



ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE  
D'INFORMATIQUE POUR L'INDUSTRIE ET  
L'ENTREPRISE

IENU  
IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU NUMÉRIQUE  
RAPPORT

---

Impact environnemental des systèmes  
de production cyberphysiques

---

*Élèves :*

Alice CHRISTOLOMME  
Colin COËRCHON

*Encadrants :*

Anne-Laure LIGOZAT  
Mahdi MOEINI

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Contexte de l'étude</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Principe technique des CPPS</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>5</b>
4.1	Principe et objectif . . . . .	5
4.2	Analyse des données . . . . .	7
4.2.1	Analyse des données de production . . . . .	7
4.2.2	Analyse des données d'utilisation . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Études de cas</b>	<b>9</b>
5.1	Première étude : Surveillance de l'Énergie avec EnyFlow . . . . .	9
5.1.1	Objectif de l'outil . . . . .	9
5.1.2	Résultats et Impact Environnemental . . . . .	9
5.2	Seconde étude . . . . .	10
5.2.1	Objectif de l'étude . . . . .	10
5.2.2	Ce qui ressort de cette étude . . . . .	12
5.2.3	Conclusion et lien avec les CPPS . . . . .	13
<b>6</b>	<b>Analyse des résultats</b>	<b>14</b>
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>15</b>
<b>A</b>	<b>Annexe</b>	<b>16</b>

# 1 Introduction

Les **systèmes de production cyber-physiques (CPPS)** connaissent une utilisation croissante dans le secteur industriel. Ces systèmes coopèrent pour prendre des décisions à tous les niveaux des activités de production, leur permettant ainsi de répondre à des événements imprévus et d'évoluer au fil du temps. Parmi les exemples notables de CPPS, on trouve les chaînes de montage automatisées (comme visible en figure 1), les usines intelligentes intégrant des robots collaboratifs, et les systèmes de maintenance prédictive.

Notre objectif est de présenter une **méthodologie** pour évaluer les efforts informatiques nécessaires à **l'intégration des CPPS du point de vue environnemental**, tout en démontrant leur applicabilité et leurs avantages dans le monde industriel.

Notre travail s'inspire très largement d'une étude publiée dans *Procedia CIRP* en 2018 par Sebastian Thiede [10]. L'article de Thiede est particulièrement pertinent car il propose **une approche systématique pour évaluer l'impact environnemental des CPPS**, ce qui est crucial pour notre recherche qui vise à étudier ce phénomène.

Il est essentiel de noter que, bien que l'article de Thiede date de 2018, **l'évolution rapide de la technologie** et des normes environnementales justifie une mise à jour des données et des méthodologies utilisées. Cela permettrait de garantir que notre approche reste conforme aux exigences actuelles et aux avancées technologiques dans le domaine des CPPS.



FIGURE 1 – Chaîne de montage de bras de robot automatisé

## 2 Contexte de l'étude

Le contexte actuel du secteur manufacturier est fortement influencé par deux tendances majeures : la **durabilité** et la **numérisation**. Ces tendances ne sont pas seulement pertinentes pour la planification et le contrôle des usines du futur, mais elles redéfinissent également les fondements de la production industrielle à travers ce qu'on appelle la "4ème révolution industrielle" [12]. Cette période est marquée par l'avènement des **systèmes de production cyber-physiques** (CPPS), qui intègrent l'automatisation et les technologies de l'information pour optimiser les processus de fabrication [10].

- La **durabilité** dans le secteur manufacturier n'est plus une option mais une nécessité. Elle implique une prise en compte intégrée des objectifs environnementaux et sociaux, au-delà des perspectives purement économiques.
- D'autre part, la **numérisation**, grâce aux progrès technologiques et à la réduction des coûts informatiques, permet **d'améliorer les performances** et d'ouvrir de nouvelles opportunités pour les entreprises.

Toutefois, malgré ces avancées, l'adoption généralisée des CPPS dans la pratique industrielle rencontre encore des obstacles significatifs tels que les problèmes de sécurité, le manque de normes, ou encore le déficit de compétences nécessaires. De plus, il subsiste une incertitude quant à **l'équilibre entre les efforts nécessaires et les avantages potentiels des CPPS**, notamment du point de vue environnemental. Il est donc crucial de questionner si l'intégration poussée de ces technologies est réellement rentable, tant économiquement qu'écologiquement.

En bref, cette étude vise donc à explorer **la faisabilité environnementale des CPPS** dans l'industrie manufacturière.

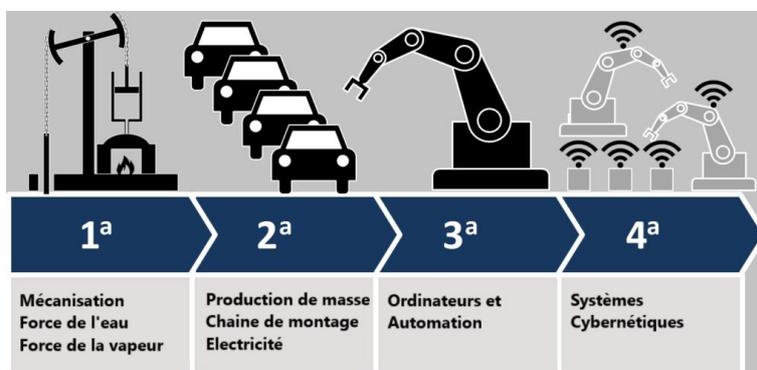


FIGURE 2 – Exemple de l'importance des CPPS dans l'industrie actuelle [12]

### 3 Principe technique des CPPS

Les CPPS sont des **systèmes de système cyber-physique** (CPS), qui sont eux mêmes des systèmes où des éléments informatiques collaborent pour le contrôle et la commande d'entités physiques. Dans les CPS, les composants physiques et logiciels sont étroitement entrelacés, capables de fonctionner sur différentes échelles spatiales et temporelles, présentant de multiples modalités comportementales distinctes, et interagissant entre eux de manière qui évolue selon le contexte [13].

Le schéma présenté en figure 3 permet d'appréhender le fonctionnement des CPPS.

- La **partie physique**, à gauche du schéma, englobe l'équipement physique réel (machines de production, services techniques du bâtiment, etc) avec sa configuration spécifique et ses paramètres de contrôle. Elle est influencée par une diversité de facteurs internes et externes, et il existe également diverses variables mesurables décrivant l'état de l'entité physique considérée.
- Dans la partie qui **acquiert les données**, à droite du schéma, les facteurs de la partie physique peuvent être traités et stockés.
- Dans la **partie cyber**, ces données sont analysées afin d'en faire une synthèse qui soit lue par un humain ou directement traitée par la machine, afin d'en faire un système complètement automatique.

Dans tous les cas, la présence humaine reste essentielle à chaque étape pour surveiller l'état du CPPS et fournir un éventuel support si nécessaire.

Ainsi, Les fonctionnalités clés mises en avant par cette architecture sont :

- **Auto-détection** : ils captent en continu, exploitent et partagent des informations de et vers l'environnement.
- **Auto-décideurs** : Ils peuvent prendre des décisions basées sur les données en temps réel sur l'état du système.
- **Auto-adaptation** : La réactivité face aux événements imprévus est améliorée grâce à une transmission plus rapide de l'information à travers l'ensemble du système.

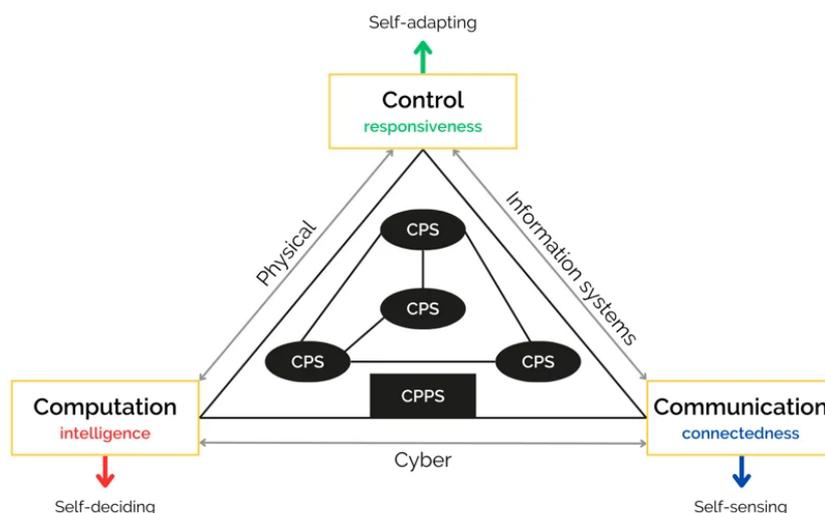


Fig. 1. Basic capabilities of CPPS as interaction CPSs, adapted from [2]

FIGURE 3 – Schéma de fonctionnement général d'un CPPS [9]

## 4 Méthodologie

La méthodologie que nous allons présenter est tirée d'une étude publiée dans *Procedia CIRP* [10]. Le sujet des CPPS étant nouveau, peu d'autres études existent, et la méthodologie présentée est similaire. On peut néanmoins citer une étude plus récente publiée par *Cambridge Centre for Computational Chemical Engineering* [4] qui a également appliqué cette méthodologie.

### 4.1 Principe et objectif

Ainsi présentés, les CCPS exigent de **nombreux composants techniques**. La méthodologie suivie permet d'étudier les **cycles de vie** des CPPS afin d'évaluer leur impact environnemental.

**L'analyse du cycle de vie (ACV)** est une méthode d'évaluation normalisée (ISO 14040 [5] et 14044 [6]) permettant de réaliser un **bilan environnemental** multi-critère et multi-étape d'un système (produit, service, entreprise ou procédé) sur l'ensemble de son cycle de vie. Son but est de connaître et pouvoir comparer les **impacts environnementaux d'un système tout au long de son cycle de vie**, de l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication à son traitement en fin de vie (mise en décharge, recyclage...), en passant par ses phases d'usage, d'entretien et de transport [11]. Son fonctionnement a été schématisé dans la figure 4.

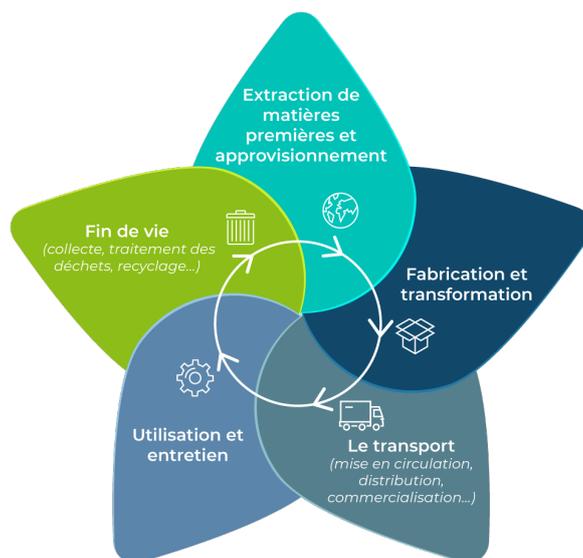


FIGURE 4 – Schéma du fonctionnement d'une "Analyse Cycle de Vie" (ACV) d'un produit

On va mesurer ici l'impact environnemental en mesurant uniquement le **potentiel de réchauffement global (GWP)**, bien que d'autres mesures existent (utilisation des terres, épuisement des ressources...).

La Figure 5 illustre la conception générale et la compréhension de la méthodologie que nous présentons.

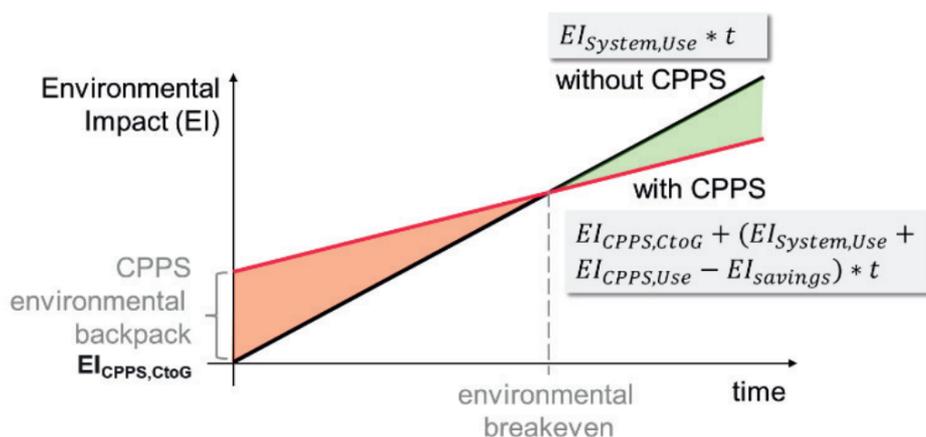


FIGURE 5 – Perspective du cycle de vie sur les CPPS [10]

Un système de production **sans CPPS** demande une certaine quantité d'énergie et de ressources ( $EI_{System,Use}$ ), ce qui entraîne un **impact environnemental croissant** au cours de la phase d'utilisation [10].

L'introduction des **CPPS** entraîne plusieurs effets dans le système considéré. L'ajout de composants techniques augmente l'impact à travers les **matériaux impliqués et leur**

**production** (cradle to gate<sup>1</sup>,  $EI_{\text{CPPS,CtoG}}$ ) (par exemple, les matériaux et la demande énergétique pour la production d'un serveur). De plus, ces composants entraînent généralement un **impact environnemental supplémentaire au cours de leur phase d'utilisation** ( $EI_{\text{CPPS,Use}}$ ) (par exemple, grâce à la demande énergétique du serveur).

Le **point de rupture** représente le moment où les avantages environnementaux commencent à compenser les coûts environnementaux associés à une action ou à une technologie [3]. Concrètement, cela signifie que les **améliorations environnementales réalisées grâce aux CPPS** ( $EI_{\text{Savings}}$ ), telles que l'optimisation de la consommation d'énergie ou la réduction des déchets, doivent **surpasser l'impact environnemental** initial causé par l'introduction de nouveaux composants techniques et leur utilisation dans le système de production. Une fois ce point de rupture atteint, l'adoption des CPPS devient **bénéfique d'un point de vue environnemental**.

Ainsi, l'**impact environnemental total** ( $EI_{\text{total}}$ ) du système de production considéré est calculé avec la formule suivante (tirée de l'article [10]), avec  $t$  le temps :

$$EI_{\text{total}} = EI_{\text{CPPS,CtoG}} + (EI_{\text{System,Use}} + EI_{\text{CPPS,Use}} - EI_{\text{Savings}}) \times t \quad (1)$$

## 4.2 Analyse des données

### 4.2.1 Analyse des données de production

L'examen des **données de production des CPPS** est importante, car la production constitue le point de départ de l'impact total des CPPS, comme illustré dans la figure 5. À travers leurs différents sous-systèmes, les CPPS peuvent exiger une diversité de **composants informatiques** tels que des ordinateurs/serveurs avec leurs périphériques (par exemple, clavier, souris), des équipements réseau (par exemple, passerelles/hubs, câbles), des capteurs supplémentaires, des batteries et des dispositifs pour l'interaction utilisateur comme des écrans LCD, des tablettes PC ou des dispositifs de réalité virtuelle/augmentée.

Le tableau suivant décrit l'impact environnemental du à la production de différents composants. Il est important de noter les données spécifiques aux CPPS sont rarement disponibles. Il faut donc se baser sur des exemples similaires et les adapter. De plus les données disponibles sont souvent assez ambiguës : les études peuvent présenter des différences significatives dans leurs résultats en fonction des composants spécifiques pris en compte et des paramètres d'analyse. Les valeurs comparables au cas spécifique doivent être prises en compte et leur sensibilité à l'impact environnemental total doit également être analysée pour améliorer les résultats de l'évaluation des CPPS.

1. Littéralement "du berceau à la porte", sous entendu la porte de l'usine.

TABLE 1 – Valeurs d’impact environnemental des composants

Composant	Valeur [en kg CO <sub>2</sub> eq]	Référence
Ordinateur fixe	940	1 pc. [7]
Ecran	297	1 pc. [8]
Switch réseau	26,35	1 pc. [8]
Serveur de données	960	1 pc. [1]
AA Battery (Li-ion)	0,124	1 pc. [10]
AA Battery (NiMH)	0,639	1 pc. [10]
Câble	0,0378	1 mètre (diamètre 1 mm <sup>3</sup> ) [10]

#### 4.2.2 Analyse des données d’utilisation

Pour l’impact environnemental des CPPS pendant la **phase d’utilisation**, on considère uniquement la **demande énergétique** de tous les composants actifs<sup>2</sup>. Les remplacements nécessaires des composants des CPPS peuvent également être un facteur à prendre en compte.

Pendant le fonctionnement des CPPS, différents composants ont besoin de plus ou moins d’énergie. Les **ordinateurs et les serveurs de données** sont les composants qui consomment le plus : par exemple en 2020, les centres de données publics en France ont émis 330.18 tCO<sub>2</sub>eq<sup>3</sup>. De nombreuses données sur la consommation des appareils électronique sont répertoriées dans l’étude *Evaluation de l’impact environnemental du numérique en France et analyse prospective* de l’Ademe [1].

La demande énergétique individuelle dépend de la configuration du système (par exemple, le nombre et le type de processeurs et d’autres composants), mais également fortement de son utilisation de la capacité installée. Cela affecte les aspects dynamiques dépendant du temps des CPPS et l’impact environnemental respectif.

En raison de la **diversité des domaines d’application**, un calcul individuel de l’amélioration environnementale induite par le CPPS ou du potentiel d’économie est nécessaire. Il est important de mentionner que cela ne se limite bien sûr pas à l’énergie en tant que champ d’action (sous différentes formes telles que l’électricité, l’air comprimé, la chaleur), mais peut également affecter par exemple les matériaux (par exemple, réduction des pertes de matériaux grâce à un meilleur contrôle des processus) ou les émissions directes (par exemple, évitement ou réutilisation des émissions de chaleur). Cependant, tous ces impacts doivent être à nouveau convertis en GWP ; dans ce cas, des facteurs de conversion individuels pour la forme d’énergie ou de matériau respective sont nécessaires.

2. L’étude des autres échanges d’énergie comme les pertes de chaleur ou les matériaux auxiliaires n’est pas pertinente dans ce contexte

3. Calcul effectué à partir de données de l’Ademe ([1] page 66).

## 5 Études de cas

### 5.1 Première étude : Surveillance de l'Énergie avec EnyFlow

Dans le cadre de l'intégration des systèmes de production cyber-physiques (CPPS) dans l'industrie manufacturière, notre première étude de cas concerne l'utilisation d'**EnyFlow** [10], un outil de surveillance énergétique à faible coût, adapté aux besoins des petites et moyennes entreprises (PME).

EnyFlow permet de surveiller en continu la consommation énergétique des machines, en collectant des données à haute résolution (chaque seconde) et en les stockant dans une base de données centrale. Ces données sont ensuite affichées via une application spécifique sur iPad (figure 6).



FIGURE 6 – Visualisation imagée des informations par EnyFlow

#### 5.1.1 Objectif de l'outil

L'objectif principal de l'utilisation d'EnyFlow est d'obtenir une **transparence énergétique** une étape cruciale pour la gestion efficace de l'énergie. Toutefois, la visualisation des flux énergétiques seuls ne conduit pas automatiquement à des économies d'énergie. Il est donc essentiel d'identifier la quantité d'énergie qui doit être économisée annuellement grâce aux mesures effectuées pour parvenir à **un scénario environnementalement viable**.

#### 5.1.2 Résultats et Impact Environnemental

Dans l'article de Thiede [10], les composants additionnels du CPPS ont été modélisés et leur impact environnemental a été évalué sur une période de trois ans.

Ce qui est important à comprendre, c'est que l'impact environnemental additionnel des composants CPPS est relativement faible par rapport à celui du système de production physique. Et comme le montre le graphique de la figure 7, l'outil EnyFlow sans

améliorations induites, **augmenterait l'impact environnemental de 7,7%**. Ce qui n'est vraiment pas une bonne nouvelle pour une utilisation bénéfique des CPPS...

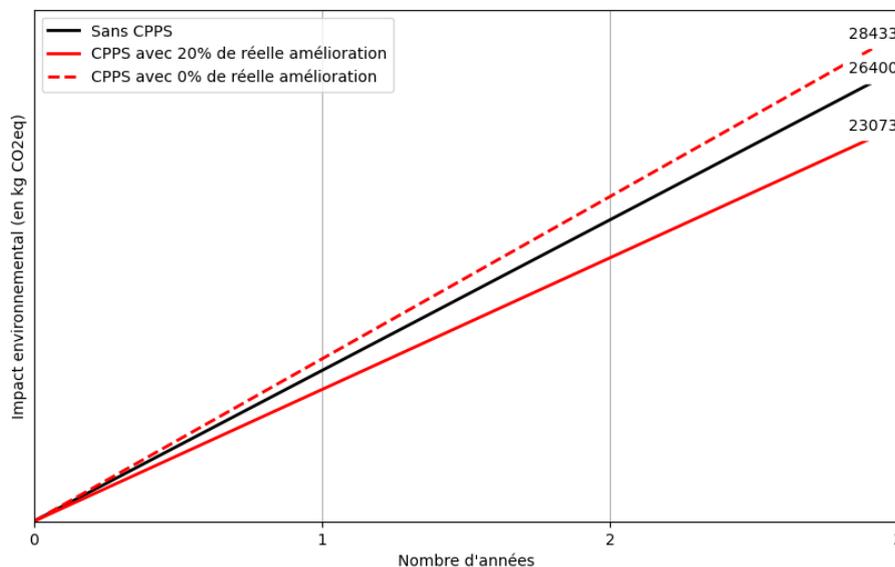


FIGURE 7 – Impact environnemental des CPPS dans cette étude de cas (graphique créé à partir des données de l'étude de Thiede [10])

Cependant, on remarque dans la figure 7, qu'une amélioration de 20% grâce au CPPS dans les économies d'énergie entraînerait une amélioration globale de 12,6% de l'impact environnemental total ( $EI_{total}$ ) et conduirait à **un point d'équilibre environnemental** en moins d'un an.

Cette analyse démontre donc clairement l'intérêt écologique des systèmes de production cyber-physiques (CPPS), à condition qu'ils soient optimisés de manière stratégique et réfléchie.

## 5.2 Seconde étude

### 5.2.1 Objectif de l'étude

Pour cette seconde étude de cas, nous nous sommes appuyés sur une étude de cas spécifique de **maison intelligente** réalisée par le *CEUR Workshop Proceedings* [2]. L'objectif étant d'illustrer le potentiel de considérer l'analyse du cycle de vie des appareils physiques et des données pour mettre en place un CPS.

L'étude se base ainsi sur la maison intelligente *Amiqual4Home* (A4H), une plateforme expérimentale qui comprend un appartement équipé de capteurs variés pour surveiller les activités quotidiennes des occupants. Le but de cette étude est de montrer comment les

choix de conception du système peuvent influencer **son empreinte environnementale totale**, détaillés aux pages 4 à 6.

De plus, il est nécessaire de rajouter un peu de contexte : les systèmes cyber-physiques (CPS) sont de plus en plus intégrés aux infrastructures critiques dans divers contextes tels que la gestion de la chaîne d'approvisionnement, les villes intelligentes et les automobiles. Selon le rapport Cisco de 2020, il est prévu que **les connexions M2M atteignent près de 15 milliards d'appareils en 2023**, représentant presque la moitié des connexions M2M globales, soit environ 1.8 connexions M2M pour chaque personne dans le monde. C'est tout simplement énorme.

Pour donner un peu de concret, on peut citer quelques exemples de M2M dans les maisons intelligentes comme *Amiqual4Home* :

- **Assistant vocal intelligent** : Les dispositifs comme Google Home utilisent des connexions M2M pour recevoir des commandes vocales, traiter ces commandes dans le cloud, et interagir avec d'autres appareils domestiques connectés pour jouer de la musique, régler l'éclairage, répondre à des questions, etc... (figure
- **Véhicules connectés** : Les voitures équipées de fonctionnalités intelligentes peuvent se connecter au réseau domestique pour offrir des commandes à distance telles que le préchauffage du véhicule, le contrôle de charge pour les voitures électriques, et l'envoi d'alertes de maintenance.
- **Systèmes de gestion de l'énergie** : Les thermostats intelligents et autres appareils de gestion de l'énergie, comme ceux de Nest ou Honeywell, utilisent des connexions M2M pour ajuster automatiquement le chauffage et la climatisation en fonction des habitudes de vie des résidents et des conditions météorologiques actuelles.
- **Surveillance de sécurité** : Les systèmes de sécurité domestique comme les caméras de surveillance, les détecteurs de mouvement et les alarmes communiquent entre eux et avec le centre de contrôle via M2M pour alerter les propriétaires et les services d'urgence en cas d'activité suspecte.



FIGURE 8 – Représentation d'un d'assistant vocal intelligent



FIGURE 9 – Représentation d'un système complet de surveillance de sécurité

Bref, ces infrastructures complexes gèrent et exploitent une quantité massive de données, soit localement soit sur le cloud, ce qui contribue également aux émissions environnementales. Malgré les avantages et le confort apportés par les CPS, leur impact environnemental, comme l'empreinte carbone, l'épuisement des ressources abiotiques et la consommation d'eau, est souvent négligé.

### 5.2.2 Ce qui ressort de cette étude

L'étude met en évidence plusieurs points clés :

1. **Importance des décisions de conception** : Les choix initiaux de conception, comme le type et la quantité de capteurs à installer, ont un impact direct sur l'efficacité énergétique et les performances environnementales du système dans son ensemble ([2] page 5).

↔ **Implication pratique** : Les concepteurs doivent évaluer les besoins réels de surveillance ou d'automatisation pour **éviter une surinstallation qui pourrait conduire à une consommation énergétique inutile** et un gaspillage de ressources matérielles. Par exemple, choisir des capteurs à faible consommation énergétique ou opter pour moins de capteurs mais plus précis peut réduire l'empreinte carbone du système.

2. **Analyse de l'impact environnemental** : Une analyse approfondie de l'impact environnemental devrait accompagner la conception des systèmes CPS dès les premières étapes, incluant la modélisation de l'impact de ces systèmes sur l'environnement en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>, de consommation d'eau et d'utilisation des sols ([2] pages 3-6).

↔ **Implication pratique** : Utiliser des outils d'évaluation du cycle de vie (ACV) (figure 4) permet aux concepteurs de prendre des décisions informées qui équilibrent

fonctionnalité et durabilité. Par exemple, il est possible de choisir **des matériaux recyclés** ou en optimisant les algorithmes pour une consommation énergétique moindre.

3. **Cycle de vie des dispositifs** : Le cycle de vie complet des dispositifs intégrés dans les CPS, de la fabrication à la fin de vie, doit être pris en compte. Cela inclut l'extraction des matières premières, la fabrication, la distribution, l'utilisation et le recyclage ou la disposition finale ([2] page 6).

↔ **Implication pratique** : La sélection de dispositifs conçus pour une plus longue durabilité et une meilleure recyclabilité peut contribuer à réduire l'impact global. Les concepteurs peuvent également envisager des programmes de reprise ou de recyclage pour les dispositifs en fin de vie afin de minimiser les déchets électroniques.

### 5.2.3 Conclusion et lien avec les CPPS

En conclusion, **il est possible de réduire drastiquement l'impact environnemental des CPS dans une maison intelligente.**

En effet, en intégrant ces 3 principes dès le début du processus de conception, il est possible de développer des maisons intelligentes qui ne se contentent pas d'être fonctionnelles et confortables, mais qui sont également conçues avec une conscience et une responsabilité environnementales. Cette approche proactive assure que les avantages des technologies intelligentes sont pleinement exploités tout en minimisant leur empreinte écologique, favorisant ainsi **un avenir plus durable.**

De plus, après avoir mené une étude sur l'utilisation des CPS dans une maison intelligente, il est essentiel de se rendre compte que **l'intégration des CPPS** (Cyber-Physical Production Systems) **peut multiplier significativement les impacts environnementaux et sociaux observés** (cf. figure 3).

Dans ce contexte, il est **primordial** de mettre en œuvre des stratégies visant à réduire cet impact. Les CPPS, en intégrant de manière plus poussée l'automatisation et l'interconnectivité dans les processus de production et de gestion domestique, présentent un potentiel immense pour améliorer l'efficacité et la personnalisation des services.

Cependant, leur déploiement doit être accompagné d'une évaluation rigoureuse de leur cycle de vie et d'une conception écologiquement responsable pour véritablement bénéficier des avancées technologiques tout en minimisant leur empreinte écologique. L'adoption consciente et réfléchie des CPPS est donc cruciale pour favoriser un développement durable et respectueux de l'environnement dans l'ère du numérique.

## 6 Analyse des résultats

Les études de cas ont souligné que l'impact environnemental des systèmes de production cyber-physiques en entreprise est dominé par quelques composants, généralement des **ordinateurs de bureau/serveurs de base de données et des écrans connectés**. Ils dominent également l'impact lié à l'utilisation. En particulier, pour ces composants, le temps d'utilisation est un levier important - notamment les applications de surveillance et de contrôle peuvent fonctionner en continu (24/7), ce qui dépasse généralement le temps d'utilisation du système de production physique lui-même. Dans l'ensemble, **le dimensionnement et le contrôle minutieux de ces composants peuvent être considérés comme l'un des facteurs clés de la faisabilité environnementale des systèmes de production cyber-physiques**.

Les prévisions sont très spécifiques à chaque cas et peuvent être difficiles, surtout dans la phase de planification d'un CPPS. Par exemple, dans le cas de la demande énergétique des machines de production, un CPPS pourrait s'attaquer à certaines parts de cette demande, **en réduisant les périodes d'inactivité** (par exemple grâce à une mise hors tension intelligente) **ou la demande énergétique liée aux processus** (par exemple grâce à un contrôle alternatif des processus). Ainsi, le potentiel est significativement plus faible par rapport à la prise en compte de la demande énergétique totale de la machine.

Des diagrammes de faisabilité comme celui visible en figure 10 peuvent être utilisés. Il montre les zones favorables et non favorables pour les CPPS en fonction du potentiel absolu (en kWh) qui est adressé combiné avec l'impact d'amélioration relative nécessaire sur une période de temps définie (ici : 3 ans). Les isoplèthes marquent la ligne de seuil de rentabilité. Ainsi, pour une situation de production donnée (avec son potentiel considéré), les améliorations relatives nécessaires pour atteindre un **seuil de rentabilité** dans un délai donné peuvent être déduites. Pour l'exemple présenté dans l'étude de cas "Surveillance de l'Énergie avec EnyFlow" (cf. section 5.1) **environ 11 % sont nécessaires**.

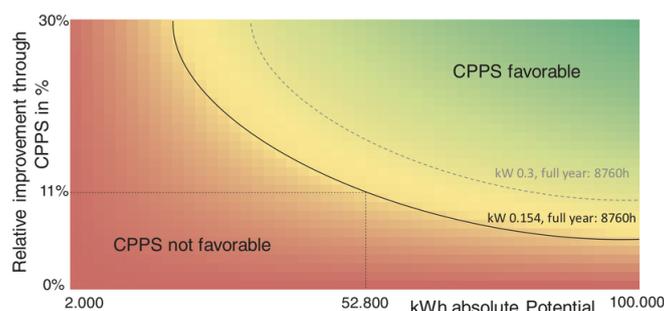


FIGURE 10 – Diagramme de la faisabilité environnementale des CPPS sur l'étude "Surveillance de l'Énergie avec EnyFlow" sur 3 ans [4]

## 7 Conclusion

La faisabilité des systèmes de production cyber-physiques est donc très spécifique à chaque cas et dépend de la configuration, des modes de fonctionnement et des circonstances générales. Dans ce contexte, le cadre et la méthodologie fournis doivent offrir une procédure systématique et permettre la transférabilité à d'autres cas.

Cependant, une diversité de points de discussion émerge du côté technique et méthodologique, qui doivent être pris en compte dans l'application et les travaux de recherche ultérieurs :

- **La scalabilité** : les configurations de CPPS peuvent être utilisées pour des applications plus grandes et plus complexes. Ainsi, la faisabilité augmente puisque le potentiel d'amélioration augmente avec des efforts comparables similaires. Il n'y a pas de relation linéaire claire entre les efforts et les avantages.
- **Linéarité des efforts et des améliorations** : l'équation présentée (1) reste valable en général, mais elle devrait être détaillée en termes de résolution temporelle, de séparation des différents composants et d'intégration de fonctions mathématiques temporelles plus complexes.
- **Simplifications** : plusieurs simplifications ont été faites, par exemple, tous les composants n'ont pas été considérés en détail. L'ACV a également été simplifiée à cause de résultats trop récents. En raison du manque de données exactes et spécifiques, les valeurs sont basées sur une analyse de la littérature/des bases de données et les composants ont été modélisés de manière simplifiée.
- **Perspective économique** : l'aspect économique a été délibérément omis ici. Bien sûr, il est extrêmement pertinent pour la pratique industrielle et peut sembler assez différent par rapport à l'évaluation environnementale.

Ce rapport offre toutefois une introduction approfondie à l'étude environnementale des CPPS, posant ainsi les bases pour une exploration plus poussée de ce domaine.

## A Annexe

### Liste des tableaux

1	Valeurs d'impact environnemental des composants . . . . .	8
---	---	---

### Table des figures

1	Chaîne de montage de bras de robot automatisé . . . . .	2
2	Exemple de l'importance des CPPS dans l'industrie actuelle [12] . . . . .	3
3	Schéma de fonctionnement général d'un CPPS [9] . . . . .	5
4	Schéma du fonctionnement d'une "Analyse Cycle de Vie" (ACV) d'un produit	6
5	Perspective du cycle de vie sur les CPPS [10] . . . . .	6
6	Visualisation imagée des informations par EnvyFlow . . . . .	9
7	Impact environnemental des CPPS dans cette étude de cas (graphique créé à partir des données de l'étude de Thiede [10]) . . . . .	10
8	Représentation d'un d'assistant vocal intelligent . . . . .	12
9	Représentation d'un système complet de surveillance de sécurité . . . . .	12
10	Diagramme de la faisabilité environnementale des CPPS sur l'étude "Sur- veillance de l'Énergie avec EnvyFlow" sur 3 ans [4] . . . . .	14

## Références

- [1] ADEME. « Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective ». In : *Analyse prospective à 2030 et 2050 Rapport 3/3* (2023), p. 32-69. URL : <https://bibliothèque.ademe.fr/consommer-autrement/5226-evaluation-de-l-impact-environnemental-du-numerique-en-france-et-analyse-prospective.html>.
- [2] Mario Cortès CORNAX, Paula LAGO et Claudia RONCANCIO. « Cyber Physical Systems and Environmental Issues : a Smart Home Case Study ». In : *CEUR Workshop Proceedings*. T. 3144. CEUR. 2022, p. 1-6.
- [3] GREENPEACE. « Climat : vers le point de rupture ? » In : (2009), p. 9-11. URL : <https://cdn.greenpeace.fr/site/uploads/2017/02/climat-vers-le-point-de-rupt.pdf>.
- [4] Oliver Inderwildi et al. « The Impact of Intelligent Cyber-Physical Systems on the Decarbonization of Energy ». In : *Cambridge Centre for Computational Chemical Engineering* (2020), p. 17-42. URL : [https://www.researchgate.net/publication/339283625\\_The\\_impact\\_of\\_intelligent\\_cyber-physical\\_systems\\_on\\_the\\_decarbonization\\_of\\_energy#pf22](https://www.researchgate.net/publication/339283625_The_impact_of_intelligent_cyber-physical_systems_on_the_decarbonization_of_energy#pf22).
- [5] ISO. *ISO 14040 :2006*. 2022. URL : <https://www.iso.org/fr/standard/37456.html>.
- [6] ISO. *ISO 14044 :2006*. 2022. URL : <https://www.iso.org/fr/standard/38498.html>.
- [7] Green IT. *24 fois plus de CO2 lors de la fabrication d'un ordinateur que lors de son utilisation*. 2010. URL : <https://www.greenit.fr/2010/02/26/24-fois-plus-de-co2-lors-de-la-fabrication-d-un-ordinateur-que-lors-de-son-utilisation/>.
- [8] Anders S.G. Andrae et OTTO ANDERSEN. « Life cycle assessment of consumer electronics - are they consistent ? » In : (2010), p. 1-9. URL : [https://www.researchgate.net/publication/265297694\\_Life\\_cycle\\_assessment\\_of\\_consumer\\_electronics\\_-\\_are\\_they\\_consistent](https://www.researchgate.net/publication/265297694_Life_cycle_assessment_of_consumer_electronics_-_are_they_consistent).
- [9] Nicola La PALOMBARA. *The Cyber-Physical Production Systems*. 2023. URL : <https://www.planisense.com/en/blog/cyber-physical-production-systems>.
- [10] Sebastian THIEDE. « Environmental sustainability of cyber physical production systems ». In : *Procedia CIRP* 69 (2018), p. 644-649.

- [11] WIKIPÉDIA. *Analyse du cycle de vie*. 2024. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse\\_du\\_cycle\\_de\\_vie](https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_du_cycle_de_vie).
- [12] WIKIPÉDIA. *Industrie 4.0*. 2024. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Industrie\\_4.0](https://fr.wikipedia.org/wiki/Industrie_4.0).
- [13] WIKIPÉDIA. *Système cyber-physique*. 2024. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me\\_cyber-physique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_cyber-physique).