

Industrie 4.0 | **GSO 3105**

# Outils et technologies de l'industrie 4.0

Faculté des Sciences de l'Administration  
*Session d'automne 2020*

Professeurs titulaires

Adnene Hajji

[adnene.hajji@fsa.ulaval.ca](mailto:adnene.hajji@fsa.ulaval.ca)

Monia Rekik

[monia.rekik@fsa.ulaval.ca](mailto:monia.rekik@fsa.ulaval.ca)

Séance 2

# Objectifs du chapitre

Au sein de ce cours centré sur la **gestion des opérations manufacturières et de logistique au sein des nouvelles industries**, vous serez amenés à réfléchir à **l'exploitation des opportunités offertes par les nouvelles technologies et méthodologies** qui les caractérisent ainsi qu'aux risques et nouveaux défis propres à ce domaine.

Pour cela, ce chapitre a pour but de **vous familiariser avec ces technologies et méthodologies** propres à l'industrie 4.0, en abordant brièvement les aspects technologiques qui y sont liés (*informatique, réseau, robotique, etc.*) pour vous offrir **une vision globale de leurs interactions et intégrations** au sein des nouveaux systèmes manufacturiers.

Ce cours est construit principalement autour de l'article en accès ouvert suivant (*d'autres références complémentaires sont disponibles en fin de document*) :

Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(3), 899-919.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098618317750>

# Plan

## I. Introduction

- I.1. Rappels et liens avec l'industrie 4.0
- I.2. Le modèle RAMI 4.0

## II. Architectures, technologies et méthodologies

- II.1. Ressources connectées et intelligentes (IIoT)
- II.2. Architectures Cloud
- II.3. Gestion des données et Big Data
- II.4. Usage de la simulation dans la prise de décision
- II.5. Nouveaux outils de production : réalité augmentée, robots autonomes, CAD & impression 3D

## III. Systèmes dédiés et intégration

- III.1. Les modèles CPPS/CPIS
- III.2. Intégration verticale et horizontale
- III.3. Le Cloud Manufacturing
- III.4. Des ERP vers les ERP-II et APS
- III.5. Logiciels complémentaires à la prise de décision

## Conclusion

---

# Partie I

# Introduction

---

## I.1. Introduction

### Rappels et liens avec l'industrie 4.0

L'industrie 4.0, considérée comme la “*quatrième révolution industrielle*”, est un **renouveau de la digitalisation des entreprises** résultant de la volonté du gouvernement allemand à **moderniser ses industries et gagner en compétitivité** (face à des pays aux coûts de production plus bas) notamment par des gains en termes de **qualité**, de **flexibilité** (*personnalisation, adaptation aux imprévus*) et de **performance** (*vitesse de production, analyses temps-réelles et prévisionnelles*) et une **baisse des coûts** (*automatisation*).

L'industrie 4.0 se caractérise notamment par de **nouveaux modèles commerciaux** et **modes de production** atteints par l'exploitation des opportunités offertes par **l'utilisation combinée des nouvelles technologies de l'information** (*échange de données via le réseau, ressources connectées et autonomes, IoT, robotique, capacités de calcul du Cloud, etc.*) et des **méthodologies avancées de prise de décisions** (*simulations temps-réelles, apprentissage automatique, IA, heuristiques et optimisation, Big Data, etc.*).

L'industrie 4.0 est ainsi technologiquement possible grâce à un modèle d'**usines intelligentes, connectées, autonomes, décentralisées** et **flexibles** fondées sur ces technologies et méthodologies. L'environnement complet qui résulte de l'ensemble de ces ressources **physiques** (*employés, machines, capteurs/contrôleurs, etc.*) et **virtuelles** (*outils de gestion, d'analyse, de planification et de contrôle tels que des ERP, APS ou jumeaux numériques*) est appelé **Cyber-Physical Systems (CPS)** ou encore **Cyber-Physical Industrial/Production Systems (CP-P/I-S)**.

## Objectifs

Guider la mise en place d'une I4.0.  
 Identifier les normes existantes, leurs liens de complémentarité, mais aussi les manques et redondances/chevauchements.

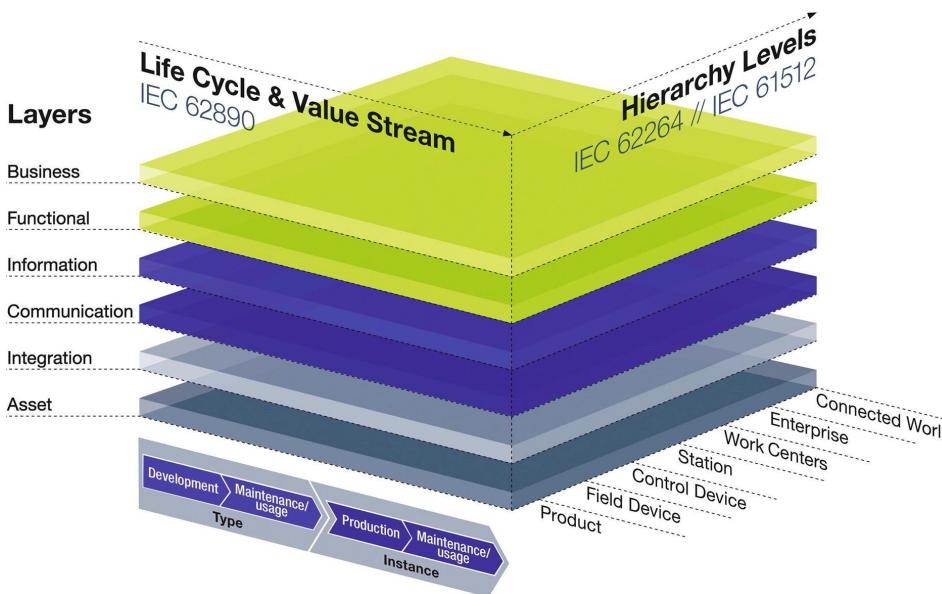


Figure 1: Modèle de référence “RAMI 4.0”  
 Extrait de [1]

## I.2. Le modèle “RAMI 4.0”

*Une structure et un langage commun pour décrire les bases fondamentales de l'industrie 4.0 (I4.0)*

Lecture du modèle :

- **Axe horizontal gauche** (norme IEC-2890) : installation et cycle de vie dans le temps d'un “Type” de I4.0 en conception vers une “Instance” en cours de production.
- **Axe horizontal droite** (norme IEC-62264) : niveaux hiérarchiques de l'instance/du type étudié, d'un simple produit jusqu'au “monde connecté” en passant par une machine, station de machines, usine ayant plusieurs stations, etc.
- **Axe vertical** (*intégration des aspects de digitalisation*) : Les “assets” sont les différentes ressources physiques (machines) et virtuelles (logiciels); leur “intégration” se fait via des outils de capture et communication des données (capteurs/contrôleurs); ces données sont ensuite “communiquées” sur le réseau (à l'aide d'outils et protocoles réseaux). Ces données sont également traitées et analysées afin d'en extraire des “informations” voire de la connaissance. Cette information est intégrée horizontalement et exploitée par le système afin de remplir ses “fonctions” (règles de décision, opérations). Le dernier niveau représente l'intégration des fonctions entre elles pour l'atteinte des objectifs commerciaux du système et de l'entreprise.

Partie II

## Architectures, Technologies et Méthodologies

# Objectif et contenu

Dans cette partie nous allons passer en revue les principaux **outils, technologies et méthodologies architecturales** typiques de l'industrie 4.0 et des “**smart factories**”. Cela nous permettra, dans un second temps (Partie III), d'étudier leur intégration finale pour former le système complet (CPS, Logiciels APS, etc.). Pour cela nous allons présenter ces outils et technologies et leur lien avec **les couches** (ou “*Layers*”) **du modèle RAMI 4.0** étudié dans l'introduction :

- Les ressources connectées et intelligentes, ou plus généralement l’Internet des Objets (IoT), est constitué “**d’Objets**” (*capteurs/contrôleurs*) de capture et transmission des données ainsi que des protocoles et outils propres au web et à “**l’Internet**” (*réseau TCP/IP, HTTP et services web REST*).
- Ces données massives, diverses et temps-réelles sont ensuite stockées et analysées dans de **nouvelles bases de données** (*No-SQL*) et à l'aide de **nouveaux algorithmes** (*Map-Reduce*) : on parle alors de “**Big Data**”.
- Afin de collaborer entre plusieurs systèmes, voire même usines, distantes et de permettre un traitement temps-réel malgré la complexité de calcul de certaines fonctions (*prise en décision sur la base de prévision, apprentissage, réaction aux évènements, etc.*), on utilise un modèle informatique architectural appelé le “**Cloud**” et les “**grilles de serveurs**”.
- Ces fonctions complexes sont réalisées à l'aide de la combinaison entre des principes issues des domaines de la gestion et de l'industrie avec des outils propres aux domaines de l'optimisation, des mathématiques/statistiques ou encore de l'informatique. Parmis ces outils, se trouve notamment la “**simulation**”.

La prise de décision pertinente, temps-réelle et autonome dans les usines intelligentes nécessite l'utilisation de machines équipées de :

- **Capteurs de données précises** : température, pression, vitesse, courant, niveau identification *RFID*, identification par caméras intelligentes, etc.
- **Contrôleurs et activateurs** à distance des fonctions de la ressource.
- **Informatique embarqué** (carte *Arduino*, *Raspberry Pie*, etc.) pour effectuer des traitements et décisions locales.

Ces données brutes permettent à un plus haut niveau d'analyse de détecter divers phénomènes et extraire de l'information : pannes, blocage, vitesse moyenne d'exécution de chaque opération, temps moyen d'inactivité des machines, etc.

Si ces données transitent via le réseau internet, on parle d'internet des objets (IoT) et en l'occurrence de "*Industrial Internet of Things (IIoT)*".

## II.1. Ressources connectées et intelligentes [1/2]

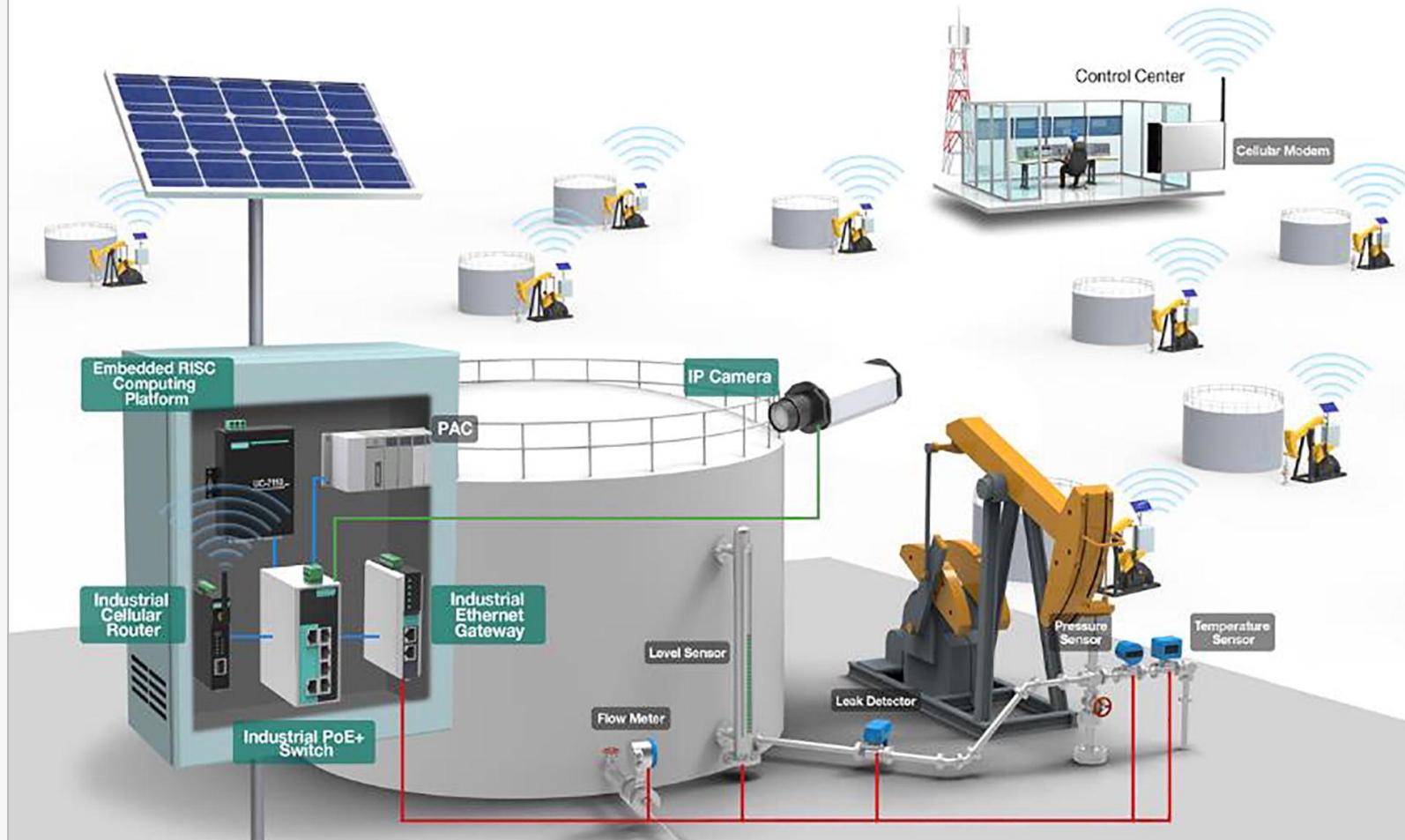
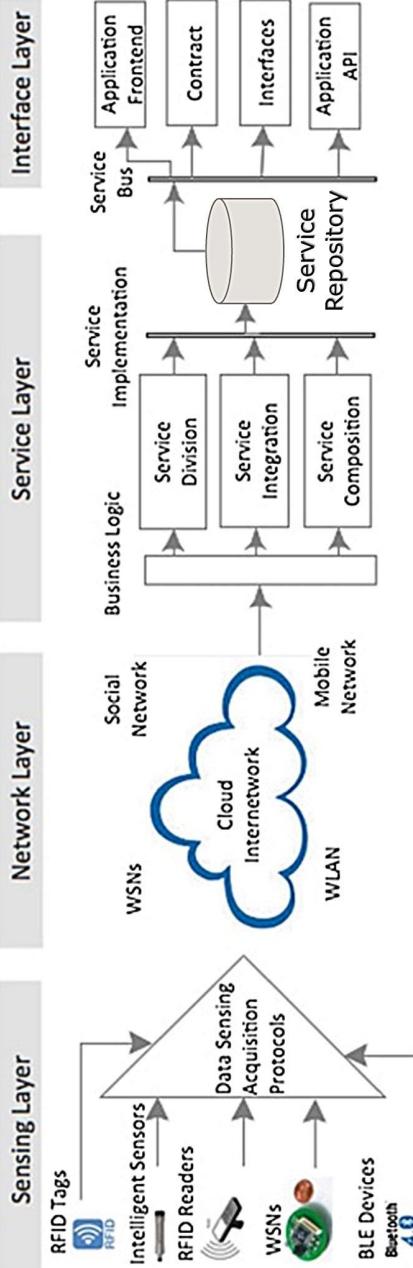


Figure 2 : Modèle typique de systèmes IoT  
Extrait de [1]



## II.1. Ressources connectées et intelligentes [2/2]

*L'Internet des Objets d'un point de vue architectural*

D'un point de vue informatique, L'IoT a vocation à relier les objets intelligents et distincts du “*monde entier*” au sein de réseaux interconnectés entre eux, voire d'**un seul réseau (Internet) sur lequel circulerait l'ensemble de la connaissance**. Cela dépasse le cadre de l'industrie et s'applique dans *le transport, les hôpitaux et la santé, la domotique, la sécurité urbaine*, etc. Ce réseau a également pour caractéristique d'être décentralisé et hétérogène.

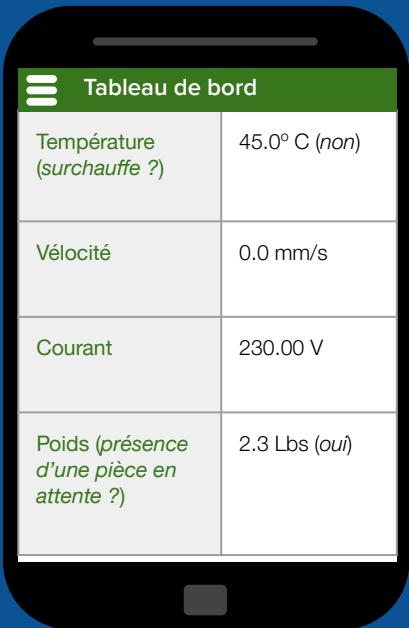
«*L'IoT permet aux gens et aux objets d'être connectés à tout moment, en tout lieu, avec n'importe quoi et n'importe qui, idéalement en utilisant n'importe quel chemin / réseau et n'importe quel service* » **Sezer et al.**

Selon l'architecture orientée services proposée sur cette figure (extraite de [1]), une **application/système IoT** au sein de ce réseau devrait posséder les couches suivantes :

- **Sensing Layer** : les capteurs et objets intelligents
- **Network Layer** : les réseaux reliés au Cloud (**voir partie II.2 sur le Cloud**) pour transmettre l'information qui y sera stockée, traitée et analysée (**voir partie II.3 sur les Big Data**)
- **Service Layer** : l'exposition des traitements Cloud (*prise de décision, détection phénomènes, simulation etc.*) pour les rendre accessibles à des applications informatiques (*ERP, APS, etc.*). Cette exposition vers l'extérieur se fait sous la forme d'API de services web/Cloud tels que REST (**voir partie II.2 sur les SOA et services REST**).
- **Interface Layer** : les applications qui exploitent ces services Cloud et présentent une interface pour l'utilisateur final.

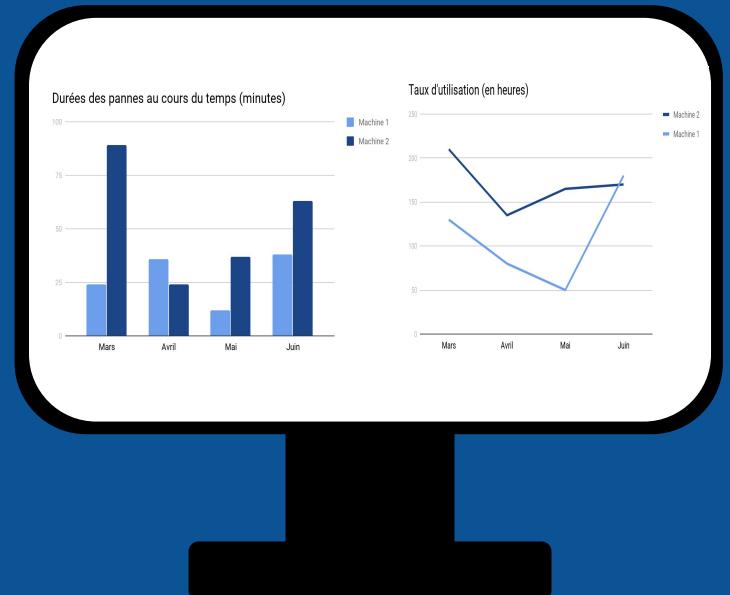
# Questions et réflexion

Parce que rien ne vaut un bon quizz !



## Question 1

Une usine décide de tester l'IoT et d'installer des capteurs reliés à une de ses machines perceuses. Sur son téléphone, un opérateur peut ainsi visualiser les données brutes reçues en temps-réel. Quel phénomène peut-il déduire de ce qu'il voit ? Quel serait l'apport de l'Intelligence Artificielle dans cette situation ?



## Question 2

Mise à part le temps-réel, l'industriel décide de stocker ces données pour faire de l'analyse rétrospective de l'historique.

Quel problème peut-il déduire ce qu'il voit ? Quel serait la solution d'après vous ?

## Réponse

On peut voir qu'il y a du courant et une pièce en attente et pourtant la perceuse est immobile (vitesse nulle) : il peut donc s'agir d'une panne.

Dans ce contexte, une analyse des données aurait pu faire cette détection automatiquement, envoyer une notification à l'opération et déclencher un algorithme de réordonnancement sans cette machine (en attendant qu'elle soit réparée).

## Réponse

On peut voir que les pannes les plus fréquentes sont sur la machine 2 qui est également la plus utilisée au cours du temps : il y a donc une surcharge.

La solution serait de modifier l'algorithme utilisé pour l'ordonnancement des pièces sur les machines afin de mieux équilibrer la charge (*load balancing*) !

## II.2. Architectures Cloud [1/3]

### Définition et niveaux de services

**Définition** : un modèle informatique d'offre à la demande (service redimensionnable) un pool de ressources (*physiques ou virtuelles*) partagées, distantes, configurables et accessibles via le web/internet.

**Fonctionnement technique** : le Cloud enregistre les différentes ressources et leurs accès sur des bases de données et effectue les traitements sur des machines serveurs ou grilles de machines serveurs (*Data Center*).

**Utilité dans l'industrie et logiciels industriels** : Les **capacités de calcul temps-réel et parallèle** des grilles de serveurs et les **capacités de synchronisation et d'accès aux ressources distantes** (des simples données jusqu'au contrôle de machines) sont essentielles à la fois dans la mise en place d'un CPPS ([voir partie III.1](#)), du calcul des Big Data ([voir partie II.3](#)) ou encore des traitements complexes des APS ([voir partie III.2](#)).

#### Modèles et niveaux de service :

- **Infrastructure as a Service (IaaS)** : fournir des ressources informatiques fondamentales (*serveurs, accès réseaux, bases de stockage, etc.*)
- **Platform as a Service (PaaS)** : fournir des outils de création et maintenance de logiciels Cloud au-dessus d'un IaaS
- **Software as a Service (SaaS)** : fournir des logiciels Cloud accessibles sur le web (*des sites publics tels que Facebook ou des progiciels privés comme un ERP*).

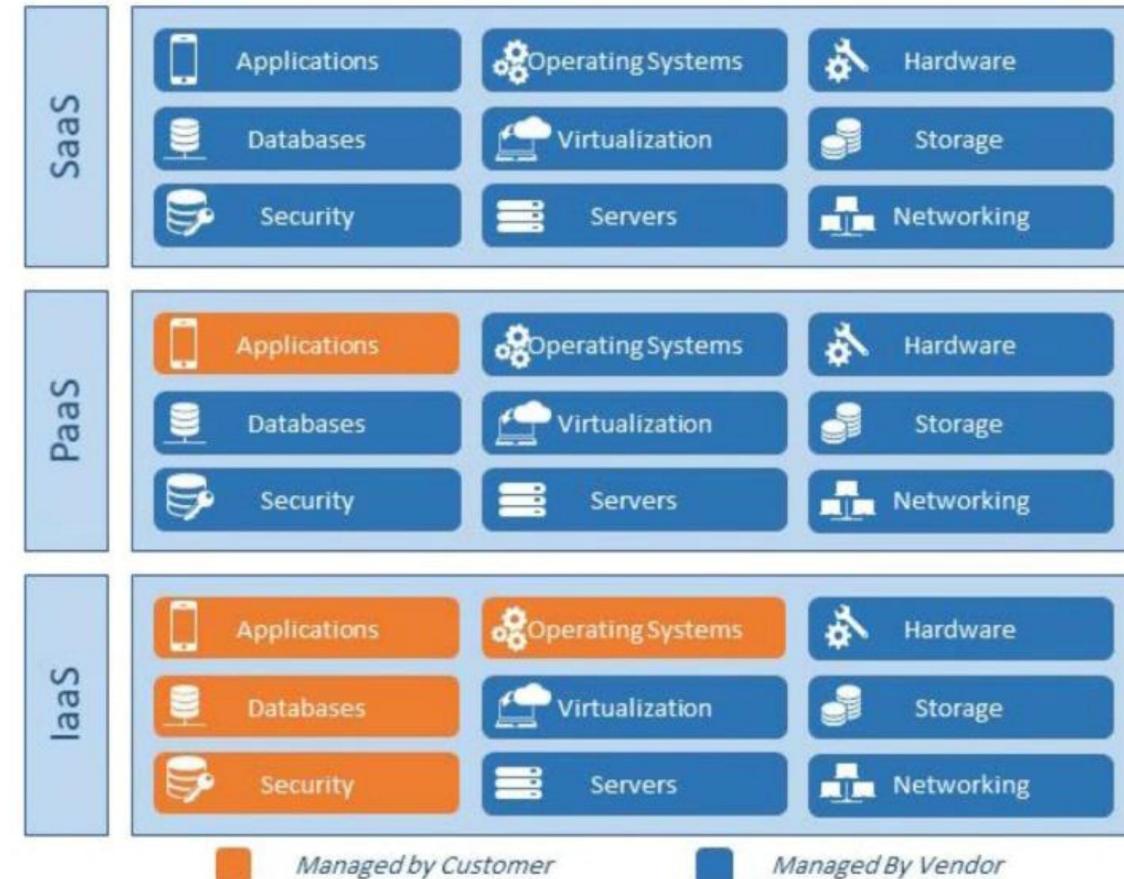


Figure 4 : Les niveaux de services et modèles du Cloud  
Extrait de [1]

## II.2. Architectures Cloud [2/3]

Retour sur l'évolution des architectures logicielles : un pas vers le WEB

**Architectures logicielles** : originellement constituées de 3 “couches” ou “tiers”

- **Présentation** : Les interfaces graphiques et interactions homme-machine
- **Métier** : Les fonctions du logiciel, des traitements et calculs
- **Données** : Les informations sur lesquels sont faits les traitements et qui sont enregistrées (*des valeurs numériques, du texte, images, son, vidéo, etc.*)

**Un besoin** : Originellement les applications étaient des « *monolithes* » : non-réparties et produits d'un code unique. Ce qui imposait des limites : *comment partager des données entre utilisateurs distants ? Comment collaborer avec d'autres applications d'un même système ? Comment faire évoluer une partie uniquement de l'application ? Comment répartir et redimensionner les capacités physiques exploitées en fonction de la demande sur chaque module ou fonctionnalité ?*

**Une 1<sup>ère</sup> réponse** : l'arrivée de nouvelles technologies (*d'abord la notion de module avec l'orienté objet, puis les protocoles de communication CORBA ou RMI suivi du web et des architectures à base de services*) a permis la distribution des applications :

- Les données sont principalement enregistrées sur un serveur distant afin d'être disponibles par différents utilisateurs et seules quelques-unes sont enregistrées chez le client (il s'agit donc d'un modèle **client-serveur**)
- Les architectures où tous les traitements sont effectués chez le client (**client lourd** comme *Microsoft Word*) disparaissent au profit de traitements entièrement effectués sur le serveur (**client léger**) ou alors répartis (**client riche** comme *Google Document* ou les applications mobiles)

### Pourquoi ces rappels ?

Pour comprendre les raisons d'être et le fonctionnement du Cloud, il faut revenir en arrière vers les évolutions des architectures logicielles vers la notion de “Service”.

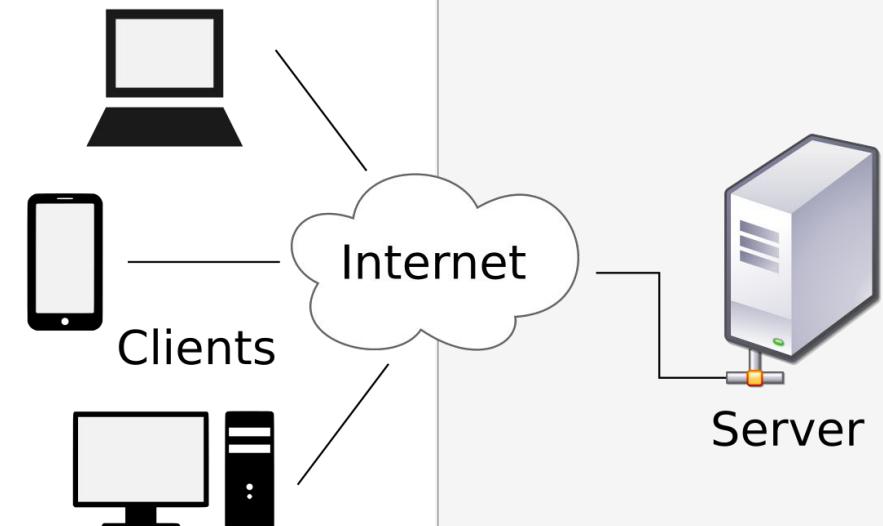


Figure 5 : Architecture Client-Serveur

Extrait de Wikipedia

## II.2. Architectures Cloud [3/3]

Retour sur les services et REST : l'orientation “ressources”

**Les services et micro-services** : 2<sup>nd</sup> évolution des architectures *client-serveur*, les architectures à base de services (**SOA**) représentent une base essentielle des modèles Cloud. Un service est une ressource (*fonctionnalité logicielle, données, etc.*) **exposée pour être accessible hors de l'application** (à distance). Un micro-service est une micro-application construite autour d'un **seul service ou ressource** qui collabore avec d'autres micro-services pour former un système complet.

**REST et le protocole web HTTP** : Aujourd’hui, les services et micro-services logiciels sont majoritairement exploités via le protocole web HTTP (*initialement conçu pour accéder à des fichiers et sites web via un navigateur*). Si ces services respectent l'orientation “ressource” et les accès dits **CRUD** (*création, suppression, modification et recherche/affichage de la ressource*), on parle alors de services **RESTful**.

**Les services Cloud** : Dans le Cloud, **tout est considéré en tant que ressources et services** déployés via les machines serveurs (même des ressources physiques et non logicielles).

Ainsi :  
 On comprend les modèles et niveaux de services  
 IaaS, PaaS et SaaS !

Ressource	Product ( <i>les produits existants dans la base de données de l’entreprise</i> )		
URI sur le réseau	<a href="https://127.0.0.1:8080/API/v1/product/">https://127.0.0.1:8080/API/v1/product/</a>		
Verbe HTTP	Équivalent CRUD	Description	modèle d'URI
POST	Create (C)	Créer un nouveau produit	[...]/product
PUT	Update (U)	Remplacer un produit par un autre	[...]/product/{id}
PATCH	Update (U)	Modifier les valeurs de certaines informations du produit	[...]/product/{id}
GET	Retrieve (R)	Afficher un produit par identifiant	[...]/product/{id}
FETCH	Retrieve (R)	Récupérer l'ensemble des produits	[...]/product
DELETE	Delete (D)	Supprimer un produit par identifiant	[...]/product/{id}

Figure 6 : Exemple d'API RESTful et accès CRUD à une ressource  
 Version originale

# Questions et réflexion

Parce que rien ne vaut un bon quizz !

## Question 3

“Fastbrication” est une société industrielle ayant un site web vitrine destiné au grand public. L’administration, n’étant pas très familière avec le Cloud, pense l’héberger sur un serveur plus classique au sein de ses propres locaux.

Citer une situation dans laquelle il serait plus avantageux pour “Fastbrication” d’héberger son site dans un “Data Center”, sur un serveur Cloud “IaaS” ?

## Réponse

Mise à part la différence certaine de puissance réseau (*bande passante, etc.*) disponible dans un Data Center face à celle d’une machine serveur hébergée sur un réseau d’entreprise, l’avantage réside dans la “*virtualisation*”.

En effet, si le site web vient à être visité de nombreuses fois et à évoluer par l’ajout de fonctionnalités, les capacités physiques du serveur (*RAM, taille du disque dur, accès réseau, processeur, etc.*) pourront ne plus être suffisantes. Dans ce contexte, l’entreprise devra changer de machine et tout réinstaller.

Dans le cadre d’un service IaaS, l’ajout virtuel de ressources (de tout type) est instantané !

## Question 4

Mis à part son site web, disponible à présent via l'url “[www.fastbrication.com](http://www.fastbrication.com)”, la société utilise un progiciel de gestion interne accessible via “[www.fastbrication.com/erp](http://www.fastbrication.com/erp)”.

Depuis quelques années, ce logiciel stock des données sur lesquelles, “Fastbrication” souhaite aujourd’hui faire de la visualisation. Pour cela, la société a décidé de développer, en plus, un troisième logiciel dans cet écosystème, qui exploite les données de l’ERP de gestion.

En utilisant les services web REST, quel serait une URI possible, appelée par le nouveau logiciel, pour récupérer de l’ERP la liste de tous les clients ? Expliquez cette URI.

## Réponse

Une URI possible serait <https://www.fastbrication.com/erp/api/v1/client> appelée en mode Http “**GET**” ou “**FETCH**”.

Généralement l’API REST est accessible via l'url du fournisseur (soit un “*nom de domaine*” comme ici soit le couple “*adresse IP : port*” comme dans l'exemple du cours) suivi du code “*api*” et de la version du service que l'on souhaite utiliser (s'il existe plusieurs versions des services, dans ce cas-ci la version 1 “*v1*”). Finalement, on appelle le nom de la ressource souhaitée (ici les “*clients*”).

## II.3. Gestion des données et Big Data [1/3]

### Rappel sur les notions de données et base de données

**Les données** : sont un aspect central du logiciel : elles représentent la vue dite “*statique*”, tous les traitements “*dynamiques*” sont faits sur ces données. Certaines d’entre-elles sont vouées à être enregistrées afin d’être réutilisées. Elles peuvent être simples (*valeurs numériques, textes*). Par exemple, dans le cas d’une application “*calculatrice*”, les données sont les **opérandes** (*données d’entrée par l’utilisateur*) et les **résultats** (*données de sortie affichées à l’utilisateur*). Les traitements seraient ici les **opérateurs**.

**Structures et modèle Objets** : Dans d’autres cas ces données représentent des entités plus complexes : on parle alors de “*structures de données*”. Par exemple, dans un logiciel de location : un donnée “*voiture*” peut être composée d’un prix à l’heure, d’un nom et d’un calendrier de disponibilité, etc. Le développement de ce concept par l’ajout de notions telles que *l’héritage de propriétés* communes mais surtout la volonté d’organiser tout le code autour de ces structures a donné naissance au paradigme “*Orienté Objet*”.

**Bases de données** : Les données de petite taille et faible complexité sont enregistrées dans de simples fichiers au format *clé/valeurs* (exemple : *meilleur score = 125*). Pour des données plus complexes, on utilise un système d’enregistrement complet appelé : **base de données**. Ce système est généralement géré par une application ou un module tiers appelé « **SGBD** : Système de Gestion de Base de Données ».

### Pourquoi ce rappel ?

Les ressources effectuent des traitements physiques (*opération de soudure*) ou virtuels (*calcul de planification*) selon leur nature. La collaboration entre ces ressources, via le Cloud, se fait via l’échange, le stockage et l’analyse de **données** et **d’informations**. Deux concepts au centre de tout système...

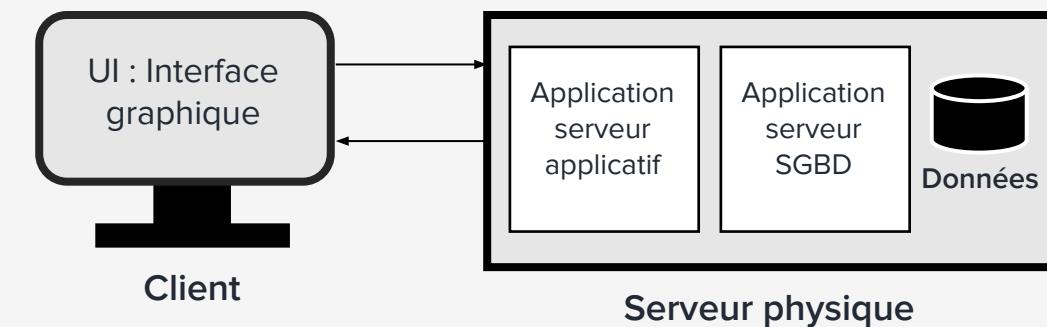


Figure 7: Schéma classique d'une architecture 3-tiers  
Version originale

## II.3. Gestion des données et Big Data [2/3]

Avant les *Big Data* : SQL et bases de données relationnelles

**Le modèle structuré relationnel** : est le modèle traditionnellement utilisé pour les bases de données. Les données sont structurées sous forme de “**Tables**” appelés aussi “**Relations**” pour lesquelles les lignes sont les **données** appelées entrées, entités ou encore tuples et les colonnes représentent les différents **attributs**. Certains attributs sont liés à des données d’autres tables : on parle alors **d’association** entre deux ou plusieurs relations.

**Accès et manipulation** : La manipulation des données dans les SGBD relationnels se fait à l’aide d’un **langage de requêtes déclaratives** appelé “**Structured Query Language (SQL)**”. Ces requêtes suivent le format CRUD vu précédemment dans les services web.

**Limites dans le contexte des Big Data :**

- La structure en tables et associations entre les tables n'est pas faite pour évoluer une fois remplie par des données.
- Le modèle ne permet pas (ou difficilement) l'ajout de **données n'ayant pas de structure claire ou redondantes** sur plusieurs structures.
- La recherche sur les attributs (hormis l'identifiant) est lente, particulièrement quand le **volume de données devient important** et quand l'attribut sur lequel la recherche est faite est complexe (*association en cascade, attribut de type multimédia, etc.*).

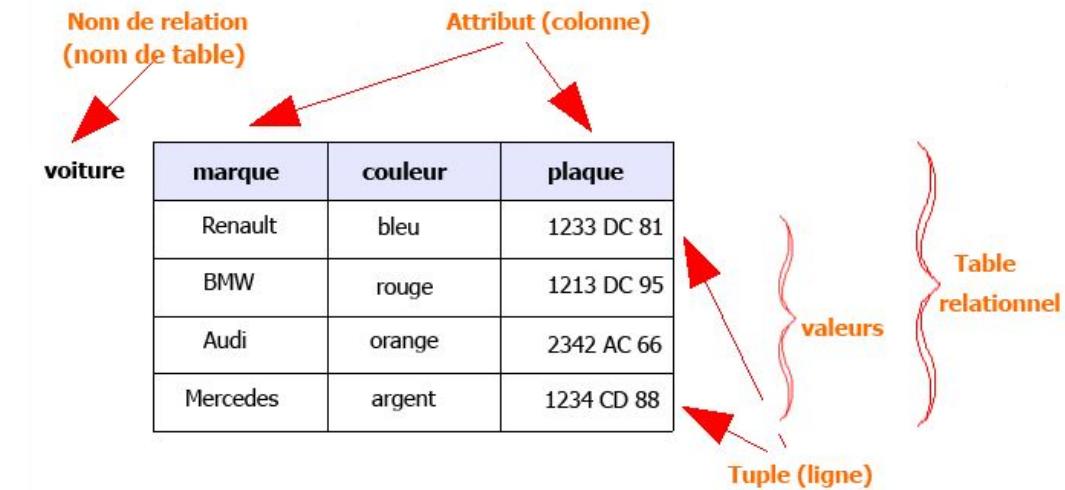


Figure 8 : Contenu d'une table de données relationnelle  
Extrait de Wikipédia

The diagram illustrates the relationship between two tables: "voiture" and "carburant". The "voiture" table has columns ID, marque, and plaque. The "carburant" table has columns ID and type. An arrow points from the "ID carburant" column in the "voiture" table to the "ID carburant" column in the "carburant" table, indicating a foreign key relationship.

ID voiture	ID carburant	marque	plaqué
1	1	Renault	1233 DC 81
2	2	BMW	1213 DC 95
2	1	Audi	2342 AC 66

ID carburant (*)	type
1	pétrole
2	gas-oil
3	gas

Figure 9 : Association entre deux tables  
Extrait de Wikipédia

## II.3. Gestion des données et Big Data [3/3]

Les *Big Data* et liens avec l'*IoT* et l'*I4.0*

**Définition par les 3V** : Les *Big Data* sont des données produites en très grande quantité ( $V_1 = \text{Volume}$ ), très rapidement et temps-réel ( $V_2 = \text{Vélocité}$ ) et provenant de nombreuses sources hétérogènes et souvent non-structurées ( $V_3 = \text{Variété}$ ). Par la suite d'autres " $V_s$ " ont été ajoutés pour décrire les *Big Data* : **Volatilité** (*valide durant une courte durée uniquement*), **Variabilité** (*données dont la valeur n'est pas fixe dans le temps*), etc.

**Source dans le contexte de l'*IoT* et de l'*Industrie 4.0*** : les *Big Data* sont principalement produites par les capteurs (*machines et produits*) mais aussi par les logiciels ERP-II/APS et les plateformes sociales ou API de données publiques.

**Problématiques et solutions** : À part les limites vues des bases de données, les algorithmes classiques d'analyse et traitement ne sont également plus applicables (trop lents principalement). Ainsi, le domaine des *Big Data* est caractérisé par l'apparition d'algorithmes de traitements fortement parallèles (*Map-Reduce*), l'utilisation d'heuristiques et la création de nouveaux types de bases de données (*données structurées sous la forme de graphes, documents, JSON, etc.*).

**Cycle de vie des *Big Data*** : Les *Big Data* ne se limitent ainsi pas qu'aux données en tant que telles mais à tout un **cycle de vie** au sein des différents éléments du **système cyber-physique**. Ce cycle de vie contient généralement les étapes suivantes : **collecte**, **stockage**, **traitement** (*nettoyage, uniformisation, etc.*), **analyse** (*comparaison, statistiques, etc.*) qui permet d'extraire de l'information, voire de la connaissance, et, finalement, **exploitation** dans les fonctionnalités des applications et présentation.

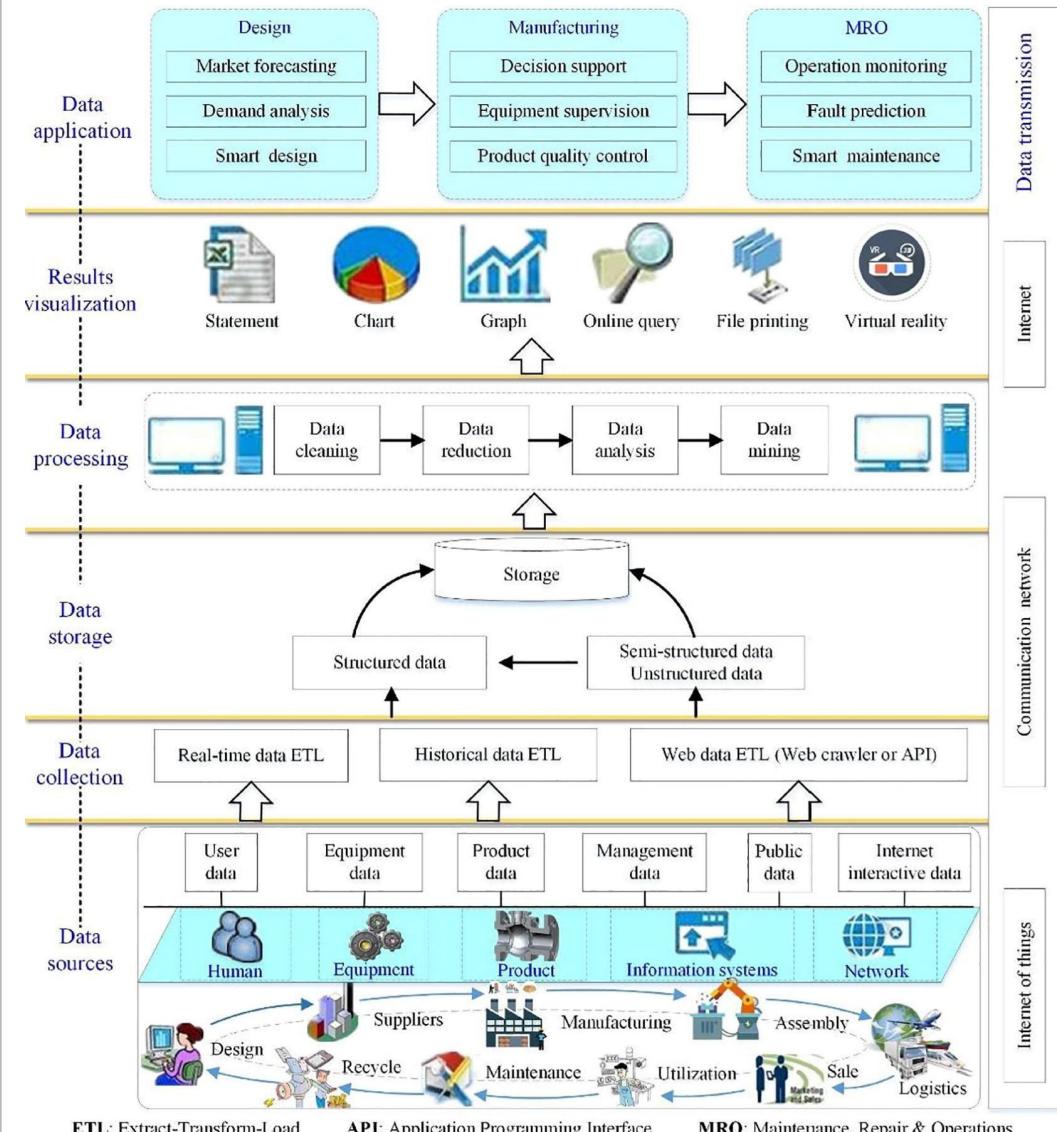


Figure 10 : Cycle de vie des données manufacturières

Extrait de [1]

# Questions et réflexion

Parce que rien ne vaut un bon quizz !

## Question 5

“Fastbrication” possède 25 machines équipées de capteurs qui envoient un signal à chaque activation (*début d'opération*) et arrêt d'activité (*fin d'une opération*). Cela permet de faire des calculs de retard, de charge ou de calculer la durée moyenne des opérations sur les différentes machines. Généralement les durées sont en millisecondes. Voici le modèle de données utilisé par le logiciel de stockage et d'analyse :

Machine		
Attribut	Type	Description
ID	Number	<i>Identifiant</i>
name	String	<i>Nom de la machine</i>
...	...	...
operations	Operation[]	<i>Liste des opérations</i>

Operation		
Attribut	Type	Description
ID	Number	<i>Identifiant</i>
type	Number	<i>Type d'événement</i>
machineID	Number	<i>ID de la machine</i>
begin	Time	<i>Date détaillée de début</i>
end	Time	<i>Date détaillée de fin</i>

À chaque événement de fin d'opération reçu, le calcul de moyenne des opérations suivant est relancé :

$$\frac{1}{|machines|} \times \sum_{m : machines} \left[ \frac{1}{|m.operations|} \times \sum_{o : m.operations} [o.end - o.begin] \right]$$

Quel problème cela pose dans le contexte des Big Data ? Proposez un meilleur modèle et formule de calcul (*expliquer pourquoi*).

## Réponse

Si les opérations ne durent que quelques secondes ou millisecondes, le calcul sera effectué souvent. Cela pose deux problèmes :

- Si l'on choisit de stocker chaque opération de manière indépendante, la taille de la base de données risque de devenir très grande. Cela impacte également son temps de parcours.
- Le calcul deviendra très long (*car dépendant du nombre total d'opérations sur l'ensemble des machines*) alors qu'une grande partie du résultat aura déjà été effectué auparavant : il y a donc du calcul inutile qui peut être “optimisé” !

Machine		
Attribut	Type	Description
ID	Number	<i>Identifiant</i>
name	String	<i>Nom de la machine</i>
nbrOp	Number	<i>Nombre total d'opérations</i>
totalTime	Number	<i>Durée totale jusqu'à présent</i>

$$\frac{1}{1 + \sum_{m : machines} m.nbrOp} \times \left[ \sum_{m : machines} [m.nbrOp \times m.totalTime] + newTime \right]$$

\* *newTime* = durée de la nouvelle opération

Ce nouveau modèle réutilise les précédents calculs et sa complexité (*nombre d'instructions à calculer*) ne dépend pas du nombre d'opérations !

## II.4. La simulation dans la prise de décision [1/3]

### Simulation : définition, modèles et liens avec l'optimisation

**Mise en pratique dans la prise de décision et liens avec l'optimisation :** Les techniques d'optimisation et heuristiques permettent de combler la **non-capacité** (*mémoire et temporelle*) à tester l'**ensemble des décisions** d'un problème lors ce que ces décisions sont trop nombreuses (*NP-Complétude*). Cependant, l'optimisation pure fait face à plusieurs limites et est difficilement applicable quand le système n'est que **partiellement connu, complexe, évolue** au cours du temps, ou est **soumis à des phénomènes stochastiques**. Dans ces cas-ci, l'optimisation peut être couplée à des techniques de simulation ou d'apprentissage automatique pour outrepasser ces limites.

**Définition et utilité :** La simulation consiste à modéliser fidèlement le système étudié, en se basant sur les informations connues (*données d'historiques, normes, etc.*) puis à l'exécuter pour **analyser et mieux comprendre son comportement, prédire son évolution** au cours du temps mais surtout **prévoir ses réponses/sorties probables à la prise de certaines décisions**. Il s'agit donc d'une approche par observation différente des approches basées sur un calcul mathématiques.

⇒ Généralement, on essaye de construire son modèle sur la base d'un modèle ou famille de modèles connus afin de profiter de certaines règles déjà établies.

**Classification :** On peut ainsi différencier les modèles de simulation selon plusieurs critères : *leur (in)dépendance au temps; les simulations temps-réelles ou basées sur les événements; l'utilisation, ou non, de nombres aléatoires et variables suivant des distributions de probabilité; l'utilisation de valeurs discrètes ou continues, etc.*

⇒ Il existe aujourd'hui de nombreux logiciels commerciaux de simulation (*AnyLogic®* par exemple) qui permettent d'exporter le modèle créé pour le faire collaborer avec de l'optimisation, avec un logiciel tiers ou l'intégrer dans un système (CPS).

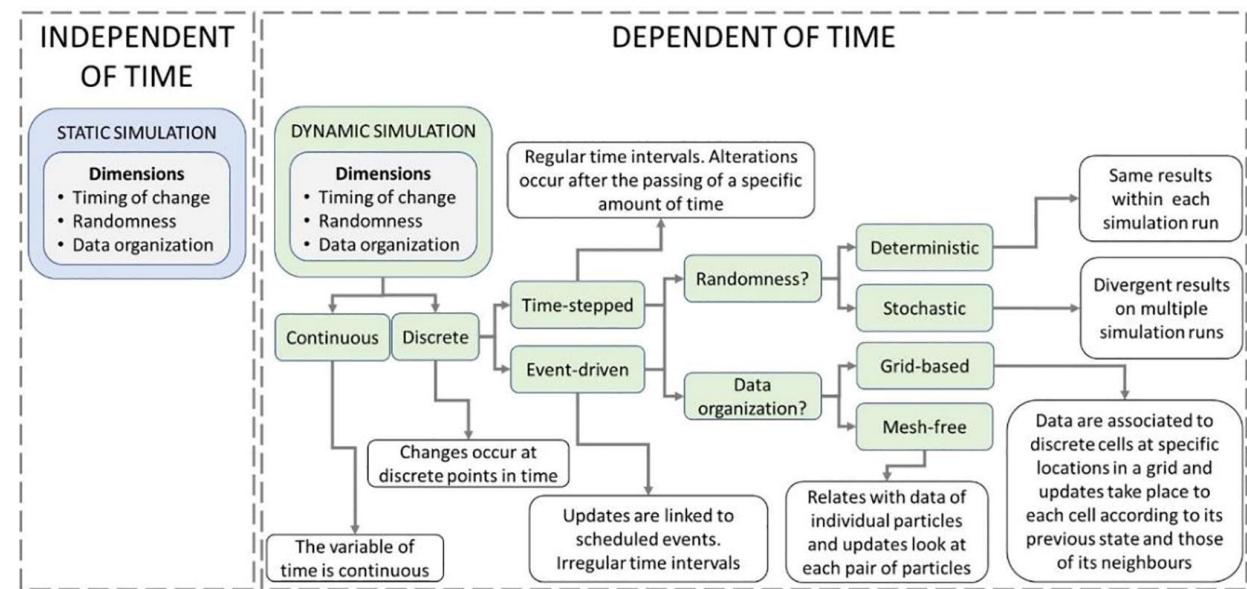


Figure 11: Classification des types de simulation

Extrait de [1]

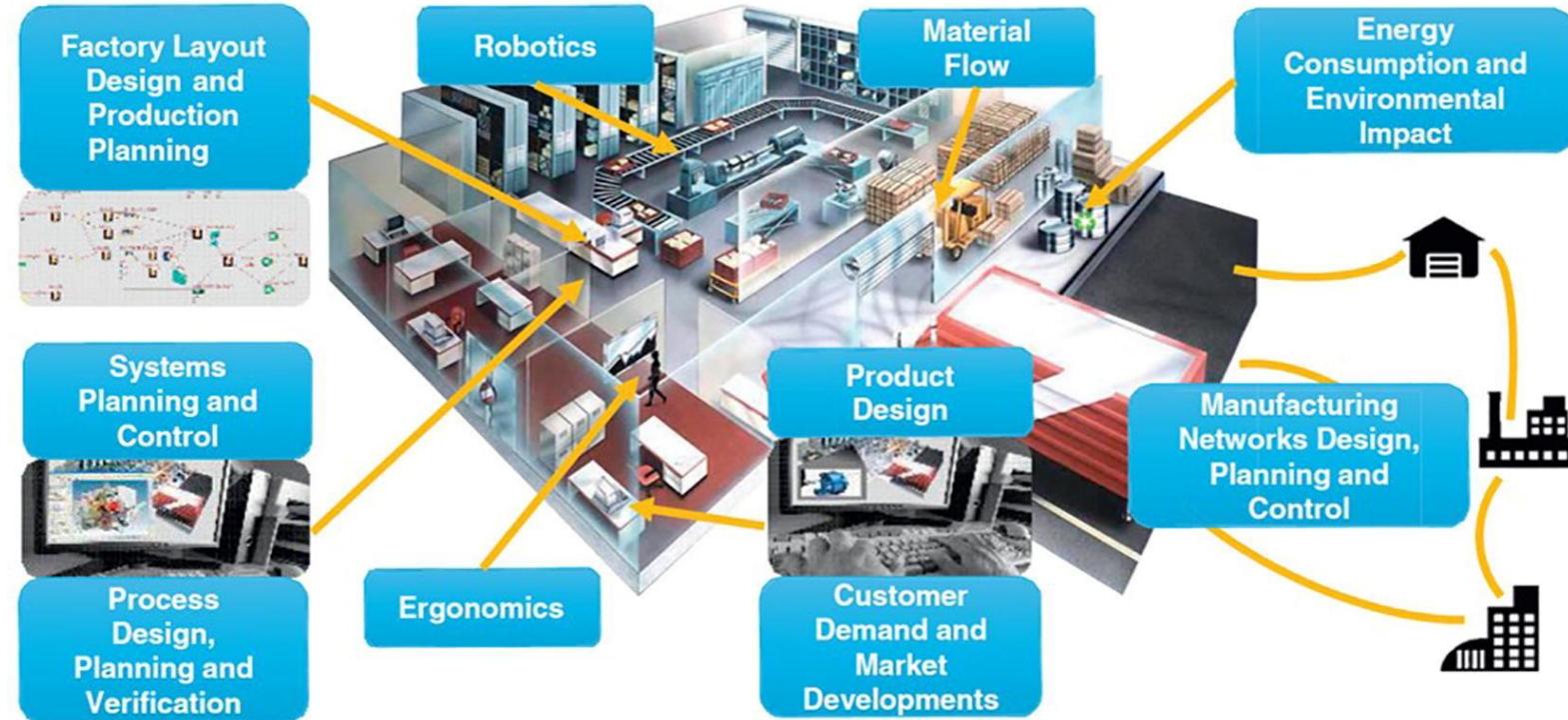
## Domaine de recherche et d'application dans l'industrie :

Dans l'industrie, la simulation a été utilisée pour de nombreuses applications incluant :

- La planification des projets en tenant compte des évolutions stochastiques de la demande, des prix ou de la variabilité dans la réalisation des activités (*maladie et congés des employés par exemple*), etc.
- L'ordonnancement des opérations de conception et/ou de production en tenant compte des possibles pannes des machines, des problèmes de qualité, structures des produits (*matériaux et opérations*) changeants etc.
- La maintenance des usines, la distribution (transport) des produits ou encore la gestion des stocks.

Dans la plupart des cas, l'objectif est de mieux comprendre la situation actuelle et d'atteindre des objectifs financiers, de temps ou de qualité (*achat de machines supplémentaires, recrutement/licenciement, définir une stratégie d'acceptation de projets, une stratégie de priorisation des opérations, ou encore une stratégie de réapprovisionnement, etc.*).

## II.4. La simulation dans la prise de décision [2/3]



*Figure 12 : Domaines de recherche et d'application de la simulation dans l'industrie*

Extrait de [1]

## II.4. La simulation dans la prise de décision [3/3]

### Les jumeaux numériques “Digital Twins”

**Définition** (adaptée de Glaessen 2012) : Une simulation temps-réelle, multi-physiques, multi-échelles et probabiliste intégrée d'un produit ou système complexe qui utilise les meilleurs modèles et technologies d'acquisition pour reproduire l'évolution de son jumeau

**Genèse de l'idée** : L'utilisation combinée des technologies telles que l'IoT et le Cloud avec les techniques de simulation a permis l'apparition d'un nouvel outil central dans le concept de CPS (voir la section III.1) : Les “**Digital Twins (DT)**”. Le terme est apparu pour la première fois en 2002 dans le contexte d'un projet aérospatial de la Nasa. Durant ce projet, une réplication réelle d'une fusée est restée sur terre pour qu'on lui applique les conditions réelles de son jumeau en cours d'utilisation et que l'on teste l'impact des décisions que l'on pourrait prendre.

#### Classification et fonctionnement

- **Modélisation** : Le modèle et le système réel n'ont pas d'impact l'un sur l'autre, il s'agit uniquement d'une *reproduction* avec *hypothèses* et *simplifications*.
- **Digital Shadow (DS)** : La base de données du modèle virtuel est mise à jour à chaque fois qu'un événement ou modification intervient sur le système réel (utilisation des *capteurs* pour la capture des événements).
- **Digital Master (DM)** : L'exécution du modèle virtuel accompagnée de phases d'optimisation à un impact sur le système réel.
- **Digital Twins (DT)** : Forte fidélité entre les jumeaux et peu de simplifications. Le modèle et le système réel s'inter-impactent. Un DT peut par ailleurs être composé de plusieurs DS et DM.

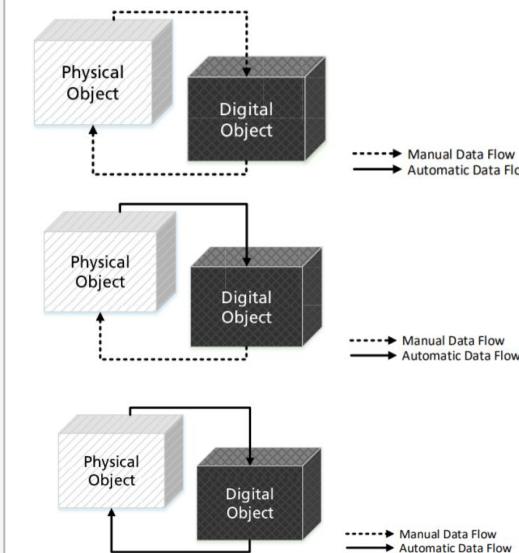


Figure 13 : Les paradigmes de simulation  
Extrait de [4]

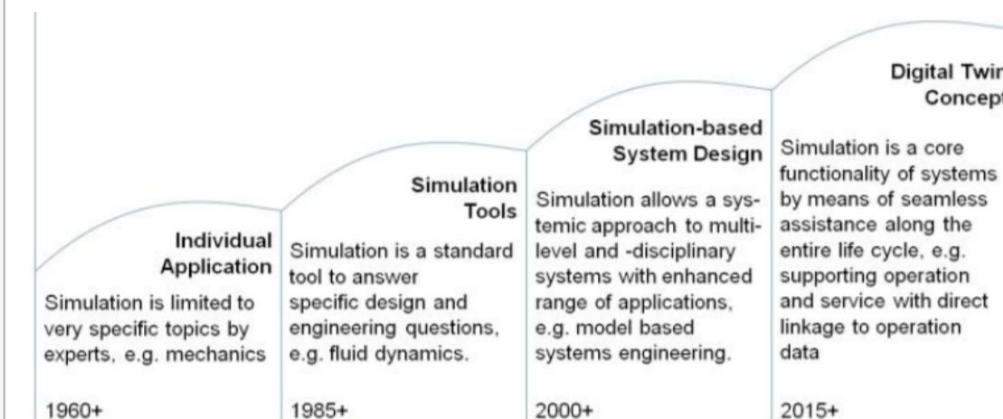


Figure 14 : Évolution des paradigmes de simulation  
Extrait de [8]

# Questions et réflexion

Parce que rien ne vaut un bon quizz !

## Question 6

Quels sont, d'après vous, les principaux apports de l'IoT et du Cloud computing dans la réalisation d'un "Digital Twin" ?

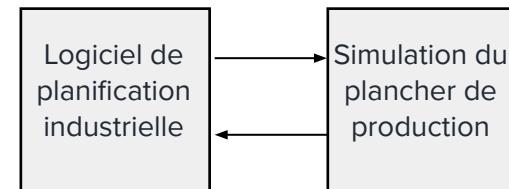
## Question 7

Quel est, d'après vous, la principale utilité du stockage de données (devenues de l'historique) pour la création d'un modèle de simulation ?

## Question 8

"Fastbrication" remarquant que les planifications prévues par son logiciel de planification (APS) ne sont que très peu représentatives de la réalité en cours d'exécution (*durées, pannes, problèmes divers, etc.*), décide de le faire collaborer avec un modèle de simulation pour valider la qualité probable des décisions.

À votre avis, si les deux logiciels communiquent à l'aide de services web, quels seraient les informations passées en entrée de la simulation, les résultats en sortie et l'URI possible pour le service ?



**Réponse :** L'IoT permet la synchronisation entre les deux jumeaux : acquérir virtuellement l'état du système réel et déclencher un comportement décidé par le jumeau numérique. Mis à part les capacités de calcul des serveurs, le Cloud permet l'utilisation de la simulation à distance.

**Réponse :** Les données d'historique témoignent d'un comportement qui peut correspondre à une fonction mathématique (*régression*) ou une distribution de probabilité. Si la proximité entre la distribution/fonction est prouvée (avec des tests statistiques comme  $x^2$ , Kolmogorov, etc.), on peut l'utiliser pour générer des comportements possibles ou prévoir des réponses à certaines entrées.

**Réponse :** <https://www.fastbrication.com/simulation/api/v1/launch> serait une URI possible; <https://www.fastbrication.com/simulation/api/v1/scheduling> également (génération d'un ordonnancement, elle serait donc exécutée en **POST**).

Les données envoyées seraient la décision prise par le planificateur : la séquence d'ordres d'exécution des opérations sur les différentes machines avec les durées prévisionnelles d'exécution de chaque opération sur chaque machine.

Les résultats produits seront l'exécution : dates d'entrée et sortie de chaque opération sur chaque machine, durées réelles d'exécution, ainsi que les événements ayant eu lieu (*panne, etc.*)

## II.5. Nouveaux outils de production [1/3]

### La réalité augmentée (AR)

**Définition et apports :** Fortement liée à la simulation et aux tests d'impact des décisions sur un modèle virtuel, l'AR ajoute une interface homme-machine (*visualisation* et *interaction*) plus compréhensible et ergonomique (usage de 3D). La réalité augmentée se définit comme la combinaison entre la recréation virtuelle de la réalité et l'ajout *d'objets ou phénomènes virtuels capables d'interagir avec cette réalité*.

#### Composants communs de l'AR

- Éléments électroniques pour effectuer la combinaison réel-virtuel : Visualisation sur écran au format **image** ou **vidéo** ou à l'aide **d'hologrammes** et **projecteurs dans l'espace (3D)**; Acquisition de la réalité à l'aide de **capteurs d'éléments réels** pour activation (*QR codes, position GPS, etc.*).
- Les traitements requièrent généralement de **l'analyse et génération d'image, son voire animation**. Pour cela, des techniques d'IA et tels que les "**Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) et profonds**" sont souvent utilisées.

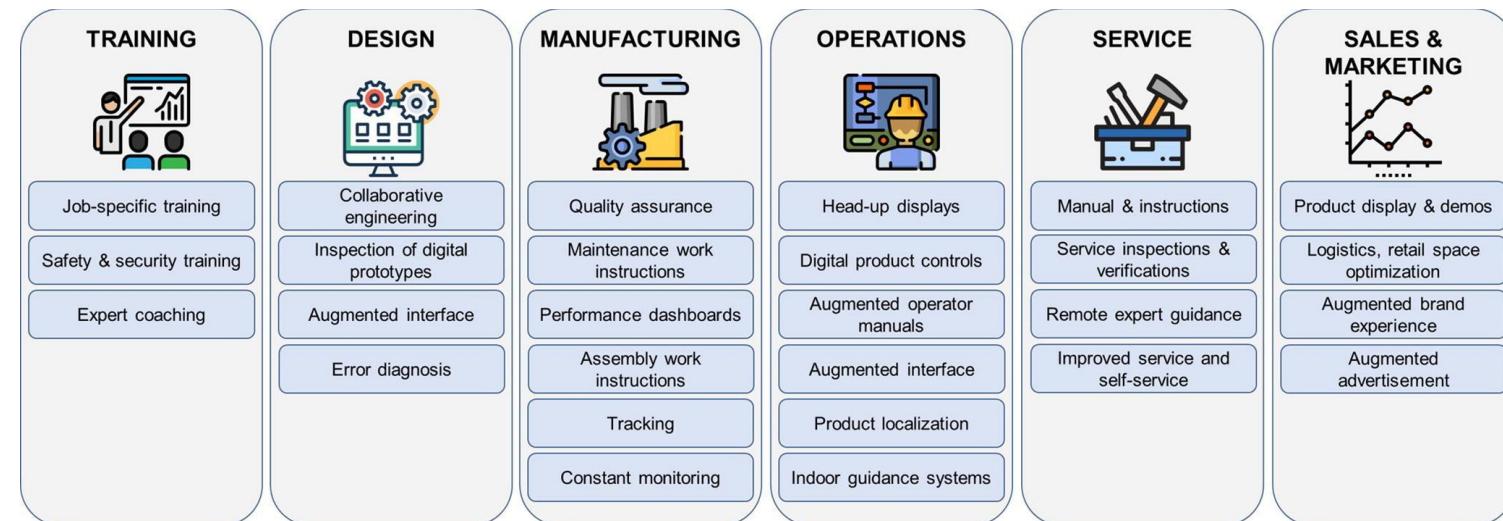
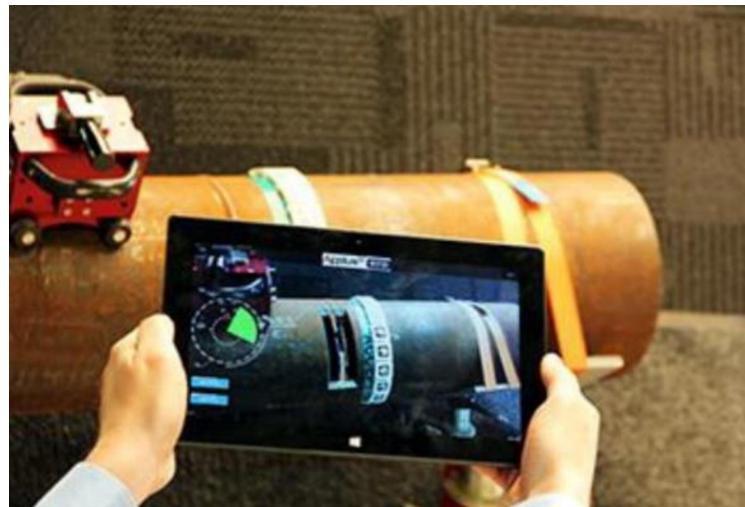


Figure 15 : Champs et exemples d'utilisation de l'AR dans l'industrie 4.0

Extraits de [1]

## II.5. Nouveaux outils de production

Conception assistée par ordinateur (CAO/CAD)  
& impression 3D

**Additive Manufacturing (AM)** : Les gains de coûts et de temps ainsi que le succès de l'AM s'explique par les et les caractéristiques intrinsèques du concept lui-même :

- Une seule machine pour toutes les opérations et tous les produits sans besoin de reconfiguration.
- Valable même pour les opérations d'assemblage complexes et formes géométriques difficilement réalisables par l'homme.
- Production automatique par analyse des dessins de conception et documents CAD.
- Pas de gaspillage de matière premières.

⇒ De nombreuses technologies et processus de production ont été inventés pour cela (*voir Figure 16*).

**Conception Assistée par Ordinateur (CAO ou CAD)** : Création et mise à jour des plans 2D et modélisations 3D d'un produit. Les plans et modèles sont composés/découpés en pièces et opérations interprétables par les systèmes manufacturiers (ERP, APS, etc.).

⇒ De nombreux logiciels existent pour réaliser cela : on peut notamment citer "Solid Works" et "Autodesk AutoCAD".

[2/3]

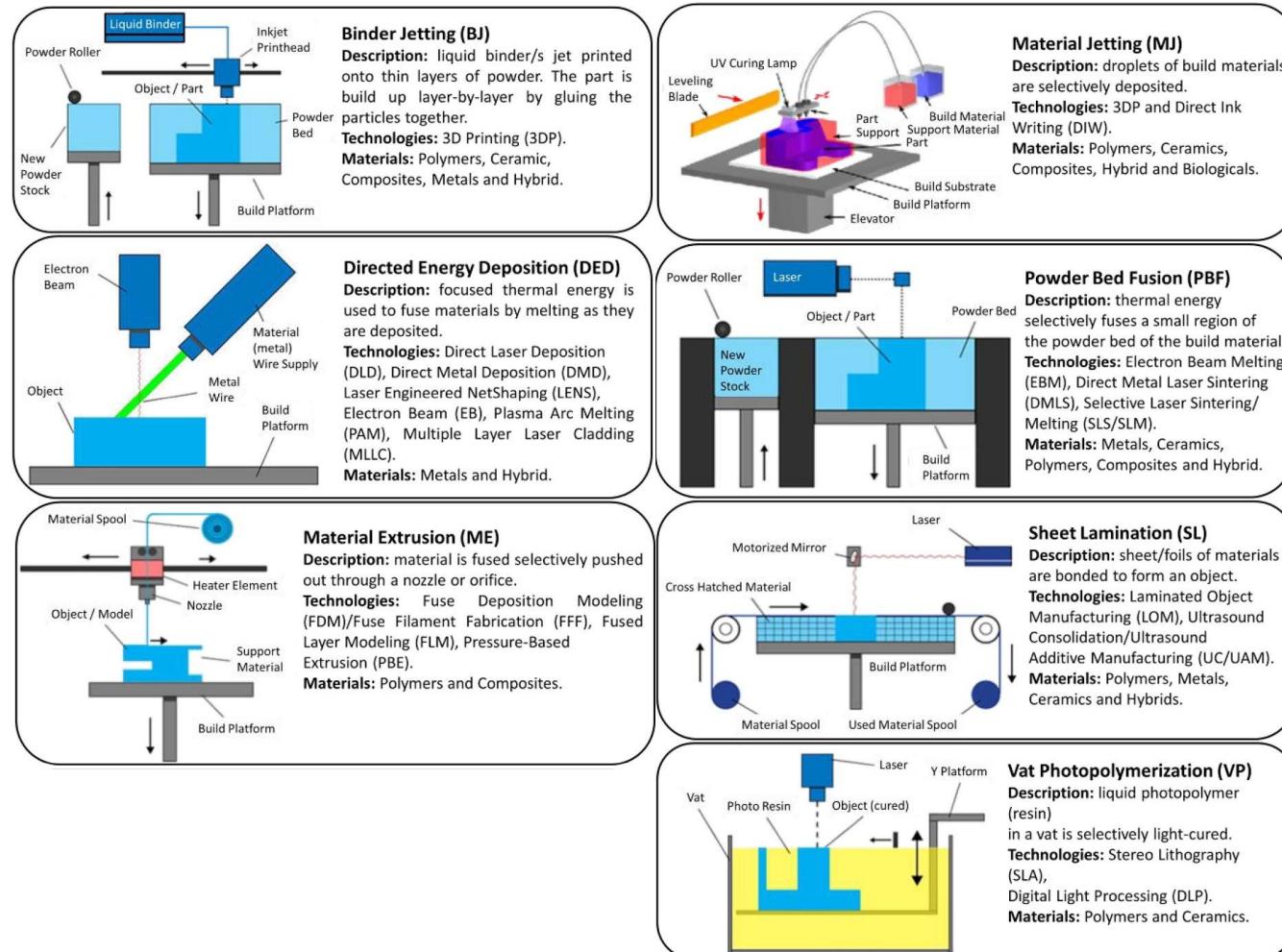


Figure 16 : Technologies et processus de l'Additive Manufacturing (AM)

Extraits de [1]

## II.5. Nouveaux outils de production [3/3]

### Les robots autonomes [industriels (AIR)]

**Avantages** : Mis à part la conséquente **réduction des coûts** (*vitesse de travail élevée, pas d'erreur humaine ni salaire, etc.*), l'utilisation des robots autonomes est essentielle dans la **production de masse de produits personnalisés** (“*Engineering-To-Order (ETO)*” et “*Mass Customization*” sont deux concepts fortement représentatifs de l’Industrie 4.0). De plus, les robots ont l'avantages de pouvoir s'adapter à de nouveaux besoins en apprenant de nouvelles tâches.

**Autonomie** : Sous-catégories des ressources connectées et intelligentes vues dans la section II.1, les AIR utilisent l'**information de leurs capteurs et de l'IA embarquée** (*présence d'un micro-processeur*) pour prendre des décisions opératoires (*attendre, se déplacer dans une direction, commencer l'opération, tenir un objet, etc.*)

**Collaboration** (systèmes “*multi-robots*”) : Pour les décisions de plus haut-niveau, les robots peuvent **collaborer entre eux** pour réaliser un même produit, en échangeant de l'**information** ou être contrôlés par un système informatique distant.

⇒ Les “**Cobots**” pour “**COLlaborative-roBOTS**” sont des robots conçus pour collaborer avec des êtres humains (employés d'une usine) au sein d'un environnement mixte.

**Classification** : Comme on peut le voir sur la Figure 17, on peut distinguer les robots selon plusieurs critères : leur **capacité à se déplacer**; le domaine d'opération (industriel notamment, mais parfois générique ou multi-domaines); le **type de tâches** qu'il réalisent (*production, maintenance, inspection de la qualité, etc.*).

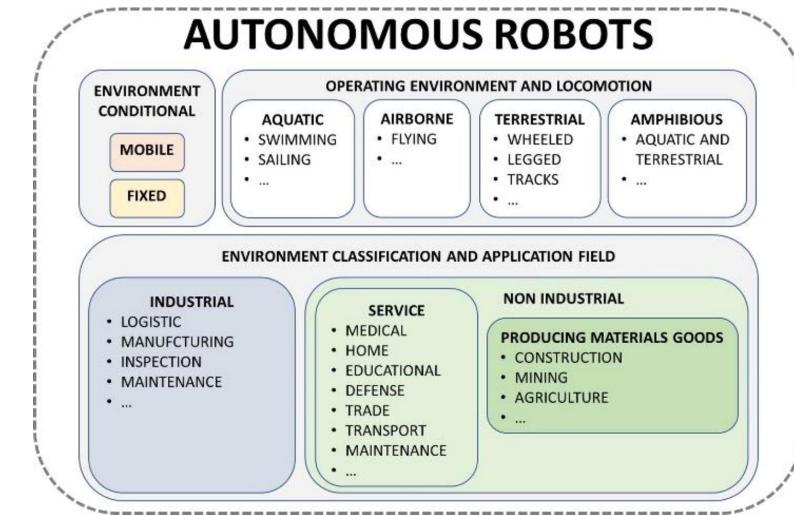


Figure 17 : Classification des robots autonomes  
Extrait de [1]

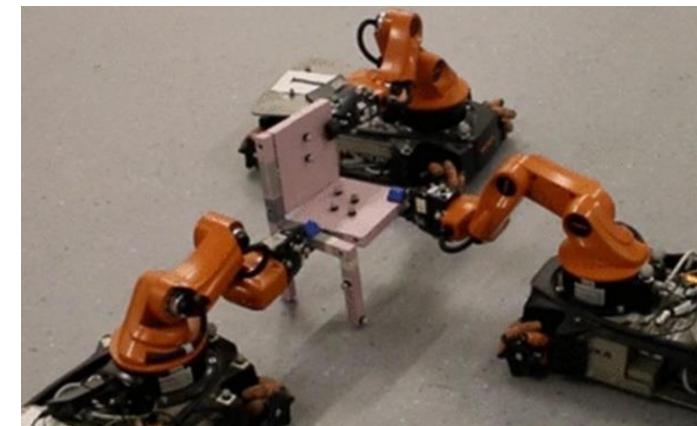


Figure 18 : Exemples de robots d'assemblage  
Extrait de [1]

# Questions et réflexion

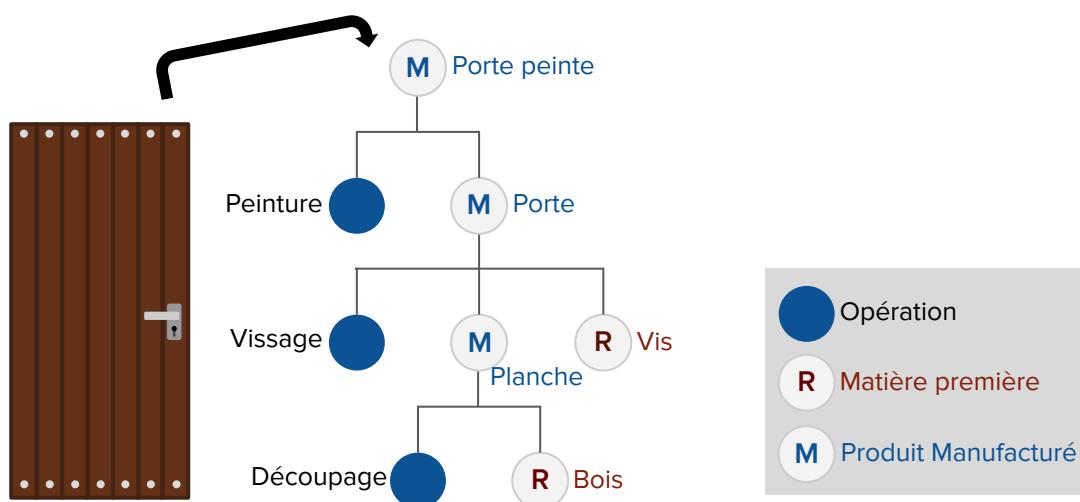
Parce que rien ne vaut un bon quizz !

## Question 9

Aujourd’hui certaines compagnies livrent par drones et sont totalement autonomes. Pourtant, elles restent très peu nombreuses et une grande majorité sont en retard dans la digitalisation. Comment peut-on expliquer ce retard ?

## Question 10

Après analyse automatique d’un plan CAD d’une porte en bois, un progiciel génère la structure logique du produit (“BOM : Bill of Manufacturing”) de la manière suivante :



D’après vous, quelle serait la structure de l’usine (*nombre, types et ordre des machines*) nécessaire à la réalisation d’une telle pièce ? Dans le cas où les opérations seraient réalisées par des robots, quelles informations complémentaires devrait-on extraire du document CAD ?

**Réponse :** Les 4 principaux facteurs sont le manque de confiance dans la technologie et sa sécurité (*bugs, piratage et vol des données, corruption de l’information, etc.*), le manque de compréhension et formation à l’utilisation, une réticence face au coût initial de digitalisation (*transformation du matériel et des processus, etc.*), ainsi qu'une gêne sociale (*remplacer des employés par des machines créée du chômage s’il n’y a pas de stratégie viable de reconversion vers le haut*).

## Réponse :

D’après la structure générée, l’usine devrait être composée de 3 types de machines uni-tâches (scie circulaire, visseuse, peinture) ou de machines/robots capables de réaliser ces 3 opérations. Dans les deux cas, l’ordre découpage, vissage puis finalement peinture doit être respecté (il s’agit d’une “gamme opératoire”).

Si ces opérations sont réalisées par des robots, ces derniers doivent également être renseignés sur les paramètres de configuration des opérations (*largeur de découpage du bois, nombre et positions exactes des vis sur les planches, nombre total de planches par porte, ou encore couleur et quantité de peinture à projeter*).

⇒ Ainsi le document CAD est réalisé en respectant, notamment, une échelle.

Le BOM généré permet également de vérifier, par exemple, si certains éléments (*matières premières ou éléments déjà manufacturés*) sont présents ou manquant dans l’inventaire. Certaines décisions peuvent ainsi être prises (*rachat, réutilisation, etc.*).

## Partie III

# Systèmes dédiés et Intégration

Ayant à présent une vue d'ensemble des différents outils à la disposition des industries et des concepteurs de systèmes, nous allons aborder **leur intégration et leurs interactions**. Cette nouvelle vision nous permet de mieux comprendre **l'utilité pratique** de ces différents concepts. Les différents thèmes abordés seront :

- Les systèmes qui **intègrent et synchronisent** les différentes machines connectées, les logiciels de contrôle et simulation ou encore les bases de données à l'aide du Cloud et des services sont appelés “**Cyber-Physical Systems (CPS)**”. Dans le contexte de l'industrie et de la production, on parle alors de “**CPPS**” et “**CPIS**”.
- Hormis les bases de données, la simulation et les jumeaux numériques, l'**Industrie 4.0 a favorisé l'apparition de nouveaux logiciels** de gestion, planification et contrôle au sein des CPPS : les **ERP-II** et les “**Advanced Planning Systems (APS)**”. Ces derniers viennent combler les nouveaux manques des systèmes plus classiques appelés “*Enterprise Resource Planning (ERP)*”.
- Finalement, les **capacités de synchronisation du Cloud** n'ont pas servi uniquement à la création de logiciels distants et répartis. En effet, le principe s'est généralisé à toute l'industrie pour proposer un modèle d'**usines** également **décentralisées et distantes**. On parle alors de “**Cloud Manufacturing (CMfg)**”.

## III.1. Les modèles CPPS/CPIS

### Cyber-Physical Systems appliqués à l'Industrie et la Production

**Définition :** Un “Système Cyber-Physique (CPS)” est un système de collaboration entre entités virtuelles fortement connectées entre elles (*notamment des logiciels*) et avec éléments physiques, échangeant de l’information via services et notamment, des services internet (ou “webservices”).

Un CPS appliqué à l’industrie (**CPIS**), ou plus particulièrement à la production (**CPPS**), est ainsi le système qui intègre l’ensemble des concepts vus dans la première partie, ainsi que les logiciels manufacturiers ([voir sections III.4 et III.5](#)) pour former l’écosystème technologique complet de l’usine intelligente. Les CPS représentent l’avancée récente la plus significative dans le domaine des technologies de la communication.

**Intégration des concepts :** Comme on peut le voir sur les figures ci-contre, les CPS utilisent le Cloud pour les traitements complexes et le partage des données, l’IoT pour franchir la barrière entre les mondes physique et virtuel ainsi que les jumeaux numériques et simulations comme principal outil d’analyse, prévision et prise de décisions mais aussi pour garantir la convergence constante entre les données réelles et les décisions prises au niveau logiciel.

**Architectures Cloud :** De nombreux modèles d’architectures logiques ont été proposés comme l’architecture **5C** détaillée dans [5]. Cependant, la plupart des architectures pour CPPS basés sur le Cloud respectent les trois couches suivantes : Les ressources physiques (“*Multi-Sensor System*”); Le “*Cyberspace*”, composé d’un ou plusieurs serveurs locaux utilisés pour la prise de décision et le stockage de bases de données; Le “*Cloud*” à travers lequel on effectue les diagnostics et calculs complexes.

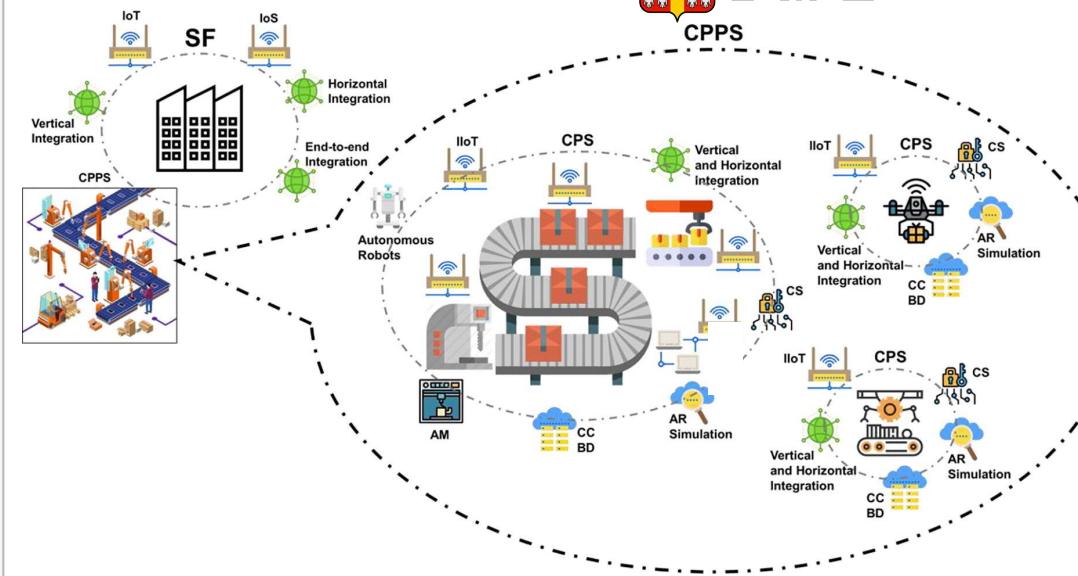
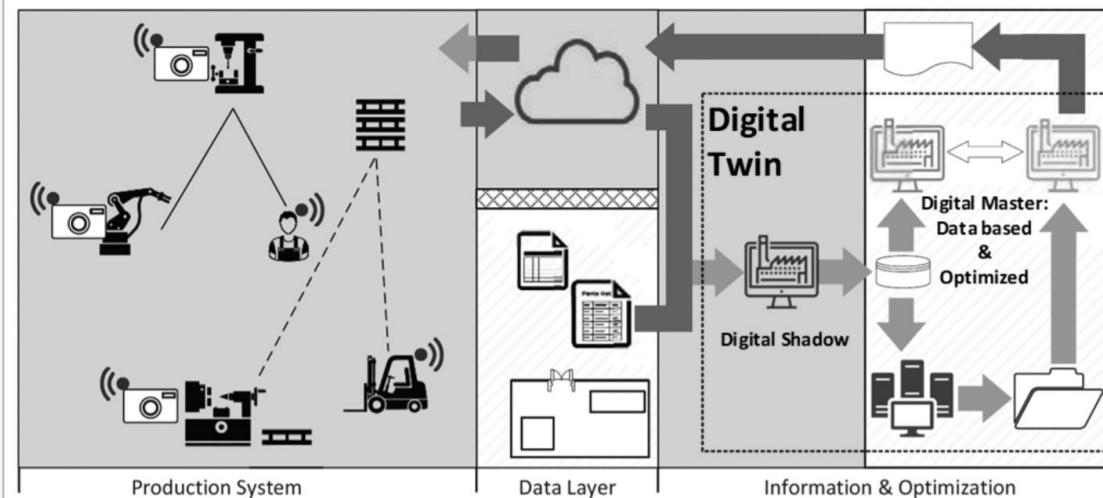


Figure 19 : Architecture générale pour usines intelligentes  
Extrait de [1]

Figure 20 : Digital Twin, élément central des CPPS  
Extrait de [7]



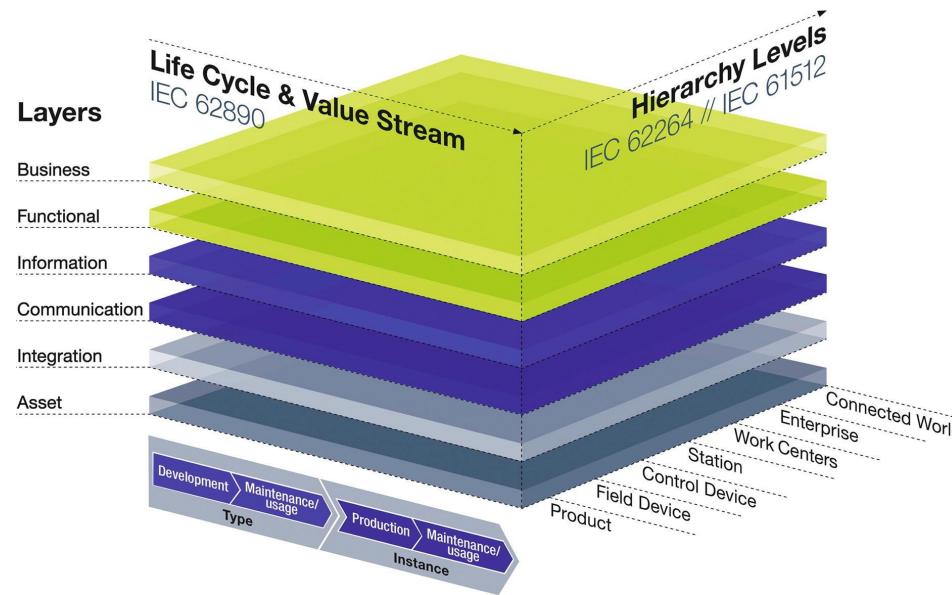


Figure 21: Modèle de référence “RAMI 4.0”

Extrait de [1]

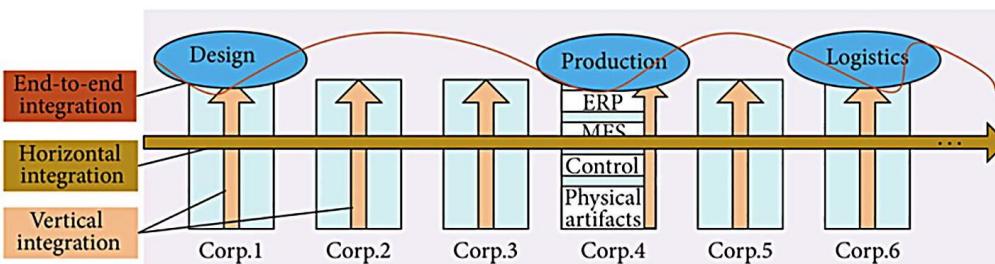


Figure 22 : Intégration horizontale et verticale

Extrait de [1]

## III.2. Intégration dans l'I4.0

### Intégration “Verticale”, “Horizontale” et “End-to-End”

La cohérence d'un CPS et la bonne orchestration d'une telle quantité de ressources hétérogènes, de données, de personnes et départements aux rôles différents, de processus, de décisions et hiérarchies doivent reposer sur des structures d'intégration et de collaboration. Les différentes visions de cette intégration sont très similaires aux axes du modèle de référence RAMI 4.0 vu précédemment ([voir section I.2](#)).

**“Vertical Integration”** : Rejoint les couches verticales du modèle. Il s'agit de l'échange d'informations (des données brutes et spécialisées des couches basses vers des informations agrégées et globales en haut) et d'ordre/contrôle (du haut vers le bas) entre les niveaux hiérarchiques de décision au sein d'une entreprise. Cette vision est valable en termes de départements et rôles humains (données des opérateurs vers l'administration), mais également en termes de ressources machines (données capteurs vers les serveurs et logiciels d'aide à la décision). La numérisation des données est essentielle l'intégration verticale.

**“Horizontal Integration”** : Correspond à l'axe horizontal droit. Il s'agit de la collaboration (partage de données, réalisation combinée, etc.) entre éléments physiques (capteurs), processus et calculs, rôles et départements du même niveau hiérarchique. On parle souvent de l'intégration horizontale pour désigner le partage, même, entre entreprises différentes (notamment avec l'*open source* et l'*ouverture d'API de services*).

**“End-to-End Integration”** : Correspond à l'axe horizontal gauche et donc une intégration également non-hiérrarchique. Il s'agit, dans les décisions prises à une étape (*dans le temps ou le cycle de vie d'un produit, projet, etc.*) de tenir compte de son impact et effets dans les décisions et problèmes des autres étapes (*mesurer en premier lieu, puis possiblement modifier*). Par exemple, des choix de conception peuvent impacter la capacité de l'entreprise à produire dans les délais ou à satisfaire, plus tard, les clients durant la vente.

# Questions et réflexion

Parce que rien ne vaut un bon quizz !

## Question 11

Dans le contexte des CPPS et notamment des Cobots, quel est l'outil ou moyen le plus évident pour intégrer l'être humain (*employés principalement mais aussi clients, etc.*) ? Quel exemple d'intégration horizontale de cet outil ou de collaboration avez-vous déjà pu avoir accès, même hors du contexte de l'industrie ?

## Réponse :

L'outil le plus évident reste le téléphone intelligent (“smartphone”) ! En effet, cet outil, que tout le monde possède, est équipé de :

- Capteurs nombreux permettant de capter diverses informations : *proximité, température, humidité, vitesse, GPS, etc.*
- D'interfaces homme-machine pour la prise de décision et pour être notifié : *microphone, écran, lampe torche, son, etc.*
- D'informatique embarqué pour faire des traitements locaux (notamment de l'IA).
- D'une capacité à communiquer l'information via internet (*Wifi, 3G, etc.*).

La collaboration entre plusieurs smartphones est utilisée notamment pour la détection du nombre de voitures sur les routes (Google Maps®) et de leur vitesse moyenne (“congestion”).



Les différents capteurs d'un smartphone

Adapté de [13]

### III.3. Le Cloud Manufacturing (CMfg) [1/2]

*Un nouveau modèle de production*

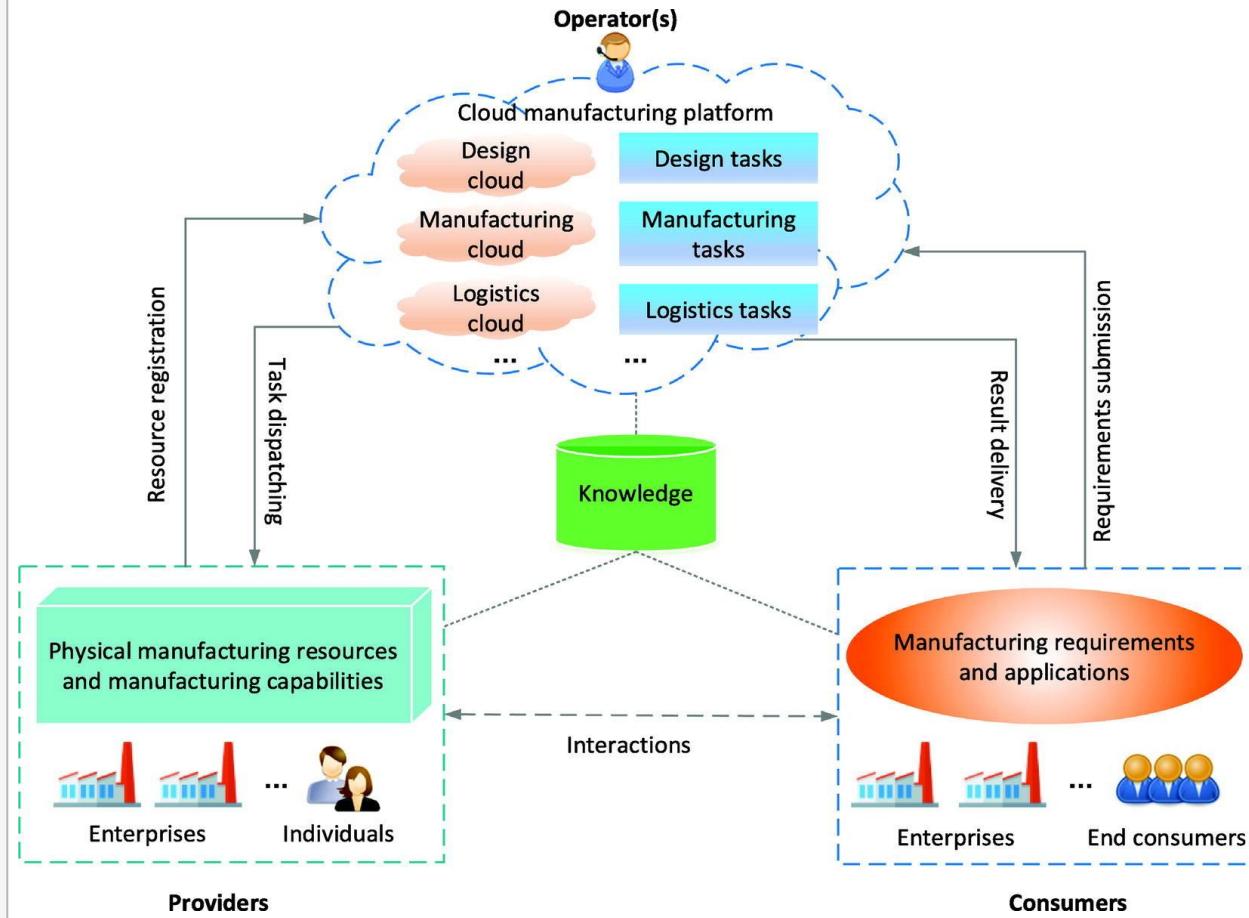
**Un nouveau modèle d'usines distribuées et distantes étend les SF (2010) :**

Selon ce modèle, les ressources et les machines sont enregistrées en tant que services cloud par des **fournisseurs** auprès des **opérateurs**. Ainsi, un **consommateur** ne se réfère pas directement aux usines mais aux **opérateurs** qui utilisent les ressources des usines selon le besoin. L'ordonnancement et la planification sont des défis majeurs d'une telle architecture. En effet, les objectifs sont plus diversifiés que traditionnellement (*équilibre des charges, impact écologique dû à la distance et aux transports, etc.*).

#### Les intervenants

- **Les fournisseurs** : propriétaires des ressources physiques (*entrepôts, machines de production, camions, etc.*), ils reçoivent leurs ordres de production des opérateurs et à travers le Cloud (*appel de services*).
- **Les opérateurs** : propriétaires de la plateforme Cloud, ils reçoivent les demandes des clients (*peuvent réaliser les étapes de conception*) et envoient les ordres de production aux fournisseurs enregistrés.
- **Les consommateurs** : sont des clients ayant une demande (*produits à réaliser*).

**Cloud Computing (CC) versus Cloud Manufacturing (CMfg)** : L'usage du CC permet d'utiliser à la demande des ressources de calcul et de partager de l'information entre systèmes distants. L'usage du CMfg (repris de l'IaaS) permet de redimensionner, de façon à produire sans limite de ressources (*nombre de machines, espace de stockage*).



**Figure 23 : Le modèle “Cloud Manufacturing”**

Extrait de [1]

### III.3. Le Cloud Manufacturing (CMfg) [2/2]

#### Services et fonctionnement du CMfg

**L'importance de la “connaissance” :** La possibilité d'organiser et orchestrer (*de manière autonome*) les ressources des fournisseurs pour un projet commun n'est possible qu'à travers l'exploitation de “*connaissances*” haut niveau (*normes, protocoles de production, charges et capacités des différentes usines, algorithmes de planification utilisés, etc.*).

**Différents types de fournisseurs :** Généralement, comme on peut le voir sur la Figure 24, les fournisseurs sont spécialisés dans un domaine et fournissent uniquement des ressources qui y sont liées. Les quatre principaux domaines sont les **industriels** (*usines de production, conception, assemblage, etc.*), les **fournisseurs d'outils spécialisés** (*voir la section II.5 sur les robots, imprimantes 3D etc.*), les **sociétés de logistique et transport** (*camions, bateaux et trains principalement*), et les **fournisseurs de services informatiques et réseaux**.

⇒ Le CMfg dépasse les limites d'un modèle purement technologique :

- Accès aux **Petites et Moyennes Entreprises (PMEs/SMEs)**, ayant des moyens de production limités, à des projets de grandes ampleurs et grands budgets.
- Flexibilité et gestion efficace provoquant une **réduction des coûts** pour les clients mais également pour les fournisseurs.
- Introduction concept de “**Pay-As-You-Go (PAYG)**” (usage d'une capacité limitée au paiement fait en avance uniquement) dans l'industrie, plutôt que le système plus classique de **contrat** (mesuré en durée et capacité requises pour l'ensemble du projet).

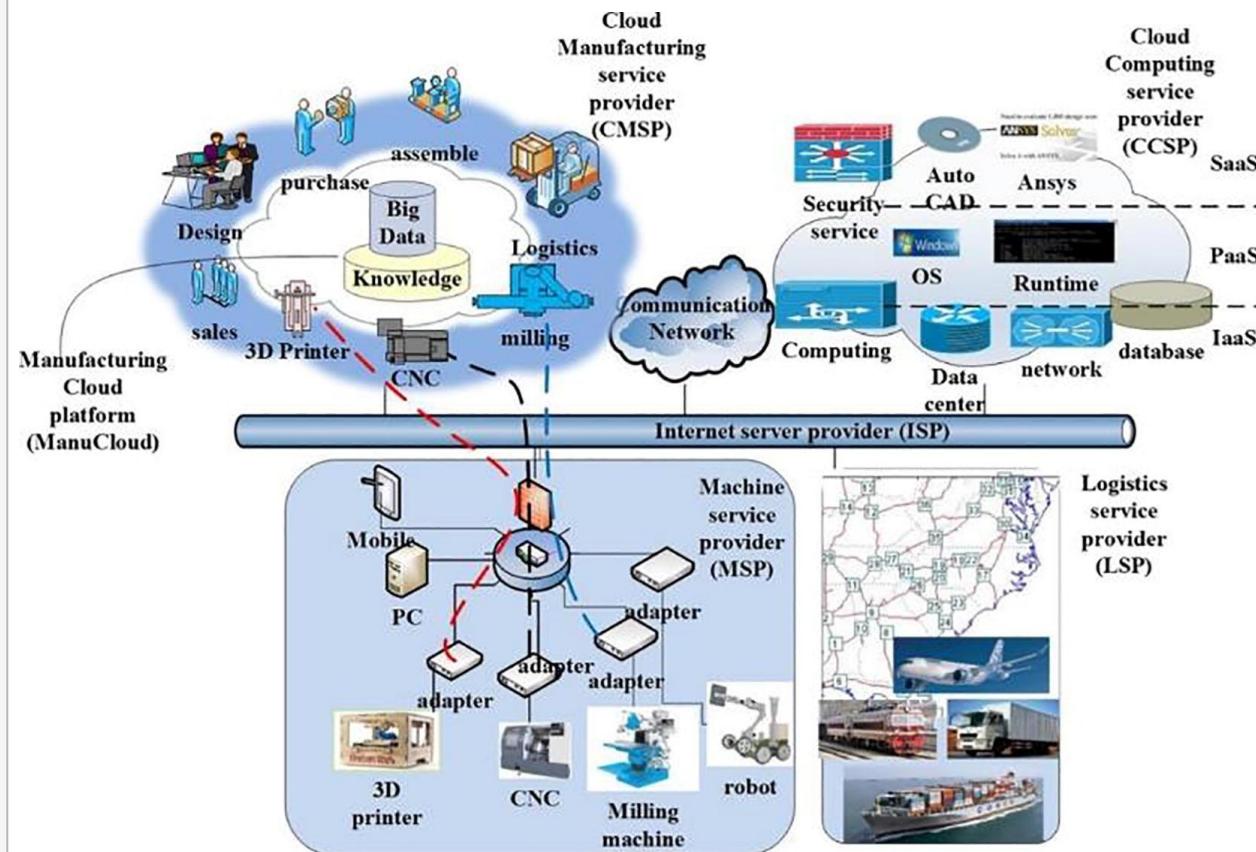


Figure 24 : Les services du “Cloud Manufacturing”

Extrait de [1]

# Questions et réflexion

Parce que rien ne vaut un bon quizz !

## Question 12

“Fastbrication” souhaite à présent se concentrer uniquement sur les tâches de conception et relation client et décide donc d'utiliser le **Cloud Manufacturing** pour déléguer ses activités de production, assemblage et transport. **Proposez un scénario dans ce contexte** (reprendre l'exemple de la fabrication de portes en bois de la question 10), détaillez les fournisseurs, opérateurs et étapes chronologiques à suivre pour cela.

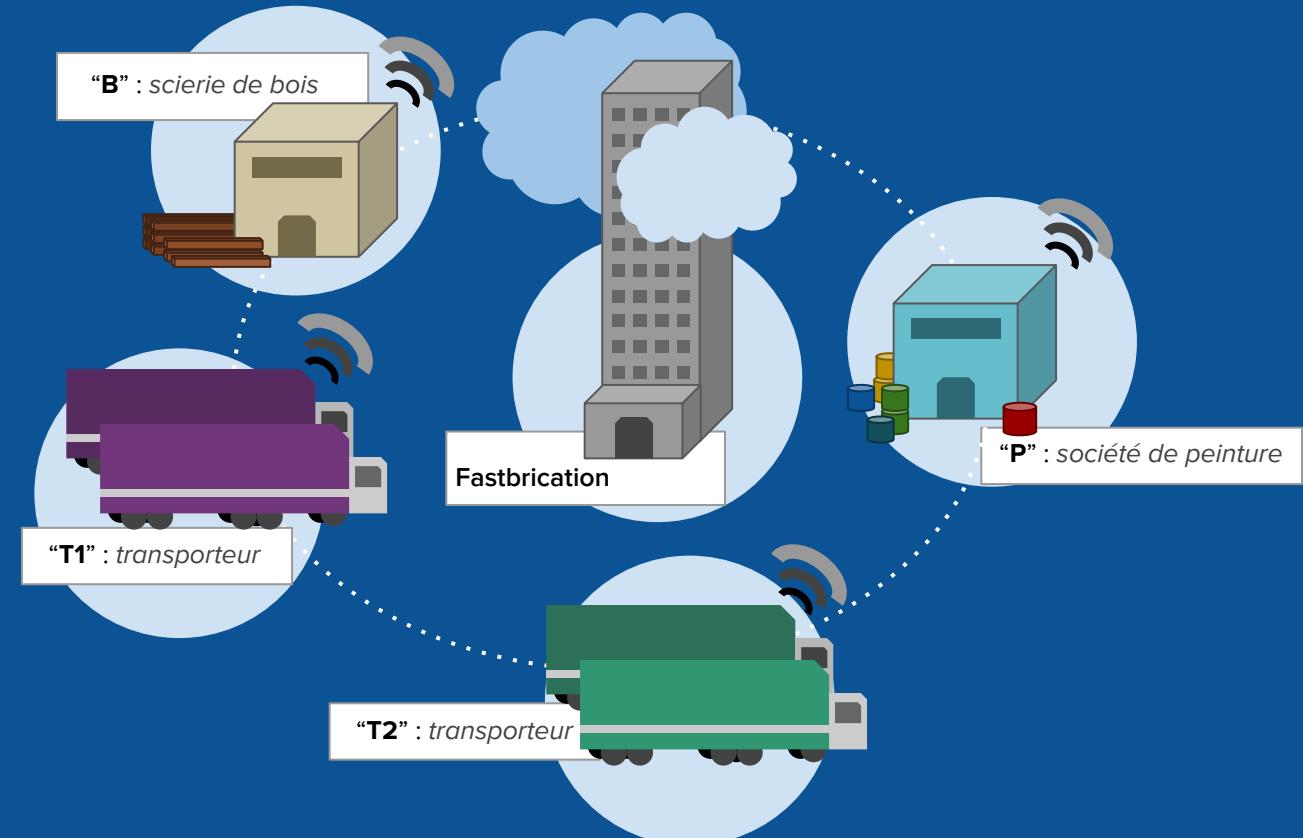
## Réponse :

Dans un premier temps, l'opérateur (dans ce cas “Fastbrication”) doit proposer à des industriels de devenir fournisseurs de services spécialisés dans certaines opérations de production ou de transport (*par exemple ici les sociétés B, P, T1 et T2*).

Pour cela, ces fournisseurs doivent être capables de transmettre les informations nécessaires à la prise de décision faite par l'opérateur (*leur charge actuelle, la position actuelle des transporteurs, le nombre de machines/camions actifs, les stocks, etc.*).

Les services nécessaires correspondent ici aux opérations vues dans la question 10 : peinture (P), découpage et assemblage avec vis (B) auxquels s'ajoute le service de déplacement entre les usines (T1 et T2). Comme on peut le voir, plusieurs sociétés peuvent proposer les mêmes services.

Ainsi, les clients ne communiquent qu'avec l'opérateur qui pourra fournir n'importe quel produit à hauteur des services disponibles (*capacité de production des fournisseurs*).



## Pourquoi ce rappel ?

Pour comprendre l'apparition des APS et ERP-II, il faut revenir sur les fonctionnalités des progiciels plus anciens appelés “Enterprise Resources Planning (ERP)”

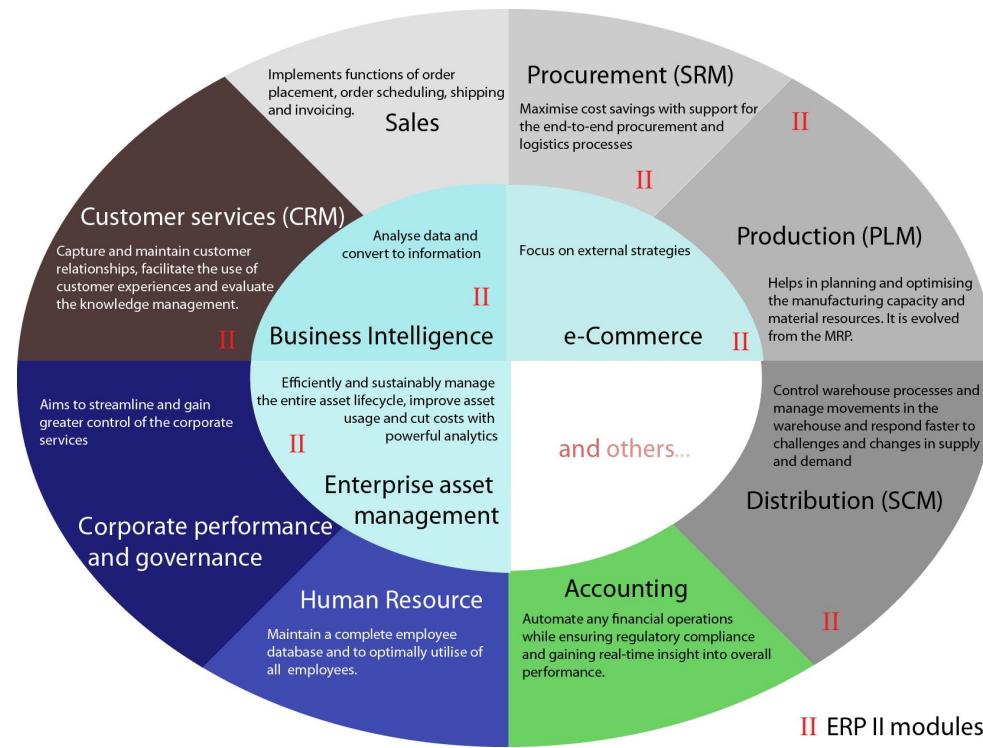


Figure 25 : Modules communs d'un ERP

Extrait de Wikipedia

## III.4. Les ERP-II et APS [1/2]

Rappel sur les Progiciels de Gestion Intégrée (PGI ou ERP)

**Utilité et apports** : Un ERP permet une meilleure gestion, visibilité et traçabilité des **ressources** (*physiques, humaines et financières*) de l'entreprise, de ses **processus** (*de production, de vente, etc.*) et de son **environnement** (*clients, fournisseurs, normes, etc.*). Un ERP se doit également d'être **personnalisable** et **modulaire** pour s'adapter aux **caractéristiques** de l'entreprise (*taille, type, etc.*).

⇒ La notion **d'intégration** au sein d'un environnement ou logiciel **unique** permet d'avoir une **cohérence complète** des données (*exemple, un achat de matières premières impacte le planning, l'inventaire, les comptes financiers, etc.*).

**Définition** : un ERP est ainsi un Système d'Information (SI) qui se doit de garantir l'unicité de l'information, d'être d'un concepteur unique, de proposer une mise à jour temps-réel, de fournir des fonctionnalités d'audit et de couvrir une ou plusieurs fonctions de gestion de l'entreprise.

**Modules** : Comme on peut le voir sur la Figure 25, avant la version ERP-II, les principaux modules d'un ERP sont : **Ventes**, **Relation clients**, **Ressources Humaines** (*congés, recrutements, etc.*), **Comptabilité** (*gestion des comptes et entrées-sorties*), **Production Manufacturière** (*BOM des produits, gestion des commandes et ordres de fabrication, planification des ressources machines MRP, inventaire, etc.*) et **Planification de Projets** (*Gantt*).

**Inconvénients** : Les principaux inconvénients des ERP sont liés aux **coûts de mise en place et mise à jour**, la **durée de personnalisation** (*adaptation au fonctionnement de l'entreprise, migration des données historiques*) et de **prise en main par les employés** (*formation, confiance et volonté de l'utiliser*).

## III.4. Des ERP vers les ERP-II et APS [2/2]

### Une nouvelle génération de systèmes d'aide à la décision

Les ERP ont dû évoluer pour rester fonctionnels dans le contexte de l'I4.0 et des nouvelles technologies. Ainsi un ERP-II tient compte de l'IoT et de la capacité à obtenir des informations précises en temps réel (par exemple pour le réordonnancement de la production après détection d'un évènement). Un ERP-II tient également compte des nouvelles méthodologies de l'IA, de l'optimisation, des Big Data, du Cloud et de la simulation pour faire de l'analyse de données, offrir des planifications plus élaborées et prendre des décisions autonomes. Finalement un ERP-II doit respecter les **6 principes du "smart"**: la décentralisation, la capacité temps-réel, une orientation vers les services, une modularité, une virtualisation et une interopérabilité.

⇒ Les ERP-II étant plus récents, ont tendance à utiliser une *interface web*.

#### Les APS : Advanced Planning [and Scheduling] Systems

Module des ERP-II (voir Figure 26), les APS sont une nouvelle manière de planifier, de manière intégrée, les projets, les activités de conception, transport ou encore production et l'ordonnancement des opérations bas niveau. Cette intégration permet de tenir compte de l'impact et effets des décisions haut et bas niveau. Un APS a également pour vocation d'utiliser l'apprentissage, la simulation ou les méta-heuristiques pour offrir une planification robuste aux imprévus, proche de l'optimale, personnalisée selon les besoins (objectifs différents entre entreprises) ou encore flexible aux données hors-système (décisions humaines, travail hors-horaires, etc.).

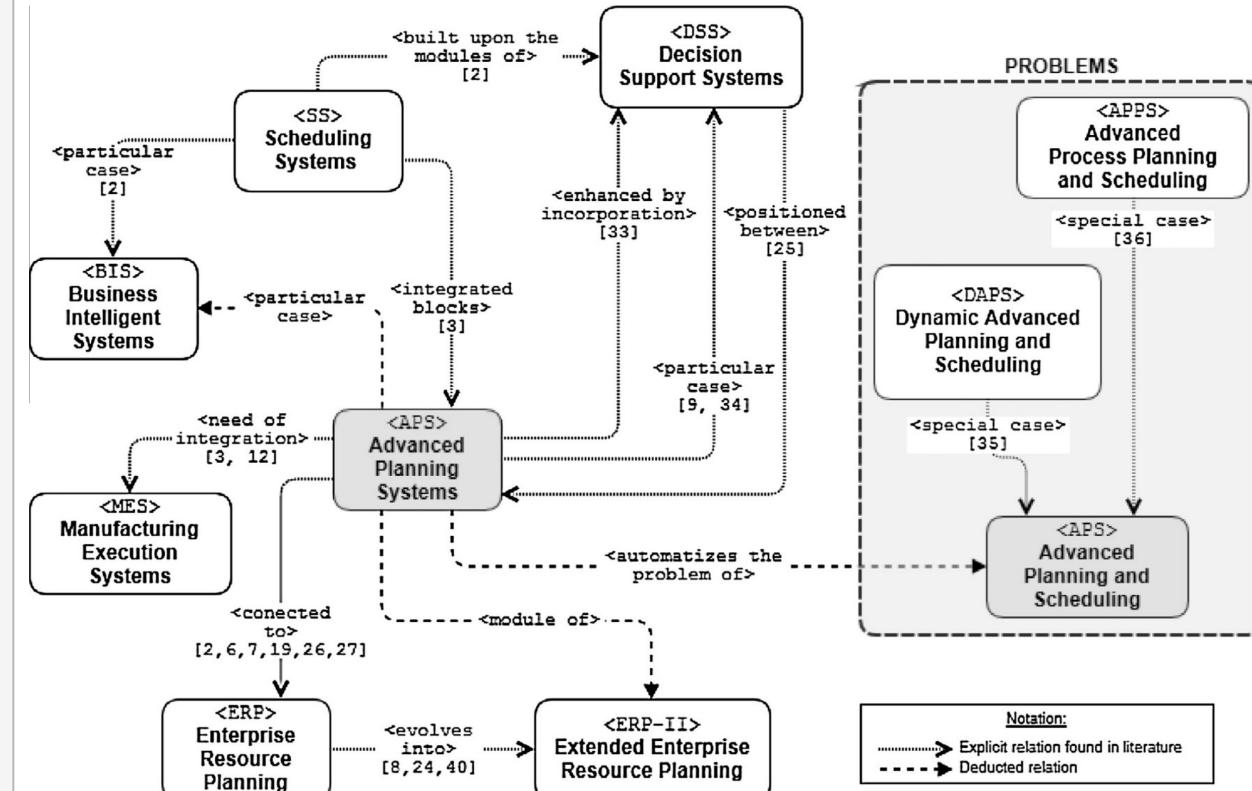


Figure 26 : Classification et relations entre les progiciels de planification et ordonnancement

Extrait de [11]

## III.5. Logiciels complémentaires

### Analyse, visualisation et présentation de données

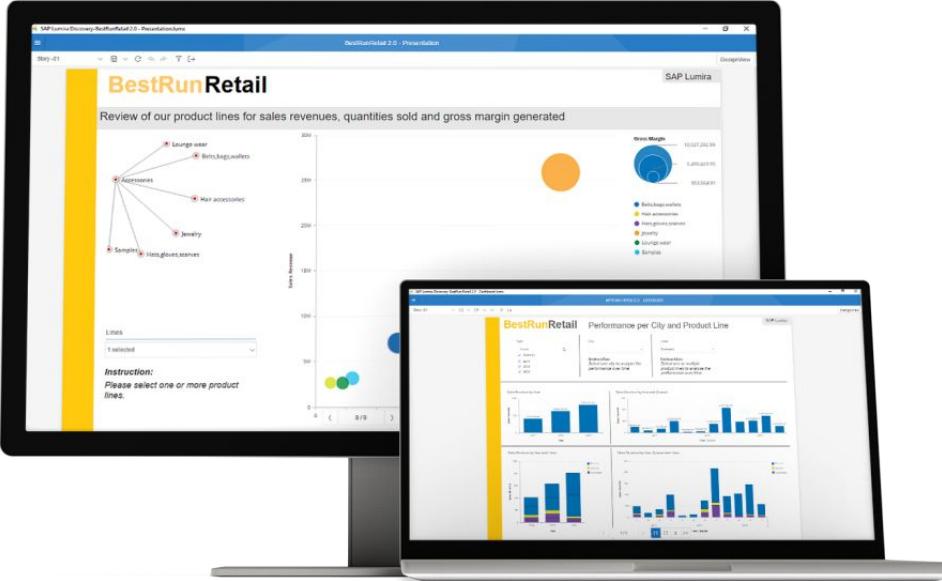


Figure 27 : Logiciels d'analyse de données

Extrait du site officiel de "SAP Lumira"

Mis à part les systèmes de planification (APS) et de gestion des ressources matérielles, humaines et financières (ERP, ERP-II), les fournisseurs de progiciels proposent aujourd’hui tout une gamme d’outils d’aide à la décision essentiels pour l’administration des industries. C’est nouveaux outils sont généralement **construits comme des modules complémentaires qui exploitent les données financières, de production, etc.** pour faire de l’analyse, notamment prévisionnelle.

**Exploitation des données pour la prise de décision :** Certains outils permettent plutôt de présenter les données et statistiques (sous forme de *tableaux de bord*, de *graphiques*, *tables* et *indicateurs de performance*) pour le **décisionnaire humain** tandis que d’autres utilisent des techniques de l’IA (*optimisation*, *apprentissage*, *simulation*, etc.) pour proposer des décisions et présenter leur **impact prévisionnel**. Finalement, certains **systèmes autonomes** peuvent même agir sans prendre l’avis de l’homme.

⇒ En pratique l’utilisation de logiciels ERP et APS ne permet pas d’avoir, en temps-réel, une vision globale de la **situation actuelle**, **des causes** de cette situation, des **choix disponibles** et de leurs **impacts**. Cette vision se crée principalement sur **l’analyse des liens et relations entre l’ensemble des informations** disponibles (ce qui rejoint les notions d’intégration vus en section III.2). Ces informations incluent les **données actuelles, historiques et futures**.

**Dans le commerce :** Ce type de logiciels, généralement classés sous l’appellation “*Business Intelligence (BI)*”, sont aujourd’hui très nombreux dans le commerce. On peut notamment citer “Microsoft Power BI”, “Tableau”, “SAP Lumira Discovery” et “SAP Analytics Cloud”.

# Questions et réflexion

Parce que rien ne vaut un bon quizz !

## Question 13

Citer un avantage d'opter pour une version web (SaaS) d'un ERP ou APS en comparaison avec une version "Desktop" (client lourd) plus classique.

## Question 14

Citer une utilisation de l'IoT (*et plus particulièrement des capteurs*) dans le cadre d'un APS.

## Question 15

Mis à part les différences fondamentales entre planification de projets haut niveau et ordonnancement détaillé des opérations (*durée de l'horizon temporel, niveau d'agrégation de l'information, objectifs, contraintes et ressources pris en compte*), quelle nouvelle différence apparaît dans le contexte de l'Industrie 4.0 ?

## Question 16

Pourquoi utiliser les techniques d'optimisation propres à l'Intelligence Artificielle (*recherche heuristique, simulation, apprentissage, algorithmes basés sur les populations, etc.*) dans la planification et les APS ?

**Réponse (13)** : Un avantage certain est la mise à jour automatique, sans effort du client, qui en allumant son navigateur web, à directement accès à la nouvelle version. Dans le cas d'une application de bureau, le client doit télécharger et réinstaller la nouvelle version (*avec des opérations de transferts de données de préférences, etc.*). Cette nouvelle version peut par ailleurs être incompatible avec la configuration matérielle et système d'exploitation du client !

**Réponse (14)** : L'IoT permet d'acquérir la situation actuelle du plancher de production. Si cette situation est en contradiction avec la planification théorique faite par l'APS (*retard*), cela peut déclencher une procédure de replanification.

**Réponse (15)** : Une des principales différences est l'utilisation qui sera faite de cette planification. La planification haut niveau est généralement destinée aux êtres humains et départements et donc pour de la visualisation uniquement. Par contre, l'ordonnancement bas niveau peut être exploité automatiquement par les machines et robots comme un ordre auquel il faut obéir.

**Réponse (16)** : Les problèmes de planification et d'ordonnancement sont complexes dans le sens où chercher la solution optimale nécessite un très grand nombre d'opérations, de tests et de calculs. Cela est dû aux contraintes (*budget, temps, capacité des machines*) et natures des solutions (*séquences*) qui provoquent une explosion combinatoire de possibilités à tester (*on parle de problème NP-difficile*). Ce très grand nombre de calculs rend les logiciels lents, voire inutilisables !

C'est dans ce contexte que les techniques d'optimisation et de recherche intelligente d'une bonne solution (*proche de l'optimal*), sans prendre le temps de tester toutes les solutions possibles, prend tout son sens !

---

## Partie IV

# Conclusion

---

## I.1. Conclusion

*Une vue d'ensemble des moyens à la disposition de l'industrie*

Les **nouvelles industries (4.0)** sont caractérisées par l'apparition de nouveaux modèles commerciaux, organisationnels, etc. possibles uniquement par l'**exploitation des nouvelles technologies** (*Cloud, objets connectés et IoT, robots autonomes, imprimantes 3D, etc.*) combinées aux **méthodologies récentes d'optimisation et de prise de décision** (*apprentissage machine, simulation, Big Data et No-SQL, etc.*). Cette exploitation est construite autour d'une **intégration au sein de logiciels** (*APS, ERP-II*) et de **systèmes complets** (*CPPS, Cloud Manufacturing*). Les usines utilisant ces technologies, méthodologies, systèmes et logiciels sont appelées "**Smart Factories**".

Toutes ces notions sont **indépendantes et existent en dehors même du secteur de l'industrie** (*L'IoT est utilisé dans l'agriculture, l'apprentissage machine dans le domaine du jeu vidéo et les Big Data dans les réseaux sociaux, etc.*) mais sont également fortement liées. En effet, c'est leur **utilisation combinée**, et la recherche d'**objectifs communs atteints par des moyens complémentaires** qui rend possible l'**impressionnante performance** de l'industrie 4.0.

L'industrie 4.0 est ainsi le résultat d'un **travail de conception** faisant intervenir des **compétences théoriques et pratiques très diverses** : *informatique embarqué et robotique, réseau, génie industriel, planification de projets, gestion et administration d'entreprises, optimisation et mathématiques, IA, vision numérique, etc.*

⇒ Le grand défi réside ensuite dans la bonne utilisation de ces nouvelles ressources !

# Références complémentaires

- [1] Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(3), 899-919.
- 
- [2] Alshuqayran, N., Ali, N., & Evans, R. (2016, November). A systematic mapping study in microservice architecture. In 2016 IEEE 9th International Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA) (pp. 44-51). IEEE.
- [3] Dragoni, N., Giallorenzo, S., Lafuente, A. L., Mazzara, M., Montesi, F., Mustafin, R., & Safina, L. (2017). Microservices: yesterday, today, and tomorrow. In Present and ulterior software engineering (pp. 195-216). Springer, Cham.
- [4] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022.
- [5] Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3, 18-23.
- [6] Liu, Y., Wang, L., Wang, X. V., Xu, X., & Zhang, L. (2018). Scheduling in cloud manufacturing: state-of-the-art and research challenges. *International Journal of Production Research*, 1-26.
- [7] Rodič, B. (2017). Industry 4.0 and the new simulation modelling paradigm. *Organizacija*, 50(3), 193-207.
- [8] Rosen, R., Von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2015). About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 567-572.
- [9] Uhlemann, T. H. J., Lehmann, C., & Steinhilper, R. (2017). The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0. *Procedia Cirp*, 61, 335-340.
- [10] Vidoni, M. C., & Vecchietti, A. R. (2015). A systemic approach to define and characterize Advanced Planning Systems (APS). *Computers & Industrial Engineering*, 90, 326-338.
- [11] Vidoni, M. C., & Vecchietti, A. R. (2016, April). Towards a Reference Architecture for Advanced Planning Systems. In *ICEIS (1)* (pp. 433-440).
- [12] Wang, X. V., Givehchi, M., & Wang, L. (2017). Manufacturing system on the cloud: a case study on cloud-based process planning. *Procedia CIRP*, 63, 39-45.
- [13] Majumder, S., & Deen, M. J. (2019). Smartphone sensors for health monitoring and diagnosis. *Sensors*, 19(9), 2164.