneur d'ordres peut faciliter des livraisons en volume adaptées à la demande. Ceci permet de réduire le niveau de stock nécessaire, et donc l'espace nécessaire au stockage.

La connaissance de l'état des stocks, ainsi que du taux de remplissage des ressources de transport au travers du Jumeau Numérique du processus de distribution/approvisionnement peut également faciliter la mutualisation de conteneurs.

## INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

**Distances parcourues** pour l'acheminement des composants.

**Émissions de gaz à effet de serre** liées à l'acheminement des composants et au stockage des composants.

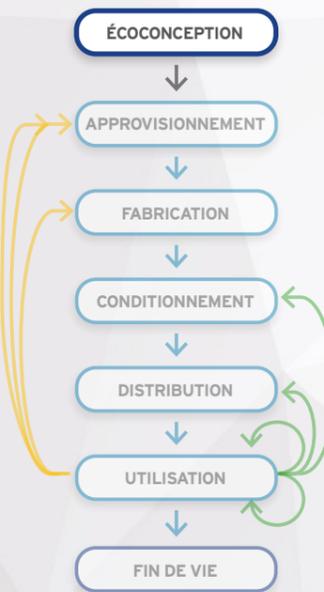
## EXEMPLES INDUSTRIELS

Cette situation de réduction d'impact s'applique aux acteurs industriels dépendant d'une chaîne d'approvisionnement et ayant différentes options de sélection et d'acheminement de composants.

CAS D'USAGE



ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



# [ECODESIGN-01] AUGMENTATION DE LA DURÉE DE VIE DU PRODUIT ET RÉDUCTION DE L'IMPACT DE L'USAGE PAR L'ÉCOCONCEPTION

DESCRIPTION

En exploitant les données d'usage et de maintenance issues des Jumeaux Numériques des produits en activité, il est possible de réduire les impacts environnementaux des nouvelles versions et gammes de produits lors de la conception, comme illustré dans les deux scénarios ci-dessous.

Augmentation de la durée de vie

Les données relatives aux casses de pièces, aux types de réparations effectuées et autres anomalies constatées durant la vie des produits permettent de bâtir des rapports sur les pannes les plus fréquentes et de mieux comprendre leurs causes.

Ces enseignements peuvent alors être pris en compte lors de la conception des nouveaux produits afin d'en augmenter la durée de vie.

De plus, la simulation du comportement du produit (frottements, usure, zones soumises à des contraintes mécaniques fortes...) peut être combinée avec les données de tests de prototypes. Ceci permet de prévenir et anticiper des casses ou des pannes en fonction des matériaux choisis et de la géométrie produit.

Tous ces enseignements peuvent alors être pris en compte lors de la conception des nouveaux produits afin d'en augmenter la robustesse.

Réduction de l'impact environnemental de l'utilisation du produit

Les données d'utilisation des produits telles que, dans le cas d'une automobile, la consommation de carburant ou d'électricité, le style de conduite ou la vitesse, permettent de mieux comprendre comment les produits sont utilisés et leur impact sur l'environnement.

Ces enseignements peuvent être pris en compte pour concevoir de nouveaux produits mieux adaptés à l'usage qui en est fait dans une optique de réduction de l'impact environnemental en utilisation et d'augmentation de leur durée de vie. Des simulations du comportement du produit en activité permettent également d'anticiper la consommation énergétique et de modifier la conception en conséquence. De même, dans une optique de résilience, il est possible d'améliorer la robustesse des pièces en cas d'accident ou de catastrophe naturelle.

INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

- Durée de vie** réelle ou estimée du produit ou des pièces.
- Consommation d'énergie** du produit en usage.
- Émissions de gaz** à effet de serre du produit en usage.
- Quantités de polluants** émis par le produit en usage.
- Consommation d'eau** du produit en usage.

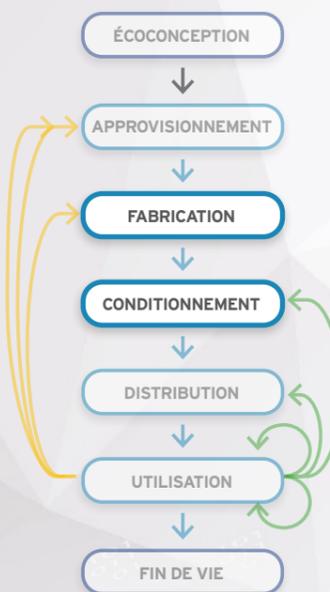
EXEMPLES INDUSTRIELS

- **Le scénario d'extension de la durée de vie grâce à l'écoconception** s'applique potentiellement à tous les types de produits manufacturés pour lesquels des données d'usage et de maintenance peuvent être récupérées. Ceci inclut notamment : les équipements industriels (machines industrielles, équipements de puissance électrique, véhicules lourds), l'électroménager, la high-tech, les véhicules, etc.
- **Le scénario de réduction de l'impact environnemental du produit en usage** concerne par exemple la réduction de la consommation de futurs modèles de véhicules (automobiles, avions...) mais aussi d'autres objets de la vie quotidienne (ballon d'eau chaude sanitaire, réfrigérateur, etc.).

CAS D'USAGE



ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



# [PRODUCTION-01] RÉDUCTION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET DE RESSOURCES D'UNE LIGNE DE PRODUCTION

DESCRIPTION

Réduction de la consommation d'énergie grâce à un réseau de capteurs et des modèles prédictifs

Les données collectées par des capteurs ou issues d'autres sources, couplées éventuellement à des simulations, permettent de réduire la consommation énergétique ou de ressources comme l'eau ou les matières premières consommées :

- **Tableau de bord énergétique** : suivi en temps réel de la production intégrant des alertes sur la consommation d'énergie (mise hors tension d'équipement, pics de consommation...).
- **Calcul de la consommation d'énergie** de différentes unités de production, par produit et famille de produits, à des fins d'analyse et de conformité réglementaire (émissions de gaz à effet de serre, déclaration environnementale produit...).
- **Simulation de différentes options de production**, s'appuyant sur les données collectées et des modèles de flux, afin de choisir un bon compromis entre cadence et consommation d'énergie.
- **Prédiction de la consommation d'énergie** selon la production prévue, les équipements et ressources humaines disponibles et d'autres paramètres influents comme la météo. Il est ainsi possible d'ajuster la production afin de respecter la courbe de charge contractualisée avec le fournisseur d'énergie.

Réduction de la consommation d'énergie grâce à l'ordonnancement des opérations

Grâce à la connaissance du carnet de commandes et à un modèle détaillé de la chaîne de production stocké dans un Jumeau Numérique, il est possible de calculer un **ordonnancement**. Outre l'optimisation des opérations et le respect de la cadence, on peut alors assigner des objectifs complémentaires au calcul d'ordonnancement : **enchaîner des opérations de cuisson** afin d'éviter des montées en température coûteuses du point de vue énergétique ; **regrouper des pièces** issues de commandes différentes dans une seule opération de cuisson ou d'impression additive (3D), **tirer parti de tarifications horaires** avantageuses pour les opérations fortement consommatrices d'énergie.

INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

- Consommation d'énergie** du processus de production ; consommation d'énergie attribuable à chaque catégorie de produit, lot ou produit physique.
- Consommation de matières premières** du processus de production.
- Consommation d'eau** du processus de production.

EXEMPLES INDUSTRIELS

- **Processus industriels consommant de l'énergie** et pouvant être instrumentés pour récupérer des données de production, notamment les installations industrielles lourdes (aciéries, cimenteries...).
- **Processus industriels incluant des traitements thermiques ou surfaciques**, avec cuisson de plusieurs pièces dans le même four / bain de traitement et/ou des montées en température récurrentes.

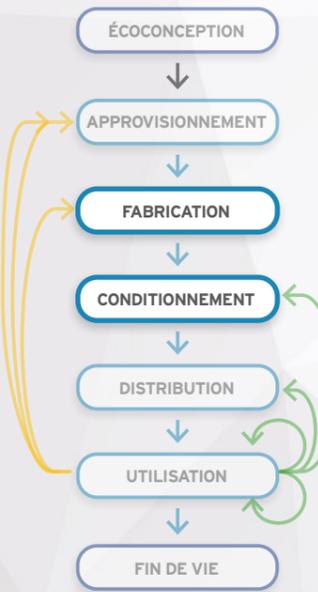
## PILIER 2

ÉCOCONCEPTION / RÉDUCTION DE L'IMPACT DE LA PRODUCTION

### CAS D'USAGE



### ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



## [PRODUCTION-02] RÉDUCTION DE L'EMPREINTE MATIÈRE ET ÉNERGÉTIQUE DE LA PRODUCTION GRÂCE À LA DIMINUTION DU TAUX DE REBUT

### DESCRIPTION

Des défauts peuvent apparaître dans les processus industriels même lorsque tous les paramètres de production se situent dans les zones de tolérance recommandées. C'est le cas de certains processus complexes mettant en œuvre des réactions chimiques ou biologiques, notamment durant la phase de montée en charge.

L'historique des données de production stocké dans un Jumeau Numérique peut alors être utilisé pour construire un modèle permettant de mettre en relation les données mesurées et la qualité obtenue grâce à des techniques statistiques ou d'apprentissage automatique (IA). Les données mesurées peuvent être issues de machines (données IoT, images...), de l'environnement (température, humidité...) ou des caractéristiques des matières premières (fournisseur, date de péremption...). S'y ajoutent les réglages effectués en cours de production (températures des fours, durées de fermentation...).

Une fois le modèle construit, il est possible de prédire la qualité finale en fonction des données de production actuelles. En cas de défaut non corrigé, la production sera arrêtée, évitant ainsi de consommer de l'énergie et des matières premières supplémentaires inutilement.

Dans une configuration plus avancée, le modèle propose des recommandations lorsque cela est possible (modèle prescriptif). De nouveaux réglages sont alors proposés, visant à éviter le défaut de qualité initialement prédit.

### INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

- Quantités consommées** de différents matériaux ne pouvant pas être valorisées du fait de problèmes de qualité.
- Consommation de matériaux** requise pour obtenir un produit à la qualité attendue.
- Consommation d'énergie** requise pour obtenir un produit à la qualité attendue.
- Consommation d'eau** requise pour obtenir un produit à la qualité attendue.

### EXEMPLES INDUSTRIELS

- **Production de matériaux composites (aéronautique, éolien)** : éviter la survenue de bulles d'air et de défauts de délaminage.
- **Production de vaccins** : s'assurer que le batch répond aux exigences de qualité.
- **Production de pneumatiques et d'élastomères** : éviter les défauts telles que les bulles, obtenir les caractéristiques géométriques souhaitées du pneumatique.
- **Métallurgie** : éviter les bulles, les fissures et autres défauts de fabrication.
- **Fabrication additive** : réduire le nombre d'essais avant l'obtention d'une pièce sans défaut en utilisant les images thermiques capturées lors de l'impression.

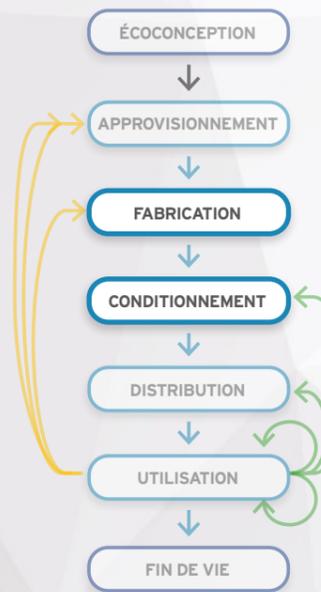
## PILIER 2

ÉCOCONCEPTION / RÉDUCTION DE L'IMPACT DE L'OUTIL INDUSTRIEL

### CAS D'USAGE



### ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



## [OUTIL INDUS-01] AUGMENTATION DE LA DURÉE DE VIE D'UN ÉQUIPEMENT ET DE SES COMPOSANTS

### DESCRIPTION

Des capteurs installés sur des équipements industriels ainsi qu'une plateforme IIoT permettent de collecter, stocker et visualiser les données d'usage des machines dans un Jumeau Numérique. Des algorithmes d'apprentissage automatique permettent ensuite de bâtir des modèles prédictifs à partir des données historiques et des incidents ou cas de panne constatés.

Par rapport à la maintenance préventive qui se conforme à un calendrier pré-établi, la maintenance prédictive vise à éviter à la fois les pannes imprévues et les opérations de maintenance non nécessaires.

Elle permet ainsi de prolonger la vie de l'équipement en évitant des pannes fatales et également d'éviter le remplacement prématuré de certaines pièces d'usure.

La maintenance prédictive favorise un modèle de commercialisation de type « *Product-as-a-service* » : un fabricant d'équipement industriel (robot, machine à commande numérique...) vend du temps d'utilisation de son équipement plutôt que la machine elle-même et se charge de maintenir l'équipement en fonctionnement. Il s'appuie sur un modèle de maintenance prédictive utilisant les données d'usage de ses clients et sa propre expertise. Le modèle économique repose sur la capacité à minimiser le nombre de pannes.

### INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

- Durée de vie moyenne de l'équipement.** Des indicateurs complémentaires comme le temps moyen entre pannes (*Mean Time Between Failures, MTBF*) ou le taux de rendement synthétique (*Overall Equipment Efficiency, OEE*) sont couramment utilisés dans l'industrie.

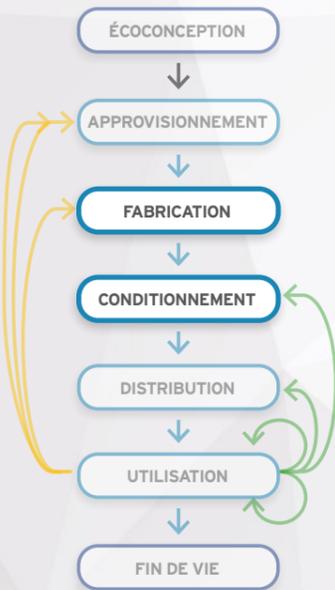
### EXEMPLES INDUSTRIELS

- **Machines rotatives, équipements motorisés** : le modèle prédictif du Jumeau Numérique détecte des vibrations anormales de l'équipement annonçant une panne à venir. Il peut également utiliser d'autres paramètres tels que la température ou le bruit enregistré.
- **Tous les types d'équipements et systèmes susceptibles de pannes** pour lesquels des données d'usage et de maintenance peuvent être récupérées.

CAS D'USAGE



ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



[OUTIL INDUS-02] OPTIMISATION ET ADAPTATION DYNAMIQUE DE L'ENVIRONNEMENT IT/OT

DESCRIPTION

Le Jumeau Numérique de l'infrastructure IT/OT reflète le modèle et l'état courant du réseau de communication et des équipements informatiques d'une usine. Les données de topologie et d'état du réseau, les données des serveurs ou les indications de l'opérateur permettent d'observer et de modéliser l'évolution de la charge et les performances du système IT/OT selon le nombre de terminaux, d'équipements et d'objets connectés, le volume d'informations traitées ou la fréquence des messages.

En phase de conception, la modélisation de l'infrastructure IT/OT (niveaux 1-2 de la norme ISA-95) et la simulation du comportement du système et des réseaux locaux en fonction de l'évolution de la charge de données et de traitements facilitent la prise de décision.

Ceci concerne le choix des équipements réseaux, des dispositifs connectés et des capteurs ainsi que leur configuration. Il est ainsi possible d'ajuster le nombre de routeurs, de diminuer ou d'adapter au plus juste la puissance de transmission, d'augmenter la durée de vie des batteries, de diminuer la consommation d'énergie et le nombre d'équipements en fonction des besoins des applications de niveau supérieur (i.e. 3-4).

Il est aussi possible d'optimiser l'architecture (centralisée ou distribuée) en fonction de la quantité de données à transférer et des types d'analyse et de calculs à faire.

Par exemple, si les volumes de données sont importants, il peut être opportun de privilégier le calcul en bordure (*edge computing*) pour limiter le transfert de données.

En phase de déploiement et en phase opérationnelle, il est possible de détecter et de remédier automatiquement ou plus rapidement aux problèmes de performance et de congestion dans les réseaux et de mieux dimensionner les équipements IT/OT à partir de l'observation de l'infrastructure en usage. Cela évite le déplacement d'un réparateur et permet un gain de temps grâce à la télémaintenance d'équipements ou de systèmes IIoT complexes.

De manière générale, le Jumeau Numérique IT/OT permet d'observer, optimiser, adapter et télé-maintenir en continu le système IT/OT. Ces analyses permettent de diminuer l'impact environnemental de l'infrastructure initiale et opérationnelle.

INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

**Consommation d'énergie** pour la fabrication et l'exploitation de l'infrastructure de connectivité (capteurs, réseaux), de calcul et de stockage (*edge et cloud*).

**Consommation de ressources** (en particulier cuivre, terres rares) pour la fabrication des équipements IIoT et IT (serveurs, réseau...).

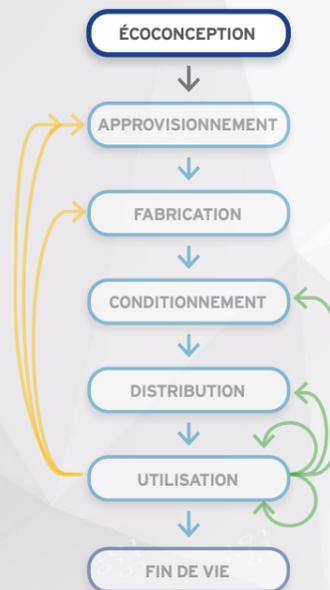
EXEMPLES INDUSTRIELS

- Réseau sans fil ou cellulaire (5G privée) d'un site industriel.
- Infrastructure IIoT pour la surveillance et le fonctionnement optimal d'une usine connectée, d'une centrale nucléaire, d'un aéroport, d'un train...

CAS D'USAGE



ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



[OUTIL INDUS-03] DIMINUTION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL LORS DE LA (RE-)CONCEPTION OU RECONFIGURATION D'UNE LIGNE DE PRODUCTION

DESCRIPTION

Grâce aux données collectées par le Jumeau Numérique et à leur analyse, il est possible de :

- Réaliser différentes simulations d'une ligne de production : simulation de la consommation d'énergie de la ligne en fonctionnement, simulation d'équipements, de flux et d'implantations de la ligne.
- Identifier des améliorations possibles affectant la consommation d'énergie et l'impact environnemental du système de production : empreinte carbone, usage de l'eau, pollution...
- Réduire les flux, les déplacements, la quantité de rebuts et choisir les équipements les mieux adaptés.

Selon les modes d'ordonnement ou les règles de gestion choisies, il est possible de simuler l'impact d'une nouvelle architecture de la ligne de production en usage nominal, en jouant par exemple une année « type ». Sur un système existant, il peut s'agir de définir quels seront les équipements en fonctionnement selon les contraintes externes (demande d'effacement électrique par exemple) dans l'optique d'un système de production reconfigurable.

Dans un contexte « *Manufacturing as a Service* », il est possible de vérifier avec le client, grâce au Jumeau Numérique, que le système se comporte bien comme il le doit, évitant alors des opérations de mise à jour du produit, et/ou de remanufacturing, et participant à une consommation maîtrisée des ressources (énergie, matière, etc.).

INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

- Consommation énergétique** de la ligne de production.
- Émissions de gaz** à effet de serre de la ligne de production.
- Consommation de matériaux** de la ligne de production.
- Consommation d'eau** de la ligne de production.
- Émission de polluants** de la ligne de production.
- Quantité de matériaux recyclés** utilisés en production et de matériaux recyclables issus de la production.

EXEMPLES INDUSTRIELS

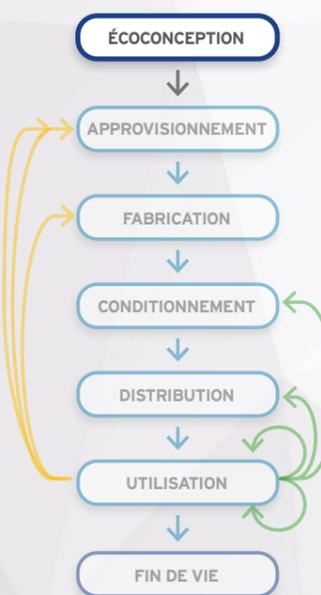
Ce scénario s'applique à un grand nombre de systèmes de production industriels, notamment :

- Lignes d'assemblage configurables : industrie automobile.
- Production par lot (batch) : production pharmaceutique modulaire.

CAS D'USAGE



ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



[OUTIL INDUS-04] CHOIX ÉCORESPONSABLES LORS DE LA CONCEPTION D'UNE USINE

DESCRIPTION

Le Jumeau Numérique de l'usine, développé dès la conception du site, peut aider aux choix de conception de l'ouvrage, avec notamment :

- **Une optimisation de la conception du gros-œuvre de l'infrastructure.**  
En ajustant l'exposition et l'orientation des fenêtres du bâtiment, il est possible d'optimiser l'utilisation de la lumière naturelle et d'améliorer le confort thermique. De même, en adaptant l'infrastructure à son environnement, on vise à minimiser l'impact sur les écosystèmes environnants.
- **Un choix de matériaux et d'équipements éco-conçus, à faible impact environnemental et nécessitant peu de maintenance.**  
Par exemple, le Jumeau Numérique peut être utilisé pour simuler les performances environnementales de différents matériaux de construction, en prenant en compte leur durabilité, leur recyclabilité et leur efficacité énergétique.
- **Un choix entre différentes configurations d'équipements et d'installations dans l'usine afin de minimiser les déplacements de matières premières et de produits finis.**  
Une disposition optimisée peut entraîner une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> associées aux transports internes à l'usine.
- **Une optimisation des systèmes d'éclairage, de ventilation et de chauffage.**  
Le Jumeau Numérique peut être utilisé pour simuler les performances des systèmes d'éclairage, de ventilation et de chauffage de l'usine, en prenant en compte des facteurs tels que la température extérieure, l'humidité et les taux d'occupation des locaux.

En complément, une analyse de cycle de vie du bâtiment dès la phase de conception ainsi qu'une mise à jour de celle-ci aux différentes étapes du cycle de vie de l'infrastructure sont particulièrement pertinentes. Un Jumeau Numérique maintenu tout au long du cycle de vie du bâtiment permettra de réduire la consommation d'énergie ou d'eau. Il pourra aussi faciliter la maintenance et la rénovation du bâtiment en simulant les changements proposés avant leur mise en œuvre physique, permettant aux parties prenantes de visualiser et d'approuver les changements envisagés.

INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

- ⚡ **Consommations d'énergie** liées à la construction et l'exploitation de l'usine.
- ☁ **Émissions de gaz à effet de serre** liées à la construction et l'exploitation de l'usine.
- 🚛 **Quantités de matériaux** utilisés lors de la construction.
- 💧 **Consommations en eau** lors de la construction et en exploitation.
- ♻ **Émissions de polluants** lors de la construction et en exploitation.
- 🌿 **Quantités ou proportions de matériaux recyclés** utilisés lors de la construction.
- 🏠 **Changements d'affectation des sols** à la suite de la construction de l'usine et de ses évolutions.

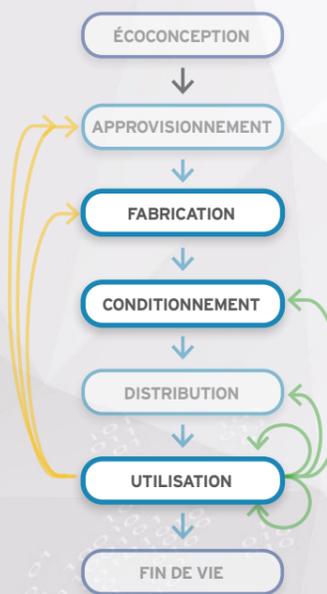
EXEMPLES INDUSTRIELS

- **Construction ou rénovation d'un site industriel** (bâtiment, centrale de production électrique, exploitation agricole, parc éolien...).
- **Construction ou rénovation d'une infrastructure** (ferroviaire, routière, aéroportuaire...).

CAS D'USAGE



ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



[MAINTENANCE-01] DIMINUTION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES DÉPLACEMENTS DES OPÉRATEURS DE MAINTENANCE

DESCRIPTION

Un Jumeau Numérique collecte et traite les données de fonctionnement d'un équipement industriel et les restitue à distance, afin de permettre une surveillance en continu et de rendre possible la télémaintenance.

Un expert en maintenance dispose d'un accès au Jumeau Numérique qui reflète l'état et la configuration exacte de l'équipement surveillé. Il peut ainsi guider à distance un opérateur qui effectuera les opérations de maintenance nécessaires sur place.

Ceci permet d'utiliser au mieux le temps des experts, parfois peu nombreux, et évite l'impact environnemental de leurs déplacements.

Des déplacements d'expert restent parfois indispensables dans le cas d'équipements ou d'installations complexes. Une application de maintenance prédictive, s'appuyant sur les données d'exploitation issues du Jumeau Numérique, permet de diminuer le nombre de déplacements par rapport à une maintenance préventive. En effet, les pièces ne sont changées que lorsque l'application l'estime nécessaire (cf. [Maintenance-02] Diminution de la consommation de pièces de rechange grâce à la maintenance prédictive).

La maintenance prédictive permet également d'anticiper ou de prévenir les pannes et de diminuer ainsi les déplacements en urgence.

INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

- 🚛 **Distances parcourues** par les experts en maintenance.
- ☁ **Émissions de gaz à effet de serre** liées aux déplacements des experts en maintenance.
- ♻ **Quantités de polluants émis** à la suite des déplacements des experts en maintenance.

EXEMPLES INDUSTRIELS

- **Installations industrielles complexes** (raffineries, production de gaz, industrie chimique).
- **Équipements industriels sophistiqués** ou spécifiques nécessitant une maintenance.
- **Équipements grand public** : ascenseurs, escalators, climatisations, ventilations, chaudières, pompes à chaleurs...
- **Serveurs informatiques, équipements réseau**...

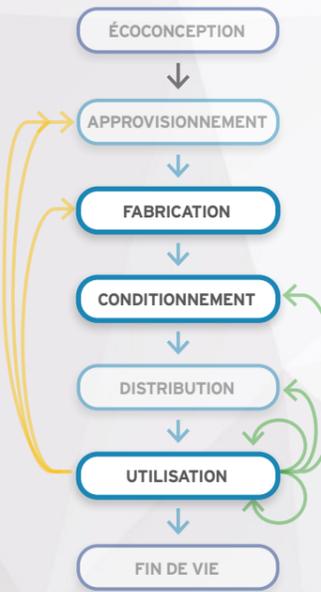
## PILIER 2

ÉCOCONCEPTION / RÉDUCTION DE L'IMPACT DE LA MAINTENANCE

### CAS D'USAGE



### ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



### VOIR AUSSI

[Outil Indus-01](#)

## [MAINTENANCE-02] DIMINUTION DE LA CONSOMMATION DE PIÈCES DE RECHANGE GRÂCE À LA MAINTENANCE PRÉDICTIONNE

### DESCRIPTION

La construction d'un modèle prédictif des pannes tel que décrit dans « [Outil Indus-01] Augmentation de la durée de vie d'un équipement et de ses composants » permet de déterminer les situations dans lesquelles une opération de maintenance est nécessaire afin d'éviter une panne prévue.

La maintenance prédictive permet d'éviter les opérations de maintenance non nécessaires résultant souvent de la maintenance préventive. Ainsi, on évitera de changer de manière prématurée des pièces d'usure comme on pourrait le faire en suivant le calendrier de maintenance pré-établi.

### INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

**Durée de vie** des différentes pièces dans l'équipement et de l'équipement lui-même. On pourra notamment comparer le nombre de pièces de rechange installées par catégorie d'équipement selon les prescriptions de la maintenance prédictive et selon celles de la maintenance préventive.

### EXEMPLES INDUSTRIELS

La maintenance prédictive s'applique potentiellement à tous les types d'équipements et systèmes pour lesquels des données d'usage et de maintenance peuvent être récupérées. Par exemple :

- **Machines rotatives, équipements motorisés...**
- **Installations industrielles complexes** (raffineries, production de gaz, industrie chimique).
- **Équipements industriels** sophistiqués ou spécifiques nécessitant une maintenance.
- **Équipements grand public** : ascenseurs, escalators, climatisations, ventilations, chaudières, pompes à chaleur...
- **Serveurs informatiques**, équipements réseau...

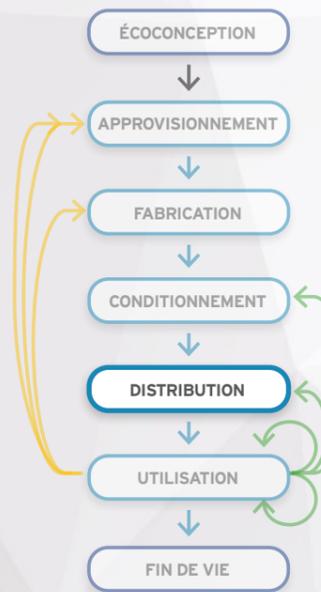
## PILIER 2

ÉCOCONCEPTION / RÉDUCTION DE L'IMPACT DES LIVRAISONS

### CAS D'USAGE



### ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



### VOIR AUSSI

[Appro-01](#)

## [LIVRAISON-01] RÉDUCTION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU RÉSEAU DE DISTRIBUTION

### DESCRIPTION

Le Jumeau Numérique du réseau de distribution peut aider au choix des moyens de transport et des transporteurs afin d'optimiser le processus de livraison selon des critères de coût, qualité, délais et impact environnemental. L'importance relative de chacun de ces critères peut être ajustée.

Le Jumeau Numérique permet également d'étudier l'impact de modifications du processus de livraison actuel, en simulant des processus alternatifs.

Il permet d'estimer l'impact environnemental selon les moyens mis en œuvre : fret ferroviaire, aérien, maritime, etc. Selon le moyen de transport utilisé, il est ainsi possible d'estimer l'impact carbone de son usage et la consommation de ressources nécessaires à son fonctionnement.

### INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

**Distances parcourues** pour la livraison des produits.

**Émissions de gaz à effet de serre** liées à la livraison des produits.

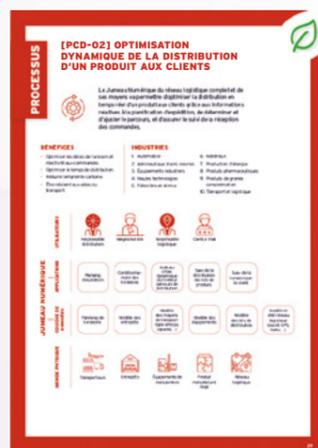
### EXEMPLES INDUSTRIELS

Cette situation de réduction d'impact s'applique potentiellement à tous les acteurs industriels gérant leur chaîne de distribution de produit. Elle s'applique également aux prestataires logistiques prenant en charge l'optimisation de la chaîne de distribution (prestataires dits de niveau 3PL ou supérieur).

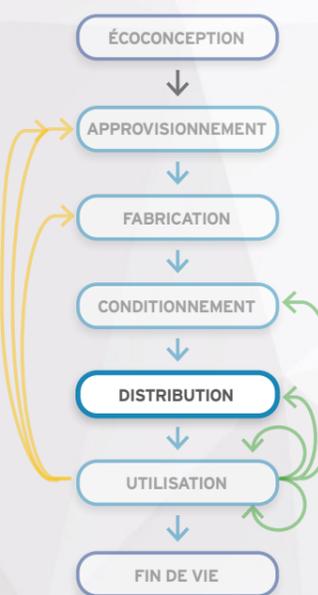
## PILIER 2

ÉCOCONCEPTION / RÉDUCTION DE L'IMPACT DES LIVRAISONS

### CAS D'USAGE



### ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



### VOIR AUSSI

Appro-02

## [LIVRAISON-02] RÉDUCTION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE LA DISTRIBUTION D'UN PRODUIT

### DESCRIPTION

Le Jumeau Numérique du réseau logistique permet d'optimiser la distribution en temps réel d'un produit grâce aux informations relatives à la planification d'expédition et à la géolocalisation, de déterminer et d'ajuster le parcours, et d'assurer le suivi de la réception des commandes.

Voici quelques exemples d'optimisation de la distribution :

- Des informations sur l'état du trafic, sur des travaux prévus ou des fermetures de route permettent d'adapter les parcours, voire même de changer de moyen de livraison.
- La connaissance de la position/présence de certains clients pour une livraison peut permettre d'éviter un déplacement inutile.
- En fonction des livraisons prévues sur une journée, le Jumeau Numérique permet d'anticiper les besoins de charge de véhicules électriques nécessaires à la livraison, et d'optimiser la tournée en fonction. Il est possible de prendre en compte des données du mix énergétique pour privilégier les périodes de rechargement durant lesquelles le mix est majoritairement renouvelable.

### INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Distances parcourues pour la livraison des produits.

Émissions de gaz à effet de serre liées à la livraison des produits.

### EXEMPLES INDUSTRIELS

- **Optimisation des trajets** d'une flotte de véhicules de transport, éventuellement de nature différente (navires, avions, camions, trains, drones...).
- **Optimisation de la logistique** du dernier kilomètre (par exemple livraison par vélos).
- **Optimisation de la logistique inverse** : prise en compte du retour d'emballages consignés ou à recycler.

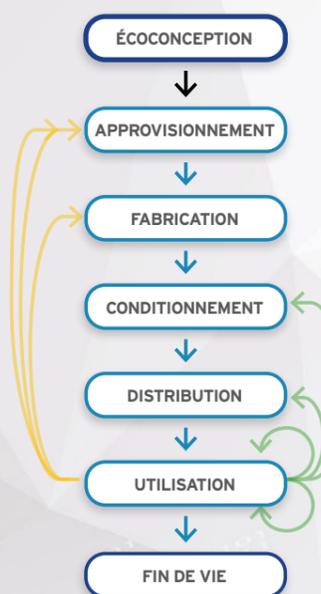
## PILIER 2

ÉCOCONCEPTION / CONFORMITÉ AUX RÉGLEMENTATIONS ENVIRONNEMENTALES

### CAS D'USAGE



### ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



## [RÉGLEMENTATION-01] RESPECT DES RÉGLEMENTATIONS ENVIRONNEMENTALES GRÂCE À LA TRAÇABILITÉ

### DESCRIPTION

La traçabilité des composants et matériaux utilisés lors de la fabrication d'un produit est un impératif réglementaire dans de nombreux secteurs, comme l'aéronautique, l'automobile, l'agroalimentaire ou les industries pharmaceutique et chimique :

- Le Jumeau Numérique du produit manufacturé permet de connaître l'origine de tous les composants ou matériaux, grâce à une hiérarchie qui reflète exactement le produit tel qu'il a été fabriqué ou assemblé (vue produit *as-built*). Cet arbre, appelé généalogie produit ou matière, associe à chacun de ses nœuds un numéro de série ou de lot, ce qui permet, dans le cas d'un composant externe, d'interroger le fournisseur en cas de défaut constaté.
- Lors du remplacement de pièces usées ou d'éléments défectueux, la généalogie est mise à jour. Elle reflète la composition du produit tout au long de sa vie et des réparations subies (vue *as-maintained*).

Plus récemment, le projet de réglementation de passeport numérique produit (*digital product passport*) de l'Union Européenne vise à favoriser l'économie circulaire. Outre le suivi des composants, auquel s'ajoutent des informations sur la facilité de réparation ou de réemploi, il comporte des exigences de traçabilité nouvelles : consommation d'énergie, d'eau et d'autres ressources, utilisation de matériaux recyclés, incidence environnementale du produit tout au long de son cycle de vie, etc.

Pour certaines catégories d'objets, telles que les batteries de véhicules électriques, les informations du passeport doivent être spécifiques à l'objet physique produit et non seulement à son modèle conceptuel. Dans ce cas, le Jumeau Numérique du produit devra intégrer, en plus de la généalogie, les informations d'impact environnemental décrites précédemment.

Par ailleurs, le Jumeau Numérique d'une usine peut permettre d'éviter aux entreprises de possibles infractions aux législations qui peuvent être dommageables (amendes, réputation, arrêt de la production...), voire à mieux se préparer pour les inspections.

### INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Nature et quantité de chacun des matériaux bruts ou transformés consommés lors de la production (plaques d'acier, tubes de cuivre, eau, huiles...).

Quantité de gaz à effet de serre émis lors de la production, en usage et en fin de vie.

Déchets et pollutions résultant de la production, de l'usage et de la fin de vie.

Nature et quantité des matériaux recyclés utilisés lors de la fabrication du produit.

Nature et quantité des matériaux recyclables dans le produit en fin de vie.

Énergie consommée par la production, l'usage et la fin de vie.

### EXEMPLES INDUSTRIELS

■ **Aéronautique, automobile** : conformité aux réglementations des autorités de régulation sur la traçabilité des pièces d'aéronefs ou de véhicules.

■ **Industries pharmaceutique et agroalimentaire** : conformité aux réglementations des autorités de régulation sur la traçabilité des ingrédients et principes actifs utilisés.

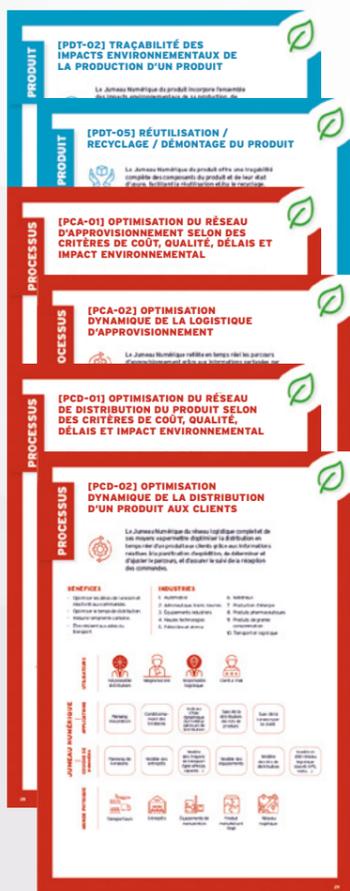
■ **Produits comportant des substances chimiques** : conformité aux réglementations sur les substances dangereuses (exemple : réglementation REACH de l'UE).

■ **Potentiellement toutes les industries** : création et mise à jour du passeport numérique produit européen.

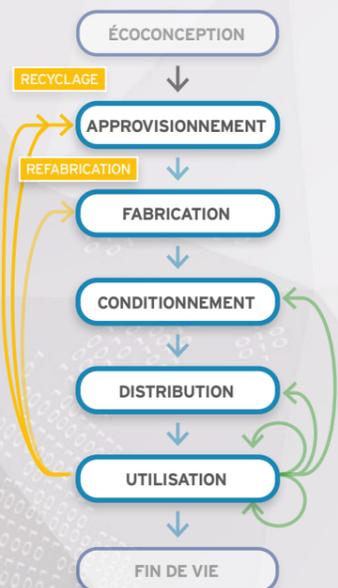
## PILIER 3

ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE ET TERRITORIALE

### CAS D'USAGE



### ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



## [TERRITORIAL-01] OPTIMISATION DES RESSOURCES D'UN TERRITOIRE

### DESCRIPTION

D'après l'ADEME<sup>10</sup>, « l'Écologie industrielle et territoriale (EIT) est un modèle économique dont l'objectif est l'optimisation des ressources. [...] Son but est d'optimiser les ressources d'un territoire, incluant les énergies, l'eau, les matières premières, les déchets ainsi que les équipements et les compétences. [...] Cette approche systémique s'inspire du fonctionnement des écosystèmes naturels. »

Le Jumeau Numérique offre un moyen de surveiller et de gérer des systèmes complexes impliquant de nombreuses interdépendances tout au long d'une chaîne de valeur, pendant tout le cycle de vie d'un produit. Il rend possible des collaborations et des synergies intra- et inter-entreprises (échange de flux, par exemple valorisation des coproduits ; mutualisation de biens, ressources ou services...). Concrètement, c'est un ensemble de Jumeaux Numériques dialoguant entre eux qui pourrait soutenir un territoire et son système économique. Ainsi, la combinaison de Jumeaux Numériques répondant à certains des cas d'usage de notre première brochure serait pertinente pour la mise en œuvre d'une écologie industrielle et territoriale pour :

- Suivre les composants et matières premières échangés sur le territoire et la mesure de l'impact environnemental [PDT-02].
- Faciliter le recyclage et la réutilisation grâce à la traçabilité des différents composants et de leur état d'usage [PDT-05].
- Optimiser la chaîne logistique territoriale (choix des fournisseurs de chaque composant, des usines...) selon des critères de coût, qualité, délais et impact environnemental [PCA-01].
- Optimiser les parcours d'approvisionnement et réduire leur empreinte carbone et environnementale [PCA-02].
- Optimiser le choix des transporteurs sur le territoire afin d'optimiser le processus de livraison selon des critères de coût, qualité, délais et d'impact environnemental [PCD-01].
- Définir les parcours de distribution et réduire leur empreinte carbone et environnementale [PCD-02].

### INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

- Quantité de gaz à effet de serre émis** par l'ensemble des acteurs industriels du territoire.
- Nature et quantité des matériaux** vierges consommés pour la fabrication des produits sur le territoire.
- Consommation d'eau** douce ou de mer des acteurs industriels du territoire.
- Distances parcourues** pour l'approvisionnement des acteurs industriels du territoire et la livraison de leurs produits.
- Déchets et pollutions** résultant de la production, de l'usage et de la fin de vie des produits des acteurs industriels du territoire.
- Nature et quantité des matériaux recyclés** utilisés lors de la fabrication des produits sur le territoire.
- Consommation d'énergie** des acteurs industriels du territoire.

### EXEMPLES INDUSTRIELS

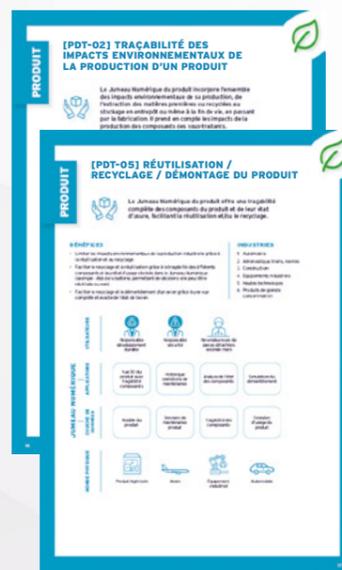
Kalundborg, au Danemark, est une ville pionnière<sup>11</sup> dans la mise en place de l'écologie industrielle et territoriale. Les différentes entreprises du territoire ont conclu des accords d'échange d'eau, d'énergie et de ressources, dans une optique circulaire : les déchets d'une entreprise deviennent des ressources ou de l'énergie pour d'autres.

<sup>10</sup> <https://economie-circulaire.ademe.fr/ecologie-industrielle-territoriale-enjeux>  
<sup>11</sup> <https://www.demainlaville.com/kalundborg-modele-decologie-industrielle/>

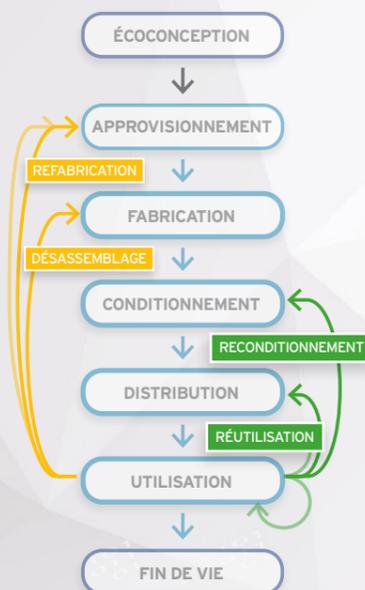
## PILIER 4

ÉCONOMIE DE LA FONCTIONNALITÉ : RÉEMPLOI ET RÉUTILISATION

### CAS D'USAGE



### ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



### VOIR AUSSI

Recyclage-01

## [RÉUTILISATION-01] FACILITATION DE LA RÉUTILISATION DE COMPOSANTS GRÂCE À LA TRAÇABILITÉ

### DESCRIPTION

Le Jumeau Numérique facilite la réutilisation grâce à la traçabilité des différents composants et matériaux qui constituent le produit. La connaissance fine de la composition du produit permet en effet de déterminer ce qui peut être remis à neuf, ce qui peut être réutilisé dans d'autres produits, de même nature ou non, et enfin ce qui doit être recyclé ou détruit. Les composants et matériaux à risque (matières dangereuses, polluantes...) sont identifiés et la sécurité des personnes et de l'environnement est assurée. Le tri est également facilité : par exemple différents plastiques utilisés dans le produit pourront suivre différentes filières de recyclage.

Le Jumeau Numérique assure la traçabilité des composants installés ou remplacés, et reflète leur état d'usage. Ceci facilite le démontage ou le démantèlement. Les pièces valorisables ou réutilisables sont identifiées selon leur état, facilitant l'économie circulaire.

### INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

- Nature et quantité de matières** ou de composants réutilisables ou recyclables en fin de vie du produit.
- Augmentation de la durée de vie** des composants du produit.

### EXEMPLES INDUSTRIELS

- **Récupération de pièces** dans une casse automobile à partir de véhicules en fin de vie.
- **Récupération de composants de batterie** selon leur état (pack, modules, cellules).
- **Démantèlement d'avions**.
- **Construction de nouveaux véhicules, d'équipements électroniques...** grâce à la récupération de composants issus de produits en fin de vie.

## PILIER 5

CONSUMMATION RESPONSABLE :  
RÉDUCTION DE L'IMPACT DE L'USAGE

### CAS D'USAGE



### ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



## [USAGE-01] RÉDUCTION DE L'IMPACT DU PRODUIT EN UTILISATION

### DESCRIPTION

Livré avec le produit physique, le Jumeau Numérique du produit en reflète toutes les caractéristiques et options. Par la suite, son état est constamment mis à jour selon les données captées lors de l'utilisation et la maintenance du produit et acheminées dans le *cloud*. Ces données sont analysées, par exemple par un algorithme d'intelligence artificielle, afin d'optimiser l'usage et la maintenance du produit en fonction des habitudes spécifiques de l'utilisateur et du contexte d'usage qui ne peuvent être prises en compte lors de la conception.

L'optimisation de l'usage en fonction du comportement de l'utilisateur et du contexte peut ainsi se traduire par des actions directes sur l'équipement, des recommandations à destination du consommateur (afin d'économiser l'énergie par exemple), des mises à jour de logiciel embarqué, des recommandations de maintenance, etc.

### INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

-  Quantités de gaz à effet de serre émises lors de l'utilisation du produit.
-  Nature et quantité de matières consommées lors de l'utilisation du produit (exemple : encre d'une imprimante).
-  Consommation de ressource en eau lors de l'utilisation du produit.
-  Distances parcourues lors de l'utilisation d'un véhicule.
-  Déchets et pollution résultant de l'usage du produit.
-  Consommation d'énergie lors de l'utilisation du produit.

### EXEMPLES INDUSTRIELS

- **Limitation de la consommation d'énergie** grâce à l'envoi au conducteur du véhicule ou à l'utilisateur du produit de suggestions personnalisées ou grâce à la mise à jour de logiciels embarqués, en fonction du comportement de conduite ou d'usage enregistré dans le Jumeau Numérique (réduction de vitesse, changement de trajectoire, usage responsable...).
- **Recommandation d'une opération de maintenance** afin d'éviter une panne future après analyse des données de vol dans le cas d'un avion, des données de fonctionnement et d'état dans le cas d'une machine-outil, etc.
- **Pilotage au plus juste d'un équipement de chauffage d'eau chaude sanitaire.** Le Jumeau Numérique permet de déterminer précisément la durée nécessaire pour monter l'eau en température en partant d'un état donné. Grâce à des capteurs, il est possible de déterminer automatiquement, à différents moments de la journée, la consigne de température à privilégier dans le ballon d'eau chaude pour répondre aux attentes de l'utilisateur, tout en limitant la consommation d'énergie.

## PILIER 6

ALLONGEMENT  
DE LA DURÉE D'USAGE

### CAS D'USAGE



### ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



### VOIR AUSSI

Réutilisation-01

## [DURÉE-01] ALLONGEMENT DE LA DURÉE D'USAGE DU PRODUIT

### DESCRIPTION

Le Jumeau Numérique du produit et de ses sous-systèmes permet de connaître l'état de ses composants. Cette information permet d'anticiper des pannes grâce à la maintenance prédictive et de planifier le remplacement de composants défectueux, si possible avec des composants de seconde main (cf. situation de réduction d'impact « Diminution de la consommation de pièces de rechange grâce à la maintenance prédictive »). La durée d'usage du produit est ainsi augmentée.

Par ailleurs, la connaissance des métriques d'usage d'un produit permet de proposer des ajustements d'utilisation pour limiter l'usure (réduction de vitesse, conduite responsable pour un véhicule).

Enfin, la connaissance des composants du Jumeau Numérique et une conception facilitant le démontage permettent d'augmenter la durée de vie du produit. La réparabilité est ainsi favorisée, ainsi que le réemploi.

### INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

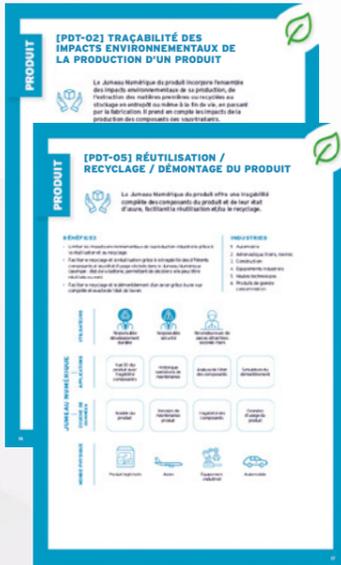
-  Durée de vie du produit ou de l'équipement industriel considéré.

### EXEMPLES INDUSTRIELS

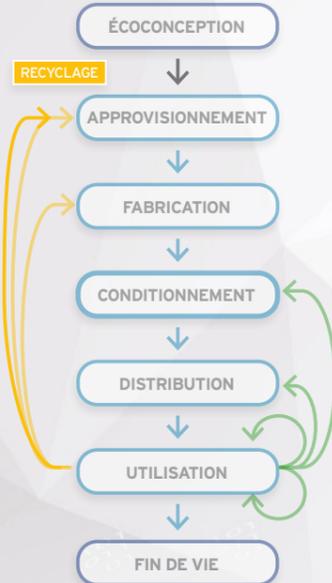
- **Allongement de la durée de vie** d'un produit, cohérent avec le passage à une économie de l'usage ou de la fonctionnalité, où le produit est loué ou intégré dans un service, plutôt qu'acheté. L'intérêt de l'industriel est alors de maintenir le produit en fonctionnement le plus longtemps possible.
- **Maintien en conditions opérationnelles** des équipements industriels (véhicules, machines-outils...) sur une plus longue durée.

# [RECYCLAGE-01] FACILITATION DU RECYCLAGE GRÂCE À LA TRAÇABILITÉ

## CAS D'USAGE



## ÉTAPES ÉCONOMIE CIRCULAIRE



## VOIR AUSSI

Réutilisation-01

## DESCRIPTION

Le Jumeau Numérique du produit, créé à la fabrication puis mis à jour après les réparations, permet la collecte de données sur la nature et la quantité des matériaux et composants le constituant. S'y ajoutent des informations visant à faciliter le recyclage, comme par exemple des instructions de démontage.

Toutes ces informations issues du Jumeau Numérique peuvent être utilisées pour générer des documents réglementaires comme par exemple le *Digital Product Passport*. Elles pourront être utilisées lors du démantèlement des produits pour trier et recycler les matières qui peuvent l'être. En effet, aujourd'hui, les freins à l'utilisation des matériaux recyclés sont liés notamment à la méconnaissance du gisement et de la qualité matière ainsi qu'aux difficultés d'extraction de ces matériaux.

## INDICATEURS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL



Nature et quantité des différents matériaux pouvant être extraits du produit en fin de vie pour réutilisation.



Nature et quantité des différents matériaux pouvant être extraits du produit en fin de vie pour recyclage.

## EXEMPLES INDUSTRIELS

- **Impératif réglementaire de recyclage** de certains produits ou d'incorporation d'un taux minimal de matériaux recyclés lors de la production. Par exemple, l'Union Européenne a pour objectif la collecte de 73% des batteries portables des appareils électroménagers en 2030 et envisage des taux minimum d'utilisation de matériaux recyclés de 16% pour le cobalt, de 85% pour le plomb et de 6% pour le lithium et le nickel<sup>12</sup>.
- **Mise en place de filières industrielles** utilisant des matériaux recyclés. Par exemple, dans la sidérurgie, on tentera de minimiser l'utilisation de minerai vierge tout en maintenant la qualité de l'acier.

# LES 19 OPPORTUNITÉS DE RÉDUCTION D'IMPACT

**[Appro-01]** Réduction de l'impact environnemental de la chaîne d'approvisionnement

**[Appro-02]** Réduction de l'impact environnemental de l'acheminement des composants

**[ÉcoDesign-01]** Augmentation de la durée de vie du produit et réduction de l'impact de l'usage par l'écoconception

**[Production-01]** Réduction de la consommation d'énergie et de ressources d'une ligne de production

**[Production-02]** Réduction de l'empreinte matière et énergétique de la production grâce à la diminution du taux de rebut

**[Outil Indus-01]** Augmentation de la durée de vie d'un équipement et de ses composants

**[Outil Indus-02]** Optimisation et adaptation dynamique de l'environnement IT/OT

**[Outil Indus-03]** Diminution de l'impact environnemental lors de la (re-)conception ou reconfiguration d'une ligne de production

**[Outil Indus-04]** Choix écoresponsables lors de la conception d'une usine

**[Maintenance-01]** Diminution de la consommation d'énergie et de l'impact environnemental des déplacements des opérateurs de maintenance

**[Maintenance-02]** Diminution de la consommation de pièces de rechange grâce à la maintenance prédictive

**[Livraison-01]** Réduction de l'impact environnemental du réseau de distribution

**[Livraison-02]** Réduction de l'impact environnemental de la distribution d'un produit

**[Réglementation-01]** Respect des réglementations environnementales grâce à la traçabilité

**[Territorial-01]** Optimisation des ressources d'un territoire

**[Réutilisation-01]** Facilitation de la réutilisation de composants grâce à la traçabilité

**[Usage-01]** Réduction de l'impact du produit en utilisation

**[Durée-01]** Allongement de la durée d'usage du produit

**[Recyclage-01]** Facilitation du recyclage grâce à la traçabilité

<sup>12</sup> <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20221205IPR60614/batteries-deal-on-new-eu-rules-for-design-production-and-waste-treatment>

# PRISE EN COMPTE DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU Jumeau Numérique LUI-MÊME

## 4.1 | IMPACT DU Jumeau Numérique TOUT AU LONG DE SON CYCLE DE VIE

Interfacés et synchronisés avec le monde physique, les Jumeaux Numériques stockent potentiellement des volumes de données massifs, peuvent effectuer des traitements lourds utilisant l'intelligence artificielle et/ou la simulation numérique et proposer des interfaces utilisateur sophistiquées (réalité virtuelle ou augmentée) ainsi que des services de haut niveau. Ils s'intègrent souvent à des **infrastructures cloud** afin de faciliter leur déploiement et leur exploitation collaborative.

Or, les architectures cloud s'appuient sur de vastes centres de données et réseaux de transmission de données. Ceux-ci sont responsables de près de **1 % des émissions annuelles** mondiales de gaz à effet de serre liées à l'**énergie** selon l'Agence Internationale de l'Énergie<sup>13</sup> et sont responsables de l'émission d'environ 330 millions de tonnes équivalent CO<sub>2</sub> en 2020, en incluant les émissions induites par la fabrication des équipements IT.

Lors de la conception et du développement d'un Jumeau Numérique, la réduction d'impact qu'il peut permettre est donc à mettre en balance avec l'impact environnemental des infrastructures numériques qui le supportent tout au long de son cycle de vie, de la conception à l'usage et la fin de vie.

L'Analyse du Cycle de vie du Jumeau Numérique peut s'appuyer sur le référentiel d'évaluation environnementale des services numériques de l'ADEME<sup>14</sup>, lequel suggère de découper l'inventaire des

équipements et infrastructures nécessaires au service en trois tiers : réseaux, terminaux, centres de données. Afin de limiter les charges de calcul et de stockage imposées aux serveurs et les volumes de données échangées, il est opportun de mettre en œuvre des bonnes pratiques d'écoconception logicielle<sup>15</sup>.

### Indicateurs d'impact environnemental du jumeau numérique



**Volume d'émissions de gaz à effet de serre** liées aux transferts de données et aux calculs



**Ressources nécessaires** à la fabrication des équipements IT (serveurs, réseau...)



**Consommation d'eau des centres de données** en phase de développement et d'usage. Consommation d'eau nécessaire à la fabrication des équipements IT.



**Énergie pour la fabrication et l'exploitation** de l'infrastructure numérique: réseau, calcul et stockage.



**Durée de vie de l'infrastructure** du Jumeau Numérique

<sup>13</sup> [www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks](http://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks)

<sup>14</sup> [bibliaire.ademe.fr/produire-autrement/6022-referentiel-par-categorie-de-produit-rcp-des-services-numeriques.html](http://bibliaire.ademe.fr/produire-autrement/6022-referentiel-par-categorie-de-produit-rcp-des-services-numeriques.html)

<sup>15</sup> <https://github.com/cnumr/best-practices>

## 4.2 | IMPACT CONSÉQUENTIEL DU PROJET Jumeau Numérique

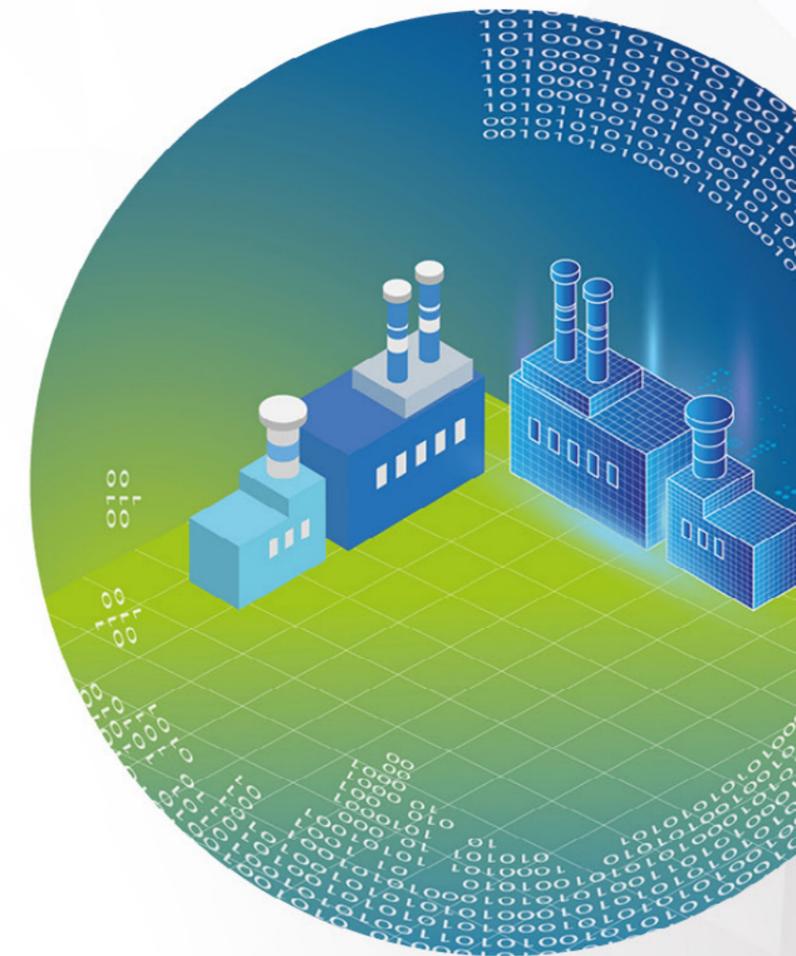
En toute rigueur, l'analyse du cycle de vie du Jumeau Numérique devrait être complétée par une analyse de l'impact indirect du projet. En particulier, des « **effets rebond** » peuvent se produire. Par exemple :

- Une réduction de la consommation d'énergie en production (cf. [Production-01]) peut permettre de produire à moindre coût et d'utiliser l'argent ainsi dégagé pour lancer de nouveaux produits sur le marché, ce qui se traduit par des impacts additionnels. À l'inverse, si l'argent économisé est investi dans l'isolation thermique du bâtiment, l'impact global est bénéfique à niveau de chauffage égal.
- L'utilisation d'un Jumeau Numérique pour le développement de nouveaux produits ou procédés peut faciliter l'écoconception comme nous l'avons vu. Mais le Jumeau Numérique peut permettre aussi de réduire le délai de mise sur le marché de produits, ce qui pourrait entraîner une augmentation de la consommation de biens et un impact environnemental accru.

Une Analyse de Cycle de Vie dite « **conséquentielle** » permet de prendre en compte de telles situations, en comparant les impacts environnementaux avant et après l'introduction du Jumeau Numérique.

La norme ITU L1480, qui s'attache à estimer les émissions carbone évitées pour un service numérique donné, peut aider à conduire cette analyse<sup>16</sup>.

<sup>16</sup> Cf. <https://hellofuture.orange.com/fr/la-recommandation-l1480-quantifie-tous-les-impacts-co2-lies-a-lusage-effet-rebond-compris/>



# ÉLARGISSEMENT À LA DIMENSION SOCIÉTALE DES ACTIVITÉS INDUSTRIELLES

Nous avons vu que le Jumeau Numérique peut contribuer à réduire l'impact environnemental des activités industrielles, avec les réserves exprimées dans le chapitre précédent. Ceci s'inscrit dans l'objectif de respect des limites planétaires<sup>17</sup>. Ce concept a été étendu dans « la théorie du donut<sup>18</sup> » de Kate Raworth : outre le plafond écologique, il convient en effet de se placer au dessus du plancher social du donut qui permet d'assurer le bien-être des humains.

Le Jumeau Numérique pourrait également contribuer à cet objectif dans un contexte industriel, tout en soulevant lui-même des problématiques sociales.

## 5.1 | BÉNÉFICES SOCIÉTAUX

Parmi les bénéfices sociétaux potentiels du Jumeau Numérique, on peut citer<sup>19</sup> :

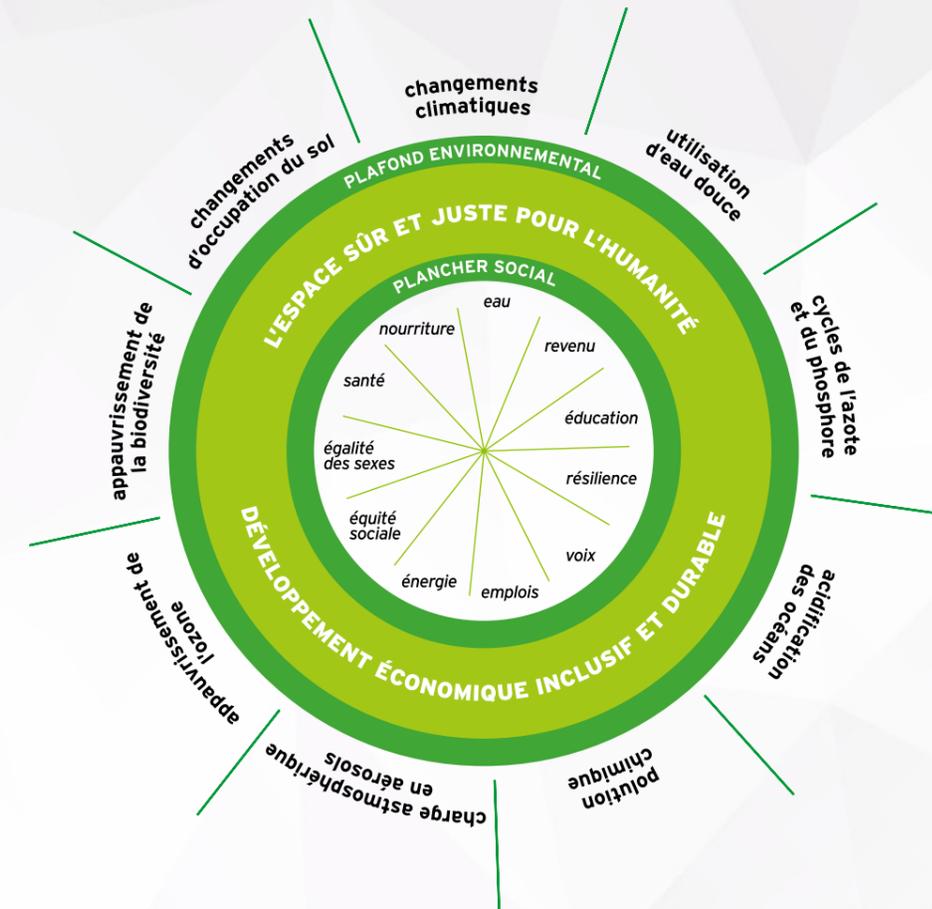
### Au niveau des opérateurs en environnement industriel :

- Une sécurité améliorée, avec détection de situations à risque, par exemple à l'aide de caméras et d'IA.
- Une meilleure ergonomie du poste de travail, prenant en compte la fatigue mentale et physique induite par le type d'opération, la posture des opérateurs engagés dans des processus de production ou de logistique, et les actions répétitives, afin de diminuer notamment les troubles musculo-squelettiques.
- L'apprentissage et la formation grâce à la simulation des opérations sur le poste de travail dans un environnement immersif (Jumeau Numérique couplé à un dispositif de Réalité Virtuelle).

### Au niveau du territoire, le Jumeau Numérique peut permettre de :

- Guider les politiques d'urbanisme en évaluant l'impact sur l'environnement d'aménagements industriels du territoire (bio-diversité, gestion de l'eau, artificialisation des sols...).
- Préparer des interventions en site sensible ou nécessitant des mises en situation spécifiques (incendies, défense...).

## La théorie du donut



## 5.2 | IMPACTS HUMAINS DU JUMEAU NUMÉRIQUE

L'introduction de la technologie du Jumeau Numérique induit un temps de mise au point et de prise en main significatif de par sa puissance et sa complexité et peut nécessiter une adaptation des postes de travail. Ces changements peuvent soulever des résistances, par exemple si le Jumeau Numérique semble contredire ou remplacer l'expertise de l'opérateur ou s'il s'accompagne, dans les applications de sécurité et d'ergonomie, de l'introduction de caméras. Le respect des réglementations de protection de la vie privée comme le RGPD constitue également un point d'attention. Tout ceci requiert donc une vigilance et une réflexion en amont, suivies d'un accompagnement et d'une formation.

<sup>17</sup> [www.notre-environnement.gouv.fr/themes/societe/article/limites-planetaires](http://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/societe/article/limites-planetaires)

<sup>18</sup> [www.oxfamfrance.org/actualite/la-theorie-du-donut-une-nouvelle-economie-est-possible/](http://www.oxfamfrance.org/actualite/la-theorie-du-donut-une-nouvelle-economie-est-possible/)

<sup>19</sup> Pater, J., & Stadnicka, D. (2021). Towards digital twins development and implementation to support sustainability-systematic literature review. Management and Production Engineering Review, 13(3), 63-73.

Greco, A., Caterino, M., Fera, M., & Gerbino, S. (2020). Digital Twin for Monitoring Ergonomics during Manufacturing Production. Applied Sciences, 10(21), 7758.

Bilberg, A., & Malik, A. A. (2019). Digital twin driven human-robot collaborative assembly. CIRP Annals, 68(1).

Romero, D., & Stahre, J. (2021). Towards the Resilient Operator 5.0 : The Future of Work in Smart Resilient Manufacturing Systems. Procedia CIRP, 104, 1089-1094.

# CONCLUSION

Ce document a présenté le potentiel de réduction d'impact environnemental des activités industrielles grâce au Jumeau Numérique.

Le Jumeau Numérique peut ainsi constituer un levier pour mettre en œuvre l'économie circulaire et atteindre les objectifs de développement durable.

En collectant, reliant et traitant un ensemble cohérent de données de processus de production, de fabrication et d'usage de produits, il peut permettre d'estimer et réduire l'impact de ces activités. Ainsi, l'utilisation d'un Jumeau Numérique, notamment en écoconception, aide à relier les informations de terrain, la modélisation et la simulation numérique pour créer et comparer différents scénarios de fabrication et d'usage.

Le Jumeau Numérique peut contribuer à réduire l'impact environnemental en :

- baissant la consommation d'énergie en production et en usage,
- réduisant les émissions de gaz à effet de serre grâce à l'écoconception, à l'allongement de la durée de vie des produits et à l'optimisation des approvisionnements et des livraisons,
- diminuant la consommation de matières premières par la conception, le recyclage et la réutilisation.

Cependant, il est essentiel de prendre en compte l'impact du Jumeau Numérique lui-même, notamment celui des infrastructures telles que les centres de données et les réseaux de communication. En début de projet d'implémentation, une analyse de cycle de vie conséquente est donc nécessaire pour évaluer les bénéfices attendus par rapport à l'impact du Jumeau Numérique lui-même.

<sup>20</sup> <https://portail-rse.beta.gouv.fr/fiches-reglementaires/rapport-de-durabilite-csrd/>

<sup>21</sup> <https://portail-rse.beta.gouv.fr/csrd/esrs-comprendre-les-standards-csrd-de-durabilite/>

<sup>22</sup> <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/reglement-reach>

<sup>23</sup> <https://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/directive-sur-les-emissions-industrielles-r3759.html?lang=fr>

<sup>24</sup> <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/risques-technologiques-directive-seveso-loi-risques>

<sup>25</sup> <https://www.info.gouv.fr/actualite/neutralite-carbone-la-nouvelle-taxonomie-verte-europeenne>

# INDEX

## ÉTAPES DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERTES PAR CHAQUE OPPORTUNITÉ

## OPPORTUNITÉS DE RÉDUCTION D'IMPACT PAR CATÉGORIE D'INDICATEURS

Le Jumeau Numérique peut aussi faciliter la mise en conformité aux diverses réglementations environnementales comme :

- le Digital Product Passport (évoqué dans [Réglementation-01]),
- le CSRD<sup>20</sup> (Corporate Sustainability Reporting Directive),
- les ESRS<sup>21</sup> (European Sustainability Reporting Standards)
- les réglementations REACH<sup>22</sup>, IED<sup>23</sup> (Industrial Emissions Directive) ou SEVESO<sup>24</sup> grâce à la traçabilité des substances dangereuses.

Le Jumeau Numérique fournit aussi des capacités potentiellement éligibles à la taxonomie européenne<sup>25</sup>, comme la maintenance prédictive.

Le Jumeau Numérique peut également aider au développement de nouveaux modèles économiques reposant sur l'usage et le partage plutôt que sur la possession individuelle. L'enjeu est alors pour le fabricant de maintenir le produit en usage le plus longtemps possible (cf. [Durée O1]).

Enfin, le Jumeau Numérique peut contribuer à la dimension sociale du développement durable, notamment en améliorant les conditions de travail, la sécurité et la formation des opérateurs grâce à la simulation des environnements à risque.

## Étapes de l'économie circulaire couvertes par chaque opportunité

### Étape Économie Circulaire

#### Opportunité de réduction d'impact

	ÉCOCONCEPTION	APPROVISIONNEMENT	FABRICATION	CONDITIONNEMENT	DISTRIBUTION	UTILISATION	PARTAGE	RÉPARATION	RÉUTILISATION	RECONDITIONNEMENT	REFABRICATION	DÉSASSEMBLAGE	RECYCLAGE	FIN DE VIE
Réduction de l'impact environnemental de la chaîne d'approvisionnement		X												
Réduction de l'impact environnemental de l'acheminement des composants		X												
Augmentation de la durée de vie du produit et réduction de l'impact de l'usage par l'écoconception	X													
Réduction de la consommation d'énergie et de ressources d'une ligne de production			X	X										
Réduction de l'empreinte matière et énergétique de la production grâce à la diminution du taux de rebut			X	X										
Augmentation de la durée de vie d'un équipement et de ses composants			X	X										
Optimisation et adaptation dynamique de l'environnement IT/OT			X	X										
Diminution de l'impact environnemental lors de la (re-)conception d'une ligne de production	X													
Choix écoresponsables lors de la conception d'une usine	X													
Diminution de la consommation d'énergie due aux déplacements des opérateurs de maintenance			X	X		X								
Diminution de la consommation de pièces de rechange grâce à la maintenance prédictive			X	X		X								
Réduction de l'impact environnemental du réseau de distribution					X									
Réduction de l'impact environnemental de la distribution d'un produit					X									
Respect des réglementations environnementales grâce à la traçabilité	X	X	X	X	X	X								X
Optimisation des ressources d'un territoire		X	X	X	X	X					X	X	X	
Facilitation de la réutilisation de composants grâce à la traçabilité									X	X	X	X		
Réduction de l'impact du produit en utilisation						X								
Allongement de la durée d'usage du produit						X	X	X	X	X				
Facilitation du recyclage grâce à la traçabilité													X	

## Opportunités de réduction d'impact par catégories d'indicateurs

### Catégories d'indicateurs environnementaux

 EMISSIONS GES	 MATIÈRE	 EAU	 ÉNERGIE	 TRANSPORT	 DUREE DE VIE	 REBUT	 POLLUTION	 RECYCLAGE	 ARTIFICIALISATION DES SOLS
---	---	---	---	---	--	---	---	---	--

### Opportunité de réduction d'impact

Réduction de l'impact environnemental de la chaîne d'approvisionnement	[Appro-01]	X				X			X	X	
Réduction de l'impact environnemental de l'acheminement des composants	[Appro-02]	X				X					
Augmentation de la durée de vie du produit et réduction de l'impact de l'usage par l'écoconception	[EcoDesign-01]	X		X	X		X		X		
Réduction de la consommation d'énergie et de ressources d'une ligne de production	[Production-01]		X	X	X						
Réduction de l'empreinte matière et énergétique de la production grâce à la diminution du taux de rebut	[Production-02]		X	X	X			X			
Augmentation de la durée de vie d'un équipement et de ses composants	[Outil Indus-01]						X				
Optimisation et adaptation dynamique de l'environnement IT/OT	[Outil Indus-02]		X		X						
Diminution de l'impact environnemental lors de la (re-)conception d'une ligne de production	[Outil Indus-03]	X	X	X	X				X	X	
Choix écoresponsables lors de la conception d'une usine	[Outil Indus-04]	X	X	X	X				X	X	X
Diminution de la consommation d'énergie due aux déplacements des opérateurs de maintenance	[Maintenance-01]	X				X			X		
Diminution de la consommation de pièces de rechange grâce à la maintenance prédictive	[Maintenance-02]						X				
Réduction de l'impact environnemental du réseau de distribution	[Livraison-01]	X				X					
Réduction de l'impact environnemental de la distribution d'un produit	[Livraison-02]	X				X					
Respect des réglementations environnementales grâce à la traçabilité	[Réglementation-01]	X	X		X				X	X	
Optimisation des ressources d'un territoire	[Territorial-01]	X	X	X	X	X			X	X	
Facilitation de la réutilisation de composants grâce à la traçabilité	[Réutilisation-01]						X			X	
Réduction de l'impact du produit en utilisation	[Usage-01]	X	X	X	X	X			X		
Allongement de la durée d'usage du produit	[Durée-01]						X				
Facilitation du recyclage grâce à la traçabilité	[Recyclage-01]		X							X	



Créée en 2015, l'Alliance Industrie du Futur (AIF), association loi 1901, organise et coordonne, au niveau national, les initiatives, projets et travaux des PME/ETI, pour la modernisation des outils industriels et la transformation de leur modèle économique, notamment par l'apport de nouvelles technologies.

Présidée par Frédéric Sanchez depuis mars 2021, elle porte la Filière **Solutions Industrie du Futur** labellisée par le Conseil National de l'Industrie : [www.solutionsindustriedufutur.org](http://www.solutionsindustriedufutur.org).

Elle anime pour cela les groupes projets du Contrat Stratégique de Filière. Son parti pris : intégrer le salarié avec son savoir-faire et son savoir-être, comme élément majeur de la réussite de ce processus. L'objectif est de repositionner l'offre française de solutions pour l'industrie du futur au cœur de la relance industrielle du pays.

#### REMERCIEMENTS

L'AIF tient à remercier tous les participants du Comité Technique « Jumeau Numérique » pour leur contribution à la réalisation de cette brochure, et en particulier :

- Emmanuelle Abisset-Chavanne, Ensam
- Christian Chaplais, Dassault Systèmes
- Damien Lamy, Mines Saint-Etienne
- Mariza Maliqi, Mines Saint-Etienne
- Yvan Picaud, Orange
- Ariane Piel, CEA
- Thomas Rousselot, AFNeT Services
- Olivier Scart, Dassault Systèmes
- Pascale Vicat-Blanc, INRIA