



CONCEPTION DE LA PERTURBATION

Le rôle critique des jumeaux virtuels pour accélérer le développement durable

La technologie des jumeaux virtuels est un levier sous-utilisé pour opérationnaliser la durabilité et l'économie circulaire à grande vitesse et à grande échelle.



Accenture Industry X

Avant-propos

Le monde évolue d'une manière qu'il est impossible d'ignorer. Alors que nous continuons à comprendre l'impact de la pandémie mondiale sur la vie dans les années à venir, il est important de reconnaître une leçon essentielle : nous exerçons des pressions de plus en plus dangereuses sur les biens communs mondiaux et nous devons agir rapidement pour éviter les scénarios à haut risque.

Dans cette optique, les dirigeants de l'industrie, des gouvernements et de la société civile doivent travailler de plus en plus ensemble pour atteindre nos objectifs mondiaux d'ici 2030. Il est clair que nous devons tous faire preuve d'urgence car il ne nous reste que dix ans pour prévenir les dommages irréversibles dus au changement climatique.

La transformation complète nécessaire pour atteindre ces objectifs nécessitera de nouvelles façons de gérer les produits et services tout au long de leur cycle de vie, depuis la conception, l'utilisation et la fin de vie. Pour ce faire, nous devons trouver de nouvelles façons de travailler ensemble pour créer des économies circulaires, favoriser la compétitivité et les opportunités de croissance responsable et garantir collectivement que les révolutions technologiques tiennent leur promesse d'une durabilité accrue.

En réponse à ces défis, Accenture et Dassault Systèmes se sont associés pour faire progresser la réflexion sur le potentiel de la technologie des jumeaux virtuels pour accélérer cette transformation durable vers une économie plus circulaire. Les jumeaux virtuels peuvent aider les entreprises à réduire leurs coûts, leur utilisation des ressources et leur empreinte carbone et ils peuvent soutenir une innovation de rupture et des modèles commerciaux agiles, centrés sur le client et plus circulaires.

Ils offrent un potentiel de hausse significatif pour l'innovation durable à grande échelle, nécessaire à la création de chaînes de valeur mondiales plus responsables, et présentent une opportunité de stimuler le progrès systémique vers des systèmes économiques plus circulaires et nettement moins gourmands en carbone.

Ce rapport examine ces opportunités et les cas d'utilisation dans lesquels les jumeaux virtuels peuvent, ou sont déjà, modéliser des chaînes de valeur entières sous forme d'expériences virtuelles, démontrant comment la technologie peut débloquent des avantages supplémentaires combinés de 1,3 billion de dollars de valeur économique et Réduction des émissions de 7,5 Gt de CO₂e d'ici 2030.

Ensemble, nous sommes enthousiasmés par le potentiel de ces technologies de jumeaux virtuels pour concevoir et fournir les nouveaux produits et systèmes dont nous avons besoin pour nos économies circulaires sans carbone. Cependant, nous devons veiller à déployer ces technologies à un rythme soutenu et en faisant de la durabilité un moteur clé, car ce n'est qu'à ce moment-là que nous pourrions garantir que nos objectifs mondiaux seront atteints d'ici 2030.



Florence Verzelen

Vice-président exécutif Industrie,
Marketing sur le terrain et durabilité
Dassault Systèmes



Pierre Lacy

Directeur de la responsabilité et mondial
Responsable des services de développement durable
Accenture



Nigel Stacey

Industrie leader mondiale X
Accenture

Contenu

Résumé exécutif	5
1. La décennie des résultats	7
2. L'opportunité d'exploiter les jumeaux virtuels	16
2.1. Construction et villes	19
2.2. Biens de consommation emballés	22
2.3. Transport et mobilité	24
2.4. Sciences de la vie	27
2.5. Électrique et électronique	30
2.6. Autres cas d'utilisation notables permettant la circularité	33
3. Points de vue des leaders de l'industrie et perspectives d'avenir	40
4. Annexe	47
4.1. Cas d'utilisation et études de cas supplémentaires spécifiques à l'industrie	48
4.2 Méthodologie	65
4.3. Remerciements et références	81

Résumé exécutif

Un jumeau virtuel est une représentation virtuelle en temps réel d'un produit, d'une plateforme ou d'un écosystème qui peut être utilisée pour modéliser, visualiser, prédire et fournir des commentaires sur les propriétés et les performances. Les technologies de jumeaux virtuels offrent une opportunité inexploitée de réduire les coûts opérationnels et de générer une perturbation durable, circulaire et de bout en bout des chaînes de valeur.

En 2020, le marché mondial des jumeaux virtuels est estimé à un peu plus de 5,4 milliards de dollars américains et devrait croître à un TCAC de 36 % au cours des cinq prochaines années. Cependant, sa portée actuelle est limitée et le marché n'a atteint qu'un taux d'adoption de 10 % à l'échelle mondiale, car cette technologie n'est pas encore complètement mature et est sous-utilisée dans de nombreux secteurs.

Malgré un taux d'adoption limité à ce jour, la technologie des jumeaux virtuels peut accélérer la réalisation des objectifs de développement durable des Nations Unies. Cette étude examine des cas d'utilisation dans les secteurs de la construction, des biens de consommation emballés, des transports, des sciences de la vie et de l'électricité et de l'électronique afin d'encadrer l'impact réel et potentiel de la technologie.

Cinq cas d'utilisation ont été évalués quantitativement pour leur impact sur l'activité et la durabilité, lorsque la disponibilité des données et/ou la maturité technologique le permettent ; d'autres ont été mis en valeur qualitativement pour leur fort potentiel de moteur de changement. L'analyse révèle que ces cinq cas d'utilisation peuvent à eux seuls générer des avantages supplémentaires combinés de 1,3 billion de dollars de valeur économique et de réductions des émissions de 7,5 Gt de CO2 d'ici 2030.

Il ressort clairement de cette étude que les avantages des technologies de jumeaux virtuels sont nombreux et que leur rôle potentiel dans le soutien d'une économie circulaire est important. Ils permettent de réduire la durée du cycle de vie du développement de produits, d'améliorer la qualité et le contrôle de la fabrication, ainsi qu'une utilisation et une récupération plus efficaces des ressources tout au long du cycle de vie. Mais son adoption a été limitée en raison de plusieurs obstacles majeurs.

Les principaux d'entre eux sont une compréhension limitée des cas d'utilisation et des avantages de la technologie, la difficulté à mesurer le retour sur investissement combiné de l'activité et du développement durable dans le cadre de l'analyse de rentabilisation, et un manque potentiel de leadership exécutif progressiste dans l'adoption de la technologie pour la compétitivité et le programme de développement durable.

Pour surmonter ces obstacles et accélérer l'adoption des technologies de jumeaux virtuels, les dirigeants devraient prendre en compte ces cinq recommandations clés :

1 

Relier les programmes de technologie et de développement durable : Garantir le soutien des dirigeants pour lier les programmes de technologie, de développement durable et circulaire, y compris la mesure et le suivi de la valeur, la connexion aux stratégies de croissance et la prise en compte de la valeur durable dans la prise de décision d'investissement clé ;

2  4 5 

Améliorer la compréhension : Améliorer la compréhension de la technologie des jumeaux virtuels et des cas d'utilisation potentiels dans l'ensemble de l'organisation, y compris les exigences en matière d'infrastructure et les contraintes héritées ;

Concentrez-vous sur les cas d'utilisation perturbateurs et de changement de système : concentrez-vous sur la mise à l'échelle de solutions ayant un impact transformationnel sur la durabilité, allant au-delà des améliorations d'efficacité et de l'incrémentalisme, vers un changement systémique tel que présenté par l'économie circulaire et la décarbonisation de l'industrie à grande échelle ;



Déployer de manière responsable : Déployer des jumeaux virtuels basés sur des principes responsables et inclusifs, en garantissant que la transparence, l'inclusion et l'accessibilité soient intégrées dès le début ;



Rassembler le soutien de l'écosystème : bâtir un large soutien auprès des secteurs privé, public et de la société civile pour garantir le succès à long terme et contribuer à réduire les risques et à piloter des cas d'utilisation où le retour sur investissement peut être perçu comme trop incertain pour le capital privé.

La décennie pour réaliser



La crise des biens communs mondiaux s'aggrave

La dégradation environnementale inhérente à nos modèles actuels de production et de consommation a atteint des niveaux critiques. Continuer sur cette voie présente un risque incroyablement élevé, car cela pourrait déclencher des changements environnementaux brusques et non linéaires au sein des systèmes planétaires, et nous en ressentons déjà les effets dans tous nos écosystèmes :

Figure 1 : Exemples clés de dégradation de l'environnement

	La vie sur terre	Les populations animales de la Terre ont diminué de près de 70 % depuis 1970, en grande partie à cause de la perte d'habitat ¹ . Les trois dernières années pour lesquelles des données sont disponibles (2016, 2017, 2018) ont connu les trois taux de perte de forêt primaire les plus élevés depuis le début du siècle.
	La vie en mer	Près de 90 % des stocks mondiaux de poissons marins sont désormais pleinement exploités, surexploités ou épuisés ² . et la chimie des océans évolue plus rapidement qu'elle ne l'a jamais été depuis peut-être 300 millions d'années, en raison de l'absorption chaque année d'environ 25 % de la pollution anthropique par les gaz à effet de serre ³ .
	Climat	Les émissions de GES doivent diminuer d'environ 8 % chaque année d'ici 2030 ⁴ si le monde veut être sur la bonne voie pour atteindre son objectif de limiter l'augmentation de la température à près de 1,5° Celsius, comme convenu par les scientifiques et les décideurs politiques dans le cadre de l'Accord de Paris. Malgré cet accord, la banquise arctique estivale pourrait disparaître dès 2035 en raison de l'augmentation des émissions.
	Eau	De graves impacts sur le cycle mondial de l'eau se sont produits en raison de l'augmentation des prélèvements et d'une pollution incontrôlée ; d'ici 2030, nous pourrions être confrontés à un déficit de 40 % de l'eau douce dont nous aurons besoin pour faire fonctionner notre économie mondiale ⁶ .
	Système alimentaire	La recherche a révélé qu'environ 30 % des terres cultivées en quantité suffisante ou de haute qualité dans le monde ont été perdues à un rythme qui dépasse de loin le rythme des processus naturels visant à remplacer les sols en diminution ⁷ .

Il s'agit d'une décennie cruciale pour l'action

Pour faire face à cette crise, nous devons transformer radicalement nos systèmes de production et de consommation. Il reste désormais moins de dix ans pour atteindre les objectifs de développement durable des Nations Unies (ODD, également connus sous le nom d'objectifs mondiaux) fixés par les gouvernements, les entreprises et d'autres parties prenantes, et nous sommes terriblement en retard. Le changement progressif n'est plus une option.

Les rapports d'avancement des ODD ont révélé que malgré des améliorations dans un certain nombre de domaines sur certains objectifs, les progrès ont été lents, voire inversés, en particulier à la suite de la pandémie de COVID en 2020. Même si nous avons encore une chance de changer cette trajectoire, nous devons comprendre que les dix prochaines années sont cruciales.

Les PDG sont prêts à garantir que les entreprises jouent leur rôle dans notre réponse collective. Dans la cinquième étude des PDG du Pacte mondial des Nations Unies — Accenture Strategy sur le développement durable de 2019, près de la moitié des PDG participants ont déclaré que les entreprises seraient l'acteur le plus important dans la réalisation des objectifs.

Pourtant, seuls 21 % des PDG estiment que les entreprises réalisent déjà ce potentiel en contribuant aux Objectifs. Mécontents de ce statu quo, les PDG conviennent que le monde des affaires devrait apporter une contribution bien plus grande à la réalisation d'un changement significatif.

un monde plus durable d'ici 2030.

Il reste désormais moins de dix ans pour atteindre les objectifs de développement durable des Nations Unies (ODD, également connus sous le nom d'objectifs mondiaux) fixés par les gouvernements, les entreprises et d'autres parties prenantes, et nous sommes terriblement en retard. Le changement progressif n'est plus une option

Les jumeaux virtuels sont un accélérateur de durabilité sous-utilisé

Pour accélérer cette transformation durable vers des modèles plus circulaires, l'expérimentation commerciale de nouvelles technologies numériques, physiques et biologiques a prospéré ces dernières années. Certaines technologies ont déjà considérablement mûri. L'Internet des objets (IoT), par exemple, est devenu la nouvelle norme en matière d'appareils et d'équipements. Cependant, il y a eu moins d'expérimentation jusqu'à présent avec la technologie utilisée aujourd'hui pour concevoir, fabriquer et construire les biens les plus complexes.

Cette technologie est connue sous le nom de gestion du cycle de vie des produits (PLM) et a considérablement évolué ces dernières années avec l'avènement des plateformes d'innovation de production. Les technologies de jumeaux virtuels reposent sur les bases fournies par le PLM mais permettent des formes d'innovation beaucoup plus disruptives.

Les jumeaux virtuels sont utilisés pour modéliser des systèmes complexes, des voitures aux villes en passant par les cœurs humains, et simuler leur fonctionnement avec une précision qui permet à l'utilisateur de passer directement d'un modèle virtuel à la création, sans passer les années qu'il faut normalement pour prototyper et améliorer progressivement sur des conceptions existantes.

Cette rapidité de mise sur le marché et cette réduction des risques des projets complexes expliquent pourquoi les technologies de jumeaux virtuels ont été utilisées dans le développement de 85 % des véhicules électriques dans le monde, de plus de 75 % de l'énergie éolienne mondiale et de projets pilotes de développement durable révolutionnaires tels que l'énergie électrique, des fours, le premier avion solaire au monde et de nouveaux biomatériaux⁸. Les univers virtuels permettent aux utilisateurs de concevoir, tester et modéliser de nouveaux produits et processus durables et révolutionnaires en un temps record.

Univers virtuels

permettre aux utilisateurs de concevoir, tester et modéliser de nouveaux produits et processus durables et révolutionnaires en un temps record

Expliquer les jumeaux : histoire, définition et applications

Le programme d'industrialisation intelligente a insufflé une nouvelle vie et un nouveau potentiel au concept de jumeau numérique. Les leaders d'opinion du monde universitaire et du monde des affaires ont beaucoup écrit sur le sujet au cours des dernières années et la terminologie utilisée couvre un large spectre. Dans cet article, nous qualifions les jumeaux numériques de virtuels, reflétant l'évolution du concept.

Pour éviter toute ambiguïté, nous définissons les jumeaux virtuels comme une représentation virtuelle en temps réel d'un produit, d'un processus ou d'un système complet, utilisée pour modéliser, visualiser, prédire et fournir des commentaires sur les propriétés et les performances, et basée sur un fil numérique sous-jacent. .

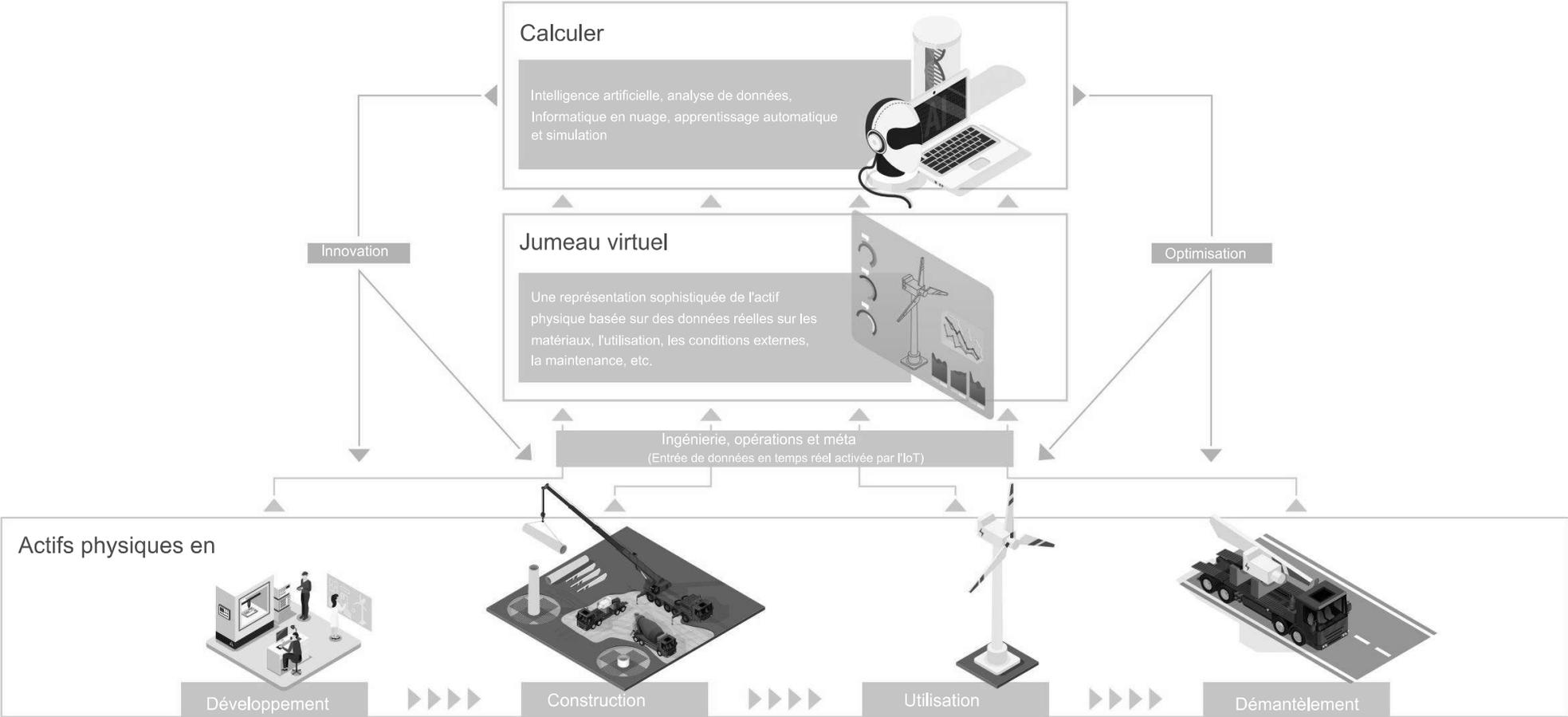
Ce dernier est le réseau interconnecté de processus et de capacités numériques qui créent, communiquent et traitent des informations sur les produits tout au long de leur cycle de vie.

Cela permet au modèle virtuel d'être continuellement mis à jour tout au long du cycle de vie de l'actif physique (ou selon les paramètres des processus de production), avec des données supplémentaires collectées à partir d'interactions réelles (voir Figure 2).

Nous définissons les jumeaux virtuels comme une représentation virtuelle en temps réel d'un produit, d'un processus ou d'un système complet, utilisée pour modéliser, visualiser, prédire et fournir des commentaires sur les propriétés et les performances, et basée sur un fil numérique sous-jacent.

1 La décennie pour réaliser

Figure 2 : Comment les jumeaux virtuels interagissent avec le monde réel



Aperçu du marché : une technologie en pleine maturité, prête à connaître une croissance rapide

Les avantages commerciaux de l'utilisation des jumeaux virtuels sont vastes et transformationnels, parmi lesquels les principaux sont des options de conception plus riches et un prototypage rapide, une amélioration significative de l'efficacité et de la qualité des processus de production, des performances opérationnelles améliorées et une prolongation de la durée de vie des actifs, une planification et une résilience des scénarios de la chaîne d'approvisionnement, et une planification et exécution du déclassement.

Il est révélateur que 100 % des plus grands fabricants mondiaux de véhicules électriques et 90 % des plus grands laboratoires pharmaceutiques et de soins de santé utilisent des solutions de jumeaux virtuels. Cependant, la grande majorité des organisations privées et publiques dans le monde n'ont pas encore testé et étendu de telles solutions9 .

En 2020, le marché mondial des jumeaux virtuels est estimé à 5,4 milliards de dollars américains et devrait croître à un TCAC de 36 % au cours des cinq prochaines années10. En termes de niveaux d'adoption, les jumeaux virtuels sont prêts à connaître une croissance rapide à partir d'une petite base.

À l'heure actuelle, les jumeaux virtuels ne sont adoptés qu'à des taux de 8 à 10 % en moyenne dans tous les secteurs11, mais la croissance future devrait être tirée par le secteur des transports, où le niveau de référence est déjà relativement élevé (taux d'adoption actuels de 30 à 40 % pour les startups de véhicules électriques) , et 60 à 70 % pour les meilleurs équipementiers de leur catégorie actuellement).

La croissance devrait également être significative dans quatre autres secteurs :

Construction (taux d'adoption actuel de

environ 1 %), l'électricité et l'électronique (adoption actuelle de moins de 5 %), les biens de consommation emballés (adoption actuelle d'environ 3 à 5 %) et les sciences de la vie (actuellement à environ 5 à 10 % sur la base du secteur pharmaceutique).

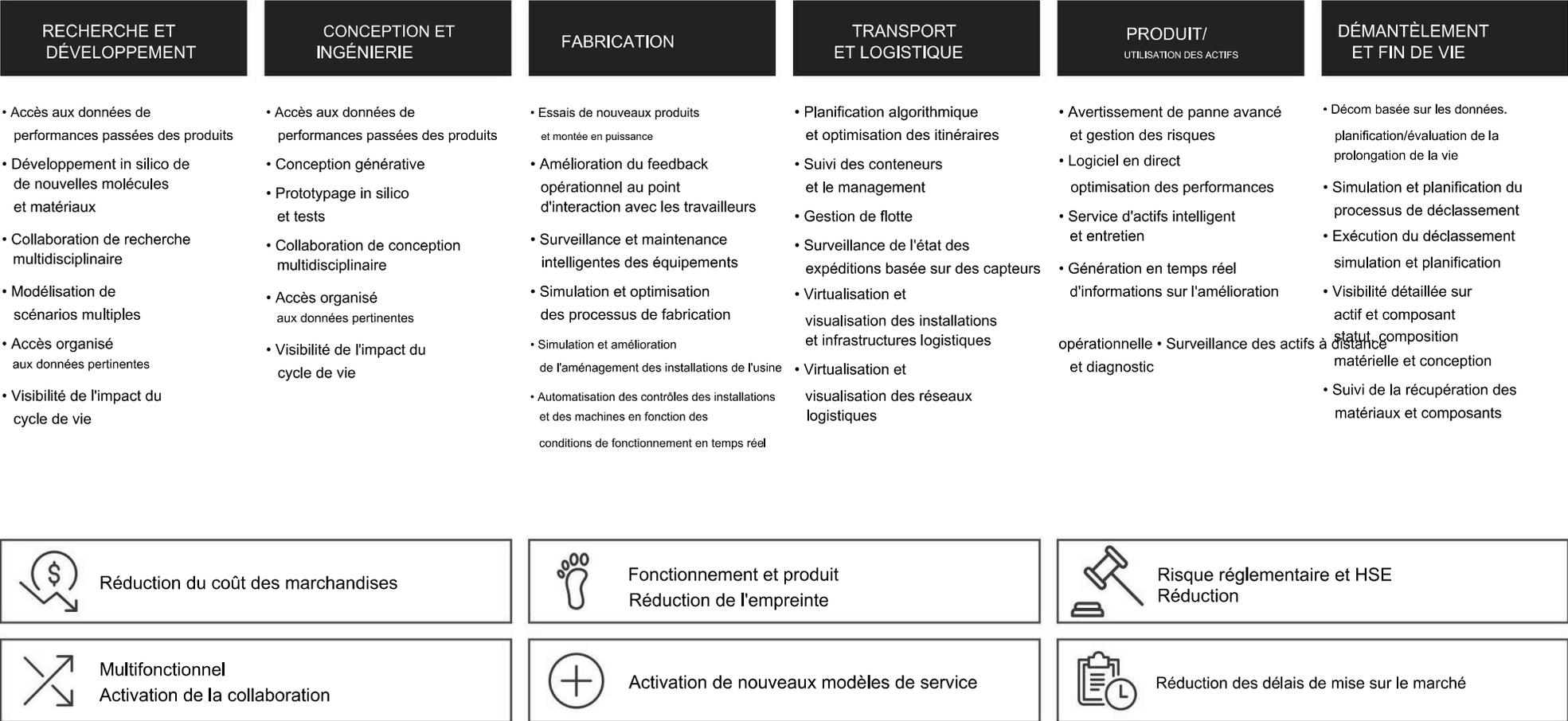
Compte tenu de l'omniprésence croissante des jumeaux virtuels au cours de la prochaine décennie, il existe un potentiel de rupture susceptible de générer des changements significatifs et durables, s'ils sont exploités de manière responsable – une opportunité unique dans la décennie de l'action.

36 % TCAC

taux de croissance prévu pour le marché mondial des jumeaux virtuels 2020-20258

1 La décennie pour réaliser

Figure 3 : Principales capacités des jumeaux virtuels et impacts observés sur l'entreprise (non exhaustif)



Portée de l'étude

L'étude se concentre sur cinq secteurs et cas d'utilisation de jumeaux virtuels, priorisés en raison de leur fort potentiel de création de valeur durable, en plus de deux cas d'utilisation indépendants du secteur.

Ces cinq cas d'utilisation spécifiques à l'industrie sont évalués quantitativement pour leur impact sur l'activité et la durabilité jusqu'en 2030 (en mettant l'accent sur la durabilité environnementale et la réduction des émissions de GES pour plus de simplicité).

Le rapport présente également cinq cas d'utilisation supplémentaires spécifiques à l'industrie présentés qualitativement dans l'annexe 4.1 aux côtés d'études de cas illustratives, car les données sont soit limitées, soit sensibles, mais les preuves existantes suggèrent que leur potentiel à conduire le changement est important.

Pour plus de détails sur la portée et la méthodologie de l'étude, veuillez consulter la section 4.2 de l'annexe.



L'opportunité en exploitant des jumeaux virtuels

Cinq cas d'utilisation peuvent à eux seuls débloquer des avantages supplémentaires combinés de 1,3 Tn USD de valeur économique et 7,5 Gt de CO₂e réductions jusqu'en 2030

Cette étude vise à mettre en évidence le lien croissant et de plus en plus critique entre les technologies de jumeaux virtuels et la durabilité et l'économie circulaire, en identifiant et en quantifiant certains des principaux résultats positifs dans les cas d'utilisation et les secteurs.

Notre analyse quantitative des avantages de cinq cas d'utilisation met en évidence la valeur en jeu importante du déploiement à grande échelle de la technologie des jumeaux virtuels dans tous les secteurs, au-delà des pilotes individuels et des fruits à portée de main.

Malgré cette valeur significative, il est également important de noter que cette analyse ne concerne que ce nombre limité de cas d'utilisation et que l'impact total du déploiement à grande échelle des jumeaux virtuels dans les systèmes économiques mondiaux est susceptible de générer un potentiel de hausse beaucoup plus important.

De plus, ce résultat est très probablement sous-estimé, puisque les hypothèses clés et les paramètres sensibles utilisés dans l'analyse étaient basés sur l'extrémité inférieure et prudente des plages observées.

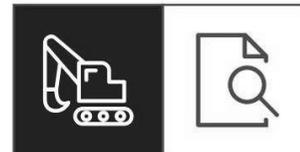
La figure 4 donne un aperçu des cas d'utilisation analysés quantitativement par secteur. Des cas d'utilisation supplémentaires présentés qualitativement sont également disponibles en annexe 4.1.

1,29 milliard de dollars américains
d'opportunités de valeur économique cumulée combinées jusqu'en 2030 à l'échelle mondiale

7,52 Gt d'équivalent CO₂
des économies d'émissions cumulées totales réalisées dans cinq secteurs d'ici 2030

Figure 4 : Cas d'utilisation ciblés pour l'étude dans les secteurs concernés

INDUSTRIE	CAS D'UTILISATION (CONTEXTUALISÉ POUR L'INDUSTRIE)	DESCRIPTION
 Construction et villes	 Optimisation de l'efficacité opérationnelle des bâtiments grâce aux technologies de jumeaux virtuels	Utilisation de technologies de jumeaux virtuels pour générer d'importantes économies de coûts opérationnels et optimiser l'utilisation des ressources pour les bâtiments en phase d'utilisation, par exemple l'énergie pour l'éclairage, le chauffage, la consommation d'eau, etc.
 Consommateur Emballé Marchandises	 Développement de produits durables soutenu par la modélisation et la simulation 3D basées sur l'ACV	Inclusion des données d'évaluation du cycle de vie des produits dans les outils virtuels de modélisation et de simulation pour fabriquer des produits plus efficaces, durables et recyclables (y compris les emballages)
 Transport et mobilité	 Conception, prototypage et tests de produits avec des technologies de jumeaux virtuels	Utiliser les technologies de jumeaux virtuels pour accélérer le concept du véhicule, les étapes de conception détaillée et de vérification de la conception, réduisant ainsi les tests physiques et optimisant l'empreinte carbone intégrée et une conception (plus) circulaire.
 Sciences de la vie	 Optimisation des usines de fabrication de produits pharmaceutiques avec des jumeaux virtuels de processus	Utilisation de jumeaux virtuels d'usine dans l'industrie pharmaceutique pour identifier les améliorations de processus conduisant à des gains d'efficacité dans l'ensemble des facteurs commerciaux et de développement durable, par exemple, une augmentation de la capacité avec les actifs existants, une réduction de la consommation de matières premières et d'énergie, une amélioration de la qualité des produits, une réduction des déchets et des retouches, etc.
 Électrique et électronique	 Valorisation des déchets d'équipements électriques et électroniques grâce au jumeau virtuel	Les données sur les conditions de fonctionnement éclairent les décisions quant à la réutilisation, au reconditionnement, au recyclage ou à la mise au rebut des articles. Les données sur les matériaux peuvent aider à déterminer les étapes de recyclage appropriées. Les données accumulées par le jumeau virtuel au cours du cycle de vie peuvent permettre une meilleure récupération de valeur en fin de vie
Intersectoriel Cas d'utilisation	 1. Optimisation des flux matières et valorisation des déchets 2. Optimisation de la récupération des pièces et matières pour les actifs déclassés	1. Utilisation de la technologie et des applications de jumeaux virtuels de la chaîne d'approvisionnement pour permettre une visibilité de bout en bout des flux de matières clés et des KPI associés 2. Utilisation de jumeaux virtuels de produits et de technologies de simulation d'usines (installations) pour faciliter la récupération de pièces et de matériaux de valeur



2.1. Construction et villes

Contexte industriel et défis en matière de durabilité

L'industrie de la construction est estimée à 8 000 milliards de dollars dans le monde, soit 10 % du PIB mondial, et constitue l'un des secteurs les plus importants au monde¹². De plus, il s'agit d'une source clé de demande de matériaux et de ressources, ce qui crée une pression et une dépendance environnementales considérables¹³.

Du point de vue de la durabilité, les bâtiments commerciaux et résidentiels consomment actuellement environ 40 % de la demande énergétique mondiale (60 % de l'électricité mondiale), représentent 25 % de notre consommation mondiale d'eau et sont responsables d'environ un tiers des émissions mondiales de GES¹⁴.

Et ces exigences ne feront qu'augmenter.

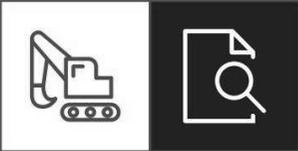
Les estimations actuelles suggèrent que d'ici 2030, il y aura 706 villes comptant au moins 1 million d'habitants, soit une hausse de près de 30 % par rapport à 2018¹⁵.

Malgré ces défis, la concentration spatiale des personnes et des activités économiques présente des avantages potentiels, car elle facilite le déploiement de solutions à grande échelle.

Par exemple, les bâtiments urbains offrent un potentiel important pour parvenir à des réductions substantielles des émissions de GES à l'échelle mondiale.

La consommation d'énergie dans les bâtiments peut être réduite de 30 à 80 % grâce à des technologies de jumeaux virtuels éprouvées et disponibles dans le commerce, souvent dans le cadre plus large des villes intelligentes¹⁶.

Consommation d'énergie
dans les bâtiments peut
être réduit de
30 à 80 % utilisant des
technologies de jumeaux
virtuels éprouvées et
disponibles dans le commerce



Cas d'utilisation : optimisation de l'efficacité opérationnelle du bâtiment grâce aux technologies de jumeaux virtuels

288 milliards de dollars d'économies supplémentaires et 6,9 Gt de CO

émissions électroniques
2

Dans ce contexte, le jumeau virtuel d'un bâtiment physique se comporte comme son jumeau réel, reliant les bâtiments aux systèmes d'énergie et de transport. Les logiciels de simulation et de modélisation 3D, les données et analyses en temps réel permettent d'optimiser les performances opérationnelles et la durabilité d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie.

Bien que des jumeaux puissent être créés pour les bâtiments existants et futurs, ce cas d'utilisation modélise le potentiel de mise en œuvre de jumeaux virtuels dans les nouvelles constructions à l'échelle mondiale entre 2020 et 2030.

288 milliards de dollars américains

réduction des coûts d'exploitation des bâtiments grâce à la réduction de la consommation d'énergie, de la maintenance et de la planification et frais de mise en service

6,9 GtCO₂e

réduction des émissions liées à l'exploitation des bâtiments grâce à une meilleure gestion de l'énergie (12 032 TWh d'économies)

Les jumeaux virtuels constituent également une ressource de données qui peut améliorer la conception de nouveaux actifs, spécifier l'état actuel des actifs et exécuter des scénarios de simulation.

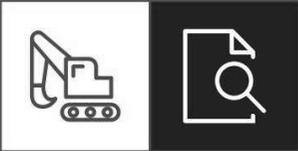
Pour ce cas d'utilisation, nous avons donné la priorité et nous sommes concentrés sur deux facteurs de valeur dont l'impact est le plus évident :

- Réductions des coûts d'exploitation du bâtiment
- Gestion énergétique améliorée

Les jumeaux avancés utilisent des interactions numériques-physiques bidirectionnelles, permettant un contrôle des actifs à distance et même autonome.

2.1 L'opportunité d'exploiter les jumeaux virtuels : construction et villes

Cas d'utilisation : optimisation de l'efficacité opérationnelle du bâtiment grâce aux technologies de jumeaux virtuels



Étude de cas : usine d'Aden, en Chine

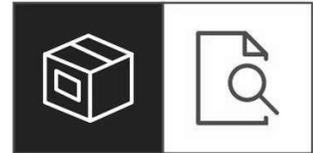
Aden est l'un des principaux fournisseurs de services intégrés de gestion d'installations qui s'est étendu des services de gestion d'installations traditionnels à la gestion d'actifs et aux services énergétiques. Il a reconnu que les jumeaux virtuels et l'analyse sont essentiels à cette transformation.

Aden a créé un jumeau virtuel pour l'un des centres commerciaux de Chengdu, en Chine. Le jumeau virtuel surveille, regroupe et comprend les données pour planifier et exécuter les activités d'inspection, de maintenance et de réparation. Des simulations 3D pour modéliser et simuler le comportement des systèmes du bâtiment sont utilisées pour prédire et optimiser la consommation d'énergie dans différentes conditions de fonctionnement.

Les avantages attendus de ce projet comprennent une réduction de la consommation d'énergie annuelle de 20 %, une diminution de la consommation d'eau et des déchets générés et une amélioration des performances en matière de santé et de sécurité.

Figure 5 : Vue de l'actif depuis la plateforme de jumeau virtuel





2.2. Biens de consommation emballés

Contexte industriel et défis en matière de durabilité

L'industrie des biens de consommation emballés (CPG) représente actuellement les deux tiers des volumes du commerce international et représente 10 % du PIB national aux États-Unis¹⁶.

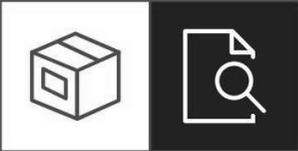
et est étroitement lié à bien d'autres, tels que l'agriculture, les produits chimiques, le pétrole et le gaz, ainsi que les mines et les ressources naturelles.

En raison de sa taille, l'industrie est également confrontée à d'importants défis en matière de durabilité. L'agriculture (y compris la production végétale et animale), la foresterie et l'utilisation des terres sont responsables de près d'un quart des émissions mondiales de GES, et un tiers de la production alimentaire mondiale est gaspillé tout au long de la chaîne de valeur¹⁷.

Les technologies de jumeaux virtuels offrent le potentiel de limiter l'utilisation des ressources et de permettre une collaboration interfonctionnelle depuis la R&D jusqu'au marketing et inversement, contribuant ainsi à établir la base d'une nouvelle façon d'aborder la durabilité par la conception, ce qui est essentiel dans la mesure où les décisions de conception peuvent être liées à 80 % d'un projet. L'impact environnemental du produit¹⁸. Les technologies de modélisation et de simulation 3D peuvent également contribuer à la conception et à la fabrication durables de produits en intégrant des données et une visibilité sur l'empreinte du cycle de vie.

Les décisions de conception peuvent être liées à 80 % de l'impact environnemental d'un produit

2.2 L'opportunité d'exploiter les jumeaux virtuels : biens de consommation emballés



Cas d'utilisation : Développement de produits durables soutenu par Modélisation et simulation 3D basées sur l'ACV

137 milliards de dollars d'économies supplémentaires et 281 Mt de CO₂e réductions d'émissions

Ici, nous nous concentrons sur le développement de produits et l'intégration des données d'empreinte de l'évaluation du cycle de vie (ACV)iii dans les outils de modélisation et de simulation 3D. Ce cas d'utilisation se concentre sur la valeur analytique des jumeaux virtuels et sur la manière dont la technologie permet l'intégration d'objectifs de développement durable au début du cycle de vie du produit.

Une partie importante des impacts environnementaux d'un produit est déterminée par les décisions prises dès les premières étapes de la conception ; c'est également là que sont déterminés 60 à 85 % du coût du produit19. Il existe différents outils d'éco-conception utilisant le principe ACV pour soutenir les décisions en matière de produits et de services, mais ceux-ci sont généralement très complexes et prennent beaucoup de temps.

Plus important encore, les outils existants ne peuvent être utilisés qu'une fois que le développement du concept et la conception ont déjà progressé de manière significative, limitant ainsi le « menu d'options » disponible pour les décideurs.

Le prototypage virtuel permet également des itérations de conception plus rapides et réduit le besoin de tests physiques, ce qui génère des avantages significatifs en matière de CO2.

Pour ce cas d'utilisation, nous avons priorisé trois facteurs de valeur dont l'impact est le plus évident :

- Réduction du coût des matières premières
- Réduction des coûts de développement de produits
- Empreinte carbone intégrée réduite

131 milliards de dollars américains

réduction des coûts d'utilisation des matières premières

6 milliards de dollars américains

réduction des coûts de développement de produits

281 Mt d'équivalent CO2

réduction de l'empreinte des produits intégrés grâce à une meilleure visibilité des résultats de l'ACV et une meilleure prise de décision en conséquence



2.3. Transport et mobilité

Contexte industriel et défis en matière de durabilité

Dans de nombreux pays développés, le transport représente 6 à 12 % du PIB, tandis que la logistique peut représenter à elle seule entre 6 et 25 % du PIB²⁰. Mais les émissions dues aux transports, qui comprennent largement les transports routiers, ferroviaires, aériens et maritimes, représentaient environ 25 % des émissions mondiales de CO₂ en 2016²¹ et elles devraient également croître plus rapidement que celles de tout autre secteur, posant un défi majeur aux efforts visant à décarboner le monde. économie.

Les recherches suggèrent que les véhicules zéro émission et autonomes ont tous deux un rôle essentiel à jouer si nous voulons atteindre les objectifs mondiaux de réduction des GES²² et que les jumeaux virtuels ont une longue histoire dans les applications automobiles²³.

On estime que d'ici fin 2020, 65 % des constructeurs automobiles utiliseraient la simulation et les jumeaux virtuels pour exploiter leurs produits et leurs actifs²⁴.

Des études de cas suggèrent que les technologies de jumeaux virtuels accélèrent la mise sur le marché et contribuent à réduire les coûts des nouvelles transmissions, des carrosseries légères et des batteries de véhicules électriques²⁵, et sont indispensables au développement du transport autonome²⁶.

D'ici fin 2020, 65 % des constructeurs automobiles utiliseraient la simulation et les jumeaux virtuels pour exploiter leurs produits et leurs actifs.

2.3 L'opportunité d'exploiter les jumeaux virtuels : transport et mobilité



Cas d'utilisation : conception, prototypage et tests de produits avec des technologies de jumeaux virtuels

690 milliards de dollars de coûts économisés et 230 millions de tonnes de CO₂e émissions évitées

Ici, nous nous concentrons sur l'évitement du prototypage et des tests physiques permis par les technologies de modélisation 3D et de simulation virtuelle lorsque de nouveaux véhicules sont conçus, prototypés et testés. Avec un jumeau virtuel, un équipementier peut tester plusieurs conceptions et fonctionnalités, éliminant ainsi de nombreux aspects des tests de prototypes au niveau des pièces et des véhicules pour aider à déterminer comment la conception se mesure par rapport aux politiques, normes et réglementations pertinentes. En règle générale, les équipementiers utilisent des centaines de véhicules d'essai par modèle sur plusieurs modèles chaque année (selon que les modifications de conception sont majeures ou mineures). Ceux-ci peuvent être considérablement réduits si un jumeau virtuel est exploité dès les premières étapes de développement du produit, ce qui permet d'éviter considérablement le gaspillage :

tant en termes de matériaux que de coûts de développement de produits.

En outre, l'utilisation de jumeaux virtuels dans le développement de nouveaux véhicules peut faire baisser d'autres coûts de production et réduire considérablement le délai global de mise sur le marché ; elle est même liée à une réduction des rappels coûteux de véhicules²⁷.

Enfin, les jumeaux virtuels contribuent à accélérer le développement de véhicules autonomes, avec une empreinte carbone considérablement réduite en remplaçant une grande partie du kilométrage total d'essai requis par des simulations.

Pour ce cas d'utilisation, nous avons priorisé et concentré nos efforts sur quatre facteurs de valeur dont l'impact est le plus évident :

- Évitement des coûts de développement audiovisuel
- Réduction des coûts de développement de produits
- Évitement des émissions de développement AV
- Réduction des émissions grâce à une diminution des tests physiques

429 milliards de dollars américains

réduction des coûts dans le développement de véhicules autonomes via la simulation

261 milliards de dollars américains

réduction des coûts dans le développement de produits

227 Mt d'équivalent CO₂

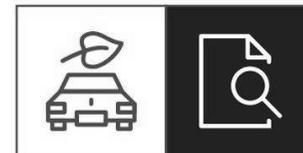
réduction des émissions dans le développement de véhicules autonomes

2 Mt CO₂e

réduction des émissions des prototypes physiques et des véhicules d'essai

2.3 L'opportunité d'exploiter les jumeaux virtuels : transport et mobilité

Cas d'utilisation : conception, prototypage et tests de produits avec des technologies de jumeaux virtuels



Étude de cas : grand OEM européen, conception et vérification virtuelles

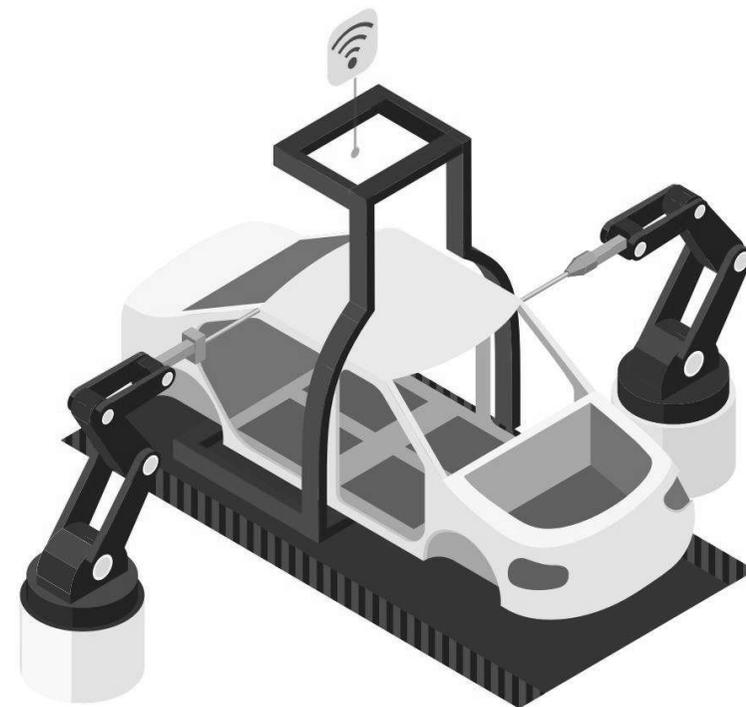
Les constructeurs automobiles sont soumis à une pression constante pour produire de meilleures voitures qui répondent à des exigences légales de plus en plus strictes en matière de sécurité et de durabilité environnementale, ainsi qu'aux demandes croissantes des consommateurs, et pour les commercialiser rapidement et à grande échelle.

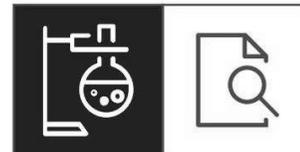
En conséquence, le processus de conception et de développement des véhicules au sein des équipementiers a évolué d'un processus qui incorporait auparavant des étapes clés impliquant des prototypes physiques à un processus qui cherche à éliminer en grande partie les prototypes physiques et tests physiques associés.

Dans le cadre de ces tests, les logiciels de simulation d'accidents peuvent désormais prédire avec précision des comportements détaillés dont on sait qu'ils ont une influence importante sur les critères de sécurité passive.

Un grand équipementier européen a réussi à réaliser les améliorations suivantes basées sur la conception et la vérification virtuelles à l'aide de technologies de jumeaux virtuels :

- Réduction du temps de développement de produits de mois
- Capacité à prédire avec précision les effets localisés tels que les défaillances de matériaux et de connexions, conduisant à une qualité améliorée
- Pour les modèles de véhicules avec des mises à jour de conception limitées, entre 70 et 100 % de réduction des prototypes physiques.
- Pour certains modèles, les prototypes physiques ont été complètement éliminés.





2.4. Sciences de la vie

Contexte industriel et défis en matière de durabilité

Les sciences de la vie sont un terme générique désignant les organisations qui œuvrent à l'amélioration de la vie²⁸ et englobent largement les produits pharmaceutiques, biopharmaceutiques, biotechnologiques et médicaux. Elle est également liée à une part considérable des flux de capital-risque²⁹ et se caractérise par l'un des niveaux de dépenses de R&D les plus importants en proportion des revenus du secteur privé³⁰.

Il est de plus en plus reconnu que l'industrie pharmaceutique, considérée comme un secteur à impact moyenvi, doit faire davantage pour améliorer ses performances en matière de durabilité³¹.

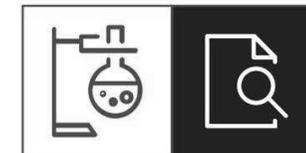
Les données suggèrent que les émissions de GES de l'industrie pharmaceutique augmentent, malgré les efforts de décarbonisation dus à la demande croissante de médicaments à l'échelle mondiale³². De plus, l'analyse des émissions par million de dollars de revenus révèle que l'industrie pharmaceutique mondiale génère environ 55 % plus d'émissions que l'industrie automobile³³.

Applications de jumeaux virtuels en production
 les plantes peuvent être bénéfiques pour l'environnement. Par exemple, la fabrication de produits pharmaceutiques botaniques peut permettre une réduction significative du temps de traitement (facteurs 5 à 20), ce qui entraîne une réduction du coût des marchandises (facteurs 2 à 10) et une réduction des émissions de GES (facteurs 4 à 20)³⁴.

Les applications de jumeaux virtuels peuvent aider la fabrication de produits pharmaceutiques botaniques, par exemple, à atteindre Réduction des émissions de GES par un facteur de 4 – 20

2.4 L'opportunité d'exploiter les jumeaux virtuels : sciences de la vie

Cas d'utilisation : Optimisation d'une usine de fabrication de produits pharmaceutiques avec des jumeaux virtuels de processus



106 milliards de dollars d'économies d'exploitation supplémentaires et 61 Mt de CO₂^e réductions d'émissions

Dans ce cas d'utilisation, le jumeau virtuel est issu du processus de production. Les éléments technologiques qui permettent de telles solutions incluent l'IoT, l'analyse avancée et l'apprentissage automatique. Les processus de mélange de produits chimiques et l'utilisation de solvants sont l'un des principaux facteurs de déchets et d'émissions liés aux processus dans la fabrication de produits pharmaceutiques³⁵.

Les simulations de ces processus peuvent permettre aux scientifiques et aux exploitants d'usines d'exécuter plusieurs scénarios dans le but de trouver la configuration optimale, d'accélérer la vitesse et la précision et de réduire les déchets, y compris les émissions associées.

En outre, il a été démontré que le recyclage des solvants, l'utilisation de moins de solvants neufs ou la combustion de moins de déchets de solvants réduisent considérablement les émissions totales d'un processus³⁶ – un problème que les jumeaux virtuels du processus peuvent également contribuer à résoudre.

Pour ce cas d'utilisation, nous avons donné la priorité et nous sommes concentrés sur deux facteurs de valeur dont l'impact est le plus évident^{vii} :

- Réduction du coût des marchandises vendues
- Empreinte carbone intégrée réduite

106 milliards de dollars américains

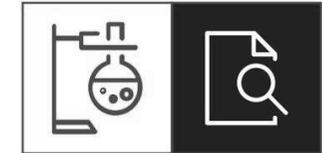
réduction du coût des marchandises vendues grâce à la baisse des dépenses d'exploitation (grâce à des délais de mise sur le marché accélérés et à une base de coûts réduite des matériaux et de l'énergie, une qualité améliorée dans le processus de production)

61 Mt CO₂^e

réduction des émissions de GES de la production grâce à des améliorations de l'efficacité et à une utilisation moindre de solvants et de matériaux

2.4 L'opportunité d'exploiter les jumeaux virtuels : sciences de la vie

Cas d'utilisation : Optimisation d'une usine de fabrication de produits pharmaceutiques avec des jumeaux virtuels de processus



Étude de cas : le phare de Framingham de Sanofi

L'usine de production de Framingham est une installation de fabrication continue et numérique où le processus de production est connecté à la R&D. La technologie des jumeaux virtuels est utilisée pour optimiser la fabrication à distance grâce à l'utilisation de la capture et de l'analyse de données en temps réel. L'ensemble du processus industriel est numérisé et sans papier et est 80 fois plus productif qu'une usine traditionnelle. Il permet de fabriquer des médicaments en moins de temps pour deux fois plus de patients et le tout avec une empreinte environnementale réduite.

Les améliorations observées des indicateurs de performance comprennent :
Réduction de 80 % de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ e par an,
réduction de 91 % de l'empreinte eau, réduction de 94 % de l'utilisation de produits chimiques et réduction de 321 tonnes de déchets par an³⁷.





2.5. Électrique et électronique

Contexte industriel et défis en matière de durabilité

L'industrie électrique et électronique revêt une importance considérable dans l'économie actuelle : le secteur de l'électronique grand public à lui seul est estimé à une valeur marchande de 1 000 milliards de dollars dans le monde³⁸. Ces technologies sont également devenues un élément indissociable de la vie moderne : la moitié de la population mondiale possède désormais un smartphone³⁹.

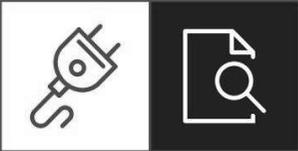
Mais l'industrie est confrontée à des défis en matière de durabilité, tels que le taux élevé de remplacement des appareils : l'étape de fabrication des équipements électroniques est à elle seule responsable de plus d'un tiers des émissions de CO₂ électroniques associées au cours de leur cycle de vie⁴⁰.

L'élimination et le recyclage appropriés des produits présentent d'autres défis. Les déchets électroniques étant officiellement le flux de déchets qui connaît la croissance la plus rapide au monde⁴¹, il est impératif d'améliorer la récupération de la valeur, l'intensité des émissions de GES et de limiter les risques pour la santé humaine. Il s'agit d'un défi particulièrement grave si l'on considère qu'en 2019, seuls 17,4 % des 53,6 millions de tonnes de déchets électroniques ont été correctement éliminés, collectés et recyclés⁴².

Les jumeaux virtuels peuvent aider les concepteurs de produits à intégrer et à suivre les principes de l'économie circulaire à chaque étape de la conception. La recherche s'est également concentrée sur l'exploration de la manière dont les technologies de jumeaux virtuels peuvent contribuer à résoudre le problème des déchets électroniques^{43, 44}.

En 2019, seulement 17,4% des déchets électroniques dans le monde ont été correctement éliminés, collectés et recyclés

2.5 L'opportunité d'exploiter les jumeaux virtuels : électricité et électronique



Cas d'usage : Valorisation des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) appuyée par la continuité numérique

73 Mds\$ de valeur supplémentaire générée et 36 Mt de CO₂e émissions évitées

Ce cas d'utilisation se concentre sur le rôle de la technologie de jumeau virtuel dans une meilleure gestion des déchets électroniques, en examinant comment la technologie peut contribuer à prolonger la durée de vie des produits en facilitant mieux les réparations et la réutilisation et en augmentant les taux globaux de recyclage des déchets électroniques en mettant les informations à la disposition des acteurs de la chaîne de valeur, en aval sur le contenu matériel et chimique.

Dans ce cas d'utilisation, la technologie prend en charge la fabrication et la refabrication ou la réparation de produits du point de vue de l'optimisation des processus et de la continuité des données. Il fournit un enregistrement virtuel reflétant l'état réel d'un appareil en termes de santé et de performances de ses composants, qui peut prendre en charge la planification du processus de réparation.

De plus, généralement lorsqu'un appareil parvient aux recycleurs, une quantité importante de données et

des connaissances ont été perdues, en particulier au cours des étapes de développement des produits, de fabrication et de durée de vie. Les jumeaux virtuels, grâce à une continuité numérique améliorée, peuvent permettre un flux constant d'informations entre les acteurs de la chaîne de valeur. Le recycleur peut lancer les étapes de processus appropriées sans avoir besoin de tests ou d'inspections supplémentaires⁴⁵.

Pour ce cas d'utilisation, nous avons priorisé et concentré nos efforts sur trois facteurs de valeur dont l'impact est le plus évident :

- Valeur ajoutée grâce à la réutilisation des équipements et remise à neuf
- Réduction des émissions grâce à une meilleure libération du réfrigérant
- Émissions évitées grâce à la prolongation de la durée de vie du produit

73 milliards de dollars américains
revenus supplémentaires provenant de l'augmentation de la remise à neuf et de la réutilisation des équipements plutôt que du recyclage pour la valorisation matière

31 Mt CO₂e
réduction des émissions liées aux rejets de réfrigérants grâce à une meilleure gestion des DEEE concernés

5 Mt CO₂e
émissions évitées en réduisant la quantité totale de déchets électroniques traités de manière informelle et les impacts environnementaux négatifs associés

2.5 L'opportunité d'exploiter les jumeaux virtuels : électricité et électronique

Cas d'usage : Valorisation des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) appuyée par la continuité numérique

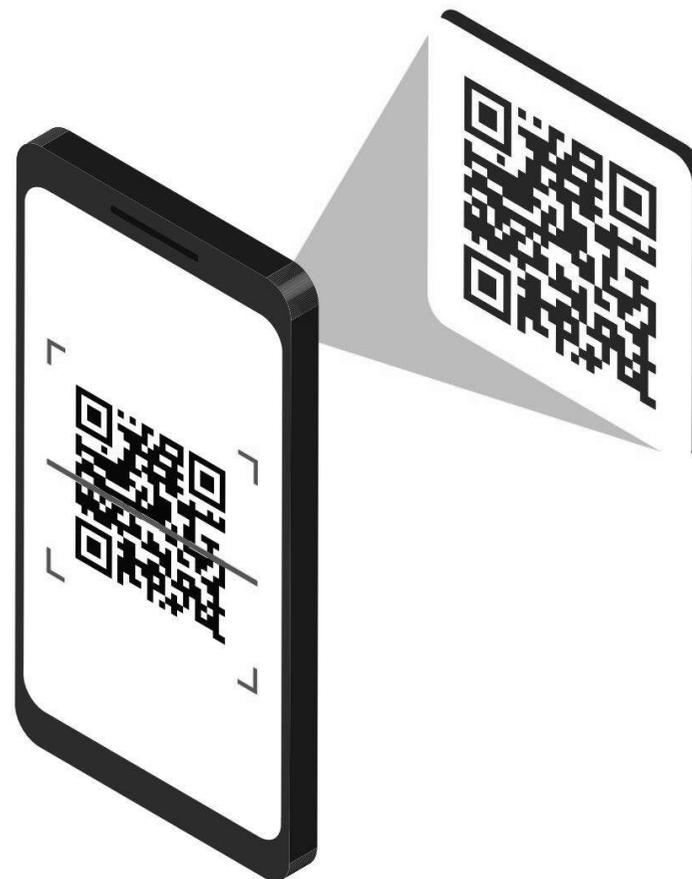


Étude de cas : Circulariser

Circularise est une start-up néerlandaise axée sur la commercialisation de technologies de transparence et de traçabilité basées sur la blockchain pour l'économie circulaire.

Leur solution permet à un large éventail de parties prenantes tout au long de la chaîne de valeur de partager des informations sur le contenu et les flux de matériaux des produits, par exemple les sociétés minières, les fabricants d'électronique, les services de collecte et les entreprises de recyclage. Le résultat final est un code QR qui fournit des données importantes aux recycleurs.

Par exemple, certains écrans d'ordinateur sont équipés d'une lampe au mercure qui doit être retirée. Cependant, comme personne ne sait quels écrans sont équipés de ces lampes, tous sont souvent ouverts à la main pour inspection. Ce même concept peut être appliqué aux composants électroniques en plastique, dont beaucoup contiennent des plastifiants et des stabilisants qui, au fil du temps, sont réglementés et constituent un obstacle au recyclage lorsqu'ils sont difficiles à identifier et à mesurer. La start-up a également développé une méthodologie propriétaire pour gérer en toute sécurité les droits de propriété intellectuelle et éviter le partage d'informations commercialement sensibles au sein de l'écosystème industriel⁴⁶.



2.6. Autres cas d'utilisation notables permettant la circularité

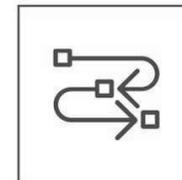
Aperçu

Ce chapitre cherche à s'éloigner du contexte spécifique à l'industrie et à mettre en évidence des cas d'utilisation supplémentaires pour les technologies de jumeaux virtuels qui peuvent soutenir des résultats commerciaux durables dans plusieurs secteurs, avec un potentiel de valeur circulaire important.

Les deux cas d'utilisation, illustrés dans la figure 6, soutiennent tous deux l'économie circulaire et une efficacité accrue des ressources et sont basés sur des solutions matures qui, en termes technologiques, combinent des jumeaux virtuels de chaîne d'approvisionnement, des fils numériques et des techniques avancées de modélisation de scénarios.

Figure 6 : Cas d'utilisation mis en évidence dans ce chapitre

CAS D'UTILISATION	INDUSTRIES CLÉS POUR MISE EN ŒUVRE	DESCRIPTION
 <p>1. Optimisation des flux matières et valorisation des déchets</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mines et matériaux de base • Produits industriels • Automobile 	<p>Utilisation de la technologie et des applications de jumeaux virtuels de la chaîne d'approvisionnement pour permettre une visibilité de bout en bout des flux de matières clés et des KPI associés, y compris les déchets et les sous-produits. Cela inclut les éléments clés de la chaîne d'approvisionnement tels que les entrées et sorties de matériaux, les emplacements des usines, les fournisseurs, les points de stockage et les itinéraires. Construire une image détaillée et vivante des flux de matières est une étape fondamentale vers une économie plus circulaire.</p>
 <p>2. Optimisation de la valorisation des pièces et matériaux pour les produits déclassés actifs</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Produits industriels • Automobile 	<p>Ce cas d'utilisation est basé sur l'utilisation conjointe de jumeaux virtuels de produits et de technologies de simulation d'usines (installations), en fin de vie ou au stade du déclassement, pour les actifs manufacturés. Les capacités d'analyse d'optimisation des processus et de modélisation de scénarios contribuent à faciliter la récupération de pièces et de matériaux de valeur de manière efficace et économiquement viable. Cela permet de limiter l'extraction et la consommation de matières premières vierges.</p>



Pleins feux sur des cas d'utilisation

Cas d'usage 1 : Optimisation des flux matières et valorisation des déchets

L'économie circulaire constitue un cadre clé pour une croissance durable, largement accepté par les chefs d'entreprise de tous les secteurs, ainsi que par les décideurs politiques. Le travail des clients et les recherches réalisées par Accenture au fil des années ont démontré à maintes reprises qu'il est possible de transformer des processus, des installations et des chaînes d'approvisionnement linéaires discrets en des capacités et des opérations plus circulaires, conduisant à une meilleure utilisation des matériaux et des ressources, souvent avec des investissements en capital limités ou inexistantes. .

Pour véritablement s'orienter vers une économie circulaire, les organisations ont besoin d'informations plus nombreuses et de meilleure qualité sur la manière dont elles utilisent les matériaux, où et quels flux de déchets proviennent et si ceux-ci peuvent être convertis en ressources et réutilisés, en interne ou en externe.

Par conséquent, une visibilité dynamique de bout en bout des flux de matières est fondamentale pour mesurer et améliorer la productivité des ressources.

Nous mesurons l'intensité matérielle au niveau macroéconomique et avons largement établi que les secteurs qui sont moins intensifs en matières ont des taux de productivité plus élevés⁴⁷.

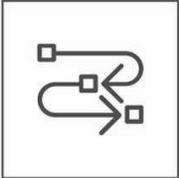
Pourtant, seules quelques organisations suivent l'intensité matérielle de leurs activités pour éclairer leurs stratégies d'économie circulaire ou de développement durable.

Les technologies de jumeaux virtuels, en raison de leur capacité à rassembler les données de toutes les étapes du cycle de vie du produit et de la production, rassemblent les informations et les analysent pour identifier les opportunités d'amélioration, suivre les performances et éclairer les décisions.

Ces technologies peuvent être utilisées pour opérationnaliser les objectifs visant à devenir plus efficaces en termes de matériaux et de ressources et à générer des avantages financiers, notamment en valorisant les flux de déchets. Cela est particulièrement important pour les entreprises à forte intensité de matériaux et d'énergie impliquées dans la production de biens intermédiaires, comme dans l'industrie métallurgique.

Le tableau ci-dessous présente les principaux facteurs de valeur, ainsi que des exemples illustratifs à l'appui, pour cadrer les avantages que ce cas d'utilisation permet de manière aussi factuelle que possible (voir Figure 7).

2.6 L'opportunité d'exploiter les jumeaux virtuels : autres cas d'utilisation notables permettant la circularité



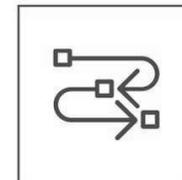
Pleins feux sur des cas d'utilisation

Figure 7 : Facteurs de valeur clés du cas d'utilisation (non exhaustif et illustratif)

VALEUR CATÉGORIES	FACTEURS DE VALEUR CLÉS (NON EXHAUSTIF)	DESCRIPTION ET EXEMPLE (ILLUSTRATIF)
 Entreprise (valeur économique)	Augmentation des revenus issus de la valorisation des déchets	Le processus de fabrication de l'acier produit un certain nombre de sous-produits potentiellement recyclables. L'un d'eux est le laitier de Linz-Donawitz (LD) ; ArcelorMittal Tubarão (Brésil) fabrique jusqu'à 30 nouveaux produits à partir de scories LD, principalement destinés à des applications de construction ⁴⁸ .
	Coûts d'approvisionnement en matériaux réduits	Jaguar a transformé plus de 360 000 tonnes de ferraille dans ses véhicules depuis 2013 ⁴⁹ , soit environ 51 000 par an ; cela équivaut à environ 1/3 de sa consommation annuelle d'aluminium ⁵⁰ ; bien que les données économiques ne soient pas des informations publiques, nous supposons une analyse de rentabilisation solide étant donné la longévité et les progrès de l'initiative
	Niveaux de stocks et coûts réduits	Le client de Dassault Systèmes dans le secteur des mines et des matériaux de base a réussi à mieux utiliser ses déchets, permettant une réduction des stocks à tout moment (8 à 10 000 tonnes).
 Valeur de durabilité (environnementale et/ou sociale)	Impact réduit sur la biodiversité lié à l'extraction des ressources	L'exploitation minière affecte la biodiversité à plusieurs échelles spatiales (c.-à-d. site, paysage, régional et mondial) par le biais de processus directs (c.-à-d. extraction de minéraux, production de déchets/résidus) et indirects (par exemple, via les industries soutenant les opérations minières) ⁵¹
	Impact réduit de l'extraction des ressources sur eau	La pollution et la consommation de l'eau (de surface et souterraine) provenant des opérations minières constituent une préoccupation majeure ; les estimations des retraits varient considérablement d'un cas à l'autre, mais la mine d'or « moyenne » utilise environ 0,350 m ³ /tonne métrique de roche à teneur en minerai (2013) ⁵²
	Réduction des émissions climatiques liées à l'extraction des ressources	La création d'aluminium recyclé nécessite environ 90 % d'énergie en moins que la production de matières premières ⁵³ ; La réalisation du scénario climatique de 2 degrés implique une réduction de 50 à 80 % des émissions provenant de l'exploitation minière.

2.6 Opportunité d'exploiter les jumeaux virtuels : autres cas d'utilisation notables permettant la circularité

Pleins feux sur des cas d'utilisation



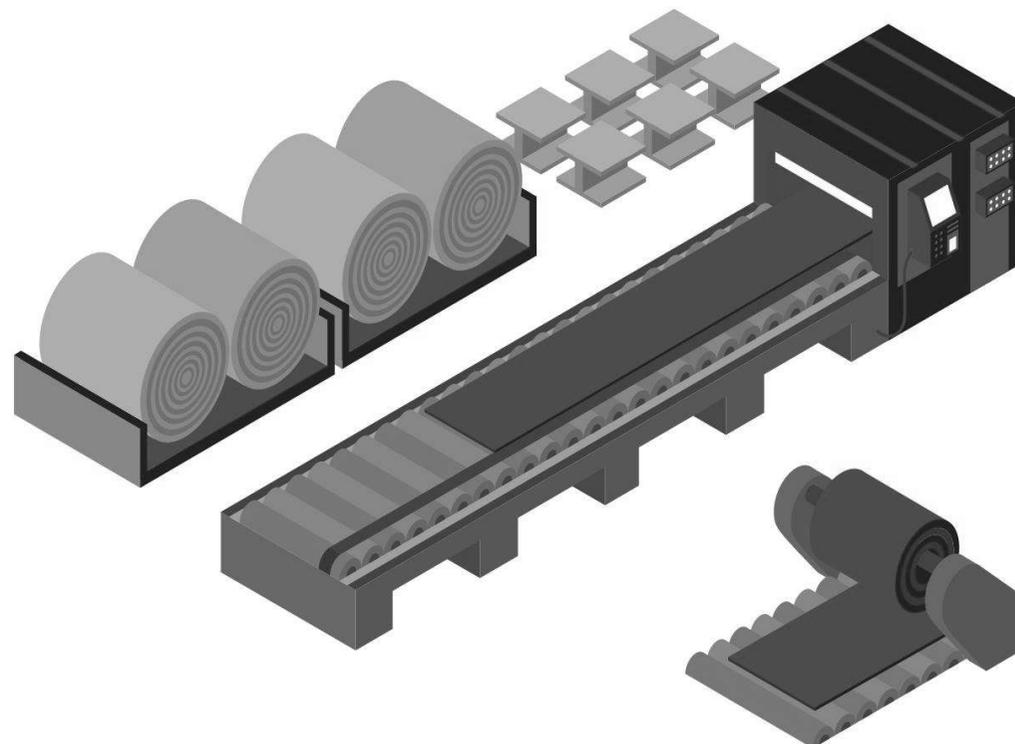
Étude de cas : Entreprise mondiale d'aluminium

Une entreprise d'aluminium cherchait à réduire l'utilisation de matières premières vierges et à obtenir une visibilité de bout en bout des flux de matières. Son principal défi était de maximiser les taux d'utilisation des déchets, à la fois issus des déchets générés au cours du processus de production et des flux de déchets post-consommation récupérés par des tiers.

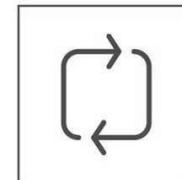
Environ 50 % du coût de production était imputable au coût des matières premières, et la volatilité du marché des métaux constitue un risque persistant. Ce défi était donc crucial pour l'entreprise. A titre indicatif, une augmentation de 1 % de l'utilisation des déchets représente plus d'un million d'euros d'économies par an.

Le déploiement d'une solution de jumeau virtuel de chaîne d'approvisionnement a fourni aux exploitants d'usines une visibilité et des capacités d'orchestration améliorées et plus détaillées des opérations, permettant une meilleure utilisation des déchets d'aluminium.

Cela a entraîné une réduction des stocks d'environ 8 à 10 000 tonnes à tout moment. Cela a également accéléré les efforts des équipes d'approvisionnement de l'entreprise pour établir de nouveaux partenariats stratégiques avec des fournisseurs de ferraille tiers, contribuant ainsi à formaliser davantage l'industrie de la ferraille métallique et à renforcer les perspectives commerciales des matières premières secondaires.



2.6 Opportunité d'exploiter les jumeaux virtuels : autres cas d'utilisation notables permettant la circularité



Pleins feux sur des cas d'utilisation

Cas d'utilisation 2 : Optimisation de la récupération des pièces et des matériaux pour les actifs déclassés

Ce cas d'utilisation met en évidence la valeur des jumeaux virtuels pour la gestion de fin de vie, contribuant à améliorer l'efficacité et la rentabilité du démantèlement, y compris la récupération des pièces et des matériaux, qui sont des éléments clés pour parvenir à une économie plus circulaire. Des jumeaux virtuels 3D et des technologies de simulation, en combinaison avec les données opérationnelles des actifs, peuvent être utilisés pour simuler chaque étape de démantèlement avant le début de l'exécution. Cela offre l'opportunité d'identifier et de définir un processus de déclasserement optimal et sûr et offre une visibilité améliorée des matières premières, des pièces et composants de valeur, qu'ils proviennent d'un bâtiment, d'un véhicule, d'un navire, d'un avion ou d'un actif énergétique. La nature collaborative des solutions de jumeaux virtuels permet aux équipes de la conception et de l'ingénierie jusqu'au déclasserement de travailler ensemble au développement d'un processus qui génère les volumes et la qualité de ressources les plus élevés. De plus, la capacité de récupérer des données de conception, de matériaux et d'exploitation et de les partager en aval signifie que tout matériau ou pièce récupérée peut potentiellement être échangé à sa vraie valeur, évitant ainsi le downcycling lorsque cela est possible.

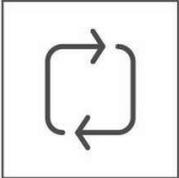
Par exemple, les techniques de recyclage des métaux destinés aux véhicules hors d'usage (VHU) reposent sur des traitements mécaniques pour récupérer principalement les alliages d'acier, d'aluminium, de cuivre et de zinc. Cependant, un véhicule peut utiliser plus de 60 métaux, qui finissent par être recyclés et sont fonctionnellement perdus⁵⁴.

En outre, le potentiel inexploité d'augmentation de la circularité des plastiques dans les actifs de transport est également élevé et de nouvelles mesures politiques en Europe sont susceptibles d'accélérer ce phénomène⁵⁵.

Enfin, même en mer, nous commençons tout juste à planifier le déclasserement des projets d'énergie éolienne offshore qui approchent de la fin de leur cycle de vie de 20 à 25 ans, et les jumeaux virtuels peuvent nous aider à mieux planifier et gérer leur déclasserement à l'avance.

Le tableau ci-dessous présente les principaux facteurs de valeur de ce cas d'utilisation, ainsi que des exemples illustratifs à l'appui (voir Figure 8).

2.6 L'opportunité d'exploiter les jumeaux virtuels : autres cas d'utilisation notables permettant la circularité

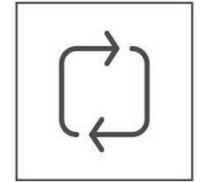


Pleins feux sur des cas d'utilisation

Figure 8 : Facteurs de valeur clés du cas d'utilisation (non exhaustif et illustratif)

VALEUR CATÉGORIES	FACTEURS DE VALEUR CLÉS (NON EXHAUSTIF)	DESCRIPTION ET EXEMPLE (ILLUSTRATIF)
 Entreprise (valeur économique)	Réduction des coûts et des délais de démantèlement	Augmentation de la qualité et de la quantité des matériaux et pièces récupérés grâce à une meilleure gestion des processus et à une meilleure disponibilité des données au stade du déclassement
	Conformité réglementaire améliorée	Le démantèlement des aéronefs doit être conforme aux règles et réglementations en vigueur émises par l'OACI relatives à la navigabilité des aéronefs, à la gestion et au recyclage des déchets généraux et dangereux ⁵⁶ .
	Réutilisation améliorée des infrastructures	Des efforts importants sont entrepris pour réutiliser les infrastructures énergétiques en fin de vie. Des exemples de réutilisation incluent la conversion de plates-formes offshore en réservoirs de stockage de CO2 et en infrastructures de type récif ⁵⁷ .
	Valeur des informations sur le déclassement pour une amélioration continue	Ceci est particulièrement important pour les nouveaux flux de déchets de faible volume qui devraient croître de façon exponentielle à l'avenir, tels que les composites d'avions et d'éoliennes ⁵⁸ .
 Valeur de durabilité (environnementale et/ou sociale)	Des opportunités d'emploi améliorées	Certaines études suggèrent que les gains d'emploi découlant des politiques économes en ressources et d'économie circulaire se situent entre 0 et 2 %, une étude prévoyant des gains d'emploi pouvant atteindre 7 % ⁵⁹ .
	Récupération améliorée pour les matériaux « plus difficiles »	À l'échelle mondiale, la récupérabilité du cuivre est relativement faible pour un métal, de seulement 40 à 60 %, principalement parce qu'il est plus dispersé, difficile à collecter, mélangé à d'autres matériaux et non ferreux.
	Réduction du décyclage	D'après des recherches antérieures d'Accenture, seul un dixième du fer et de l'acier récupérés dans les véhicules mis au rebut est utilisé pour fabriquer de nouvelles voitures ; les métaux rares et les alliages techniques finissent par être recyclés ⁶⁰
	Réduction des déchets envoyés à l'incinération ou à la mise en décharge	Malgré les taux de recyclage élevés (95 % exigés par la loi), plus de 10 % du poids d'une voiture en Europe est encore envoyé vers la valorisation énergétique en fin de vie du véhicule.
	Amélioration des performances environnementales lors du déclassement des actifs	Le déclassement des actifs énergétiques va s'accélérer à mesure que le monde s'éloigne des hydrocarbures fossiles ; ces activités doivent être gérées avec prudence afin de minimiser l'impact environnemental.

2.6 Opportunité d'exploiter les jumeaux virtuels : autres cas d'utilisation notables permettant la circularité



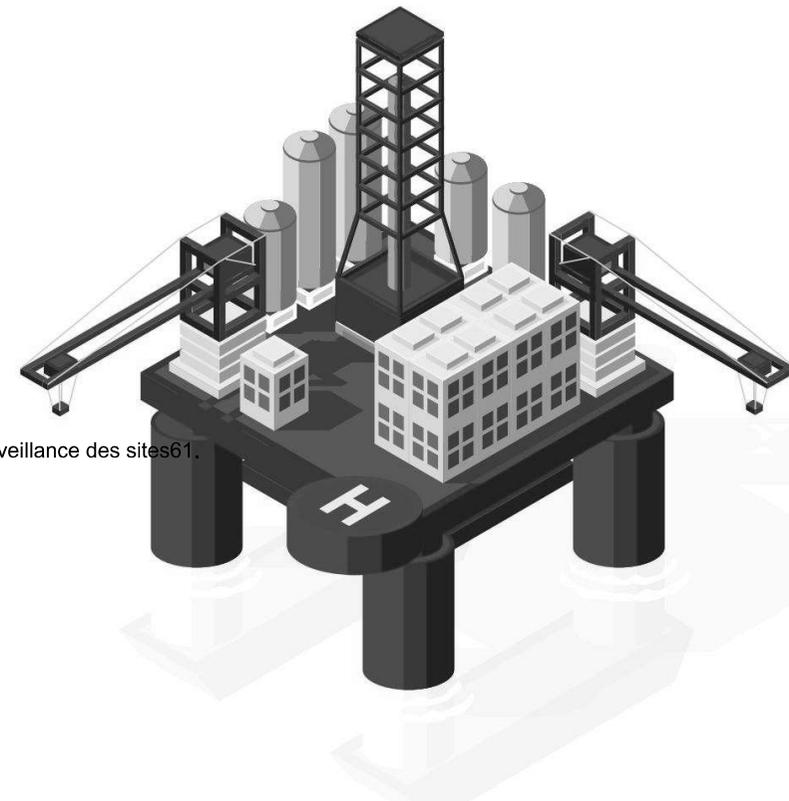
Plains feux sur des cas d'utilisation

Étude de cas : Déclassement d'actifs énergétiques offshore

L'extraction pétrolière touche à sa fin dans la majeure partie de la mer du Nord alors que le monde continue de s'orienter vers des sources d'énergie plus durables. Cette situation s'étend également à d'autres coins du monde. Alors que les exploitants de ces plates-formes pétrolières commencent à planifier leur déclassement au coût le plus optimal, il est essentiel de garantir le retrait des structures d'une manière écologiquement rationnelle, sûre et circulaire. Les structures seront démontées en morceaux maniables, chargées sur des barges et ramenées à terre.

pour réutilisation, recyclage ou élimination.

Les dernières solutions intelligentes pour le déclassement des usines combinent un jumeau virtuel de n'importe quel actif marin ou offshore avec l'analyse de données, la modélisation et la simulation de scénarios, permettant aux opérateurs de faire les bons choix plus rapidement pour améliorer l'efficacité, la sécurité, l'intégrité, les performances, le retour sur investissement et réduire leurs coûts. empreinte carbone. Dans des études de cas sélectionnées, des économies comprises entre 9 et 30 % sont possibles pour les activités de déclassement, allant de l'enlèvement des surfaces de surface et de l'enveloppe aux infrastructures et installations sous-marines, à la « mise hors tension », aux coûts d'exploitation, au recyclage à terre et à l'assainissement et à la surveillance des sites⁶¹.



Points de vue des leaders de l'industrie et perspectives d'avenir

Points de vue des leaders de l'industrie et perspectives d'avenir

Pour identifier comment l'adoption des technologies de jumeaux virtuels peut augmenter pour générer de plus grands avantages en matière de développement durable et évoluer vers une transformation systémique et des économies circulaires, nous avons discuté avec des chefs d'entreprise et des experts de nos secteurs d'activité sélectionnés. Ces discussions, ainsi que nos recherches et analyses, ont éclairé cinq recommandations clés sur la manière dont nous pouvons mieux exploiter le potentiel des technologies de jumeaux virtuels (voir Figure 9).

1. Associer la technologie et le développement durable
2. Améliorer la compréhension
3. Concentrez-vous sur les changements perturbateurs et systémiques cas d'utilisation
4. Déployez de manière responsable
5. Soutien à l'écosystème du rallye

Nous avons discuté avec des chefs d'entreprise et des experts de nos sociétés sélectionnées secteurs concernés



1. Relier la technologie

et programmes de développement durable

Les dirigeants doivent contribuer à conduire le changement vers la mesure et le suivi de la valeur issue du développement durable, en la reliant de manière concrète aux stratégies d'entreprise et de croissance, et en prenant en compte cette valeur dans la prise de décision en matière d'investissement dans la technologie et l'innovation. Cela devrait commencer par la gestion du changement interne et l'alignement des priorités en matière de technologie et de durabilité, ainsi qu'un soutien externe et pratique plus large pour exploiter la technologie au service de la durabilité, par exemple, des initiatives multilatérales, l'approbation du public, un leadership éclairé, etc.

"Cette réunion est la première fois que nous discutons de la manière dont les jumeaux peuvent avoir un impact à long terme sur l'environnement."

Société Pharmaceutique Mondiale



2. Améliorer compréhension

Les organisations doivent d'abord développer une vision claire, basée sur les données, de leurs propres problèmes et exigences. La connaissance limitée du sujet signifie que la plupart des organisations ont du mal à identifier le cas d'utilisation adapté à leurs besoins. À cela s'ajoute la nécessité de comprendre les exigences plus larges en matière d'infrastructure et la manière de contourner les contraintes héritées de l'empreinte installée dans les installations de production, les lacunes en termes d'échange de données et de capacité de jumeau virtuel en temps réel.

« De nombreux obstacles... mais un
L'un des plus importants est l'identification du bon cas
d'utilisation.

Société mondiale de technologie

3 Points de vue des leaders de l'industrie et perspectives d'avenir



3. Concentrez-vous sur les éléments perturbateurs, cas d'utilisation de changement de système

Les efforts visant à faire évoluer les solutions doivent être concentrés au niveau de la transformation des systèmes. Les améliorations de l'efficacité constituent un bon point de départ, en particulier dans les secteurs où il existe des « gains rapides » importants à réaliser. Cependant, au fil du temps, les parties prenantes doivent se concentrer davantage sur des interventions exigeant des efforts et à fort impact, telles que la promotion de l'économie circulaire et la décarbonisation de l'industrie à grande échelle, ce qui nécessitera des solutions plus adaptées. Cela doit être fait rapidement et à grande échelle pour garantir que nous atteignons nos objectifs mondiaux. Les acteurs de l'industrie devraient profiter de l'occasion pour tester, apprendre, s'adapter et déployer, pour trouver et faites évoluer ces cas d'utilisation perturbateurs rapidement et efficacement.



4. Déployer de manière responsable

Les fournisseurs et acheteurs de technologies ont la responsabilité de garantir que les solutions de jumeaux virtuels facilitent la standardisation des méthodes, des mesures et la transparence des données. Il existe également un risque que les petites entreprises et les start-ups soient exclues du prix, l'accent étant actuellement mis sur les grandes organisations multinationales basées dans l'hémisphère Nord. Une attention particulière doit être accordée aux marchés émergents et en développement où le besoin de solutions « axées sur la durabilité » est élevé, mais où la sensibilisation, l'accessibilité et l'abordabilité sont souvent limitées.

« L'efficacité seule ne suffira pas nous amener à zéro émission nette ou nous amener à un économie circulaire. Société mondiale de produits de grande consommation

« Veiller à ce que les PME et les startups ne sont pas exclus, hors prix ces technologies. Société de mobilité électrique



5. Écosystème de rallye soutien

Les technologies de jumeaux virtuels sont souvent utilisées pour concevoir des avancées complexes en matière de développement durable à l'échelle industrielle. Comme il s'agit de vastes projets aux vastes implications, les organisations doivent s'efforcer de bâtir une coalition de soutien plus large au sein de la communauté des affaires et d'autres groupes de parties prenantes clés. Cela peut contribuer à offrir les meilleures opportunités d'apprentissage entre et au sein des secteurs, à favoriser une plus grande adoption des technologies de jumeaux virtuels à grande échelle, à dépasser les mises en œuvre pilotes et à permettre un développement technologique amélioré et inclusif.

Il existe également une opportunité de relier les initiatives aux programmes pertinents du secteur public, tels que ceux menés par l'Union européenne dans les domaines de l'innovation durable, de l'économie circulaire, de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique. La collaboration avec ces institutions pourrait contribuer à réduire les risques dans les cas d'utilisation dans lesquels les capitaux privés pourraient être trop réticents à prendre des risques pour être soutenus, et fournir une réflexion avant-gardiste et un plus grand soutien.

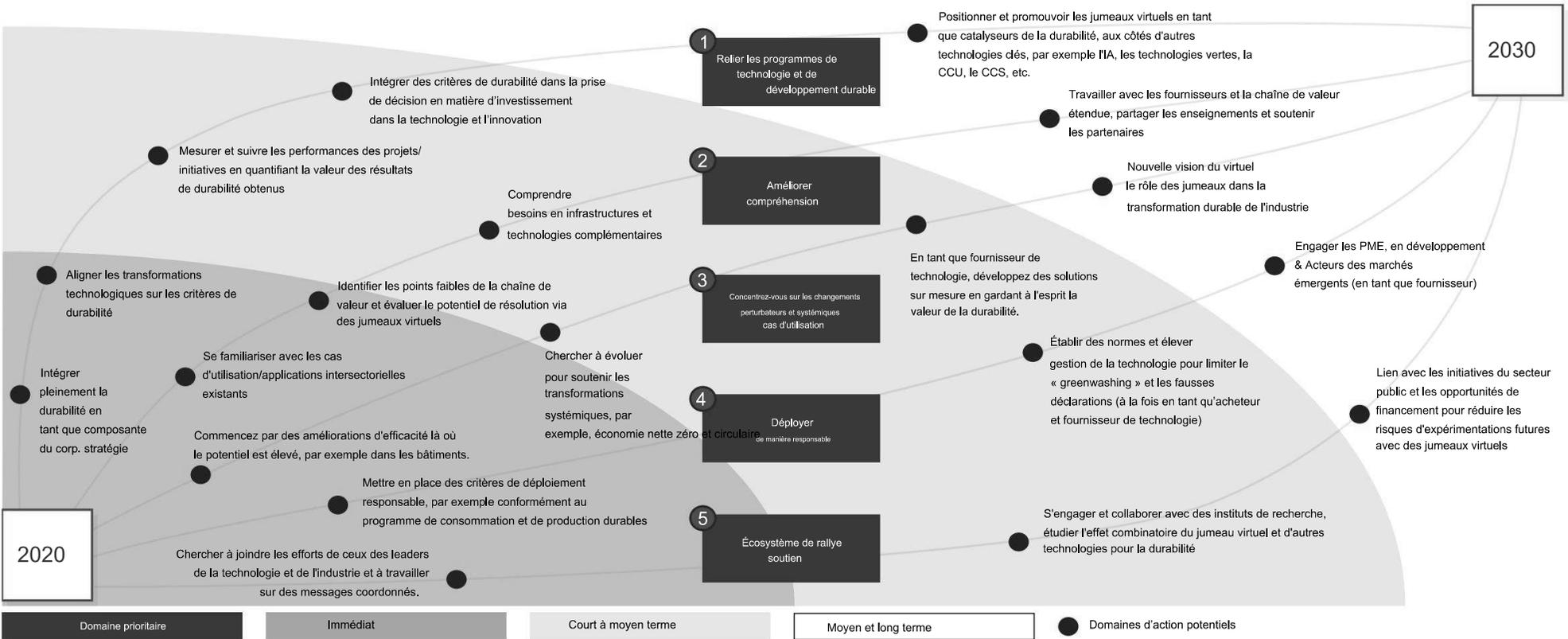
« Les jumeaux numériques pourraient être la clé de l'économie circulaire, qui est l'avenir du design. »

Société mondiale de technologie

3 Points de vue des leaders de l'industrie et perspectives d'avenir

Exploiter les jumeaux virtuels pour la durabilité nécessiterait que les parties prenantes se concentrent sur cinq domaines prioritaires d'ici 2030

Figure 9 : Cinq domaines d'action prioritaires pour l'avenir



En conclusion

Cette étude vise à démontrer et à encadrer le potentiel disruptif des technologies de jumeaux virtuels. Nous avons examiné divers secteurs et cas d'utilisation pour démontrer l'étendue et le potentiel de la technologie, et illustrer comment elle peut être utilisée tout au long du cycle de vie des produits pour générer des avantages significatifs de bout en bout.

Grâce aux cinq cas d'utilisation étudiés, les jumeaux virtuels peuvent générer des avantages supplémentaires combinés de 1,3 billion de dollars de valeur économique et de réductions d'émissions de 7,5 Gt de CO₂ d'ici 2030. En plus de ces avantages considérables, les jumeaux virtuels ont également le potentiel de créer une innovation plus disruptive, et conçoit, permet le développement de nouveaux services, réduit les risques réglementaires et HSE et permet une collaboration et un coworking interfonctionnels.

Ces avantages amélioreront non seulement la compétitivité des entreprises, mais stimuleront également des progrès systémiques vers un système économique plus circulaire et nettement moins intensif en carbone et nous aideront à atteindre nos objectifs mondiaux à l'horizon 2030, qui constituent une étape cruciale de la Décennie pour l'action.

Pour soutenir cette transformation à la vitesse et à l'échelle dont nous avons besoin, nous devons mieux comprendre les cas d'utilisation et les avantages de la technologie, et chercher à mieux mesurer le retour sur investissement combiné de l'activité et du développement durable dans le cadre de l'analyse de rentabilisation. Nous espérons que ce document constituera une première étape dans cette voie, mettant en valeur le potentiel d'innovation de rupture, et pourra inciter la prochaine vague de dirigeants à réfléchir aux avantages combinés de la technologie et de la durabilité.

annexe

4.1 Annexe : Cas d'utilisation supplémentaires spécifiques à l'industrie et autres études de cas

Figure 10 : Cas d'utilisation ciblés pour l'étude dans les secteurs concernés

INDUSTRIE	CAS D'UTILISATION (CONTEXTUALISÉ POUR L'INDUSTRIE)	DESCRIPTION
 Construction et villes	 Conception urbaine améliorée grâce à la simulation, la planification et l'optimisation	Utilisation de technologies de jumeaux virtuels pour visualiser, modéliser des scénarios et optimiser les systèmes de construction et d'infrastructures urbaines afin d'améliorer l'expérience des citoyens, l'efficacité des ressources, la résilience au changement climatique, etc.
 Consommateur Emballé Marchandises	 Optimisation d'usine de fabrication pour Produits FMCG avec jumeaux virtuels de processus	Utilisation de jumeaux virtuels d'usine dans le secteur des produits de grande consommation pour identifier les améliorations de processus conduisant à des gains d'efficacité dans l'ensemble des facteurs commerciaux et de développement durable, par exemple, une augmentation de la capacité avec les actifs existants, une réduction de la consommation de matières premières et d'énergie, une amélioration de la qualité des produits, une réduction des déchets et des reprises, etc.
 Transport et mobilité	 Optimisation des performances après-vente via les technologies de jumeaux virtuels	Capter les données de performances via des jumeaux virtuels et des fils numériques à partir des actifs en phase d'utilisation et les analyser pour fournir des informations exploitables afin d'améliorer l'efficacité des produits et des systèmes de support et d'augmenter la durée de vie des actifs.
 Sciences de la vie	 Virtualisation des essais cliniques rendue possible par les technologies de jumeaux virtuels	Combinant la science des données, la collaboration virtuelle, la modélisation et la simulation (y compris du corps humain), pour le développement de médicaments/dispositifs « in silico », réduisant l'impact sur les animaux et les personnes, l'utilisation des ressources et les délais de mise sur le marché.
 Électrique et électronique	 Aide à la conception de produits électriques et électroniques circulaires	Utilisation de technologies de jumeaux virtuels pour intégrer la durabilité dès la phase de conception en tenant compte de l'empreinte matérielle et en facilitant les principes de l'économie circulaire, par exemple la réutilisation, la réduction, la réparation, le recyclage.



Cas d'utilisation : Amélioration de la conception urbaine grâce à la simulation, la planification et l'optimisation

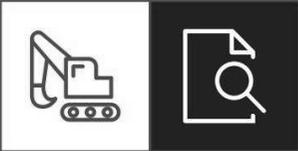
Opportunité d'augmentation du PIB, d'économies de coûts municipaux et d'amélioration de la durabilité urbaine, de la résilience et du bien-être des citoyens

Pour être durables et résilientes, les villes doivent avoir la capacité de changer, de s'adapter et de se transformer. Les jumeaux virtuels permettent une vision plus éclairée de l'avenir grâce à l'analyse, la visualisation et l'expérimentation. Leur capacité à consolider de larges pans de données, à anticiper les scénarios possibles et à contribuer à la planification des mesures d'adaptation au changement climatique est essentielle pour maintenir l'attractivité d'une ville.

Ce cas d'utilisation se concentre sur les outils de modélisation, de simulation et de données 3D capables de créer des copies numériques précises de villes entières, permettant aux planificateurs, concepteurs et ingénieurs d'améliorer leurs conceptions et de mesurer l'effet des changements potentiels en exécutant des scénarios de simulation dans un environnement virtuel et sécurisé. environnement.

En plus des données cartographiques et de terrain, ces plateformes peuvent intégrer des données de trafic et météorologiques en temps réel, des réseaux logistiques, des informations démographiques et climatiques, permettant ainsi une prise de décision éclairée à un large éventail de parties prenantes. Les jumeaux virtuels permettent les villes intelligentes, une solution clé pour parvenir à une urbanisation durable et résiliente.

Les villes jumelles virtuelles créent de la valeur pour un large éventail de parties prenantes dans les domaines public, privé et sociétal. Encore aux premiers stades de l'adoption dans le monde, il est difficile de développer une analyse détaillée des avantages, mais le tableau ci-dessous présente les principaux facteurs de valeur, ainsi que des exemples à l'appui (voir Figure 11).



Cas d'utilisation : Amélioration de la conception urbaine grâce à la simulation, la planification et l'optimisation

Figure 11 : Facteurs de valeur clés du cas d'utilisation (non exhaustif et illustratif)

VALEUR CATÉGORIES	FACTEURS DE VALEUR CLÉS (NON EXHAUSTIF)	DESCRIPTION ET EXEMPLE (ILLUSTRATIF)
 Entreprise (valeur économique)	Accélération de la croissance économique	Des recherches examinant l'impact des technologies des villes intelligentes sur le PIB (par exemple, 5G, capteurs routiers à faible consommation et à zone étendue, IOT, etc.) ont mis en évidence une augmentation incrémentielle allant jusqu'à 3 % et 20 000 milliards de dollars de bénéfices économiques supplémentaires d'ici 202662.
	Économies de coûts grâce à une gestion et une automatisation améliorées de la ville	Économies de coûts grâce à l'amélioration de l'efficacité des opérations municipales, telles que la gestion des déchets. Des projets pilotes avec des conteneurs à déchets intelligents et connectés à l'IoT ont permis de réduire la fréquence de collecte de 70 à 80 % ; une ville d'Irlande a réalisé 200 000 € d'économies annuelles et une réduction de 69 tonnes de CO2 e63
	De nouvelles sources de revenus issues de la monétisation des données	Par exemple, via un accès ouvert aux données en temps réel liées à la ville pour les développeurs tiers, les start-ups et les entreprises ; données ouvertes Ces politiques peuvent générer des gains économiques supplémentaires pouvant atteindre 500 millions de dollars pour une mégapole type dans un pays développé64.
 Valeur de durabilité (environnementale et/ou sociale)	Amélioration de la résilience urbaine face aux événements météorologiques	Par exemple, la mousson de Toon en 2012 a causé des dégâts d'une valeur de 8 millions de livres sterling à Newcastle lorsque les précipitations d'un mois sont tombées en seulement deux heures aux heures de pointe. Un jumeau virtuel d'une ville pourrait prédire quels bâtiments seraient susceptibles d'être inondés, quelles infrastructures seraient fermées et permettrait une meilleure planification et une meilleure réponse65.
	Diminution des déchets dus à une gestion inefficace des infrastructures	Aider à résoudre les problèmes d'entretien des infrastructures mal ou inefficacement programmés et à cartographier les services sur le terrain, par exemple, creuser des routes ; dommages aux réseaux d'énergie, de données et d'eau ; incapacité à identifier les fuites souterraines, etc.
	Efficacité énergétique urbaine améliorée	Par exemple, pour l'Université technologique de Nanyang à Singapour, la planification 3D et la modélisation opérationnelle de 21 bâtiments, les tests virtuels et l'optimisation des performances ont permis d'identifier des économies d'énergie de 31 % par an66.
	Réduction des émissions du trafic urbain	Une vue et un contrôle en temps réel des actifs (par exemple, un feu de circulation) et des systèmes d'infrastructure entiers (par exemple, une grande route urbaine, un périphérique, etc.) donnent aux équipes opérationnelles la capacité de prédire les problèmes, de fluidifier la circulation, d'atténuer les risques, etc. 67
	Diminution des risques sanitaires liés à la mauvaise qualité de l'air urbain	La qualité de l'air peut varier considérablement d'une rue à l'autre dans les villes denses en raison des différences de conditions de circulation et de ventilation. L'accès aux variations en temps réel d'une rue à l'autre des informations sur la qualité de l'air et des informations sur les risques pour la santé peut permettre aux utilisateurs de prendre des décisions éclairées concernant les activités de plein air quotidiennes.

Cas d'utilisation : Amélioration de la conception urbaine grâce à la simulation, la planification et l'optimisation

Étude de cas : Singapour virtuel

Virtual Singapore est dirigé par la National Research Foundation Singapore en collaboration avec la Singapore Land Authority (SLA) et l'Infocomm Development Authority of Singapore (IDA). Il a été mis en service en 2015 et vise à créer un jumeau virtuel de données haute fidélité et en temps réel de la ville.

Alimenté par une analyse sophistiquée d'images et de données collectées auprès d'agences publiques et de capteurs en temps réel, Virtual Singapore est conçu pour donner un tout nouveau sens au terme « ville intelligente » : il vise à capturer toutes les parties mobiles de la ville et à suivre ce qui se passe. se passe en temps réel.

Virtual Singapore permettra aux urbanistes de tester diverses réponses à tout, depuis la croissance démographique et la gestion des ressources jusqu'aux événements publics et aux modèles de construction, et de mettre en œuvre celles qui créent les expériences les plus sûres et les plus positives.



Figure 12 : Singapour virtuel





Cas d'utilisation : Amélioration de la conception urbaine grâce à la simulation, la planification et l'optimisation

Focus supplémentaire : projet européen « Destination Earth (DestinE) »

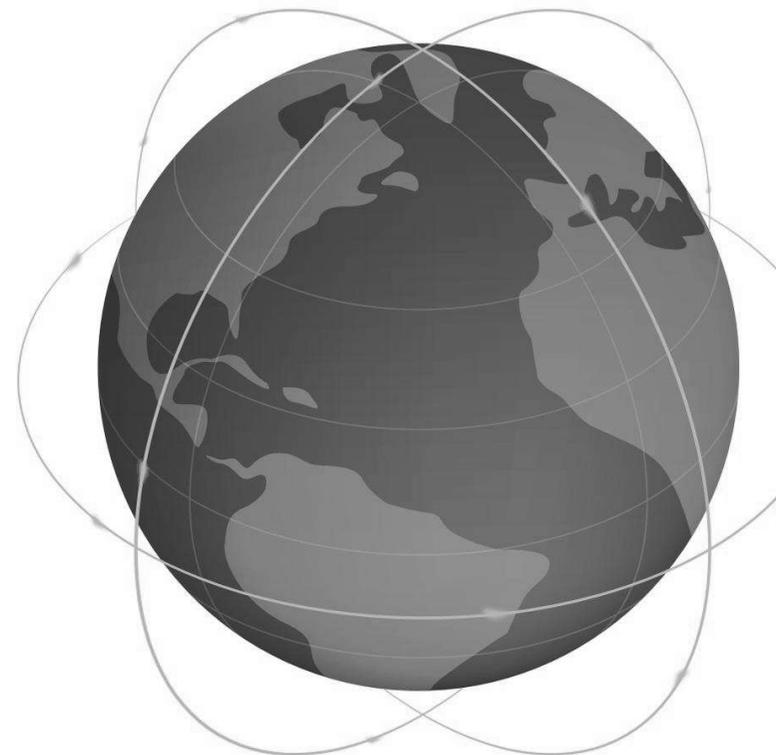
Destination Terre (DestinE) est le projet de l'Union européenne visant à créer une jumelle virtuelle de la planète et se déroulera au cours de cette décennie. L'objectif de l'initiative Destination Terre est de développer un modèle virtuel de très haute précision de la Terre pour surveiller et simuler l'activité naturelle et humaine, ainsi que de développer et tester des scénarios qui permettraient un développement plus durable.

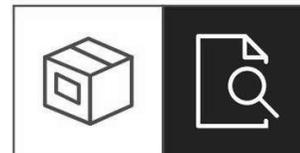
DestinE contribuera au Green Deal et à la stratégie numérique de la Commission européenne. Il libérera le potentiel de la modélisation virtuelle des ressources physiques de la Terre et des phénomènes associés tels que le changement climatique, les environnements aquatiques/marins, les zones polaires et la cryosphère, etc. pour accélérer la transition verte et aider à anticiper les grands défis environnementaux.

Au cœur de DestinE se trouvera une plate-forme fédérée de modélisation et de simulation basée sur le cloud, donnant accès aux données, à une infrastructure informatique avancée, à des logiciels, à des applications d'IA et à des analyses.

Il intégrera des jumeaux virtuels de sous-systèmes planétaires, tels que la météo et le climat, la sécurité alimentaire et hydrique, la circulation océanique mondiale et la biogéochimie des océans, etc. — donnant aux utilisateurs l'accès à des informations thématiques, des services, des modèles, des scénarios, des simulations, prévisions et visualisations.

La plateforme permettra le développement d'applications et l'intégration des propres données des utilisateurs.





Cas d'utilisation : Optimisation d'une usine de fabrication de produits FMCG avec des jumeaux virtuels de processus

Opportunité de réduction des coûts, d'énergie et des déchets et d'amélioration de la qualité dans la fabrication de biens de consommation emballés

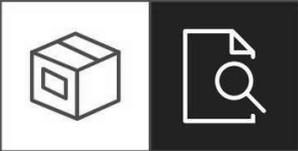
Les opérations de fabrication sont depuis longtemps un domaine d'intérêt pour la mise en œuvre de la technologie des jumeaux virtuels (à la fois pour l'optimisation des processus et des actifs). Il s'agit d'un environnement riche en données et relativement isolé du monde extérieur.

Dans ce contexte, les jumeaux virtuels permettent d'optimiser les conceptions pour la fabrication et de tester, d'affiner et d'automatiser les agencements, les flux de matériaux et les processus.

La modélisation et la simulation de processus de production discrets ou d'usines entières permettent aux opérateurs d'usine d'analyser d'énormes quantités d'informations, de trouver des améliorations de productivité, de réduire les coûts et de rendre les processus de production plus efficaces, plus flexibles et moins gourmands en ressources par unité de production.

En outre, la mise en œuvre de telles technologies dans les usines peut soutenir la transformation des compétences numériques de la main-d'œuvre.

Les jumeaux virtuels pour la fabrication de produits de grande consommation en sont aux premiers stades d'adoption dans le monde et les études de cas CPG avec des données accessibles au public sur les plages d'amélioration observées sont encore relativement rares. Le tableau ci-dessous présente les principaux facteurs de valeur, ainsi que des exemples à l'appui (voir Figure 13).

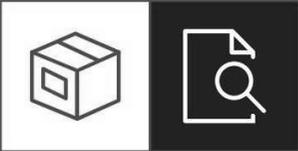


Cas d'utilisation : Optimisation d'une usine de fabrication de produits FMCG avec des jumeaux virtuels de processus

Figure 13 : Facteurs de valeur clés du cas d'utilisation (non exhaustif et illustratif)

VALEUR CATÉGORIES	FACTEURS DE VALEUR CLÉS (NON EXHAUSTIF)	DESCRIPTION ET EXEMPLE (ILLUSTRATIF)
 Entreprise (valeur économique)	Augmentation de la productivité grâce à une automatisation améliorée.	Le projet pilote d'Unilever au Brésil a enregistré une augmentation de la productivité de 1 à 3 % ⁶⁸ ; Henkel a signalé une efficacité globale de l'équipement (OEE) de 30 % améliorée grâce à sa plateforme mondiale en temps réel améliorant l'OEE ⁶⁹
	Économies de coûts grâce à une utilisation optimisée des ressources	Dassault Systèmes rapporte que ses solutions jumelles 3DEXPERIENCE Model Based Systems Engineering (MBSE) ont permis de réduire le COGS jusqu'à 27 % dans les études de cas clients ⁷⁰ .
	Capacité accrue au sein de l'usine	L'optimisation de la production avec les technologies de jumeaux virtuels peut permettre de libérer de la capacité dans l'usine sans installer d'équipement supplémentaire ; jusqu'à 18 % d'augmentation du débit ⁷¹
	Activation de l'optimisation de la conception de produits	La capture et l'analyse des données de production peuvent être utilisées pour éclairer les décisions de conception et de gestion au niveau du portefeuille de produits.
	Moins d'interruptions et de temps d'arrêt	Unilever a réussi à réduire le nombre d'alertes nécessitant une action de 90 % par jour, garantissant ainsi beaucoup moins d'interruptions ⁷²
 Valeur de durabilité (environnementale et/ou sociale)	Consommation d'énergie réduite	Henkel a mis en place une plateforme de données basée sur le cloud qui connecte plus de 30 sites et plus de 10 centres de distribution en temps réel ; un jumeau virtuel pour une solution de durabilité a permis une réduction de 38 % de la consommation d'énergie ⁷³
	Réduction des déchets de production	Les solutions aident à éliminer les goulots d'étranglement et à attribuer les bons matériaux aux bonnes commandes pour réduire les déchets ; Unilever a réduit ses déchets de matériaux de plus de 42 % dans son usine de Dubaï, aux Émirats arabes unis, grâce à la gestion numérique de la qualité E2E ⁷⁴ .
	Amélioration des opportunités de perfectionnement des employés	Les techniques de formation peuvent être liées à la technologie et inclure la gamification, les parcours d'apprentissage numérique, la réalité virtuelle et les outils d'apprentissage en réalité augmentée.

Cas d'utilisation : Optimisation d'une usine de fabrication de produits FMCG avec des jumeaux virtuels de processus



Étude de cas : Jumeaux virtuels en logistique

Un élément essentiel de tout effort d'optimisation de la chaîne d'approvisionnement consiste à établir un niveau adéquat de transparence et de visibilité de la chaîne d'approvisionnement elle-même. Ceci est particulièrement important lorsque l'accent est mis sur l'amélioration de votre empreinte environnementale ou sociale dans la logistique aller et retour. Par exemple, réduire les émissions de CO2 en se concentrant uniquement sur la réduction des kilomètres parcourus donne des résultats limités.

Bien qu'il existe une forte corrélation entre une réduction de la distance parcourue et une réduction des émissions de CO2, d'autres considérations peuvent être prises en compte, telles que le type de véhicule, la taxe carbone locale et le type de conduite (par exemple, urbaine ou autoroute, topographie de la route). etc.) qui peuvent avoir un impact important sur les émissions de CO2 d'une flotte.

Capter ces différences dans les calculs d'émissions de CO2 via un outil de jumeau virtuel peut aider à créer un plan logistique via une optimisation mathématique en fonction de l'objectif de minimiser le CO2 et en tenant compte d'une gamme de variables clés au-delà de la simple minimisation de la distance.

Figure 14 : Les KPI pour les émissions de CO2 affichés bien en évidence et suivis pour chaque étape d'un itinéraire





Cas d'utilisation : optimisation des performances des actifs après-vente grâce aux technologies de jumeaux virtuels

Opportunité de réduction des coûts et des déchets, de nouvelles sources de revenus, une sécurité améliorée et une durée de vie plus longue des actifs

Ce cas d'utilisation se concentre sur l'application de jumeaux virtuels pour optimiser les performances pendant la phase d'utilisation du véhicule et comme moyen de fournir un meilleur service et une meilleure fiabilité aux propriétaires. Une fois sur la route, l'actif physique reste connecté à son jumeau virtuel, lui fournissant des données sur les modèles d'utilisation, les performances, les conditions de conduite et les besoins d'entretien, améliorant ainsi les capacités prédictives du jumeau virtuel au fil du temps.

Le jumeau virtuel renvoie également des mises à jour logicielles en fonction des besoins de ce véhicule individuel. Il peut formuler des recommandations de maintenance et d'entretien personnalisées et prescriptives, minimisant ainsi l'allocation inefficace des ressources associée aux approches traditionnelles de maintenance basées sur le temps et l'état.

Sur la base de ces applications, les jumeaux virtuels permettraient d'améliorer de 20 à 30 % la prolongation de la durée de vie des actifs grâce à des interventions logicielles et matérielles opportunes.

De plus, les données et les informations recueillies tout au long de la durée de vie d'un actif sont inestimables pour permettre le développement d'itérations améliorées à l'avenir, particulièrement pertinentes pour l'adoption massive des véhicules électriques.

Des jumeaux virtuels pour l'optimisation et le suivi des opérations des véhicules en sont aux premiers stades de développement mais deviennent de plus en plus essentiels au développement et à l'adoption à grande échelle de groupes motopulseurs électrifiés. Le tableau ci-dessous présente les principaux facteurs de valeur et des exemples à l'appui (voir Figure 15).



Cas d'utilisation : optimisation des performances des actifs après-vente grâce aux technologies de jumeaux virtuels

Figure 15 : Facteurs de valeur clés du cas d'utilisation (non exhaustif et illustratif)

VALEUR CATÉGORIES	FACTEURS DE VALEUR CLÉS (NON EXHAUSTIF)	DESCRIPTION ET EXEMPLE (ILLUSTRATIF)
 Entreprise (valeur économique)	Avantages supplémentaires en R&D	En calibrant et en améliorant la fidélité d'un jumeau virtuel avec des données opérationnelles provenant des véhicules en circulation, les équipementiers peuvent ensuite utiliser cette intelligence dans le développement de nouveaux produits.
	Diminution des coûts de garantie et de service pour les véhicules	En général, les équipementiers automobiles consacrent 2 à 5 % de leur chiffre d'affaires aux coûts de service et de garantie, soit une fourchette comprise entre 4 et 7 milliards de dollars ; à l'inverse, le coût de la garantie de Tesla est de 0,9 à 1,8 % depuis 2016
	Nouvelles sources de revenus issues de la monétisation des données. En fonction des contraintes juridiques, les OEM pourraient potentiellement partager des données avec des tiers intéressés pour offrir aux propriétaires d'actifs des biens et services	
	Nouveaux modèles économiques et sources de revenus	Les jumeaux virtuels peuvent faciliter les stratégies et les modèles commerciaux de logiciels en direct (SOTA), dans lesquels les constructeurs OEM peuvent développer de nouvelles sources de revenus basées sur les mises à jour SOTA, les mises à niveau payantes, les applications et services d'infodivertissement et télématiques.
 Valeur de durabilité (environnemental et/ ou social)	Durée de vie prolongée des actifs	Les fabricants de batteries et de composants pour véhicules électriques signalent une prolongation potentielle de la durée de vie des batteries pour véhicules électriques de 20 à 30 %
	Utilisation optimisée des ressources	À mesure que la maintenance devient personnalisée et prescriptive, les interventions inutiles basées sur le temps sont minimisées, voire complètement éliminées.
	Remise à neuf et reconditionnement facilités	Les enregistrements de données et les informations relatives à l'utilisation des véhicules peuvent permettre une remise à neuf ou un reconditionnement plus rentable à la fin de la première vie.
	Sécurité opérationnelle accrue	Alerte avancée et prédiction des pannes graves potentiellement dangereuses pour l'homme



Cas d'utilisation : optimisation des performances des actifs après-vente grâce aux technologies de jumeaux virtuels

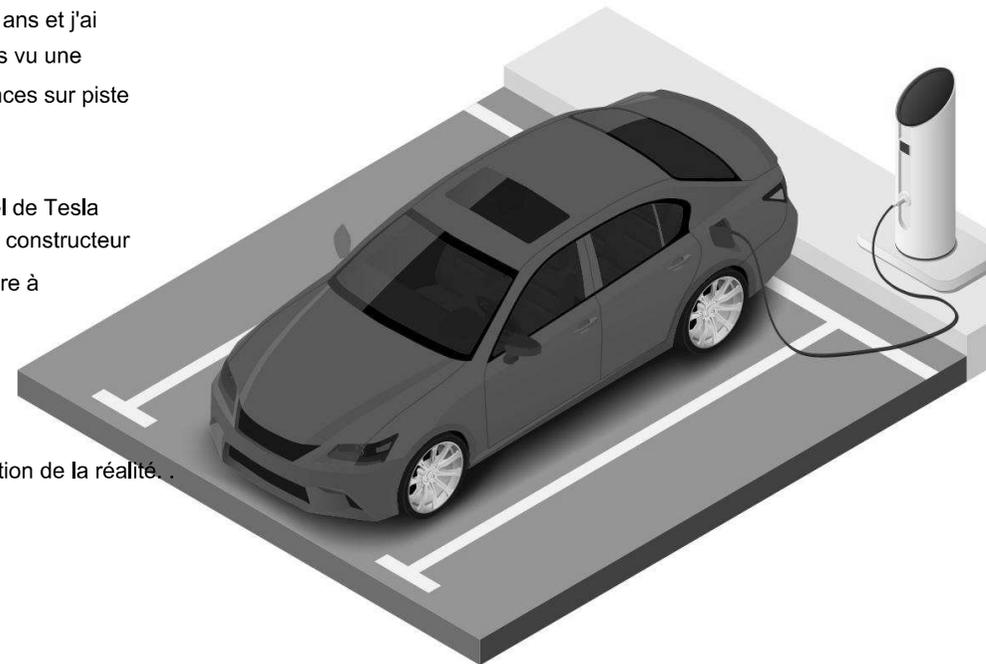
Étude de cas : résolution d'un problème de rupture avec la Tesla Model 3

Consumer Report a signalé de « gros défauts » dans le modèle 3 de Tesla concernant sa « longue distance d'arrêt » lors de son test de freinage d'urgence. En conséquence, il n'a pas recommandé le modèle et cela a été un coup dur pour Tesla, une entreprise fière de son bilan en matière de sécurité.

Ce week-end, Tesla a publié une mise à jour logicielle en direct, qui, selon le constructeur automobile, a modifié l'étalonnage de l'algorithme de freinage antiblocage du véhicule pour réduire la distance d'arrêt du véhicule à 60 mph de 19 pieds, à 133 unités, soit environ la moyenne pour un véhicule de luxe. berline compacte. Neuf jours plus tard, Consumer Report a mis à jour son examen pour donner sa recommandation au modèle 3.

Jake Fisher, directeur des essais automobiles chez Consumer Report, a déclaré dans un communiqué : « Je suis chez Consumer Report depuis 19 ans et j'ai testé plus de 1 000 voitures, et je n'ai jamais vu une voiture qui pourrait améliorer ses performances sur piste avec une mise à jour en direct ».

La capacité opérationnelle du jumeau virtuel de Tesla est si avancée qu'elle permet également au constructeur OEM de collecter le kilométrage de sa voiture à différents endroits avec différentes conditions de vent et de calibrer l'aérodynamique de son jumeau virtuel (coefficient de traînée), de sorte que son jumeau virtuel soit une véritable représentation de la réalité.



Cas d'utilisation : Virtualisation des essais cliniques grâce aux technologies de jumeaux virtuels

Possibilité d'un accès accru aux essais cliniques, d'une expérience améliorée pour les patients et d'une réduction de l'intensité des émissions de GES

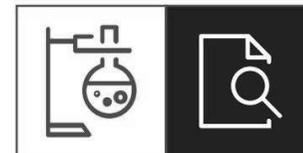
Une plus grande implication des patients dans les essais cliniques devient de plus en plus populaire. Les promoteurs d'essais et les enquêteurs cliniques explorent de nouvelles façons d'immerger les patients dans les essais, en incluant leurs points de vue et en les informant mieux sur les risques, les avantages et la progression de la maladie.

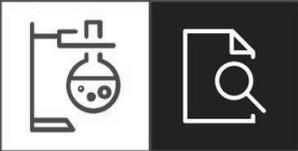
De plus, les données peuvent désormais être collectées en dehors du cadre clinique traditionnel, grâce à l'omniprésence des technologies et des réseaux mobiles, qui ont légitimé les appareils numériques grand public en tant que sources de collecte de données pouvant générer des informations cliniques fiables en dehors de la clinique. Cela a créé un nouveau défi dans la gestion de la qualité, de la quantité et de la validité de ces données.

Ici, nous nous concentrons sur la manière dont les technologies de jumeaux virtuels peuvent prendre en charge les essais cliniques virtuels. Par exemple, ils peuvent aider à créer un avatar virtuel complet d'un patient individuel basé sur des données, conçu pour prédire les résultats de diverses thérapies, permettant aux patients, en partenariat avec leurs cliniciens, d'« essayer » des interventions alternatives telles qu'un nouveau médicament, en mode électronique. simulation, via leur jumeau virtuel, avant de sélectionner celle la plus susceptible d'être bénéfique.

Les essais 100 % virtuels (toutes les interactions sont menées à distance) restent l'exception, mais ils exploitent tout le potentiel de la connectivité et des fils numériques, permettant aux patients de participer à des essais même à long terme sans quitter leur domicile et aux sponsors de bénéficier d'avantages plus élevés, participation des patients et économies de coûts^{viii}.

La recherche sur l'impact des essais cliniques virtuels et hybrides sur la durabilité est limitée et se concentre généralement sur le facteur bien-être humain. Même si les données disponibles ne permettent pas une analyse approfondie des impacts sur la durabilité environnementale, les preuves qualitatives existantes suggèrent un fort potentiel d'obtention de bénéfices environnementaux. Le tableau ci-dessous présente les principaux facteurs de valeur, avec des exemples à l'appui, pour encadrer ces avantages (voir Figure 16).





Cas d'utilisation : Virtualisation des essais cliniques grâce aux technologies de jumeaux virtuels

Figure 16 : Facteurs de valeur clés du cas d'utilisation (non exhaustif et illustratif)

CATÉGORIES	FACTEURS DE VALEUR CLÉS (NON EXHAUSTIF)	DESCRIPTION ET EXEMPLE (ILLUSTRATIF)
 Entreprise (valeur économique)	Économies de coûts grâce à la réduction du temps total passé dans les essais	La durée totale des essais est en moyenne plus courte en raison d'un recrutement plus efficace, de taux d'abandon plus faibles et d'une collecte de données plus rapide et plus précise ⁷⁵ .
	Économies de coûts grâce à un patient plus efficace recrutement	Le recrutement des patients est l'une des principales raisons des retards dans les essais cliniques, 80 % des essais ne parvenant pas à respecter les objectifs et les délais de recrutement. Le recrutement de patients via des visites sur site et des limites basées sur la localisation géographique constituent un obstacle majeur ⁷⁶
	Économies de coûts grâce à une meilleure rétention des patients. Les essais virtuels peuvent théoriquement contribuer à réduire d'environ 40 % le taux d'abandon actuellement élevé des patients impliqués dans les études de phase III ⁷⁷ .	
 Valeur de durabilité (environnementale et/ou sociale)	Amélioration de la santé humaine grâce à un accès précoce aux traitements	10 000 patients ont pu utiliser le stimulateur cardiaque compatible IRM de Medtronic 2 ans plus tôt que ce qui aurait été possible auparavant grâce à l'utilisation de modèles informatiques pour le faire approuver ⁷⁸
	Confort, sécurité et expérience améliorés pour les patients	Les essais cliniques virtuels peuvent être utilisés pour améliorer le confort, la commodité et la confidentialité des participants à la recherche ⁷⁹ ; la collecte « en direct » de données permet aux enquêteurs de calibrer, de modifier et peut-être même d'interrompre une étude plus facilement ⁸⁰
	Diversité des patients améliorée	La virtualisation d'une composante importante des essais cliniques peut contribuer à améliorer la participation de groupes démographiques et ethniques sous-représentés ⁸¹ .
	Réductions des émissions grâce à la réduction consommation d'énergie	Les principales sources de consommation d'énergie dans les essais cliniques proviennent des locaux et des déplacements ; lors d'un audit d'un an sur un échantillon d'essai clinique, les GES ont été estimés à 126 tonnes de CO ₂ e ⁸² ; à titre de comparaison, l'empreinte carbone annuelle de l'UE27 est estimée à 7 tonnes/personne (2018) ⁸³

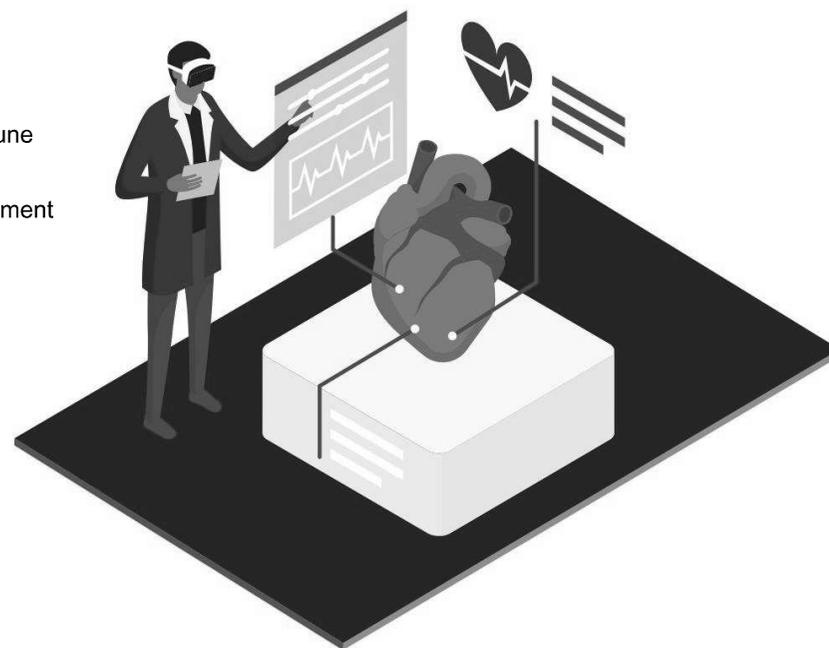


Cas d'utilisation : Virtualisation des essais cliniques grâce aux technologies de jumeaux virtuels

Étude de cas : Le projet Living Heart

Le projet Living Heart rassemble des chercheurs en cardiologie, des éducateurs, des développeurs de dispositifs médicaux, des régulateurs et des cardiologues en exercice dans le but de développer et de valider des modèles numériques personnalisés et hautement détaillés de cœur humain.

Ces modèles visent à établir une base unifiée pour la médecine cardiovasculaire in silico et servent de base technologique commune pour l'éducation et la formation, la conception de dispositifs médicaux, les tests, le diagnostic clinique et la science réglementaire, créant ainsi une voie efficace pour traduire rapidement les avancées actuelles et futures. innovations directement dans l'amélioration des soins aux patients.



Cas d'utilisation : Activation de la conception de produits électriques et électroniques circulaires

Opportunité d'amélioration des revenus et d'orientation client, Émissions de GES et réduction des déchets

Ce cas d'utilisation se concentre sur l'utilisation de technologies de jumeaux virtuels pour développer des produits électriques et électroniques qui intègrent et suivent mieux les principes de l'économie circulaire afin d'optimiser l'utilisation des ressources tout au long du cycle de vie du produit.

La modélisation et la simulation 3D permettent aux concepteurs de produits et ingénieurs pour explorer des options illimitées d'innovation durable.

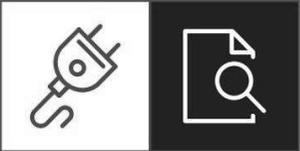
Par exemple, des outils avancés peuvent prendre en charge l'exploration et le développement in silico de matériaux de batterie, en examinant spécifiquement le développement d'architecture modulaire, la visibilité de l'empreinte intégrée et les risques d'approvisionnement.

Plus largement, ces technologies permettent aux équipementiers de réduire l'impact de leurs produits dès la conception, de manière économique et avec un minimum de risques grâce à la simulation virtuelle, à l'analyse des données et à une collaboration renforcée entre les concepteurs, les ingénieurs et les opérateurs de production.



La valeur positive créée s'étend sur l'ensemble du cycle de vie du produit : des produits plus durables et plus efficaces, plus faciles à réparer, à démonter et à recycler à la fin de leur durée de vie utile.

Il n'est objectivement pas possible d'attribuer des résultats discrets en matière de durabilité à l'utilisation de technologies de jumeaux virtuels dans la conception de produits électriques et électroniques au niveau industriel. Des études de cas individuelles contribuent cependant à mettre en évidence le rôle de ces technologies en tant que catalyseur important de la durabilité. Le tableau ci-dessous présente les principaux facteurs de valeur, ainsi que des exemples à l'appui, pour cadrer la valeur de ce cas d'utilisation (voir Figure 17).



Cas d'utilisation : Activation de la conception de produits électriques et électroniques circulaires

Figure 17 : Facteurs de valeur clés du cas d'utilisation (non exhaustif et illustratif)

VALEUR CATÉGORIES	FACTEURS DE VALEUR CLÉS (NON EXHAUSTIF)	DESCRIPTION ET EXEMPLE (ILLUSTRATIF)
 Entreprise (valeur économique)	Diminution des coûts des matières premières	Pour les machines à laver, les estimations montrent des économies nettes de coûts de matériaux de plus de 12 % du coût total des intrants de l'industrie, en supposant que 50 % des machines EOL sont remises à neuf et 50 % sont recyclées ⁸⁴ ; 30 % d'économies de poids moyennes obtenues grâce à la conception générative
	Nouvelles sources de revenus issues des modèles de services	En 2019, le programme de développement durable de HP a généré plus de 900 millions de dollars de nouveaux revenus basés sur des modèles commerciaux circulaires et la réutilisation des matières plastiques, soit une augmentation de 35 % par rapport à 2018 ⁸⁵ .
	Augmentation des revenus grâce aux majorations de prix pour les produits durables	Pour Electrolux, en 2019, les appareils électroménagers haut de gamme représentaient 23 % du total des unités vendues, mais 32 % de la marge brute des produits de consommation ⁸⁶ .
	Risque de non-conformité réduit et pertes financières potentielles	En 2019, pour la première fois, des mesures au titre de la directive européenne sur l'écoconception ont été incluses pour soutenir la réparabilité et la recyclabilité des produits ⁸⁷ .
 Valeur de durabilité (environnemental et/ ou social)	Utilisation réduite de matières premières (grâce à une durabilité accrue)	Avec des compositions de matériaux et une production similaires, le remplacement de 5 machines à durée de vie de 2 000 cycles par 1 machine à durée de vie de 10 000 cycles permet d'économiser environ 180 kg d'acier et plus de 2,5 tonnes d'émissions de CO ₂ .
	Empreinte de produit intégrée réduite	Pour Apple, l'utilisation de matériaux recyclés réduit l'empreinte CO ₂ e des produits d'environ 50 % en moyenne ⁸⁸
	Efficacité accrue du produit (pendant phase d'utilisation)	En Europe, qui représente 38 % des ventes totales d'Electrolux, l'efficacité énergétique s'est améliorée en moyenne de 2 % par an depuis 2015 grâce aux initiatives d'éco-conception ⁸⁹ .

Cas d'utilisation : Activation de la conception de produits électriques et électroniques circulaires



Étude de cas : Global Tech Co

Tech Co, une entreprise mondiale de fabrication de matériel informatique, s'est fixé pour objectif de réduire de 45 % l'empreinte carbone intégrée de son nouveau produit et d'augmenter l'utilisation de matériaux de structure recyclés de 50 %.

La technologie de simulation de jumeaux virtuels permet d'étudier beaucoup plus d'options de conception et d'optimiser les performances des produits tout en respectant les KPI de développement durable. Les développeurs de produits ont étudié le comportement du prototype virtuel avec un large éventail de scénarios concernant les performances thermiques et acoustiques et le comportement électromagnétique.

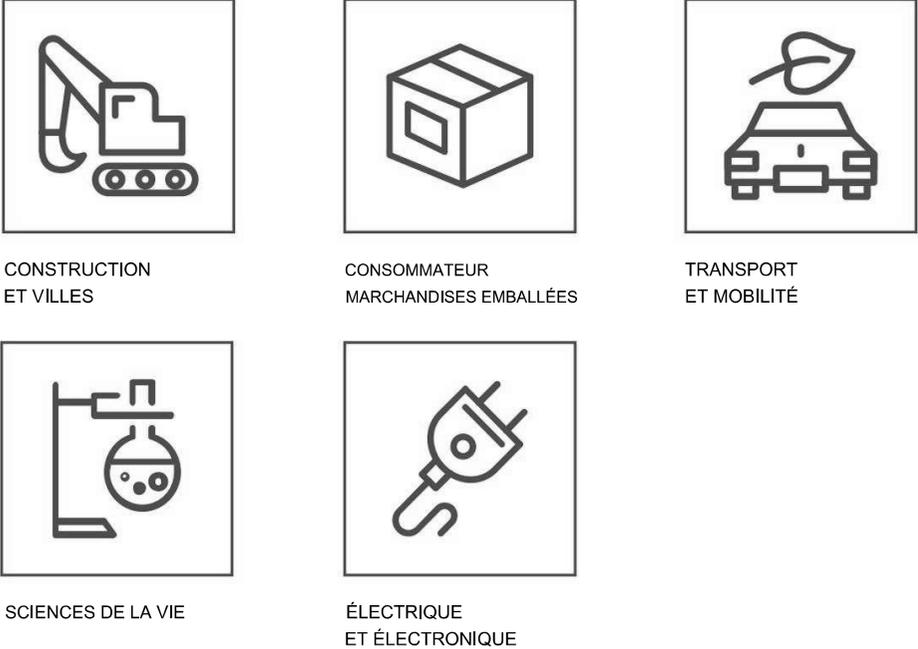
La conception générative ainsi que la simulation et l'optimisation mécaniques avancées ont conduit à des pièces structurelles plus légères ainsi qu'à des performances de torsion et de flexion plus élevées. Ils ont également permis un taux de matériaux recyclés nettement plus élevé que d'habitude.

Il est important de noter que les technologies de jumeaux virtuels ont permis à l'entreprise d'atteindre ses objectifs en matière de développement durable : le nouvel ordinateur a une empreinte carbone inférieure de 47 % par rapport à la génération précédente et une coque composée à 100 % de matériaux recyclés.



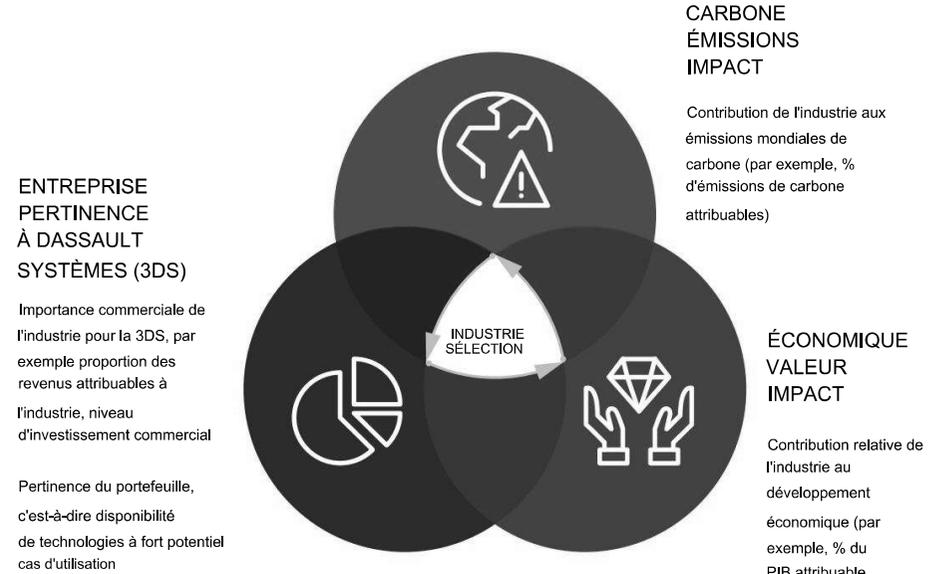
Portée de l'industrie

Figure 18 : Industries ciblées pour la recherche



Les figures ci-dessous décrivent les critères, définitions et résultats de priorisation de l'industrie

Figure 19 : Les critères proposés se concentrent sur la pertinence commerciale, le carbone et l'impact économique



4.2 Annexe : Méthodologie

Figure 20 : Critères de priorisation de l'industrie : définitions élevées/moyennes/faibles

	PERTINENCE COMMERCIALE POUR LA 3DS	IMPACT DES ÉMISSIONS DE CARBONE	IMPACT SUR LA VALEUR ÉCONOMIQUE
HAUT	L'industrie/le marché constitue une source de revenus clé pour l'entreprise et/ou un domaine d'investissement élevé	Contribution directe ou indirecte à plus de 10 % des émissions mondiales de GES/équivalent carbone	L'industrie figure parmi les 10 premières au monde en termes de valeur/\$-taille ; contribution au PIB mondial, lorsque connue est >10 %
MOYEN	Le marché industriel est une source de revenus secondaire, mais il englobe des cas d'utilisation technologique potentiellement stratégiques à évaluer et à augmenter. sensibilisation sur	Contribution directe ou indirecte à moins de 10 % des émissions mondiales de GES/équivalent carbone mais supérieure à 2 %	Une industrie de plus petite taille mais importante pour l'emploi, le développement du capital intellectuel, etc. ; la contribution au PIB mondial, lorsqu'elle est connue, est de 2 à 10 %
FAIBLE	L'industrie/le marché constitue une source de revenus secondaire avec un potentiel de cas d'utilisation technologique limité.	Contribution directe ou indirecte à 2 % ou moins des émissions mondiales de GES/équivalent carbone	Une industrie de plus petite taille ; mondial La contribution au PIB, lorsqu'elle est connue, est <2 %

4.2 Annexe : Méthodologie

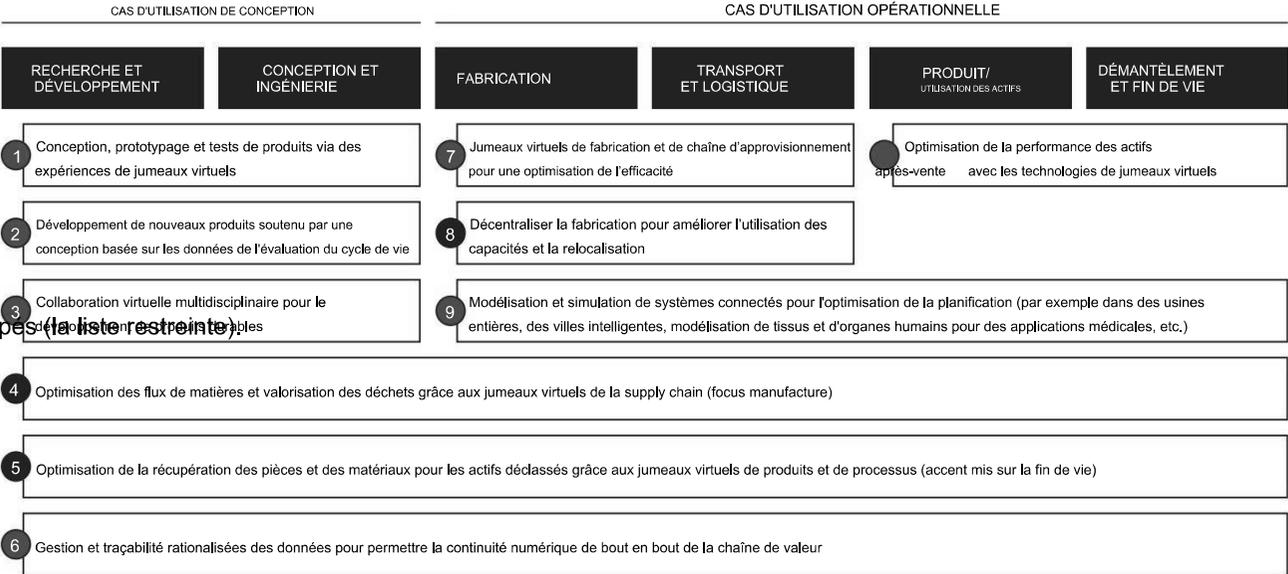
Figure 21 : Résultats de la priorisation de l'industrie

LES INDUSTRIES	ENTREPRISE PERTINENCE POUR 3DS	CARBONE ÉMISSIONS IMPACT	ÉCONOMIQUE IMPACT SUR LA VALEUR	NOTES SUPPLÉMENTAIRES ET JUSTIFICATION (ÉDITÉ POUR INFORMATIONS SENSIBLES)
Aérospatial et Défense	Moyen	Moyen	Faible	<ul style="list-style-type: none"> Impact carbone faible-moyen (5 % attribuables à la défense ; moins à la fabrication aérospatiale) Contribution au PIB ~ 2 % aux États-Unis (2018) ; 0,5 % au Royaume-Uni (2016) ; 705 milliards de dollars à l'échelle mondiale (2019) ou <1 %
Construction et villes	Haut	Haut	Haut	<ul style="list-style-type: none"> Env. 13% du PIB mondial (2017) Env. 10 % des émissions mondiales de carbone attribuables (28 %, y compris la phase d'exploitation/d'utilisation, 2019)
Consommateur Marchandises emballées	Haut	Haut	Moyen	<ul style="list-style-type: none"> Contribution au PIB ~ 3 % aux États-Unis (2019) ; ~14 % au Royaume-Uni (2019) 90 % des émissions carbone du secteur se situent dans la chaîne de valeur (2019) ; liens en amont avec l'agriculture, Transports et Industrie, proximité des consommateurs finaux – importance stratégique pour le carbone
L'énergie et Matériaux	Faible	Haut	Haut	<ul style="list-style-type: none"> Impact carbone important, par exemple, la production d'électricité et de chaleur représente ¼ des GES mondiaux Impact de valeur significatif, par exemple, l'énergie, le pétrole et le gaz parmi les plus grandes industries du monde
Électrique et Technologie électronique Matériel	Haut	Moyen	Haut	<ul style="list-style-type: none"> L'empreinte carbone du secteur des TIC représente environ 1,4 % des GES mondiaux ; problème aigu des déchets électroniques Dans de nombreux pays de développement. marchés, le secteur technologique représente une part importante de l'activité économique
Maison et Mode de vie	Moyen	Moyen	Moyen	<ul style="list-style-type: none"> Impact carbone et valeur économique moyen
Industriel Équipement	Haut	Faible	Faible	<ul style="list-style-type: none"> Importance faible à moyenne pour la valeur ajoutée totale dans l'UE, par exemple 3 % en 2010 pour l'économie non financière. Faible impact carbone, par exemple <1 % des émissions du Royaume-Uni en 2018 attribuables à la fabrication. de l'équipement
Sciences de la vie	Haut	Moyen	Haut	<ul style="list-style-type: none"> Les pays de l'OCDE ont consacré environ 10 % de leur PIB aux soins de santé en 2016 ; Produits pharmaceutiques à forte intensité de revenus et de GES L'empreinte carbone de la santé en 2014 représentait 5,5 % de l'empreinte carbone nationale totale dans les pays de l'OCDE.
Marine et En mer	Moyen	Moyen	Moyen	<ul style="list-style-type: none"> Supposé d'économie moyenne. valeur en raison de son importance stratégique pour le commerce et l'économie mondiales (sources de l'ONU) Le transport maritime représente environ 2,5 % des émissions mondiales de GES ; émissions d'énergie en amont 5-37% du total
Transport et mobilité	Haut	Haut	Haut	<ul style="list-style-type: none"> Les transports jouent un rôle clé dans l'économie actuelle et ont un impact important sur la croissance et l'emploi. • Les transports représentent 1/3 des émissions de GES à l'échelle mondiale, la route représentant la plus grande proportion de ces émissions.

Formulation et priorisation de cas d'utilisation technologique

L'étude est basée sur une recherche ascendante de solutions technologiques liées aux jumeaux virtuels déjà disponibles sur le marché ou actuellement en développement, qui ont le potentiel d'opérationnaliser les objectifs de développement durable. L'étape de formulation était basée sur la capture d'un cas d'utilisation détaillé pour chaque solution technologique (construction d'une longue liste), une hiérarchisation rapide de la pertinence par rapport aux objectifs de durabilité, une agrégation et un exercice de simplification. Cela a permis de restreindre la sélection à dix cas d'utilisation regroupés (la liste restreinte).

Figure 22 : Liste indépendante de l'industrie de dix cas d'utilisation susceptibles de générer des avantages en matière de développement durable ; les sept entourés en violet vif ont été classés en priorité pour une analyse plus approfondie et leur inclusion dans le document final



4.2 Annexe : Méthodologie

Figure 23 : Carte thermique de priorisation des cas d'utilisation avec les cas d'utilisation sur l'axe Y et l'impact de l'industrie, des affaires et du développement durable sur l'axe X ; les nuances de violet indiquent l'impact de l'indice H/M/L ; le gris indique une faible pertinence du cas d'utilisation pour l'industrie

UTILISER CAS	ÉLECTRONIQUE ET ÉQUIPEMENT ÉLECTRIQUE		CONSTRUCTION ET VILLES		CONSOMMATEUR MARCHANDISES EMBALLÉES		VIE LES SCIENCES		TRANSPORT ET MOBILITÉ	
	Entreprise Impact	Durabilité Impact	Entreprise Impact	Durabilité Impact	Entreprise Impact	Durabilité Impact	Entreprise Impact	Durabilité Impact	Entreprise Impact	Durabilité Impact
1	Haut	Haut	Moyen	Moyen	Haut	Moyen	Haut	Moyen	Haut	Haut
2	le	Moyen	Moyen	Moyen	Haut	Haut	Haut	Moyen	Faible	Moyen
3	le	Faible	Moyen	Moyen	N / A	N / A	N / A	N / A	Moyen	Moyen
4	le	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Haut
5	en	Faible	N / A	N / A	N / A	N / A	N / A	N / A	Moyen	Haut
6	t	Haut	Moyen	Faible	N / A	N / A	Moyen	Moyen	Moyen	Haut
7	le	Faible	N / A	N / A	Haut	Haut	Haut	Haut	Moyen	Moyen
8	le	Faible	N / A	N / A	Moyen	Faible	Faible	Faible	Moyen	Moyen
9		N / A	Moyen	Haut	N / A	N / A	Haut	Haut	Faible	Moyen
10	en	Moyen	Haut	Haut	N / A	N / A	Moyen	Moyen	Haut	Haut

Les dix cas d'utilisation regroupés ont été étudiés en détail pour déterminer leur potentiel relatif en matière de durabilité, et les avantages commerciaux dans un contexte industriel.

Sept cas d'utilisation uniques ont été priorisés pour une analyse plus approfondie pour chaque secteur, sur la base de preuves du potentiel de création de valeur commerciale et durable.

Deux cas d'utilisation supplémentaires ayant une applicabilité intersectorielle sont présentés au chapitre 3.6. pour leur pertinence dans la mise en place de l'économie circulaire (Figure 23, cas d'utilisation 4 et 5).

4.2 Annexe : Méthodologie

Figure 24 : Catégories d'impact et critères pour l'analyse des cas d'utilisation individuels lors de l'établissement de la courte liste finale des cas d'utilisation technologique pour l'étude. Celles-ci ont été utilisées dans l'analyse de la carte thermique décrite ci-dessus pour déterminer les évaluations élevées/moyennes/faibles pour chaque cas d'utilisation dans les dimensions de l'impact commercial et durable et dans les 5 secteurs.

<p>DÉFINIR L'IMPACT CATÉGORIES ET KPI</p>	<ul style="list-style-type: none"> Cas d'utilisation évalués en fonction des dimensions d'impact commercial potentiel et d'impact sur le développement durable. 	<ul style="list-style-type: none"> KPI d'impact commercial : productivité (augmentation de la production, augmentation de la productivité, réduction des coûts des produits, réduction du COGS, réduction des coûts de qualité, etc.) ; agilité (réduction des stocks, réduction des délais, etc.) ; rapidité de mise sur le marché (réduction de la rapidité de mise sur le marché, réduction du temps d'itération de conception, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> KPI d'impact sur le développement durable : réduction des déchets, réduction des matières premières, réduction de la consommation d'eau, réduction de l'intensité énergétique
<p>DÉFINIR LA QUALITATIVE CATÉGORIES DE CLASSEMENT (IMPACT H/M/L)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Impact élevé : preuves d'améliorations systémiques par rapport au scénario de statu quo dans un secteur donné, c'est-à-dire : peut permettre un changement à grande échelle. 	<ul style="list-style-type: none"> Impact moyen : preuve d'améliorations significatives par rapport au scénario de statu quo dans un secteur donné, par exemple : 20 % et plus 	<ul style="list-style-type: none"> Faible impact : preuves d'améliorations progressives par rapport au scénario de statu quo dans un secteur donné, par exemple : moins de 20 %

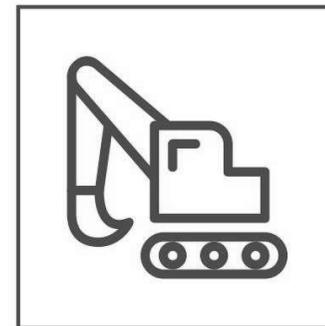
CONSTRUCTION ET VILLES

Analyse des avantages des cas d'utilisation

Optimisation de l'efficacité opérationnelle du bâtiment grâce à la technologie des jumeaux virtuels.

- La portée inclut l'empreinte mondiale des bâtiments résidentiels et commerciaux ; exclut la construction industrielle
- Comprend à la fois les nouveaux bâtiments qui adopteront des jumeaux virtuels et les bâtiments existants qui seraient rénovés d'ici 2030.
- Nouvelle construction entre 2020 et 2030 on suppose qu'il y a la même proportion commerciale/ résidentielle que celle observée actuellement
- Les impacts pris en compte ne couvrent que 10 ans du cycle de vie du bâtiment après la mise en œuvre des jumeaux virtuels.

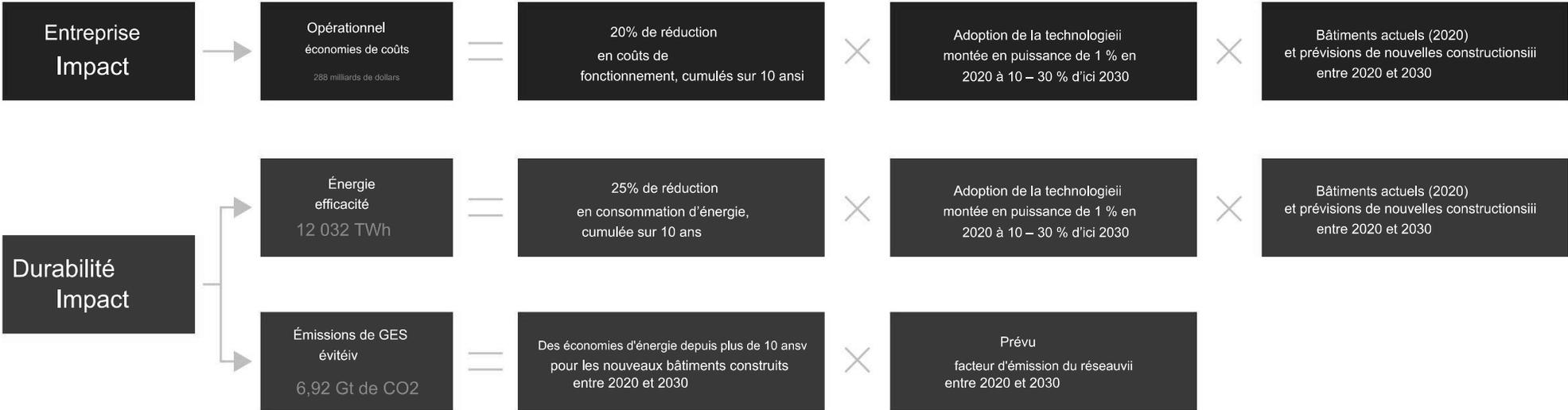
- Calibré pour les différences de taux d'adoption et d'exigences réglementaires dans l'UE, l'Amérique du Nord, l'Asie, etc.
- Les réductions d'émissions ne prennent en compte que l'efficacité énergétique et non la part plus élevée des énergies renouvelables dans le mix énergétique au fil du temps, même s'il a été démontré que les jumeaux virtuels augmentent l'adoption des énergies renouvelables dans les bâtiments.



CONSTRUCTION ET VILLES



Méthodologie d'estimation de haut niveau



Hypothèses clés : i. Économies sur les coûts d'exploitation grâce à la réduction de la consommation d'énergie, des coûts de planification et d'exécution de la maintenance, des coûts de démantèlement⁹⁰ ; ii. L'adoption de la technologie dans le reste du monde (y compris l'Océanie, l'Afrique, l'Amérique latine et le Moyen-Orient) est supposée être la même qu'en Asie. Différents taux d'adoption sont supposés pour les nouvelles constructions et les bâtiments existants⁹¹ ; iii. prévisions de croissance du parc immobilier pour l'industrie⁹² entre 2015 et 2050, en supposant une répartition de 90 : 10 entre les bâtiments résidentiels et commerciaux (sur la base de la répartition actuelle du marché américain) ; iv. L'impact de la baisse des émissions du réseau au fil du temps n'est pas pris en compte car il ne peut pas être attribué à l'application de jumeaux virtuels (principalement un facteur de baisse des prix et d'augmentation de la disponibilité/capacité de production d'énergie renouvelable) ; v. Les impacts sont regroupés sur 10 ans, même s'ils s'accumuleront sur toute la durée de vie du bâtiment, afin d'être prudent dans notre estimation et de supposer que les nouvelles technologies deviendront habituelles dans 10 ans ; vi. L'estimation des avantages a été calculée séparément pour les bâtiments existants et les nouveaux bâtiments puisque les taux d'adoption et les impacts seront différents, la plage de valeurs inférieure a été supposée arriver à une estimation prudente ; vii. Les facteurs régionaux provenant de sources multiples^{93, 94, 95} diminuent chaque année conformément aux estimations mondiales de l'AIE⁹⁶.

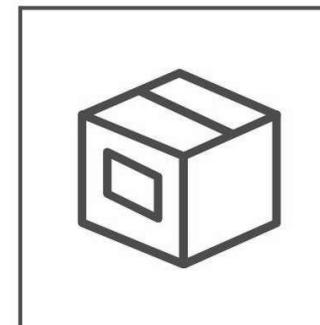
BIENS DE CONSOMMATION EMBALLÉS

Analyse des avantages des cas d'utilisation

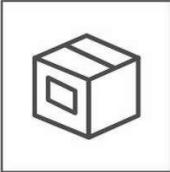
Développement de produits et d'emballages durables soutenus par une conception basée sur l'évaluation du cycle de vie (ACV).

- La modélisation d'impact a été réalisée pour Biens de consommation emballés et exclut Commerce de détail étant donné la différence significative dans les modèles opérationnels et les structures de coûts
- L'impact commercial couvre les économies de coûts lors du développement du produit et résultant d'une moindre consommation de matériaux.

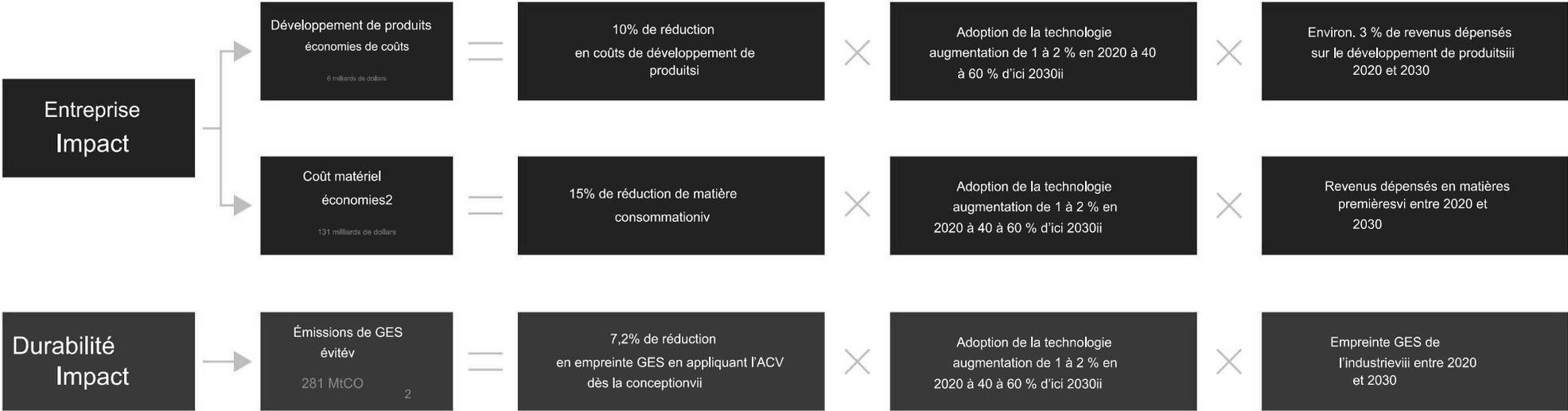
- Impact de la réalisation d'une ACV au niveau le stade de conception a été estimé sur la base de recherches comparant une ACV granulaire à une ACV de haut niveau⁹⁷
- L'impact de l'ACV est supposé être élevé au cours des 1 à 2 premières années et devrait être plus faible au cours des années suivantes grâce à des améliorations continues.



BIENS DE CONSOMMATION EMBALLÉS



Méthodologie d'estimation de haut niveau



Hypothèses clés : i. Une moyenne des plages d'amélioration fournies par Dassault Systèmes sur la base d'études de cas clients ; ii. Estimations pour l'Amérique du Nord ; l'adoption devrait être environ le double de celle en Europe et la moitié de celle en Asie et dans le reste du monde ; sur la base des données de marché fournies par Dassault Systèmes ; iii. Estimations externes de Statista utilisées pour les dépenses mondiales de R&D98 ; iv. Une moyenne des plages d'amélioration fournies par Dassault Systèmes sur la base d'études de cas clients ; v. L'évitement des émissions par la réduction de la consommation de matières n'est pas pris en compte, puisque l'estimation de la réduction des GES pour l'industrie prend déjà en compte l'impact matériel, afin d'éviter une double comptabilisation ; vi. Les coûts des matériaux représentent environ 40 à 50 % des revenus des entreprises de biens de consommation emballés. Cette part est plus faible pour les grandes marques et les marchés oligopolistiques, mais est estimée en moyenne à 45 % pour l'industrie99 ; vii. Basé sur une méta-analyse de plus de 800 études ACV où l'impact d'une ACV détaillée a été comparé à celui d'une ACV de haut niveau. Bien que les impacts de l'application de l'ACV sur le prototype 3D devraient être plus élevés, l'avantage supplémentaire de la réalisation d'une ACV détaillée a été pris comme indicateur de l'impact100 ; viii. Alors que les émissions directes (Scope 1 + 2) attribuées à l'industrie représentent environ 4 % des émissions mondiales, l'impact sur le cycle de vie (y compris les émissions du scope 3) est d'environ 40 %, puisque 90 % de l'impact GES des entreprises FMCG réside en amont ou en aval. (CDP)101.

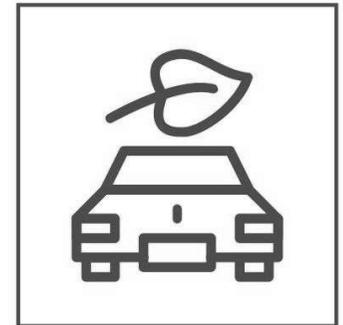
TRANSPORT ET MOBILITÉ

Analyse des avantages des cas d'utilisation

Conception, prototypage et tests de produits avec des technologies de jumeaux virtuels.

- Compte tenu de la nature mondiale de la chaîne de valeur automobile, l'évaluation est effectuée au niveau mondial plutôt que séparément par région (comme dans d'autres cas d'utilisation)
- Les calculs d'impact sont basés sur véhicules de tourisme, donc sous-estimés car l'impact serait plus élevé si les véhicules utilitaires étaient également pris en compte
- Les avantages découlent de la part accrue du prototypage virtuel lors du développement de produits et de l'optimisation des simulations lors du développement de systèmes de conduite autonomes.

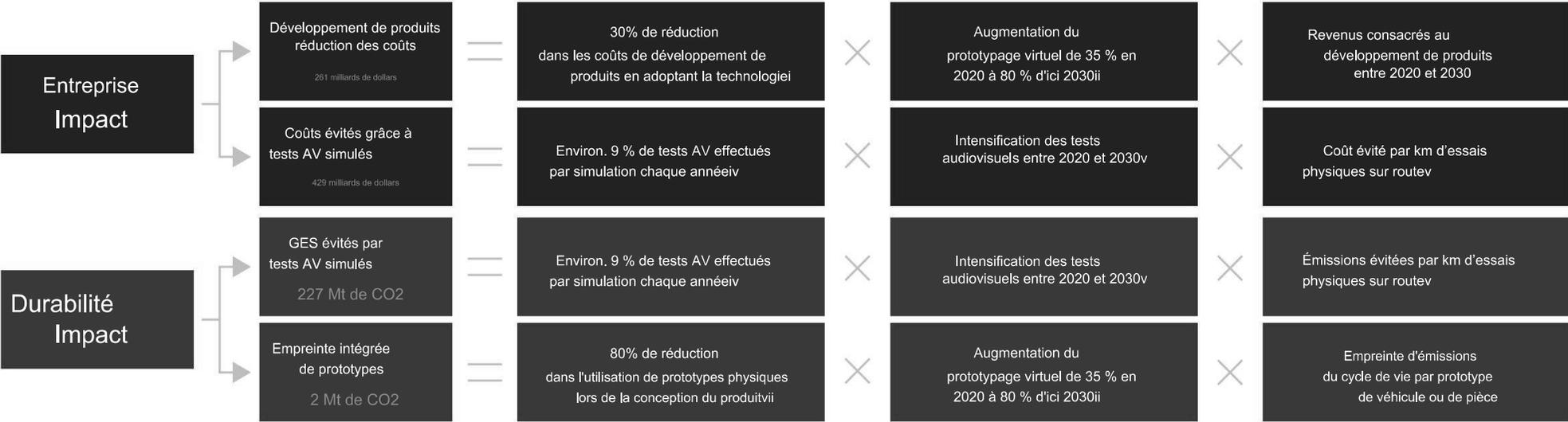
- Les économies de coûts et d'émissions liées à la simulation de conduite autonome ont été estimées en utilisant les véhicules électriques comme point de référence, qui ont des coûts d'exploitation et des émissions par km inférieurs à ceux des véhicules ICE. L'estimation est donc prudente
- L'impact commercial est une valeur importante et environ 60 % de cet impact est un évitement de coûts attribué aux tests physiques des véhicules autonomes (VA). Cela montre que la croissance récente du développement des AV a été rendue possible, en grande partie, grâce à la disponibilité de technologies de simulation à faible coût. Poursuivre le développement de l'audiovisuel via des tests conventionnels est extrêmement difficile sur le plan économique (les tests requis sont estimés à 14 milliards de km par système¹⁰²).



TRANSPORT ET MOBILITÉ



Méthodologie d'estimation de haut niveau

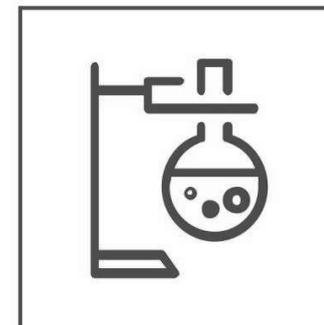


Hypothèses clés : i. Une moyenne des plages d'amélioration fournies par Dassault Systèmes sur la base d'études de cas clients ; une mise sur le marché plus rapide constitue également un avantage important, dont l'impact est difficile à quantifier, mais une réduction de 1 à 2 ans a été observée dans de nombreux cas ; ii. L'adoption de technologies est élevée parmi les constructeurs automobiles européens et les niveaux d'adoption seront très élevés sur les marchés matures d'ici 2030. Ces estimations concernent cependant l'ensemble de l'industrie automobile, représentant différentes zones géographiques et segments de produits ; iii. Les constructeurs automobiles consacrent généralement 5 % de leurs revenus au développement de produits¹⁰³ ; iv. Basé sur une comparaison des tests physiques annuels¹⁰⁴ et des simulations effectués par les principales entreprises automobiles et technologiques¹⁰⁵ ; v. Les économies d'émissions¹⁰⁶ et de coûts¹⁰⁷ sont basées sur les kilomètres parcourus par les véhicules électriques afin de fournir une estimation prudente. Cependant, les économies seraient plus importantes si l'on considère l'utilisation de véhicules ICE, de robots-taxis et de véhicules commerciaux. Une réduction de 90 % du coût est supposée en tenant compte du coût du matériel, du stockage, des outils de simulation, etc.¹⁰⁸ ; vi. Les niveaux actuels de tests AV sont estimés entre 30 et 35 milliards de kilomètres, sur la base des données fournies par des entreprises leaders¹⁰⁹ sur le marché de la conduite autonome. Les tests audiovisuels devraient croître au même rythme que le marché de la conduite autonome¹¹⁰, qui devrait croître à un TCAC de 22 % d'ici 2030 ; vii. Une moyenne des plages d'amélioration fournies par Dassault Systèmes sur la base d'études de cas clients ; viii. Estimation conservatrice basée sur une voiture électrique comme référence¹¹¹. Cependant, l'empreinte au sol d'un véhicule d'essai audiovisuel et de l'équipement installé devrait être beaucoup plus élevée.

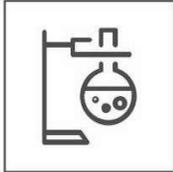
Analyse des avantages des cas d'utilisation

Optimisation d'usine de fabrication de produits pharmaceutiques avec des jumeaux virtuels de processus.

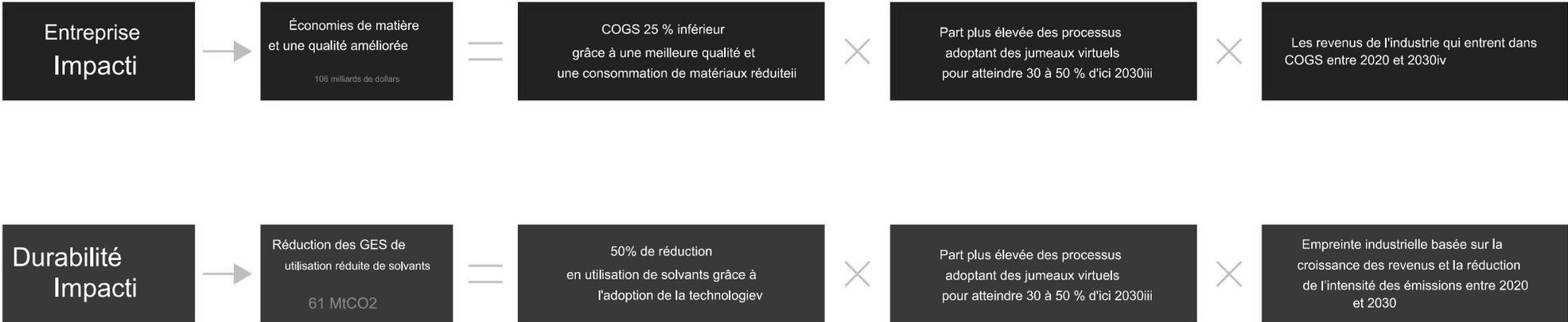
- Compte tenu de la nature mondiale des chaînes de valeur pharmaceutiques, l'évaluation a été réalisée au niveau mondial, mais avec une différenciation pour les génériques et les marques.
- Les solvants contribuent largement à la consommation de matière et Les émissions de GES au cours du cycle de vie d'un produit pharmaceutique et les réductions d'émissions ont été calculées sur la base des économies de solvants, en ignorant les autres réductions mineures.



SCIENCES DE LA VIE



Méthodologie d'estimation de haut niveau



Hypothèses clés : i. L'impact de la fabrication continue a été considéré comme un indicateur de l'impact des jumeaux virtuels, car disposer d'un jumeau virtuel pour les données de processus en temps réel est un facteur essentiel¹¹² pour la transition du traitement par lots au traitement continu ; ii. Cela prend en compte l'augmentation de la qualité, les rendements plus élevés, la diminution du gaspillage, etc. pour arriver à un impact consolidé sur le COGS ; iii. Actuellement, l'adoption de la technologie par le marché est d'environ 5 % en moyenne, mais peut atteindre 30 à 50 % selon les données fournies par Dassault Systèmes. Ces valeurs concernent la mise en œuvre complète du processus et non les jumeaux virtuels pour les opérations unitaires sélectionnées au sein d'une usine ; iv. Les structures de coûts des produits pharmaceutiques génériques¹¹³ et de marque¹¹⁴ sont très différentes, et une moyenne pondérée a été utilisée pour obtenir le COGS en pourcentage des revenus de l'industrie ; v. Une estimation prudente étant donné qu'une réduction de 70 à 90 % a été observée dans de nombreuses études de cas¹¹⁵ impliquant une réduction significative de l'utilisation de solvants ; vi. L'intensité des émissions de l'industrie doit diminuer de 59 % par rapport aux niveaux de 2015 d'ici 2025 pour respecter le scénario de 1,5°C prévu par l'accord de Paris¹¹⁶. Cela a été utilisé comme référence et les jumeaux virtuels et le traitement continu contribueraient grandement à la réduction requise.

ÉLECTRIQUE ET ÉLECTRONIQUE

Analyse des avantages des cas d'utilisation

Récupération des ressources des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) grâce aux jumeaux virtuels.

- L'analyse est de portée mondiale et basée sur les estimations disponibles des volumes de déchets électroniques et les projections de croissance jusqu'en 2030
- Une amélioration du traitement formel est attendue au cours des 10 prochaines années grâce à l'adoption de fils numériques qui favorisent le respect des lois sur les déchets électroniques et de meilleurs taux de remise à neuf.

• Le recyclage étant également possible avec des solutions low-tech, l'éventuelle augmentation des taux de recyclage n'a pas été prise en compte lors de l'estimation de l'impact.

- Bien que les catégories de déchets électroniques telles que les smartphones ont des taux de récupération formelle, de remise à neuf et de génération de valeur élevés grâce à la réutilisation, nous avons supposé des valeurs conservatrices qui sont représentatives du stock global de déchets électroniques



ÉLECTRIQUE ET ÉLECTRONIQUE



Méthodologie d'estimation de haut niveau



Hypothèses clés : i. Une augmentation linéaire de 17 % en 2020 à 43 % d'ici 2030, en supposant que les taux mondiaux de traitement formel atteindront les meilleures pratiques actuelles (considérées comme étant celles de l'UE) d'ici 2030¹¹⁷ ; ii. Actuellement, la réutilisation est d'environ 5 % en moyenne, mais peut atteindre 40 à 50 % sur la base d'estimations récentes des taux de rénovation possibles^{118, 119} ; iii. Il s'agit d'une augmentation moyenne basée sur une comparaison de la valeur de la valorisation des déchets électroniques du Global E-waste Monitor – 2020 (ONU) avec l'augmentation de la valeur par réutilisation pour différentes catégories de déchets électroniques telles que les smartphones, les téléviseurs, les ordinateurs portables¹²⁰ et les machines à laver¹²¹ ; iv. Sur la base de la différence entre les économies d'émissions résultant de la réutilisation et du recyclage estimées par Clarke et al. pour le Royaume-Uni¹²² et estimation pour les déchets électroniques mondiaux ; v. Il est supposé qu'en cas de manipulation (formelle) appropriée et/ou de réutilisation des réfrigérateurs et équipements de climatisation mis au rebut, aucun des HFC n'est rejeté dans l'environnement.

Experts consultés

NOM	RÔLE	ENTREPRISE
Olga Afremova	Senior Manager, Global Industry X. Services, Biens de Consommation Senior Manager,	Accenture
Sébastien Angerer	Global Industry X. Services, Automotive High-Tech Industry Solution Experience	Accenture
Anissa Bellini	Director Directeur Principal, Sustainability Services Business	Dassault Systèmes
Mauricio Bermudez	Consultant, Construction, Villes et Territoires Lead	Accenture
Marty Doscher	Consultant Transformation Digitale Circulaire et Supply Chains Durables	Dassault Systèmes
Lucas Florez	Responsable de la responsabilité sociale d'entreprise mondiale Expert Consultant d'affaires — Sciences de la	Dassault Systèmes
Lyndsay Harris	vie Consultant d'affaires en risques et résilience Directeur,	Dassault Systèmes
Barbara Holtz	Construction, Villes et Territoires Directeur, Transport et	Dassault Systèmes
Angéline Kneppers	mobilité Industrie de haute technologie Consultant en expérience de solutions R&D, Développement durable et vision	Dassault Systèmes
Ganesan Krishnamurthy	commerciale Directeur principal, Fabrication et	Dassault Systèmes
Auriane Joudiou	opérations numériques, Construction	Dassault Systèmes
Alexandre Laloi		Dassault Systèmes
Graham Malley		Accenture
Hrishikesh Mohan	Directeur technique des solutions industrielles, Biens de consommation emballés	Dassault Systèmes
Tammo Schwindt	Gestionnaire, Produits et plateformes intelligents, Sciences de la vie	Accenture
Félix Wunner	Gestionnaire, Produits et plateformes intelligents	Accenture
Personne interrogée externe	Co-fondateur, Technologie et Ingénierie	Société de mobilité électrique
Personne interrogée externe	Ingénieur en chef	Société de mobilité électrique
Personne interrogée externe	Directeur technologique, Solutions manufacturières et automobiles	Société mondiale de technologie
Personne interrogée externe	Vice-président exécutif, Affaires industrielles mondiales	Société Pharmaceutique Mondiale
Personne interrogée externe	Directeur de programme, R&D numérique	Société mondiale de produits de grande consommation
Personne interrogée externe	Directeur R&D, Gestion du cycle de vie des produits	Société mondiale de produits de grande consommation
Personne interrogée externe	Responsable de la fabrication durable	Société mondiale de produits de grande consommation

Comité de pilotage

NOM	RÔLE	ENTREPRISE
Simon Bentley	Directeur principal, Global Industry X. Services, 3DEXperience Platform Vice-président,	Accenture
Victoire de Margerie	Marketing d'entreprise, image de marque et communications Vice-président exécutif	Dassault Systèmes
Thibault De Tersant	principal, Secrétaire général Vice-président, Stratégie industrielle	Dassault Systèmes
Julien Durand	et finances Directeur général, Global Industry X. Services,	Dassault Systèmes
Jan-Willem Jannink	Développement durable Directeur principal, Corporate Marketing et Directeur	Accenture
Rod Kay	général des communications, Directeur des services de développement	Accenture
Justin Keble	durable, Directeur de l'Alliance mondiale	Accenture
Laurent Maniaudet		Dassault Systèmes
Christophe Mouillé	Directeur général, Industrie X. Directeur du développement durable de	Accenture
Alice Steenland	l'écosystème et des partenariats	Dassault Systèmes
Séverine Trouillet	Directeur des Affaires Mondiales	Dassault Systèmes
Youssef Touma	Co-responsable mondial, Produits et plateformes intelligents	Accenture
Laurent Valroff	Responsable des alliances mondiales	Dassault Systèmes
Florence Verzelen	Vice-président exécutif Industrie, Marketing terrain et Développement durable	Dassault Systèmes

Équipe de base du projet

NOM	RÔLE	ENTREPRISE
Justin Keble	Directeur général, Services de développement durable	Accenture
Lauren Ing	Gestionnaire principal, Services de développement durable	Accenture
Dhruv Malik	Consultant, Services de développement durable	Accenture
Tony Murdjev	Consultant, Services de développement durable	Accenture

Les références

- Greenfield, P., 2020. Les humains exploitent et détruisent la nature à une échelle sans précédent – Rapport. [en ligne] *le Gardien*. Disponible sur : <<https://www.theguardian.com/environment/2020/sep/10/humans-exploiting-and-destroying-nature-on-unprecedented-scale-report-aoe>>.
- Forum économique mondial. 2018. Près de 90 % des stocks de poisson sont dans le rouge – les subventions à la pêche doivent cesser. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.weforum.org/agenda/2018/07/fish-stocks-are-used-up-fisheries-subsidies-must-stop/>>.
- Steer, A., Waughray, D., Ellison, G. et McGregor, M., 2016. Le Grand découplage : notre empreinte économique humaine et les biens communs environnementaux mondiaux. [en ligne] *Iucn.org*. Disponible sur : <https://www.iucn.org/sites/dev/files/the_great_decoupling_10_10_16.pdf>.
- Actualités de l'ONU. 2019. Rapport des Nations Unies sur les émissions : Le monde en route vers plus Un pic de plus de 3 degrés, même si les engagements climatiques sont respectés. [en ligne] Disponible sur : <<https://news.un.org/en/story/2019/11/1052171>>.
- Borunda, A., 2020. La glace marine estivale arctique pourrait disparaître dès 2035. [en ligne] *National Geographic*. Disponible sur : <<https://www.nationalgeographic.com/science/2020/08/arctic-summer-sea-ice-could-be-gone-by-2035/>>.
- Steer, A., Waughray, D., Ellison, G. et McGregor, M., 2016. Le Grand découplage : notre empreinte économique humaine et les biens communs environnementaux mondiaux. [en ligne] *Iucn.org*. Disponible sur : <https://www.iucn.org/sites/dev/files/the_great_decoupling_10_10_16.pdf>.
- Le Gardien. 2015. La Terre a perdu un tiers de ses terres arables en 2015. Les 40 dernières années, disent les scientifiques. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.theguardian.com/environment/2015/dec/02/arable-land-soil-food-security-shortage#:~:text=4%20years%20old,Earth%20has%20perdu%20a%20troisième%20de%20arables,dernières%2040%20années%2C%20scientists%20sayandtext=New%20research%20has%20calculated%20cela,traite%20à%20remplace%20diminué%20sol.>>.
- Source : estimations Dassault Systèmes, 2020
- Idem.
- Source : Dassault Systèmes, étude Global Market Insight, 2019
- Source : Recherche Accenture et Dassault Systèmes basée sur des données commerciales, 2020
- PNUE, et Efficacité énergétique des bâtiments. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.euenergycentre.org/images/uneep%20info%20sheet%20-%20ee%20buildings.pdf>>.
- OCDE. 2018. L'utilisation des matières premières va doubler d'ici 2060 avec de graves Conséquences environnementales – OCDE. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.oecd.org/environment/raw-materials-use-to-double-by-2060-avec-des-conséquences-environnementales-graves.htm>>.
- PNUE, et Efficacité énergétique des bâtiments. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.euenergycentre.org/images/uneep%20info%20sheet%20-%20ee%20buildings.pdf>>.
- ONU, 2018. Les villes du monde en 2018. [en ligne] Disponible sur : <https://www.un.org/en/events/citiesday/assets/pdf/the_worlds_cities_in_2018_data_booklet.pdf>.
- Association des marques de consommation, 2020. Impact sur l'industrie. [en ligne] Disponible sur : <<https://consumerbrandsassociation.org/industry-impact/#:~:text=The%20jobs%20supported%20by%20the,in%20tous les%2010%20American%20jobs.andtext=The%20total%20travail%20revenu%20soutenu,de%20tous%20U.S.%20travail%20revenue.andtext=Le%20CPG%20industry's%20total%20les cotisations%20représentent%2010%25%20de%20le%20national%20PIB>>.
- Lacy, P., Long, J. et Spindler, W., 2020. L'économie circulaire Manuel : Réaliser l'avantage circulaire. Palgrave Macmillan.
- Centre scientifique de l'UE – Commission européenne, 2020. Politique de produits durables. [en ligne] Disponible sur : <<https://ec.europa.eu/jrc/en/research-topic/sustainable-product-policy>>.
- Agudelo, L., Mejía-Gutiérrez, R., Nadeau, J. et Pailhes, J., 2017. Analyse du cycle de vie dans les étapes de conception préliminaire. [en ligne] Disponible sur : <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01066385/document>>.
- Rodrigue, J. et Notteboom, T., 2020. Transports et développement économique. Dans : J. Rodrigue, éd., La géographie des systèmes de transport, 5e éd, New York : Routledge.
- Institut des ressources mondiales. 2019. Tout ce que vous devez savoir À propos de la source d'émissions mondiales à la croissance la plus rapide : les transports. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.wri.org/blog/2019/10/everything-you-need-know-about-fastest-growing-source-global-emissions-transport#:~:text=1,émissions%20de%20brûlure%20fossile%20carburants>>.
- Williams, E., Das, V. et Fisher, A., 2020. Évaluation des implications des véhicules autonomes sur la durabilité : recommandations pour la pratique communautaire de recherche. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/5/1902/pdf>>.
- DHL Trend Research, 2019. Jumeaux numériques dans la logistique. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.dhl.com/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/glo-core-digital-twins-in-logistics.pdf>>.
- Altran. 2020. Jumeaux numériques : créer des opérations numériques aujourd'hui pour Créer de la valeur commerciale demain. [en ligne] Disponible sur : <https://www.altran.com/as-content/uploads/sites/5/2019/09/digital-twin-pov-whitepaper_v7.pdf>.
- Électricité générale. 2016. Ce « jumeau numérique » d'une batterie de voiture pourrait livrer un nouveau véhicule hybride dans votre garage | Actualités GE. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.ge.com/news/reports/scientists-built-a-digital-twin-of-a-car-battery-to-make-it-last-longer>>.
- Etherington, D., 2019. Techcrunch fait désormais partie de Verizon Media. [en ligne] *Techcrunch.com*. Disponible sur : <<https://techcrunch.com/2019/07/10/waymo-has-now-driven-10-Billion-autonomous-miles-in-simulation/?guccounter=1>>.

27. Tata Consultancy Services, 2018. Jumeau numérique dans l'industrie automobile : favoriser la convergence physique-numérique. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.tcs.com/content/dam/tcs/pdf/Industries/fabrication/resume/industrie-4-0-et-digital-twin.pdf>>.
28. Pivot, 2020. Linchpin : Tendances qui transforment les sciences de la vie Perspectives de l'industrie en 2021. [en ligne] Disponible sur : <<https://linchpinseo.com/tendances-in-the-life-sciences-industry/>>.
29. Wall Street Journal, 2020. Suivi des investissements en capital-risque par secteur. [en ligne] Disponible sur : <<https://graphics.wsj.com/venture-capital-deals/>>.
30. Cushman et Wakefield, 2020. La vie de Cushman et Wakefield Sciences 2020 : L'avenir est là | États-Unis | Cushman et Wakefield. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.cushmanwakefield.com/fr/etats-unis/insights/life-science-report>>.
31. Neville, S., 2019. L'industrie pharmaceutique trouve ses marques dans la lutte contre le climat Changement. [en ligne] Financial Times. Disponible sur : <<https://www.ft.com/content/d672b65a-fe30-11e8-aebf-99e208d3e521>>.
32. Schmidt, A., Uhlenbrock, L. et Strube, J., 2020. Potentiel technique de réduction de l'énergie et du PRP dans l'industrie chimique et pharmaceutique en Allemagne et dans l'UE – axé sur la fabrication de produits biologiques et botaniques. *Processus*, 8(7), p.818.
33. Belkhir, L. et Elmeligi, A., 2019. Empreinte carbone de la planète l'industrie pharmaceutique et l'impact relatif de ses principaux acteurs. *Journal de production plus propre*, 214, pp.185-194.
34. Schmidt, A., Uhlenbrock, L. et Strube, J., 2020. Potentiel technique de réduction de l'énergie et du PRG dans l'industrie chimique et pharmaceutique en Allemagne et dans l'UE – axé sur la fabrication de produits biologiques et botaniques. *Processus*, 8(7), p.818.
35. Kopach, M., 2012. L'approche de la chimie verte pour la fabrication pharmaceutique. *Innovations in technologie pharmaceutique*. [en ligne] Disponible sur : <<http://www.iptonline.com/articles/public/ACSGreenChemistry.pdf>>.
36. Kopach, M., 2012. L'approche de la chimie verte pour la fabrication pharmaceutique. *Innovations in technologie pharmaceutique*. [en ligne] Disponible sur : <<http://www.iptonline.com/articles/public/ACSGreenChemistry.pdf>>.
37. Sanofi, 2020. Usine du futur. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.sanofi.com/en/about-us/our-stories/sanofi-takes-a-step-into-the-future-of-making-medicine>>.
38. Wadhvani, P. et Saha, P., 2020. Taille du marché de l'électronique grand public par produit (équipement audio et vidéo [personnel, professionnel], gros électroménager, petit électroménager, équipement photo numérique [personnel, professionnel]), par Application (personnelle, professionnelle), rapport d'analyse de l'industrie, perspectives régionales, potentiel de croissance, part de marché concurrentiel et prévisions, 2020-2026. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.gminsights.com/industry-analysis/marche-de-l-electronique-grand-public>>.
39. BanqueMyCell, 2020. Combien y a-t-il de smartphones dans le monde ?. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.bankmycell.com/blog/how-many-phones-are-in-the-world>>.
40. Bordage, F., 2019. L'empreinte environnementale du monde numérique. *GreenIT.fr*.
41. Forum économique mondial, 2019. Une nouvelle vision circulaire pour Il est temps pour l'électronique d'effectuer un redémarrage global. [en ligne] Disponible sur : <http://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf>.
42. Forum économique mondial, 2019. Les déchets électroniques mondiaux ont augmenté de 21 % en cinq ans, et le recyclage ne suit pas. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.weforum.org/agenda/2020/07/global-electronic-waste-recycling-management/>>.
43. Rocca, R., Rosa, P., Sassanelli, C., Fumagalli, L. et Terzi, S., 2020. Intégration de la réalité virtuelle et du jumeau numérique dans les pratiques d'économie circulaire : un cas d'application en laboratoire. *Durabilité*, 12(6), p.2286.
44. Wang, X. et Wang, L., 2018. Recyclage, valorisation et reconditionnement des DEEE basés sur des jumeaux numériques dans le contexte de l'Industrie 4.0. *Journal international de recherche en production*, 57(12), pages 3892-3902.
45. Ardente, F. et Mathieux, F., 2014. Recyclage des écrans électroniques : Analyse du prétraitement et améliorations potentielles de l'écoconception. *Ressources, conservation et recyclage*, 92, pp.158-171.
46. Wassink, J., 2018. Circularise utilise la technologie Blockchain pour tracer Matières premières. [en ligne] TU Delft. Disponible sur : <<https://www.tudelft.nl/en/delft-outlook/articles/circularise-uses-blockchain-technology-to-trace-raw-materials/>>.
47. Baptist, S. et Hepburn, C., 2013. Intrants intermédiaires et productivité économique. *Transactions philosophiques de la Royal Society A : Sciences mathématiques, physiques et techniques*, [en ligne] 371 (1986), p.20110565. Disponible sur : <<https://www.inetEconomics.org/uploads/papers/hepburn-cameron-berlin-paper.pdf>>.
48. ArcelorMittal, 2020. Recycler nos déchets. [en ligne] Disponible sur : <<https://corporate.arcelormittal.com/media/case-studies/recycling-our-waste>>.
49. Jaguar-Land Rover, 2020. Jaguar Land Rover recycle l'aluminium Réduire les émissions de carbone d'un quart. [en ligne] Disponible sur : <<https://media.jaguarlandrover.com/news/2020/08/jaguar-land-rover-upcycles-aluminium-cut-carbon-emissions-quarter>>.
50. Médias de solutions d'ingénierie de production, 2019. JLR va recycler l'aluminium des voitures existantes pour de nouvelles gammes de véhicules. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.pesmedia.com/jaguar-land-rover-aluminium-recycling-closed-loop-strategy/>>.
51. Sonter, L., Ali, S. et Watson, J., 2018. Exploitation minière et biodiversité : des enjeux et besoins de recherche en science de la conservation. *Actes de la Royal Society B : Biological Sciences*, 285 (1892), p.20181926.
52. AZGS, 2020. Quelle quantité d'eau est nécessaire pour extraire l'or ? [en ligne] Disponible sur : <<http://azgs.arizona.edu/ask-a-geologist/how-much-water-required-mining-gold>>.
53. Jaguar-Land Rover, 2020. Jaguar Land Rover recycle l'aluminium Réduire les émissions de carbone d'un quart. [en ligne] Disponible sur : <<https://media.jaguarlandrover.com/news/2020/08/jaguar-land-rover-upcycles-aluminium-cut-carbon-emissions-quarter>>.
54. Ortego, A., Valero, A., Valero, A. et Iglesias, M., 2018. Downcycling dans le processus de recyclage automobile : une évaluation thermodynamique. *Ressources, conservation et recyclage*, 136, pp.24-32.
55. Kalapos, N., 2020. Appel d'Euric pour le contenu en plastique recyclé dans les voitures. [en ligne] EuRIC. Disponible sur : <<https://www.euric-aisbl.eu/position-papers/item/351-euric-call-for-recycled-plastic-content-in-cars>>.
56. Elsayed, A., Roetger, T. et Bann, A., 2019. Meilleures pratiques et Normes en matière de fin de vie et de recyclage des avions. Dans : *Destination Green : Le prochain chapitre*. [en ligne] pp.279-284. Disponible sur : <[https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20\(1\).pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20(1).pdf)>.

57. ESA. 2020. Déclassement des actifs énergétiques. [en ligne] Disponible sur : <<https://business.esa.int/funding/invitation-to-tender/déclassement-des-actifs-énergétiques>>.
58. Elsayed, A., Roetger, T. et Bann, A., 2019. Meilleures pratiques et Normes en matière de fin de vie et de recyclage des avions. Dans : Destination Green : Le prochain chapitre. [en ligne] pp.279-284. Disponible sur : [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20\(1\).pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20(1).pdf)
59. ESA. 2020. Déclassement des actifs énergétiques. [en ligne] Disponible sur : <<https://business.esa.int/funding/invitation-to-tender/déclassement-des-actifs-énergétiques>>.
60. Ortego, A., Valero, A., Valero, A. et Iglesias, M., 2018. Downcycling dans le processus de recyclage automobile : une évaluation thermodynamique. Ressources, conservation et recyclage, 136, pp.24-32.
61. Au large. 2020. Bureau Veritas présente les avantages financiers du démantèlement des jumeaux numériques. [en ligne] Disponible sur : <https://www.offshore-mag.com/production/article/14174483/bureau-veritas-outlines-digital-twin-decommissioning-cost-benefits>>.
62. Accordant. 2018. ABI Research : Rôle des villes intelligentes pour le développement économique. [en ligne] Disponible sur : <https://www.chordant.io/white_papers/abi-research-role-of-smart-cities-for-enomic-development>.
63. Haider, I., 2020. Comment les villes intelligentes peuvent aider à construire un Monde | Internet des affaires. [en ligne] Internet des affaires. Disponible sur : <<https://internetofbusiness.com/how-smart-cities-can-build-a-sustainable-world/>>.
64. Accordant. 2018. ABI Research : Rôle des villes intelligentes pour le développement économique. [en ligne] Disponible sur : <https://www.chordant.io/white_papers/abi-research-role-of-smart-cities-for-enomic-development>.
65. Monde des villes intelligentes. 2020. L'essor des jumeaux numériques dans les villes intelligentes. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.smartcitiesworld.net/special-reports/special-reports/the-rise-of-digital-twins-in-smart-cities>>.
66. BIM aujourd'hui. 2019. La technologie des jumeaux numériques, fer de lance de l'énergie Efficacité. [en ligne] Disponible sur <<https://www.pbctoday.co.uk/news/bim-news/digital-twin-technology-energy/55587#:~:text=The%20numérique%20jumeau%20technologie%20objectifs,%20carburants%20fossiles%20dans%20une%20communauté>>.
67. Huawei Entreprise. 2020. Comment les jumeaux numériques permettent les villes intelligentes. [en ligne] Disponible sur : <<https://e.huawei.com/uk/eblog/industries/insights/2020/how-digital-twins-enable-intelligent-cities>>.
68. Smith, J., 2020. Unilever utilise des usines virtuelles pour optimiser ses Chaîne d'approvisionnement. [en ligne] WSJ. Disponible sur : <<https://www.wsj.com/articles/unilever-utilise-des-usines-virtuelles-pour-optimiser-sa-chaîne-d'approvisionnement-11563206402>>.
69. Le Forum économique mondial. 2019. Réseau mondial de phares : aperçus de l'avant-garde de la quatrième révolution industrielle. [en ligne] Disponible sur : <http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Lighthouse_Network.pdf>.
70. Dassault Systèmes. 2020. Planification agile de production parfaite, Gestion de la planification et de la chaîne d'approvisionnement, Maison et style de vie. [en ligne] Disponible sur : <https://ifwe.3ds.com/sites/default/fichiers/3DS_2020%20FLYER%20HL%20PERFECT%20PRODUCTION%20A4_WEB.pdf>.
71. Dassault Systèmes. 2020. Agilité de production : planifier la production dans un monde variable. [en ligne] Disponible sur : <<https://ifwe.3ds.com/consumer-packaged-goods-retail/production-agility>>.
72. Crozier, R., 2019. Unilever met en place huit jumeaux numériques d'usines de biens de consommation. [en ligne] ITnews. Disponible sur : <<https://www.itnews.com.au/news/unilever-sets-up-eight-digital-twins-of-consumer-goods-factories-528320>>.
73. Le Forum économique mondial. 2019. Réseau mondial de phares : aperçus de l'avant-garde de la quatrième révolution industrielle. [en ligne] Disponible sur : <http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Lighthouse_Network.pdf>.
74. Forum économique mondial. 2020. Comment l'industrie manufacturière peut prospérer dans un Monde numérique et mener une révolution durable. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.weforum.org/agenda/2020/01/factories-of-the-future-innovation-manufacturing>>.
75. Sommet Oracle Health Sciences et CNS, 2019. Marché 2019 Rapport de recherche : L'utilisation de composants virtuels dans les essais cliniques.
76. Laboratoire d'innovation LEO. 2020. Les essais cliniques virtuels créent du nouveau Possibilités pour les patients et l'industrie pharmaceutique — notamment en dermatologie — LEO Innovation Lab. [en ligne] Disponible sur : <<https://leoinnovationlab.com/2020/04/02/virtual-clinical-trials-create-new-possibilities-for-patients-pharma/>>.
77. Lucchini, C., 2018. L'industrie adopte les plateformes d'essais virtuels — Pharma World. [en ligne] Pharma World. Disponible sur : <<https://www.pharmaworldmagazine.com/industry-embraces-the-virtual-trial-platforms/>>.
78. Church, G., et In Silico Heaven. [en ligne] Thirona. Disponible sur : <<https://thirona.eu/in-silico-heaven/>>.
79. Académies nationales des sciences, E., Division, H., Politique, B., Forum sur la découverte de médicaments, D., Shore, C., Khandekar, E. et Alper, J., 2019. Essais cliniques virtuels. Washington, DC : Presse des académies nationales.
80. Lucchini, C., 2018. L'industrie adopte les plateformes d'essais virtuels — Pharma World. [en ligne] Pharma World. Disponible sur : <<https://www.pharmaworldmagazine.com/industry-embraces-the-virtual-trial-platforms/>>.
81. Hebenstreit, C., 2020. Message du Conseil : Comment la technologie contribue à accroître la diversité dans les essais cliniques. [en ligne] Forbes. Disponible sur : <<https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2020/06/18/comment-la-technologie-contribue-à-augmenter-la-diversité-dans-les-essais-cliniques/#70f5206dbf89>>.
82. Sustainable Trials Study Group., 2007. Vers des essais cliniques durables essais. BMJ, 334(7595), pages 671-673.
83. Les statistiques d'Eurostat expliquées. 2020. Statistiques sur les émissions de gaz à effet de serre — Empreintes carbone — Statistiques expliquées. [en ligne] Disponible sur : <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics_-_carbon_footprints#:~:text=Eurostat%20estimates%20the%20UE%2D27,en%20important%20des%20biens%20et%20services>.
84. Fondation Ellen MacArthur. 2012. En profondeur — Machines à laver. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/actualités/machines-à-laver-en-profondeur>>.
85. Brown, A., 2019. HP fait passer l'économie circulaire au niveau supérieur. [en ligne] Triple Pundit. Disponible sur : <<https://www.triplepundit.com/story/2019/hp-takes-circular-economy-next-level/84091>>.
86. Electrolux, 2019. Electrolux Sustainability Report 2019. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.electroluxgroup.com/en/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/electrolux-sustainability-report-2019-final.pdf>>.

87. Commission européenne. 2019. Les nouvelles mesures d'écoconception Expliqué. [en ligne] Disponible sur : <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/QANDA_19_5889>.
88. Apple. 2019. Rapport sur la responsabilité environnementale 2019. [en ligne] Disponible sur : <https://www.apple.com/environment/pdf/Apple_Rapport_responsabilité_environmentale_2019.pdf>.
89. Electrolux. 2019. Electrolux Sustainability Report 2019. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.electroluxgroup.com/en/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/electrolux-sustainability-report-2019-final.pdf>>.
90. Source : estimations Dassault Systèmes, 2020
91. Idem.
92. Statista. 2020. Croissance projetée de la superficie des bâtiments à l'échelle mondiale par région 2050 | Statista. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.statista.com/statistics/731858/projected-global-building-floor-area-growth-by-region/>>.
93. Administration américaine d'information sur l'énergie (EIA). 2020. Foire aux questions (Faq). [en ligne] Disponible sur : <<https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&ndt=11>>.
94. Agence européenne pour l'environnement. 2020. Intensité en CO2 de la production d'électricité. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/cc2-intensity-of-electricity-generation>>.
95. Takahashi, K. et Louhisuo, M., 2020. Liste IGES des émissions du réseau Facteurs. [en ligne] IGES. Disponible sur : <https://www.iges.or.jp/en/pub/list-grid-emission-factor/en?_ga=2.179693218.766814362.1601011394-1468244533.1601011394>.
96. Statista. 2020. Intensité des émissions de production d'électricité 2040. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.statista.com/statistics/1013834/emission-intensity-electricity-generation-globally/#statisticContainer>>.
97. Meinrenken, C., Chen, D., Esparza, R., Iyer, V., Paridis, S., Prasad, A. et Whillas, E., 2020. Émissions de carbone incorporées dans les chaînes de valeur des produits et rôle des Analyse du Cycle de Vie pour les juguler. Rapports scientifiques, 10(1).
98. Statista. 2020. Pourcentage des dépenses mondiales de R&D, par secteur 2018 | Statista. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.statista.com/statistiques/270233/pourcentage-des-dépenses-globales-par-industrie/>>.
99. Tarver, E., 2020. Quels ratios financiers sont les meilleurs à évaluer Biens de consommation emballés?. [en ligne] Investopedia. Disponible sur : <<https://www.investopedia.com/ask/answers/060515/what-are-some-important-financial-ratios-evaluate-respect-consumer-packaged-goods.asp>>.
100. Meinrenken, C., Chen, D., Esparza, R., Iyer, V., Paridis, S., Prasad, A. et Whillas, E., 2020. Émissions de carbone incorporées dans les chaînes de valeur des produits et rôle de l'analyse du cycle de vie pour les réduire. Rapports scientifiques, 10(1).
101. CDP. 2019. Les meilleurs produits de grande consommation en course pour suivre le rythme de Consommateurs – CDP. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.cdp.net/fr/articles/media/top-fmcgs-in-race-to-keep-up-with-conscient-consummateurs>>.
102. Kalra, N. et Paddock, S., 2016. Conduire en toute sécurité : combien de kilomètres de conduite faudrait-il pour démontrer la fiabilité d'un véhicule autonome ? Santa Monica, Californie : RAND Corporation.
103. Statista. 2018. Constructeurs automobiles sélectionnés dans le monde – Intensité R&D 2018. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.statista.com/statistics/574012/ratio-recherche-et-développement/ventes-des-constructeurs-automobiles/>>.
104. Herger, V., 2019. Rapport sur le désengagement 2019. [en ligne] Le dernier titulaire du permis de conduire... Disponible sur : <<https://thelastdriverlicenseholder.com/2020/02/26/disenagement-report-2019>>.
105. Wiggers, K., 2020. Les défis du développement de véhicules autonomes pendant une pandémie. [en ligne] VentureBeat. Disponible sur : <<https://venturebeat.com/2020/04/28/challenges-of-developing-autonomous-vehicles-during-coronavirus-covid-19-pandemic/>>.
106. Agence européenne pour l'environnement. 2017. Gamme de CO2 pendant le cycle de vie Émissions pour différents types de véhicules et de carburants. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2017/infographics/range-of-life-cycle-co2/view>>.
107. Szumska, E., Jurecki, R. et Pawelczyk, M., 2019. Évaluation des coûts totaux de possession des voitures particulières de taille moyenne équipées de transmissions conventionnelles et alternatives. Communications – Lettres scientifiques de l'Université de Zilina, 21(3), pp.21-27.
108. Castignani, L., 2019. Essais routiers ou simulation ? – Le milliard de milles Question pour le développement de la conduite autonome. Engineering Reality Magazine, [en ligne] (Volume IX), pp.83-87. Disponible sur : <<https://www.mscsoftware.com/sites/default/files/road-testing-or-simulation-the-Billion-mile-question-for-autonomous-driving-development.pdf>>.
109. Wiggers, K., 2020. Les défis du développement de véhicules autonomes pendant une pandémie. [en ligne] VentureBeat. Disponible sur : <<https://venturebeat.com/2020/04/28/challenges-of-developing-autonomous-vehicles-during-coronavirus-covid-19-pandemic/>>.
110. Statista. 2020. Voitures autonomes par taille du marché mondial 2030. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.statista.com/statistics/428692/taille-projetée-du-marché-mondial-des-véhicules-autonomes-par-type-de-véhicule/>>.
111. Partenariat pour les véhicules à faible émission de carbone et émissions du cycle de vie des voitures. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.lowcvp.org.uk/assets/documents/travail/MC-P-11-15a%20Lifecycle%20emissions%20rapport.pdf>>.
112. Rogers, L. et Jensen, K., 2019. Fabrication continue – la Promesse de la chimie verte ? Chimie verte, 21(13), pages 3481-3498.
113. BCG mondial. 2019. Maîtriser le COGS dans les médicaments génériques. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.bcg.com/publications/2019/prendre-en-main-les-ouages-des-médicaments-génériques>>.
114. Basu, P., Joglekar, G., Rai, S., Suresh, P. et Vernon, J., 2008. Analyse des coûts de fabrication dans les sociétés pharmaceutiques. Journal of l'innovation pharmaceutique, 3(1), pp.30-40.
115. Rogers, L. et Jensen, K., 2019. Fabrication continue – la Promesse de la chimie verte ?. Chimie verte, 21(13), pages 3481-3498.
116. Randall, I., 2019. Les grandes sociétés pharmaceutiques émettent 13 % d'émissions de carbone de plus que les constructeurs automobiles, préviennent les experts. [en ligne] Courrier en ligne. Disponible sur : <<https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-7081851/Big-Pharma-companies-create-13-carbon-emissions-making-medicine-CAR-MAKERS.html>>.
117. Forti, V., Baldé, C., Kuehr, R. et Bel, G., 2020. The Global E-Waste Monitor 2020. [en ligne] Disponible sur : <https://www.itu.int/en/UIT-D/Environnement/Documents/Toolbox/GEM_2020_def.pdf>.

118. Fondation Ellen MacArthur, 2013. Vers l'économie circulaire. [en ligne] Disponible sur : <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>.

119. Resmi, N. et Fasila, K., 2017. Gestion des déchets électroniques et Modèle de prévision de la remise à neuf (EMARP) pour les industries de la remise à neuf. Journal de gestion environnementale, 201, pp.303-308.

120. WRAP, 2013. La valeur de l'électronique grand public pour l'échange et la revente. [en ligne] Disponible sur : <https://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Valeur%20of%20consumer%20electronics_trade%20in%20_revente%2013%2008%2020.pdf>.

121. Forti, V., Bakté, C., Kuehr, R. et Bel, G., 2020. The Global E-Waste Monitor 2020. [en ligne] Disponible sur : <https://www.itu.int/en/UIT-D/Environnement/Documents/Toolbox/GEM_2020_def.pdf>; Estimations de la recherche Accenture, 2020

122. Clarke, C., Williams, I. et Turner, D., 2019. Évaluation du carbone empreinte écologique de la gestion des DEEE au Royaume-Uni. Ressources, conservation et recyclage, 141, pp.465-473.

je. Mettre en œuvre des solutions technologiques au niveau des systèmes pour améliorer l'efficacité énergétique urbaine, les transports et les services publics.

ii. L'analyse est basée sur une comparaison entre un statu quo (ce qui est susceptible de se produire de toute façon) et un scénario accéléré dans lequel nous avons augmenté les taux d'adoption de la technologie de 9 à 30 % d'ici 2030, en fonction de la géographie, du type de bâtiment et de l'âge ; la portée de l'analyse est mondiale, incluant les nouvelles constructions commerciales et résidentielles et le parc de bâtiments existants, en utilisant les moyennes actuelles de l'intensité énergétique opérationnelle des bâtiments comme référence ; production cumulée sur une période de 10 ans ; pour plus de détails sur l'analyse, veuillez consulter l'annexe.

iii. Données sur les impacts environnementaux associés à toutes les étapes du cycle de vie d'un produit et/ou des matières premières utilisées pour sa fabrication, son procédé ou son service.

iv. L'analyse est basée sur l'industrie mondiale des CPG et une comparaison entre un statu quo (ce qui est susceptible de se produire de toute façon) et un scénario accéléré dans lequel nous avons augmenté les taux de déploiement des cas d'utilisation jusqu'au niveau maximum réalisable d'ici 2030. Il n'existe pas encore d'études de cas accessibles au public, car il s'agit d'une solution unique combinant l'analyse d'impact sur la durabilité avec des outils de modélisation et de conception 3D dès les premiers jours de test. Pour plus de détails sur l'analyse, veuillez consulter l'annexe.

v. L'analyse est basée sur la quantification des contributions à la réduction des émissions résultant de la virtualisation du développement et des tests de véhicules de tourisme conventionnels (dans les limites définies par la réglementation locale) et de l'utilisation de la conduite simulée pour le développement de véhicules de tourisme autonomes, à l'échelle mondiale et jusqu'en 2030. Les économies de coûts et d'émissions liées à la simulation de conduite autonome ont été estimées en utilisant les véhicules électriques comme point de référence. L'impact commercial est d'une valeur significative et environ 60 % de celui-ci est un évitement de coûts attribué aux tests audiovisuels physiques. Pour plus de détails, veuillez consulter l'annexe.

vi. Les émissions de l'industrie pharmaceutique sont estimées à environ 52 Mt d'équivalent CO₂ à l'échelle mondiale pour les émissions de scope 1 et 2 (c'est-à-dire sans tenir compte des émissions indirectes de la chaîne de valeur, ce qui augmentera considérablement ce chiffre) ; en prenant une estimation du WRI des émissions mondiales de 2016 à 46,1 Gt, cela équivaut à 0,11 % des émissions mondiales d'équivalent CO₂.

vii. L'analyse est basée sur l'industrie pharmaceutique mondiale et sur une comparaison entre un scénario de statu quo (ce qui est susceptible de se produire de toute façon) et un scénario accéléré (dans lequel les niveaux d'adoption des cas d'utilisation d'ici 2030 pourraient être 20 % plus élevés que l'adoption du BAU). Même si les usines peuvent adopter partiellement des jumeaux de processus pour certaines opérations unitaires, l'estimation a été calculée pour des jumeaux virtuels de processus complets. Les structures de coûts des génériques et des produits pharmaceutiques de marque sont très différentes, et celles-ci ont été prises en compte lors de l'estimation des économies de coûts de matériaux et de production. Pour plus de détails, veuillez consulter l'annexe.

viii. Il est important de noter que de nombreux aspects des essais cliniques peuvent être virtualisés et qu'il n'existe pas de définition commune pour clarifier à quel moment un essai devient hybride ou virtuel. En outre, cette approche présente des limites évidentes, notamment un paysage réglementaire flou, l'intégration des données et des problèmes de sécurité.

ix. Le recyclage informel des déchets électriques et électroniques a été associé à l'exposition des travailleurs à des vapeurs toxiques de divers métaux lourds par inhalation et par contact avec la surface de la peau.

X. L'analyse repose sur une augmentation du traitement formel des DEEE à l'échelle mondiale, passant du niveau actuel de 17 % à 43 % d'ici 2030 (dernière estimation du traitement formel en Europe). Une autre amélioration réalisée grâce à l'adoption des fils numériques est que pour les DEEE formellement traités, le niveau de remise à neuf et de réutilisation peut augmenter considérablement en fournissant de meilleures informations sur la durée de vie et la composition matérielle du produit. Même si les catégories de déchets électroniques telles que les smartphones présentent des taux de récupération formelle, de remise à neuf et de génération de valeur élevés grâce à la réutilisation, nous avons supposé des valeurs conservatrices qui sont représentatives du stock global de déchets électroniques. Pour plus de détails sur l'analyse, veuillez consulter l'annexe.

XI. Pour les informations globales issues des entretiens, veuillez consulter l'annexe.

À propos de Dassault Systèmes

Dassault Systèmes, la société 3DEXPERIENCE, est un catalyseur du progrès humain. Nous fournissons aux entreprises et aux particuliers des environnements virtuels collaboratifs pour imaginer des innovations durables. En créant des « jumeaux d'expérience virtuelle » du monde réel avec notre plateforme et nos applications 3DEXPERIENCE, nos clients repoussent les limites de l'innovation, de l'apprentissage et de la production. Les 20 000 collaborateurs de Dassault Systèmes apportent de la valeur à plus de 270 000 clients de toutes tailles, dans tous les secteurs, dans plus de 140 pays. Pour plus d'informations, visitez www.3ds.com.

À propos d'Accenture

Accenture est une société mondiale de services professionnels dotée de capacités de pointe en matière de numérique, de cloud et de sécurité. Combinant une expérience inégalée et des compétences spécialisées dans plus de 40 secteurs, nous proposons des services de stratégie et de conseil, interactifs, technologiques et opérationnels, tous alimentés par le plus grand réseau au monde de centres de technologies avancées et d'opérations intelligentes. Nos 514 000 collaborateurs tiennent chaque jour les promesses de la technologie et de l'ingéniosité humaine, au service de clients dans plus de 120 pays. Nous embrassons le pouvoir du changement pour créer de la valeur et un succès partagé

pour nos clients, nos collaborateurs, nos actionnaires, nos partenaires et nos communautés. Visitez-nous sur www.accenture.com

Ce document fait référence descriptive aux marques commerciales qui peuvent appartenir à des tiers. L'utilisation de ces marques dans les présentes ne constitue pas une affirmation de propriété de ces marques par Accenture et n'est pas destinée à représenter ou impliquer l'existence d'une association entre Accenture et les propriétaires légitimes de ces marques.

Ce contenu est fourni à des fins d'information générale et n'est pas destiné à être utilisé à la place de la consultation de nos conseillers professionnels.