



L'USINE DU FUTUR POUR LES INDUSTRIES DE PROCÉDÉS

Livre Blanc

Société Française de Génie des Procédés



- 2019 -



Avant-propos

Les Assises Nationales du Génie des Procédés, organisées au printemps 2017, ont confirmé la place de « l'usine du futur » au premier rang des grands enjeux industriels et sociétaux de la discipline¹.

Dès mai 2016, la SFGP a mis en place une commission « usine du futur », associant des industriels – utilisateurs finaux et ingénieries – des associations professionnelles ou leurs centres techniques (France Chimie, CETIM, ANIA, PROFLUID) ainsi que les pôles universitaires historiques du génie des procédés en France (ENSIC Nancy & Toulouse INP-ENSIACET) afin de promouvoir la contribution du Génie des Procédés dans la conception de l'industrie de demain.

L'**usine du futur** sera **flexible** et s'adaptera aux fluctuations des besoins – en s'appuyant sur une conception **modulaire** des équipements – à la variabilité de **matières premières biosourcées** ou issues du recyclage (**économie circulaire**) et à la **transition énergétique**.

Elle sera **numérique** et utilisera pleinement les opportunités offertes par la connectivité des équipements (*Internet of Things*), les capacités de calcul (*Big Data*) pour proposer des nouvelles stratégies de **contrôle des procédés**, pour développer des **modèles prédictifs** pour la **maintenance des équipements**, et pour **optimiser les flux** de production. Elle utilisera l'impression 3D (*additive manufacturing*) pour la production et la maintenance d'équipements, et **l'intensification des procédés** pour proposer de nouvelles solutions technologiques ou modes de production.

Elle sera davantage **responsable**, respectueuse de l'**environnement**, intégrée dans un écosystème industriel et économe en ressources naturelles : matières premières, eau, énergie.

L'usine du futur se conçoit aujourd'hui. La SFGP a déjà commencé et continuera à apporter sa contribution aux grandes **initiatives françaises et européennes** et à ouvrir ses groupes de travail aux autres disciplines ou secteurs partageant la même **ambition pour notre industrie**. Ce document vise, d'une part, à partager la synthèse de nos réflexions avec les différents acteurs de la communauté du génie des procédés (industriels, universitaires et étudiants) ainsi qu'avec les responsables politiques et, d'autre part, à promouvoir la discipline auprès des jeunes générations.

Dominique HORBEZ

Vice-président industriel de la SFGP
Animateur de la commission *Usine du futur*

1 : *Le Livre blanc du Génie des Procédés et sa synthèse sont téléchargeables sur le site de la SFGP : <https://www.sfgp.asso.fr/2018/05/30/livre-blanc-du-genie-des-procedes/>*

Qu'est-ce que l'industrie de procédés ?

L'industrie de procédés se définit habituellement par opposition à l'industrie manufacturière, qui produit des « objets » unitaires par assemblage ou façonnage : produits intermédiaires (« business to business ») ou produits finis destinés au consommateur final (« business to consumer ») : automobiles, ordinateurs, appareils électro-ménagers, vêtements ...

L'industrie de procédés transforme la matière par des processus chimiques ou physiques. Ses productions peuvent être destinées à fournir l'industrie manufacturière en matières premières et en énergie (fibres textiles, matières plastiques, produits chimiques, carburants) ou, de façon analogue, servir les clients finaux, généralement après une étape de conditionnement ou d'emballage (produits pharmaceutiques, cosmétiques, alimentaires...), ou directement par une alimentation en réseau (eau, gaz...).

L'industrie de procédés couvre donc des secteurs aussi larges que la chimie et la parachimie (formulation), la pharmacie, l'énergie et les fluides industriels, l'environnement (eau, air, sols, déchets), l'agro-alimentaire et les biotechnologies ...

Sommaire

1	L'usine du futur : Quels enjeux pour les industries de procédés ?	5
	Quel contexte pour "l'usine du futur" ?	
	L'usine du futur est en construction !	
	Quels enjeux pour les industries de procédés ?	
2	De la conception à l'exploitation : panorama d'initiatives industrielles	9
	Le digital dans la conception des procédés	
	Le digital dans l'exploitation des procédés	
	Des procédés éco-efficients	
	L'intensification des procédés	
3	Les compétences de l'ingénieur du futur	27
	Le rôle de l'ingénieur procédés face aux attentes de l'industrie du futur	
	Quelle formation pour l'ingénieur procédés ?	
4	Challenges & opportunités	35
	<i>La vision de la SFGP</i>	39

L'usine du futur : Quels enjeux pour les industries de procédés ?

Intégration des nouvelles technologies numériques (Big data, intelligence artificielle, robotique, fabrication additive...), intensification des procédés, conception modulaire, maîtrise de la sécurité et des risques environnementaux, acceptation sociétale sont parmi les nombreux enjeux associés au concept d'usine du futur. Il s'agit bien d'une quatrième révolution industrielle, issue de la transformation numérique et répondant à des attentes nouvelles de la société. Cette révolution est rendue possible par la puissance sans cesse accrue des ordinateurs et la performance des technologies. Pour situer la réflexion menée par la SFGP, il nous semble important de rappeler le contexte dans lequel s'inscrit cette mutation industrielle. Nous proposerons une définition de "l'usine du futur", dont l'industrie manufacturière s'est déjà emparée mais qui, pour une large part, reste encore en devenir dans les industries de procédés, qui se sont pourtant approprié de longue date les outils de modélisation et de simulation comme la conception assistée par ordinateur (CAO) ou la CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Enfin, dans ce référentiel ainsi précisé, il nous faudra identifier les réels enjeux associés à cette révolution industrielle, pour le citoyen, l'économie et la société.

Quel contexte pour "l'usine du futur" ?

La réponse immédiate est celui de la transformation numérique : l'exploitation des "**Big data**", à la base même de l'Intelligence Artificielle, a de fait déjà transformé des pans entiers de l'économie, dont le secteur industriel bien-sûr.

Qui aujourd'hui accepterait d'attendre une livraison de produit sans données de suivi, sans informations sur son origine, sur sa fabrication ? La partie très visible de la transformation numérique de l'industrie est sans doute la chaîne d'approvisionnement (supply chain) ; l'ordonnancement des productions pouvant être optimisé par le partage des données en amont, côté fournisseurs, en aval, côté clients.

C'est tout le processus de fabrication, le "*manufacturing*", qui s'en trouve affecté : l'analyse des données en continu par des algorithmes de plus en plus efficaces, la conception d'un "jumeau numérique" pour optimiser la maintenance et corriger les déviations de procédé, permettent des

gains nouveaux de productivité, de qualité, de traçabilité. Les contraintes sanitaires et environnementales du système productif sont mieux respectées et l'image de l'entreprise améliorée.

Il en découle une transformation importante des métiers eux-mêmes, le développement de la robotique cristallisant les craintes de voir disparaître des fonctions entières assurées aujourd'hui par une main d'œuvre peu qualifiée : production automobile, tri de déchets, transport de marchandises... De nouveaux métiers se créent : data scientist, data officer... Les métiers classiques d'ordonnancement, de maintenance, de contrôle qualité se transforment en intégrant des modèles statistiques performants. Mais l'impact va au-delà et des professions de plus haute technicité se doivent aussi d'évoluer : par exemple, l'utilisation de robots "haut débit" avec analyse en ligne et le traitement automatisé des données, obligent ainsi à redéfinir les approches méthodologiques de la recherche expérimentale, remettant en question les profils de compétences attendus du chercheur scientifique.

En toute logique, l'enseignement (formation initiale) et plus largement le développement de compétences au long de la vie professionnelle (formation continue), s'en trouvent directement affectés. Sur le plan de la forme et des moyens, le professeur doit s'adapter à des élèves qui ont grandi dans ce monde numérique et dont le comportement vis-à-vis des modes d'apprentissage a évolué. Sur le fond ensuite, il s'agit de redéfinir le socle de connaissances "non négociables", compte tenu de l'accès immédiat à une quantité insoupçonnée de connaissances via les outils internet. Il s'agit aussi de développer l'esprit critique de l'élève pour manipuler ces connaissances disponibles pour tous, mais validées par personne...

Le contexte de l'usine du futur est donc bien celui d'une société transformée profondément dans son mode de vie et son accès large et immédiat à une masse de connaissances incommensurable. Il en ressort un besoin de transparence plus fort, associé parfois à une remise en cause du dire d'expert et donc une fragilité dans la construction d'une opinion individuelle éclairée.

Un autre élément de contexte est très certainement le **changement climatique** et la prise de conscience collective que nos comportements doivent évoluer. Les conséquences des choix de société passés, consommation et production de masse afin d'offrir à tous l'accès à des richesses nouvelles, la politique du "Toujours plus !", se manifestent aux yeux de tous et marquent nos esprits : limites du modèle de la mono-industrie dans certaines régions, mutations industrielles difficiles, pollution des sols, des eaux et de l'air, risques sanitaires non pris en compte dans la commercialisation de certains produits... Les réponses à ces nouveaux défis existent et nous avons les outils et les compétences pour les développer : analyse du cycle de vie, évaluation des impacts environnementaux, développement de la bio-industrie, approche énergétique plus systémique, politiques environnementales plus agressives. Néanmoins, les dommages sont là et le citoyen n'accepte plus l'exposition au risque, même maîtrisé ou mineur ; il en résulte une image dégradée de l'industrie, dont la part se réduit dans les économies occidentales.

L'usine du futur est en construction !

L'industriel est aussi un citoyen et il doit se plier à une nouvelle gouvernance ; il a compris les limites des modèles économiques passés et engagé des mutations pour pallier les insuffisances constatées. Les concepts cités précédemment témoignent de cette mutation déjà en cours dans nos usines :

meilleur contrôle de la qualité, meilleurs rendements, diminution des consommations énergétiques, réduction de l’empreinte carbone et diminution des consommations d’eau. Des progrès importants ont ainsi été obtenus par la modélisation numérique et la conception assistée par ordinateur, pour mieux appréhender les régimes de production hors nominal, prendre en compte les pertes de rendement et gérer la non-qualité. Par l’instrumentation, le contrôle-commande numérique et le traitement statistique des données, l’efficacité a été augmentée et les bonnes pratiques plus facilement partagées. Pour gagner en flexibilité et mieux répondre à ses clients, l’industriel propose des nouveaux concepts : robotique bien-sûr, mais aussi conception modulaire de l’usine ou supervision à distance de plusieurs sites de production.

Ces avancées sont connues du grand public qui constate les transformations importantes de l’industrie manufacturière, et notamment de l’automobile. Elles demeurent peu visibles lorsque l’on présente les industries de procédés, chimie, pharmacie, agroalimentaire, énergie ou environnement ; les mutations y sont pourtant en cours et les enjeux n’en sont pas moindres, si l’on se réfère à la communication croissante de la plupart des sociétés sur leurs projets de transformation numérique.

Quels enjeux pour les industries de procédés ?

Les industries de procédés partagent certaines spécificités. Industries de transformation de la matière ou de conversion d’énergie, elles mettent en œuvre des produits le plus souvent fluides (liquides, gaz) ou sous forme de solides divisés. Elles doivent en contrôler la pureté et les caractéristiques à l’échelle moléculaire, tout en développant des propriétés d’application plus macroscopiques, des fonctionnalités sources de valeur pour les clients. Ce caractère “fluide” de la production exige des contrôles en ligne du procédé, pour s’assurer de la maîtrise du point de fonctionnement nominal et garantir la qualité finale du produit, qu’il soit produit en lots (batch) ou en continu. Il s’agit de gérer des flux, de maintenir les rejets dans les limites autorisées et de maîtriser les risques associés au procédé.

Les industries de procédés conçoivent et optimisent en permanence leurs outils industriels comme une “usine du futur” en transformation continue. Que ce soit pour la conception, le contrôle ou la maintenance, le numérique y est partout présent. Les données sont stockées et il s’agit de les exploiter le plus efficacement possible pour gagner encore en efficacité. Mais cette efficacité doit s’entendre dans le temps et l’espace, en prenant en compte le cycle de vie du produit et en inscrivant la production dans son économie locale. L’un des enjeux est de développer une **économie circulaire**, par une approche systémique qui bénéficiera à tous ses acteurs, en commençant par le citoyen. Boucle locale ou circuit court répondent aux attentes de la société ; ce sont aussi des moyens au service de la performance économique, créateurs de valeurs pour tous. Cette **approche systémique** est nécessaire et doit sans doute, dans un premier temps, être soutenue par la politique industrielle et environnementale du pays (taxe carbone, écotaxe, politique de valorisation des déchets). L’enjeu est donc aussi de reconquérir le citoyen et de proposer des solutions industrielles prenant en compte l’**acceptation sociétale**. La production doit être responsable, respectueuse de l’environnement et des exigences de sécurité. Cette **maîtrise de la sécurité** doit s’accompagner de pédagogie et d’une transparence accrue auprès des citoyens. Il s’agit aussi de répondre aux attentes des clients, en proposant des produits maîtrisés et plus personnalisés : pour cela, numérique, instrumentation et contrôle du procédé demeurent incontournables.

Au final, l'usine du futur doit répondre à un objectif majeur : l'acceptation sociétale d'une **industrie solide, proche de ses clients, créatrice d'emplois** et comprise comme un maillon indispensable à l'économie française.

Relever ce défi, c'est donc saisir l'opportunité de réindustrialiser un pays dont les compétences scientifiques et l'histoire industrielle sont reconnues de tous. C'est aussi faire évoluer l'enseignement du Génie des Procédés pour les générations futures.

François NICOL

*Président de la Société Française
de Génie de Procédés (SFGP)*

Jean-Pierre DAL PONT

*Président de la Société des Experts Chimistes
de France (SECF)
Ancien président de la SFGP (2009-2017)*

2

De la conception à l'exploitation : Panorama d'initiatives industrielles

Les exigences croissantes, en termes d'**efficience** et de **responsabilité environnementale** – et sociale – de l'industrie de procédés sont et vont être à intégrer dans toutes les étapes de la vie de l'usine du futur, de sa **conception** à son **exploitation**, voire jusqu'à son démantèlement. L'approche modulaire pourrait ainsi être considérée, dès l'origine d'un projet, dans un objectif de **réutilisation des équipements**.

Le développement des **technologies numériques** permet déjà aujourd'hui de concevoir l'usine de demain. Plus qu'un essai prospectif sur les grands défis qui nous font face, ce chapitre vise à montrer, à partir d'exemples concrets, que cette transformation au service de la sécurité et de la performance de nos procédés - performance opérationnelle, énergétique ou environnementale - est déjà engagée.

Le **facteur humain** est aussi au cœur de ce changement. Le numérique ouvre la perspective de réduire les tâches chronophages de collecte des données en plaçant l'efficacité et la **simplification du poste de travail** au centre de la réflexion. De même, la robotique et la cobotique vont pouvoir **soulager le travail des opérateurs** dans des environnements ou des postures difficiles.

Face à l'urgence que constitue le changement climatique, l'**efficacité hydrique** de nos procédés, d'une part, et la production et l'utilisation des **énergies renouvelables**, d'autre part, sont également des enjeux majeurs.

Signe de la vitalité de notre industrie de procédés, le changement qui s'opère est à la fois porté par des **grands groupes industriels**, et par un réseau de **start-up** et de **petites et moyennes entreprises** fortement engagées dans les nouvelles technologies. Les exemples qui suivent, qui ne prétendent à aucune exhaustivité, illustrent quelques-unes des nombreuses initiatives déjà lancées dans différents secteurs de l'industrie de procédés.

Le digital dans la conception des procédés

De nouvelles méthodologies d'acquisition des données expérimentales

Pour les industries de procédés, la conception, le dimensionnement, l'évaluation économique et le temps requis pour la mise en œuvre des procédés sont extrêmement dépendants du nombre, de la diversité et de la robustesse des données disponibles sur le moment de la prise de décision.

L'acquisition de données de base pour l'extrapolation est un domaine propice à la mise en place de partenariats entre les industriels, le monde académique ou la recherche publique. Citons par exemple le LOF, « laboratory of the future », créé en 2004 par Solvay (Rhodia), le CNRS et l'université de Bordeaux, ou la MEPI « Maison Européenne des Procédés Innovants », structure associative portée en 2007 par l'Institut National Polytechnique de Toulouse et plusieurs groupes industriels.

Bénéficiant des travaux de recherche menés par le **LGPC** (Laboratoire de Génie des Procédés Catalytiques, Lyon), depuis le début des années 2000, sur les réacteurs structurés à l'échelle micro- ou millimétrique, le laboratoire commun **DATAFAB** a été créé en mars 2018 avec la PME lyonnaise **PROCESSIUM**, spécialisée dans la conception, le développement et l'optimisation des procédés industriels, avec l'aide du programme LabCom de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). DATAFAB a pour objectif d'accroître la compétitivité des entreprises de ce secteur par l'implémentation de technologies et de méthodologies permettant l'acquisition rapide et fiable de telles données.

Installées sur le campus Axel'One, quatre unités pilotes d'acquisition de données, basées sur des microréacteurs, permettent l'étude de diverses réactions à fortes contraintes, dont une oxydation gaz-liquide pouvant dégager jusqu'à 50 MW/m^3 et une chloration très rapide, exothermique et en milieu corrosif (utilisation de Cl_2).

Le LGPC doit ainsi relever le défi des dispositifs et réacteurs correspondants et, éventuellement, innover dans la conception des microréacteurs. Enfin, les deux partenaires doivent joindre leurs expertises pour des expérimentations plus rapides, en couplant ces microréacteurs avec des méthodes de plans d'expériences (*Design of Experiments*) et aussi pour capitaliser des données en grand nombre.



◀ Exemples d'écoulements multiphasiques dans des microréacteurs (canal cylindrique de 1,6 mm de diamètre (à gauche) et de section carrée 300 microns (à droite))

L'acquisition des données de base d'un nouveau s'appuie également sur des installations pilotes, à une échelle intermédiaire entre les microréacteurs et l'unité de démonstration. Cette phase d'acquisition de données peut être longue et coûteuse. Les approches les plus récentes consistent à paralléliser l'acquisition de données, en utilisant des unités pilotes de petites tailles équipées de plusieurs réacteurs en parallèle (4 à 16). Cette approche est dérivée des méthodologies « expérimentation haut débit » utilisée pour le screening et le développement des catalyseurs.



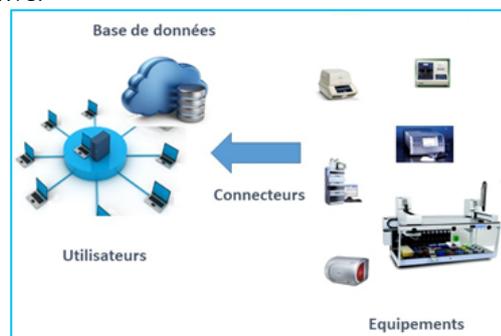
Installation pilote à l'IFPEN avec plusieurs réacteurs en parallèle pour de l'acquisition de données procédés en haut débit ►



Les nouvelles technologies dans les laboratoires de biologie

Les laboratoires de biologie de l'industrie pharmaceutique disposent aujourd'hui d'équipements permettant de faire des dizaines de cultures cellulaires simultanément et ainsi, à partir d'un plan d'expériences complètement automatisé, d'identifier les conditions de culture optimales. Ils utilisent souvent des éléments à usage unique instrumentés afin de faciliter leur mise en œuvre.

Ces équipements génèrent un nombre important de données qui doivent être intégrées et agrégées pour faciliter leur analyse. Les fournisseurs de bases de données et d'outils d'analyse mettent à disposition des laboratoires des connecteurs qui permettent facilement de collecter et d'analyser les données venant de leurs équipements.



L'ingénierie, comme beaucoup d'autres domaines de l'industrie, découvre les nombreuses opportunités que peuvent lui apporter les nouvelles technologies du digital et entreprend une démarche d'appropriation de ces nouveaux usages.

L'ingénierie de procédés développe, depuis déjà de longues années, une approche de progrès continu pour améliorer l'opérabilité et la sûreté des installations industrielles qu'elle conçoit ; pour cela elle fait évoluer ses méthodes de travail, utilise des technologies ou des procédés performants et sûrs capables de satisfaire des exigences toujours plus fortes (réglementaires, sociétales, client) ; l'exécution des projets répond également à des contraintes de temps et de coûts (appelées dans le jargon « time to market » et « design to cost »). Demain, avec le développement du concept d'usine du futur poussé par la transformation digitale et la nécessité de produire autrement et mieux, l'ingénierie de process créera non seulement des usines sûres, attractives et performantes mais aussi des usines plus agiles, plus faciles à opérer et mieux connectées à leur environnement.

Pour disposer d'une ingénierie de premier niveau capable de concevoir les usines du futur du groupe, **Arkema** développe des technologies digitales comme le scan laser, la réalité virtuelle 3D et 4D, le « smart commissioning » ou encore des nouveaux outils de formation des opérateurs ou des rondiers.

Scan laser et réalité virtuelle 3D

Au début d'une étude de conception sur une unité existante (projet de modification ou d'extension), il est important de disposer de données de CAO fiables par rapport à la réalité. Les nouvelles technologies d'utilisation des relevés laser, qui fournissent une image du réel colorisée en 3D, permettent de vérifier ce niveau de cohérence avant le démarrage des projets et de maintenir les données à jour au cours de la vie de l'unité industrielle.

En phase d'ingénierie de conception, les équipes s'approprient les lieux d'implantation grâce à des « viewers » 3D qui autorisent des expériences immersives dans l'image restituée à partir du scan laser ; en vue de préparer le démarrage des études de CAO, les équipements principaux sont pré-positionnés pour faire valider leur implantation par les futurs utilisateurs. Il est maintenant possible d'intégrer la dimension ergonomie et pénibilité pour l'étude des environnements complexes (par exemple en cas de taux de compacité élevé). Avec l'utilisation des masques ou des lunettes de réalité virtuelle, les opérateurs vont être plongés virtuellement dans leur futur environnement ; un avatar leur permet d'apprécier les conditions d'accès, les distances qui satisferont à l'opérabilité future des nouvelles unités ; les modifications nécessaires de la maquette de CAO 3D sont alors réalisées en un temps record.



◀ Importation de maquettes CAO dans un scan 3D

Utilisation de lunettes de réalité virtuelle en revue de projet ▶



Réalité virtuelle 4D

En support aux phases de construction, pour améliorer l'appropriation du planning par les équipes internes et externes, de nouveaux outils appelés 4D permettent d'associer la maquette 3D du projet et son planning de réalisation sous la forme d'une scénarisation en 3D des séquences de montage. Chaque discipline concernée peut valider la séquence de montage qui la concerne au cours des revues de projet et les contraintes liées à la co-activité des entreprises intervenantes sont mieux identifiées.



▲ Scénarisation 3D des phases de construction

Smart commissioning et réceptions mécaniques

Pour raccourcir de façon significative la durée des tests du programme de conduite des unités industrielles, il existe aujourd'hui, si le choix préalable de réaliser un simulateur de conduite a été fait, de nouveaux outils digitaux qui permettent de connecter le simulateur au logiciel de conduite ; grâce à cette connexion, le paramétrage du logiciel peut être vérifié de façon exhaustive et les réglages des boucles de contrôle peuvent être transférés automatiquement. Plusieurs semaines sont ainsi gagnées pendant les tests.

En fin de construction, les équipes de contrôle doivent s'assurer de la conformité des montages en unité. Leur efficacité et leur productivité sont grandement améliorées par l'apport d'outils de la mobilité (tablettes) et l'utilisation d'applications digitales métier. La tablette embarque l'ensemble des documents requis pour la vérification (PID (*Process & Instrumentation Diagrams*), isométriques, spécifications...), permet les annotations, enregistre et transfère automatiquement les validations et la liste des réserves.

Simulateurs de formation des opérateurs

Les simulateurs de conduite permettent de s'exercer aux phases transitoires comme les arrêts ou démarrages des unités ou de tester les actions correctives répondant à des scénarios d'incidents ; ils ont un grand intérêt au premier démarrage et tout au long de la vie des unités pour maintenir la compétence des opérateurs.

Il est également possible de former les opérateurs de terrain grâce à la réalité immersive. L'opérateur apprend à se déplacer dans son futur environnement ; c'est la *formation en mode serious game* ▶.



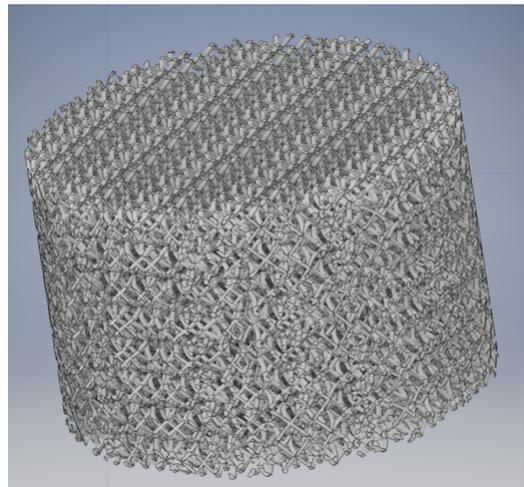
De façon identique sont développées des formations à la maintenance d'équipements complexes ; les fournisseurs sont aujourd'hui capables de fournir des modélisations 3D détaillées de leurs équipements qui sont alors intégrées dans la modélisation 3D du projet. Il est alors possible de simuler le démontage de tous les éléments de l'équipement.

Génie des procédés et impression 3D : un apport mutuel

Depuis quelques années, l'impression 3D, ou fabrication additive, s'inscrit parmi les techniques de fabrication d'objets et même de produits. Si le génie des procédés peut l'utiliser pour produire « à la demande » des équipements ou des composants optimisés (mobiles d'agitation, supports de catalyseurs etc.), ses méthodes s'avèrent aussi nécessaires à l'optimisation du processus d'impression.

Les techniques d'impression sont en constante évolution afin de proposer des solutions qui, en termes de dimensions des pièces imprimables, de précision et de diversité des matériaux utilisables, répondent à des exigences de plus en plus strictes. Le fonctionnement de l'outil « imprimante » lui-même, la gestion des flux et de l'énergie, la capture des gaz émis, la maîtrise de la sécurité, du recyclage... sont autant de problématiques abordées par la discipline.

Les objets fabriqués en impression 3D offrent une grande liberté de design, souvent très complexe, impossible à concevoir avec des techniques classiques et donnant lieu à d'importantes innovations. Échangeurs de chaleur, réacteurs miniaturisés, éléments de garnissage ► etc., le panel d'applications est large en génie des procédés (voir en encadré l'exemple de la technologie d'échangeur-réacteur développée dans le cadre du projet FAIR par Air-Liquide et Poly-Shape).



▲ Prototype d'interne de colonne innovant conçu au Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse et réalisé par impression 3D

Dans l'usine du futur, la fabrication additive sera intégrée dans la chaîne d'approvisionnement et la maintenance, permettant la fabrication de pièces de rechange à la demande, simplifiant ainsi grandement la gestion des stocks.

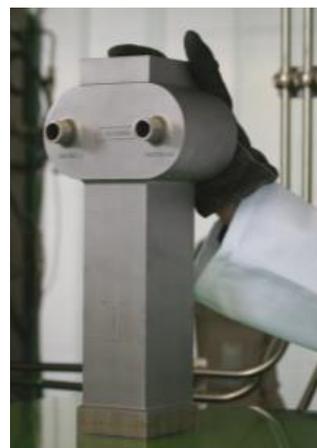
L'impression 3D trouve des applications dans le domaine pharmaceutique, pour la production de médicaments, en permettant une libération complexe dans le temps du principe actif ainsi que la fabrication de médicaments adaptés à chaque patient. Les méthodes du génie des procédés sont ici indispensables pour caractériser les transferts de matière et déterminer l'agencement optimal des différentes couches d'enrobage.



Des réacteurs prototypes fabriqués en impression 3D

Dès 2014, **Air Liquide** a réalisé les premiers exemplaires de réacteurs en utilisant le procédé de Fabrication Additive. Ce procédé de fabrication innovant offre de nouveaux horizons en matière de conception.

Le premier réacteur – dont la plus grande dimension atteignait 30 cm avec une section de 100 cm^2 - a été installé dès 2015 dans une unité pilote SMR (Steam Methane Reforming) de production d'hydrogène sur le Campus parisien d'Air Liquide dédié à l'innovation, et a été fabriqué et testé avec succès en moins de 6 mois, démontrant tout l'intérêt de la Fabrication Additive pour la phase de prototypage ►. Le réacteur a été opéré pendant plus de 5000 heures, à des températures allant jusqu'à 900°C et des pressions de plus de 10 bar, faisant de ce prototype le premier équipement sous pression réalisé en Fabrication Additive. Des résultats très prometteurs ont ainsi été mis en évidence, démontrant que les performances du SMR peuvent être significativement améliorées tout en réduisant la taille du réacteur jusqu'aux canaux millimétriques.



Fort de cette expérience, Air Liquide, associé à la PME **Poly-Shape**, a initié dès 2015 le **projet FAIR** (Fabrication Additive pour Intensification de Réacteurs), aux côtés de huit autres partenaires industriels et académiques, afin de développer toutes les compétences nécessaires à la constitution d'une filière industrielle de fabrication d'échangeurs et de réacteurs par Fabrication Additive et de promouvoir les premiers usages industriels.

FAIR, projet structurant pour la compétitivité (PSPC) du Programme d'Investissements d'Avenir, soutenu par BPI France, a notamment permis de dépasser les limites connues en termes de taille de pièces et de productivité avec les machines disponibles sur le marché, d'une part, et de développer de nouveaux outils pour le dimensionnement de réacteurs innovants, d'autre part. Il a reçu en 2017 le «**Process Intensification Award for Industrial Innovation**» de la Fédération Européenne de Génie Chimique (EFCE).

Le principal avantage de la Fabrication Additive est de « libérer » les règles de conception, jusqu'alors limitées par les procédés de fabrication. Ainsi, les composants internes du réacteur peuvent maintenant être pensés en 3D, ce qui était totalement impossible avec les processus de fabrication conventionnels. Les nouvelles possibilités offertes ont été utilisées aussi pour améliorer les propriétés de transfert de chaleur et de masse dans le réacteur. La nouvelle technologie développée semble particulièrement prometteuse dans le cas d'unités de productions d'hydrogène de faible ou moyenne capacité (de l'ordre de 25 à $500\text{ Nm}^3/\text{h d}'\text{H}_2$), installées sur le site d'utilisation du client (on-site). Avec cette nouvelle génération d'unités, Air Liquide espère non seulement améliorer l'efficacité énergétique du procédé de production d'hydrogène de près de 20% et réduire par la même occasion dans les mêmes proportions les émissions de CO_2 .



▲ Exemples de réacteurs produits par fabrication additive depuis 2014 : évolution des dimensions et des formes

Le digital dans l'exploitation des procédés

La transformation digitale d'un site de production

Le développement des solutions numériques offre également de nouvelles perspectives pour l'amélioration de la performance et de la compétitivité des usines.

Ainsi, le site **Solvay** de Tavaux, dans le Jura, qui met en œuvre depuis plusieurs années des projets d'excellence opérationnelle dans ses unités de production de polymères de spécialité ainsi que dans les processus supports comme la maintenance, a engagé dès 2017 un projet de transformation digitale, dans un objectif double :

- renforcer de façon significative les performances des unités de production et l'impact des transformations d'excellence opérationnelle en cours,
- transformer en profondeur les processus et les comportements.

Cette transformation s'appuie sur quatre leviers :

- **la mise en œuvre de statistiques avancées** basées sur le « Big Data ». Les modèles issus de ces statistiques avancées, par la puissance de calcul et la mise en relation de données de natures différentes, ont permis d'aller au-delà des démarches classiques. Des résultats significatifs ont déjà été obtenus ou sont en cours de concrétisation : accroissement des capacités de production, amélioration des rendements, identification de paramètres influençant la qualité des produits, etc.

- **la transformation des processus et des méthodes de travail**. L'intégration de données dans des tableaux de bord et l'utilisation d'applications développées pour les outils digitaux mobiles (smartphones, tablettes ►) utilisés dans les unités de production ont déjà profondément modifié les façons de travailler. Renforcement de la rigueur, simplification des tâches, partage de données en temps réel, amélioration de l'efficacité des processus, responsabilisation et collaboration accrues sont les principaux bénéfices déjà visibles.



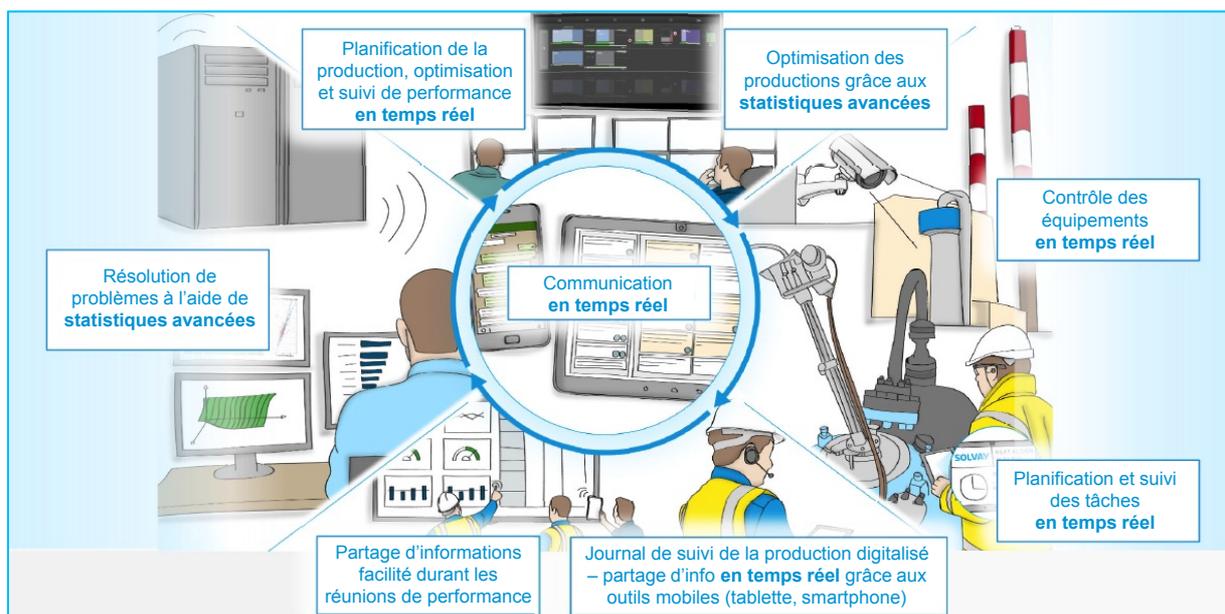
- **la mise en place d'une infrastructure** pour soutenir la transformation digitale : data lake, accès au réseau, serveurs, écrans, tablettes, smartphones...

- **le développement de nouvelles compétences**. Plusieurs compétences clé sont nécessaires pour réussir la transformation digitale et ont donc été mises en place dans l'organisation de l'usine : data scientist, data manager, data translator, leader de changement digital, agent de changement digital ...

La réussite d'une transformation digitale en usine repose bien évidemment sur une multitude de facteurs. Après plusieurs mois de mise en œuvre sur le site de Tavaux, il est possible d'en citer quelques-uns qui semblent essentiels :

- le recrutement et le développement des nouvelles compétences digitales,
- l'implication, dès le début du projet, des utilisateurs des nouvelles solutions digitales,
- le management du changement induit par la transformation digitale,
- la mise en cohérence des infrastructures avec les ambitions afin de permettre une intégration totale entre les modèles, applications, tableaux de bords et systèmes existants,
- l'équilibre entre les activités digitales exploratoires/expérimentales et la structuration de la démarche afin de combiner agilité, innovation et pérennisation,
- la méthodologie adaptée et structurée en conséquence.

La transformation digitale en cours dans les unités de production Solvay de Tavaux est une étape importante vers « l'Usine du Futur ». De nombreux axes et leviers sont encore en chantier ou à explorer. Parmi les principaux, on peut notamment mentionner la digitalisation du processus de maintenance, la poursuite de la mise en œuvre d'une infrastructure adaptée et pérenne ou encore le développement de nouvelles applications permettant d'interconnecter des informations provenant de sources différentes (production, maintenance, inventaires, sécurité, qualité...).



▲ Les différents leviers à mettre en œuvre

Une plateforme de supervision au service des exploitants

Autre exemple de transformation, la plateforme de monitoring développée chez **Total Exploration & Production**, avec son application intégrée, met à la disposition des utilisateurs un système de traitement des données en temps réel, qui permet de surveiller en continu et sans efforts les équipements les plus sensibles des installations. Elle élimine les tâches répétitives et chronophages de collecte des données et accroît ainsi leur valeur en plaçant au cœur de la démarche l'efficacité et la simplification au poste de travail.

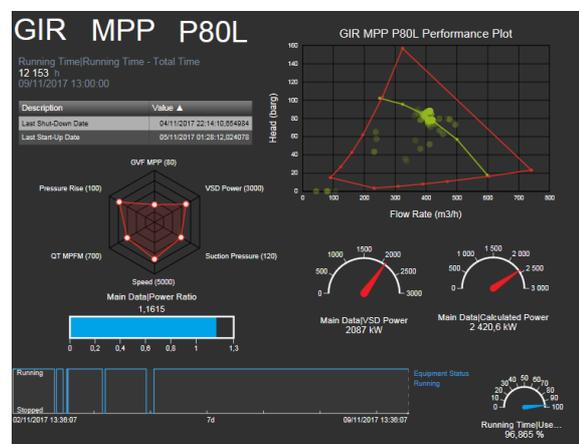
Cette plateforme permet également de partager le même niveau d'information entre différentes équipes, qu'elles soient situées sur site ou dans les sièges administratifs.

Une **bibliothèque de « templates »**, modules de calcul et de visualisation, est proposée, qui transforment la plateforme de monitoring en véritable boîte à outils :

- **des templates d'équipement** pour surveiller une classe d'équipements grâce à des méthodes standardisées et validées par les spécialistes des disciplines (pompe, vanne de régulation, échangeur, filtre, compresseur, réservoir, vanne de sécurité),
- **des templates polyvalents d'analyse** qui implémentent des fonctions de recherche d'information dans les données telles que la notification d'évènements,
- **Des templates de production et performance** pour alimenter les rapports de production en données fiables, et surtout assurer le suivi des paramètres de production au cours de la journée.

Tous ces **templates** sont vérifiés, robustes et « plug and play » grâce à leur parfaite compatibilité avec les architectures déjà déployées dans les filiales du groupe. Des **templates graphiques** viennent compléter la boîte à outils pour afficher sur des pages Web les indicateurs de performance calculés.

Une équipe de spécialistes est disponible au siège pour aider à configurer en quelques clics ces **templates**. Quelques heures de formation suffisent aux utilisateurs pour se lancer avec un retour sur investissement maximal. Pour tous ceux qui souhaitent aller plus loin, une communauté a été créée sur l'intranet de la société.



▲ *Template de surveillance de la performance d'une pompe polyphasique*



La vision des équipementiers

Les équipements utilisés dans les procédés sont en pleine mutation pour répondre aux contraintes environnementales et profiter des apports de la révolution digitale en cours.

Pour les équipements consommateurs d'énergie comme les pompes, le rendement devient un critère de choix de plus en plus important pour les exploitants. Les équipements du futur seront donc tous sélectionnés, conçus, fabriqués, installés et exploités afin de répondre aux exigences de performance énergétique exprimées par le client ou imposés par la réglementation. Il n'est déjà plus acceptable de surdimensionner systématiquement un équipement, de mettre sur le marché un moteur avec un faible rendement, de fabriquer une pompe de la même manière que dans les années 2000, d'installer un système d'air comprimé non optimisé. Mais c'est surtout en phase d'exploitation, tout au long de la vie des équipements, que le potentiel d'économie d'énergie est important : la maintenance, l'adaptation aux changements de production ou encore la surveillance en continu des conditions d'exploitation.

La révolution digitale représente ainsi un outil formidable pour accompagner ces économies d'énergie mais également diminuer les autres coûts d'exploitation. Ainsi, les équipements connectés et supervisés en continu permettent de passer de la maintenance corrective ou préventive à la maintenance prédictive. Par exemple, les équipements peuvent ainsi être réparés juste avant leur défaillance effective, dans le cadre d'un arrêt de fonctionnement programmé. Tout cela fonctionne déjà très bien aujourd'hui dans le cadre de démonstrateurs ou dans des usines qui se veulent à la pointe. Toutefois, le déploiement généralisé de ces pratiques nécessitera deux évolutions. D'une part, si ces innovations permettent des gains évidents quand on réfléchit en termes de coût total de possession, nos organisations et nos business models ne sont pas toujours adaptés. Une sorte de révolution culturelle est nécessaire, voire le passage à une économie de fonctionnalité. D'autre part, les protocoles de communication doivent se standardiser : des équipements d'origines diverses travaillent ensemble ; des connaissances se trouvent chez l'exploitant, d'autres chez le fournisseur d'équipement... tous cela doit pouvoir communiquer facilement, dans un cadre assurant une confiance et un niveau de sécurité acceptables par toutes les parties prenantes.



Optimisation et pilotage à distance de la production

En 2017, **Air Liquide** a mis en service en région lyonnaise un premier centre d'opération et d'optimisation à distance (COOD), unique dans l'industrie des gaz industriels, capable de piloter et d'optimiser la production, l'efficacité énergétique et la fiabilité ou encore de mener des analyses de maintenance prédictive d'une vingtaine de sites « Grande Industrie », qui produisent et alimentent par canalisation les clients industriels en oxygène, azote, argon et hydrogène sur tout le territoire.

Le centre de Lyon, qui a nécessité un investissement de 20 millions d'euros, est la première brique d'un programme de transformation numérique baptisé **Connect**, qui a reçu le label « vitrine industrie du futur » de l'Alliance Industrie du Futur (AIF). Un centre analogue a été inauguré en Malaisie en janvier 2018 pour la gestion à distance de 18 unités de production dans huit pays de la région Asie-Pacifique.



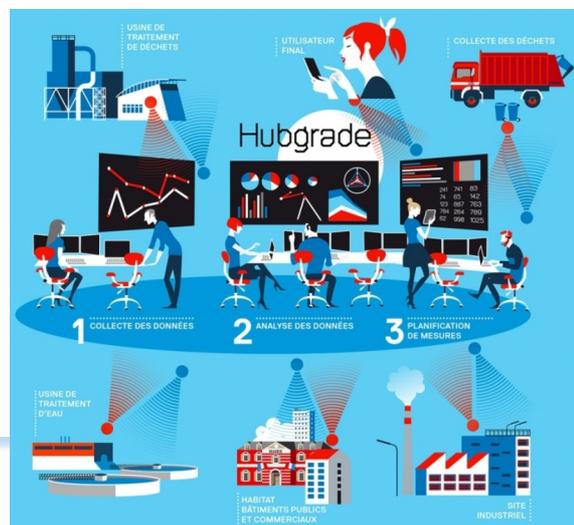
Développé par des équipes pluridisciplinaires, avec l'appui d'une dizaine de start-up françaises, ce projet vise également à introduire les dernières technologies numériques dans le travail quotidien des équipes des sites : lunettes connectées (visualisation d'informations en réalité augmentée), tablettes tactiles pour la consultation et la saisie des données et la communication en temps réel avec des experts à distance, scans 3D, etc.).



Hubgrade de **Veolia** est un « hub » de pilotage intelligent permettant de mesurer et d'améliorer la performance des services délivrés, de garantir un niveau de qualité, d'optimiser la gestion des assets industriels de ses clients et d'améliorer la performance environnementale globale.

Actuellement, ce sont plus de 8500 sites ou contrats connectés à ces centres Hubgrade, une masse colossale de données permettant des comparaisons de performance à haute valeur ajoutée. Il est important de noter que le concept Hubgrade est avant tout une organisation humaine s'appuyant sur les données.

Dans ces centres intelligents créés par Veolia, des spécialistes en gestion de l'eau, de l'énergie et des déchets, analysent et interprètent les données provenant des installations et de leur environnement. Grâce à cette mise en valeur contextuelle, à l'apport d'analyses s'appuyant sur la data science, le centre Hubgrade peut détecter des déviations du procédé et lancer en temps réel les bonnes interventions sur place, pour agir au plus tôt : dès qu'un centre détecte une dérive de consommation ou une anomalie de fonctionnement, les analystes interviennent en temps réel, à distance ou en envoyant une équipe sur place.



L'opérateur du futur : de la robotique à la cobotique

Développée initialement dans l'industrie manufacturière – automobile en particulier – la robotique a trouvé plus récemment des applications dans l'industrie de procédés, par exemple pour limiter l'exposition des opérateurs dans des environnements difficiles en termes d'hygiène industrielle.

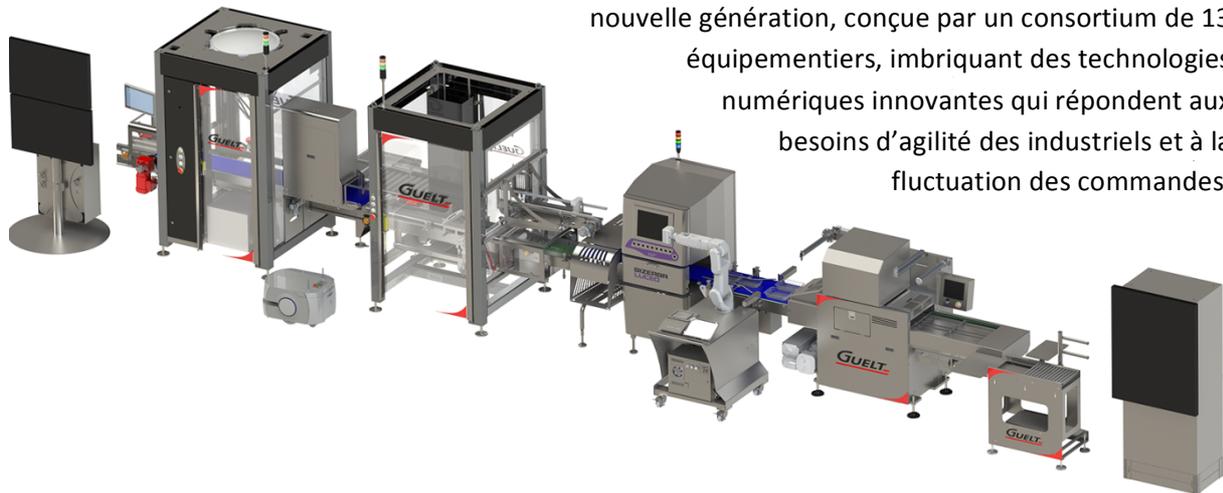
On voit maintenant se développer la cobotique, domaine de la collaboration homme-robot, notamment pour soulager l'opérateur dans des opérations difficiles ou répétitives, par exemple sur les lignes de conditionnement.



▲ Utilisation de robots pour le transfert de produits minéraux pulvérulents (Solvay - La Rochelle)

Dans cette perspective de l'usine du futur, le **secteur agroalimentaire** doit faire face à un certain nombre de défis spécifiques : sécurité sanitaire des produits (contrôle de l'hygiène, maintien de la chaîne du froid, conservation), traçabilité, variabilité des matières premières, qualité nutritionnelle des produits finis, transition alimentaire vers des pratiques de production et de consommation plus « durables ».

Au CFIA (Carrefour des Fournisseurs de l'Industrie Agroalimentaire) à Rennes, en 2019, **Bretagne Développement Innovation** a présenté une ligne de conditionnement de nouvelle génération, conçue par un consortium de 13 équipementiers, imbriquant des technologies numériques innovantes qui répondent aux besoins d'agilité des industriels et à la fluctuation des commandes.



Malgré l'automatisation partielle de la chaîne, le rôle de l'opérateur reste central et est totalement intégré au projet. L'ergonomie des postes de travail peut être largement améliorée grâce à la cobotique (coopération opérateur/robot), La société **GOBIO** a ainsi présenté une chaise exosquelette soulageant l'opérateur lors des alternances de posture assis /debout. Dans cette même optique, une entreprise du consortium (**E-Mage-In-3D**) a développé, en collaboration avec Armor Lux, des capteurs qui se fixent sur la combinaison de travail et qui permettent d'évaluer en temps réel les troubles musculo-squelettiques (TMS).

Des procédés éco-efficients

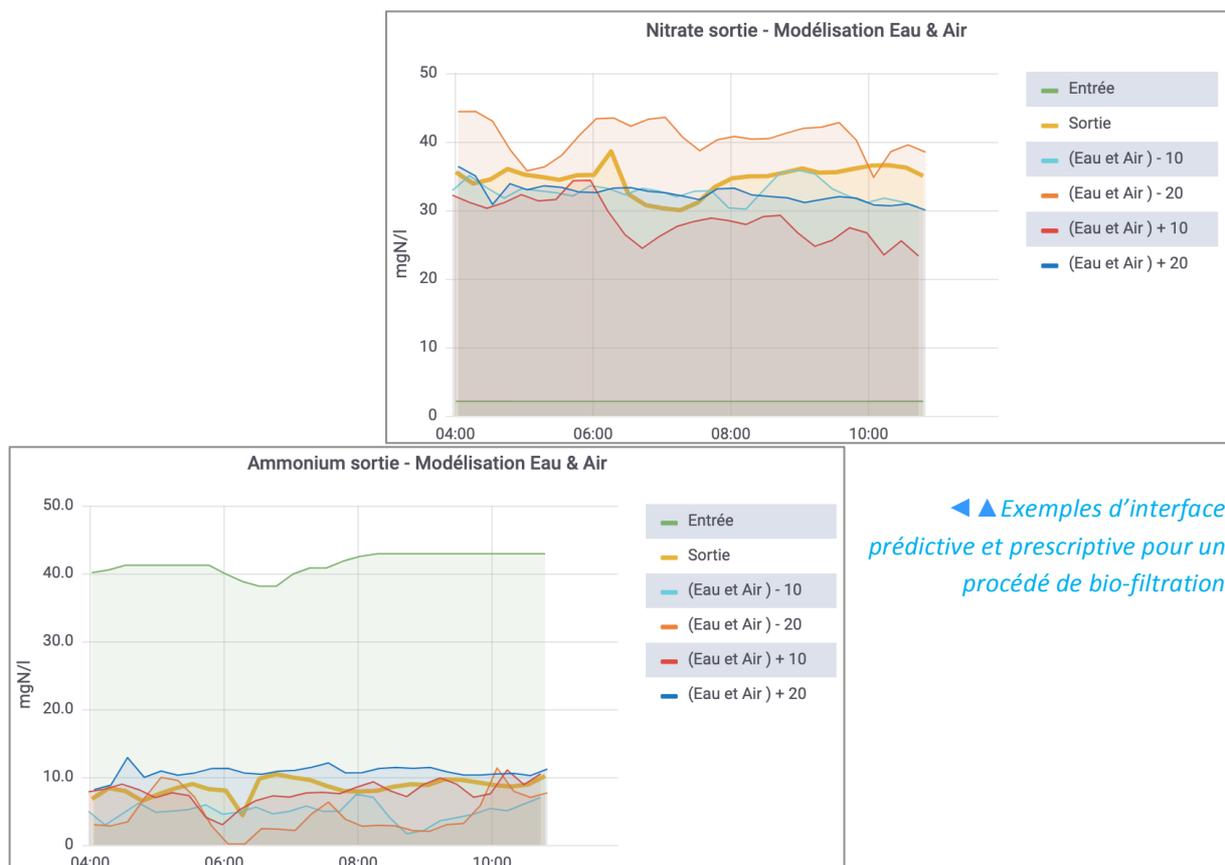
La transformation numérique au service de la transition hydrique

L'eau est devenue un enjeu mondial et tous ses usages (agricoles, industriels et urbains) sont à repenser. De nouvelles stratégies d'efficacité hydrique basées sur la cartographie en temps réel des usages et traitements de l'eau se mettent en place.

La réduction à la source de la consommation de l'eau et des productions de pollutions passe par une amélioration de la performance des procédés mais aussi par une réorganisation des flux et usages de l'eau. Pour cela, la société **Aquassay**, basée à Limoges, a développé une solution « SaaS » (Software as a service) de collecte et d'analyse avancée de données, en masse et en temps réel. Cette solution apporte une approche de type « génie des procédés ». Ses fonctionnalités les plus avancées sont l'analyse de procédés et la simulation prédictive et prescriptive, en temps réel.

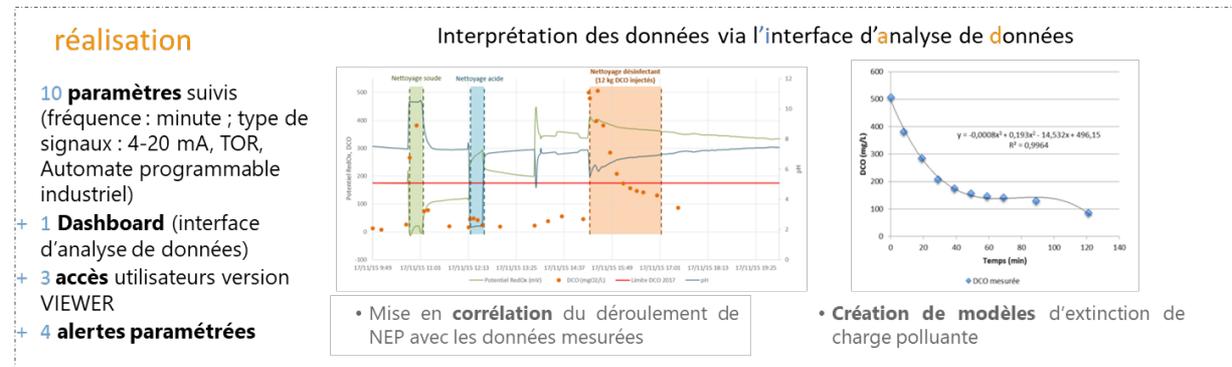
Cas de la simulation prédictive et prescriptive de traitement de l'eau

En collaboration avec le **SIAAP**, le service public de l'assainissement en Île de France, Aquassay a développé des interfaces métiers qui intègrent des modèles de procédés, exploités en temps réel. La simulation permet de prédire la qualité de l'eau en sortie, à partir des données mesurées en entrée (point de mesure quantité et qualité). L'intervalle de prédiction est celui du temps de séjour du procédé. Le modèle est aussi utilisé en mode prescriptif, pour estimer la qualité de l'eau en sortie, avec des configurations différentes de la consigne standard.



Cas du tri sélectif d'effluents en sortie de Nettoyage en Place

Un trieur d'effluent, équipé de points de mesure et d'une analyse de données en temps réel, identifie les empreintes de chaque phase des effluents et les oriente vers des solutions de gestion adaptées (ex. : retour eau brute, déchet liquide, STEP). Exemple de résultat : 90% de la charge polluante est éliminée en évacuant par dépotage seulement 7% du volume de rejet. Ceci peut modifier la nature et la taille des installations de traitement des eaux usées ▼.



La transition énergétique : biométhane et énergies renouvelables

L'usine du futur devra apporter une réponse responsable aux grands enjeux de la transition énergétique et écologique, et s'intégrer davantage dans son écosystème local, alliant performance industrielle et engagement humain.

L'histoire de la société **Méthélec** est celle d'une famille auvergnate qui, soucieuse de trouver des solutions pérennes aux importants besoins énergétiques de son entreprise agricole, s'est engagée en 2008 dans la construction d'un projet multi-énergies et écoresponsable.

Le besoin d'une intégration locale

L'objectif initial du projet était d'assurer les besoins énergétiques de l'exploitation - environ 100 kW de puissance moyenne continue - en valorisant les déchets de l'entreprise, regroupant des élevages avicoles, bovins ainsi que des cultures. Une solution combinant méthanisation et production d'électricité photovoltaïque est d'abord étudiée, mais les estimations montrent que l'équilibre économique peut difficilement être trouvé pour une installation d'aussi faible capacité. Il est donc décidé d'élargir le périmètre du projet aux déchets des industries agroalimentaires locales. L'objectif devient donc la mise en place d'une unité de méthanisation à la ferme de 1000 kW - extensible à 2000 kW - qui traitera de manière flexible non seulement les sous-produits de l'exploitation, mais aussi des coproduits et déchets agro-industriels locaux. Cette augmentation de capacité, nécessaire à la rentabilité économique du projet, suppose en contrepartie de l'adapter à la variabilité des matières premières. Pour l'exploitant c'est une maîtrise des procédés à acquérir, ainsi qu'une chaîne d'approvisionnement à mettre en place, intégrée dans le tissu agricole local.

Une technologie flexible et robuste

Sachant que la transformation de la matière s'étale sur plusieurs mois et fonctionne en continu, différentes technologies, choisies pour leur robustesse, sont installées afin de sécuriser dans le temps les approvisionnements qui évoluent en fonction des procédés et des conditions commerciales. Elles permettent d'engager différents intrants, qu'ils soient liquides, visqueux, pâteux ou solides, ce qui rend possible un fonctionnement avec 50% de déchets de l'agriculture et 50% de déchets de l'industrie agroalimentaire.

Dans une logique d'économie circulaire bénéficiant à l'agriculture locale, les produits de digestion, tant liquides que solides, ainsi que les condensats récupérés après refroidissement du biogaz, sont utilisés pour l'amendement des champs agricoles locaux. Le gaz produit alimente une turbine génératrice d'une puissance de 1,5 MW et l'excédent est utilisé pour alimenter une chaudière fournissant le réseau de chaleur. L'empreinte CO₂ du site est minimisée grâce à une intégration énergétique poussée, et surtout à l'installation complémentaire, en partenariat avec le groupe LANGA, de huit centrales photovoltaïques pour une puissance totale de plus de 2 MW.



« Indépendamment de sa taille, l'usine du futur doit être respectueuse de l'environnement et des citoyens, avec une intégration sociale, tout en relevant le challenge d'être économiquement viable dans une forme d'économie circulaire »

Jean-Sébastien Lhospitalier, président de Méthélec



L'intensification des procédés

Dans un contexte de raréfaction des ressources face à des besoins croissants de l'humanité, l'amélioration des procédés ne peut s'envisager sans des progrès de rupture. C'est là le domaine de l'intensification des procédés qui, faute de pouvoir se définir simplement, peut décliner sa finalité par une formule simple : « Faire plus et mieux avec moins ».

L'intensification au service de l'efficacité énergétique

Le groupe **Seqens** a développé, pour sa production d'acétate d'isopropyle (IPAC) sur la plateforme chimique de Roussillon (Isère), un concept innovant alliant à la fois intensification des procédés, avec une distillation réactive, et efficacité énergétique et environnementale. Cette innovation est le fruit d'un partenariat avec l'IFPEN, qui a développé et breveté la distillation réactive pour les réactions d'estérification.

L'utilisation de la distillation réactive pour cette réaction constitue une première mondiale. Grâce à une catalyse hétérogène, cette technologie permet une chimie « propre », avec très peu d'impuretés formées et donc une quasi-absence de rejets aqueux et gazeux associés. Cette technologie multifonctionnelle, réalisant la réaction et la séparation au sein d'un même équipement, et l'intégration énergétique du procédé conduisent à une consommation énergétique très basse.

Opérationnelle depuis fin 2015, cette nouvelle unité a nécessité un investissement initial de 4 M€ pour une capacité annuelle de plus de 5 000 tonnes. L'unité d'acétate d'isopropyle vient de bénéficier d'un investissement complémentaire afin de porter sa capacité annuelle à 8000 tonnes.



▲ Production d'acétate d'isopropyle utilisant une distillation réactive

Le projet a reçu en 2016 le prix Pierre Potier récompensant l'innovation en chimie en faveur du développement durable.

L'intensification au service de la production d'un principe actif pharmaceutique

Porté par le groupe **Pierre Fabre** et labellisé par le pôle de compétitivité Cancer-Bio-Santé, le projet **INPAC** (INtensification d'un Procédé de production d'AntiCancéreux)², associant deux laboratoires universitaires toulousains, le **LGC** (Laboratoire de Génie Chimique) et le **LAAS** (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes) ainsi que l'équipementier **MERSEN BOOSTEC**, a permis de développer une nouvelle voie d'accès à un principe actif pharmaceutique, dont les étapes de synthèse et de séparation ont été intensifiées, tout en offrant des garanties accrues de qualité, de sécurité et de respect de l'environnement. Cet objectif a été atteint avec la mise au point par Mersen Boostec d'un nouveau type de réacteur en carbure de silicium, un matériau très résistant à la corrosion, même en conditions sévères, et doté d'une excellente conductivité thermique. Ces qualités en font un matériau de choix pour des réactions agressives et exothermiques. Le procédé a pu ainsi être fortement intensifié grâce à un fonctionnement continu et à l'analyse en ligne. La faisabilité a été démontrée avec succès à une échelle de 10 kg/h sur un site industriel de Pierre Fabre. Des améliorations du rendement (proche de 90%) et de la qualité du produit ont été constatées. La technologie de réacteur-échangeur à plaques en carbure de silicium, développée dans le cadre de ce projet, est maintenant commercialisée par CORNING (gamme AFR, Advanced-Flow Reactors™).



▲ *Plaque et réacteur prototype Mersen Boostec en carbure de silicium*

² Le projet INPAC a bénéficié du soutien financier de la région et du FUI (Fonds Unique Interministériel).

3

L'ingénieur du futur : Quelles compétences pour répondre aux besoins de l'industrie ?

Le rôle de l'ingénieur procédés face aux attentes de l'industrie du futur

Dans les phases d'ingénierie, la mission de l'ingénieur procédés est de concevoir et de mettre en œuvre des usines, des unités ou des équipements nouveaux. Il s'agit aussi parfois de modifier une usine ou des unités de production existantes pour les adapter à des augmentations de capacité, des changements de charge ou des évolutions de la réglementation.

L'ingénieur procédés est un spécialiste qui exerce dans de nombreux secteurs d'activité, mais on le rencontre principalement dans les industries de la chimie, de la parachimie, de la pharmacie, de la pétrochimie, de l'aéronautique, du nucléaire, de l'alimentation ou du traitement de l'eau.

L'Ingénieur du Futur en génie des procédés est en mesure d'appréhender, avec son bagage scientifique et technique, les fondamentaux de dimensionnement des opérations unitaires de génie chimique et de les intégrer dans une installation complexe. Tout en garantissant les performances industrielles globales de l'unité, au travers des bilans de matière, de quantité de mouvement et d'énergie, il permet de prendre en compte tous les aspects relatifs à la sécurité des procédés. L'évolution des technologies nouvelles, particulièrement digitales, donne une autre vision à l'Ingénieur du Futur pour les comprendre et les intégrer dans la conception des unités industrielles du Futur.

Dans le cadre actuel où les **questions de sécurité et d'environnement, d'efficacité énergétique** ou de coûts sont prégnantes, l'ingénieur procédés occupe une position toujours plus importante au cœur de la chaîne de l'ingénierie qui va des études de faisabilité à la réalisation, en passant par les phases de conception, d'études de base, puis de détail. On attend également de l'ingénieur procédés qu'il soit un promoteur de l'innovation, qu'il l'accompagne et s'assure de sa maturité avant sa mise en œuvre.

Avec le développement rapide des outils numériques et leur convergence, des aspects importants du travail de l'ingénieur procédés évoluent actuellement. L'ingénierie basée sur des documents (schémas, spécifications, rapports techniques...) évolue vers une **organisation autour des données** dont l'ingénieur procédés est à la fois utilisateur, mais aussi grand pourvoyeur.

Dans un environnement de bureau d'étude multidisciplinaire, le rôle de l'ingénieur procédés, spécialiste des installations industrielles et des opérations unitaires au sein d'une équipe de projet, va être d'alimenter un ensemble de technologues avec les informations dont l'équipe a besoin pour définir en détail les matériels nécessaires au bon fonctionnement d'une usine ou d'un complexe industriel. A ce titre, son rôle est très transverse et il s'agit de gérer avec rigueur un grand nombre d'interfaces avec les spécialistes d'autres domaines comme la chimie, la biologie, les machines tournantes, la chaudronnerie, l'instrumentation et contrôle ou encore la tuyauterie. Pour une parfaite gestion de ces interfaces en phase d'ingénierie, il connaît la plupart des équipements, des opérations unitaires ou encore des grands fournisseurs de ces matériels ou consommables. L'inventaire des connaissances requises est long, mais il lui permet une bonne vision d'ensemble de la conception d'une installation industrielle. On voit d'ailleurs dans certains domaines, ou dans certains pays, nombre d'ingénieurs procédés évoluer naturellement vers le pilotage de projet.

Ces usines du futur nécessitent la prise en compte de production quasiment à façon de petits volumes ou de grands volumes de produits en cours de développement. C'est ainsi que l'usine du futur devient un outil industriel facilement reconfigurable pour accueillir des nouveaux procédés avec des technologies en constante évolution.

Cette équation à plusieurs dimensions offre à l'ingénieur du Futur l'opportunité d'ouvrir son champ du savoir vers des équipements de génie chimique modulaires, connectés et fonctionnant dans un environnement ouvert de contrôle-commande.

Beaucoup de méthodes et technologies du numérique ont été développées avant l'ère du digital. Leur utilisation à grande échelle est rendue possible grâce à l'augmentation de la puissance de calcul, des capacités de stockage et des moyens de communication. Bien évidemment ces moyens technologiques permettent d'améliorer les méthodes et donnent de nouvelles idées.

Phase de conception d'une installation

Les différentes phases du travail de l'ingénierie sont assez codifiées (selon les secteurs), mais commencent généralement par une phase de définition, avant une étude de faisabilité ou étude conceptuelle, une étude de base, puis de détail et enfin la réalisation avant de remettre l'usine ou l'unité à son opérateur.

La phase de définition

C'est une phase cruciale : il s'agit de s'assurer de l'obtention des données de base afin de lancer les études et de bien faire clarifier au client (souvent l'opérateur) ses attentes, ses besoins ainsi que les contraintes auxquelles il est astreint (normalisation, référentiels techniques, spécifications des produits, conditions aux limites du périmètre, autres projets dans le même périmètre, tierces-parties...).

En sus, lors de cette phase, il est nécessaire à l'ingénieur procédés de discuter et de connaître les principaux enjeux du projet afin de permettre les bon choix ou arbitrages : **maximisation de la production, minimisation des coûts, optimisation de la performance énergétique / de l'intégration thermique, maximisation du recyclage de certains produits (de l'eau par exemple), limitation/élimination du brûlage, maximisation de la disponibilité des installations**. La clarification de ces enjeux en amont des études va impacter de nombreux choix effectués en phase d'ingénierie,

comme le niveau de redondance des équipements, ou l'existence d'interfaces supplémentaires avec des tierces-parties (échanges de flux d'utilités ou énergétiques).

La conception de l'usine doit en effet intégrer les enjeux nouveaux de l'écologie industrielle. Ainsi, l'usine ne peut plus être considérée comme une unité isolée. Le concept d'écologie industrielle repose sur un mode d'organisation collectif quelle que soit la forme prise ou le nom porté - écosystème industriel, métabolisme industriel, symbiose industrielle, parc éco-industriel, réseau éco-industriel, éco-parc - il doit rendre possible la gestion optimisée des ressources primaires, le recyclage des déchets, le traitement des eaux usées, sur une logique de mutualisation et d'échanges à tous les niveaux, matières premières, énergies, équipements, services.... répondant ainsi au déploiement de l'économie circulaire. L'usine se doit également d'être en accord avec les concepts du développement durable, avec les 12 principes de la chimie verte, et si possible d'être flexible, c'est-à-dire d'être capable à partir des mêmes ressources de passer d'un procédé de fabrication à un autre, de manière à adapter la production à la demande.

De par sa connaissance fine des procédés qui vont être mis en œuvre et de leurs limites, l'ingénieur procédés est souvent un interlocuteur privilégié dans cette phase qui va conditionner la pertinence des études à suivre et leur bon déroulement.

Faisabilité ou Étude Conceptuelle

Le but de cette phase est de s'assurer que :

- le projet sera réalisable techniquement et économiquement,
- les grandes options de procédés ou d'architecture de développement ont été passées en revue
- l'on pourra lancer un projet répondant aux attentes et contraintes du client et en outre optimisé en fonction des grands enjeux.

Comme cette phase reste assez préliminaire, l'essentiel du travail concerne les équipes d'ingénierie de procédés et l'on attend clairement qu'elles fassent des choix qui ne seront pas remis en question dans les phases ultérieures. Une importante part (70 à 80%) des coûts du projet résulte souvent du travail effectué à ce stade. Des simulations sont effectuées pour les principaux cas dimensionnants et les grandes lignes des schémas de procédés sont établies ; les principaux équipements sont définis de manière à permettre une première estimation de coût.

Le choix du schéma détermine les caractéristiques essentielles du procédé au regard de ses enjeux majeurs, notamment en performance énergétique ; l'ensemble des schémas les plus performants doit avoir été envisagé à ce stade, y compris les plus innovants.

L'existence de bases de projets passés peut permettre aux ingénieurs procédés d'adopter une approche par analogie lors de cette phase d'étude et ainsi de passer en revue un plus grand nombre de cas / de schémas.

Même si ce n'est pas le cas aujourd'hui, ces bases de projets et les nouveaux outils numériques (*machine learning, data analytics*) pourraient accélérer les dimensionnements préliminaires sans recourir à des outils sophistiqués de simulation ou de calcul.

Étude de Base (ou FEED chez les anglo-saxons)

Cette phase, généralement confiée à une société d'ingénierie, a pour but de pousser plus loin le détail de la définition du projet. Pour l'ingénieur procédés impliqué dans cette phase, il s'agit d'optimiser au maximum le schéma de procédés et ses paramètres de fonctionnement. **Des simulations de procédés sont effectuées pour l'ensemble des cas de marche envisagés** ; les équipements et les principaux instruments sont dimensionnés et spécifiés pour couvrir les cas de marche envisagés.

Lors de cette phase, une amélioration du niveau d'**efficacité énergétique** est possible en travaillant sur l'optimisation des principaux paramètres opératoires, le choix des types d'équipements et sur l'intégration énergétique. On s'intéresse également aux rejets et à la mise en sécurité de l'installation en cas de dysfonctionnement (scénarios, logique de sécurité, dimensionnements des instruments de sécurité).

Cette phase est cruciale dans la digitalisation des installations, puisqu'un grand nombre de données sont générées avec un impact fort sur la suite des études. Des fournisseurs de plus en plus nombreux proposent des outils numériques qui vont permettre la structuration, l'unicité du jeu de données et leur partage. Différents aspects de l'ingénierie de procédés peuvent être concernés :

- les simulations de procédés avec l'émergence d'outils disponibles sur des espaces cloud,
- la préparation des spécifications / des schémas PID / des différentes listes (de lignes, d'instruments, d'équipements,...) avec des outils numériques intégrés de DAO (dessin assisté par ordinateur) couplés avec des bases de données intelligentes,
- le développement de modèles 3D des installations,
- l'Assurance Qualité avec une gestion des interfaces facilitée par les bases de données intelligentes,
- le transfert d'une phase d'ingénierie à la suivante sans perte de temps ni d'information.

Étude de Détail et de Réalisation

Ces phases, confiées à des sociétés d'ingénierie et de construction, ont pour but de compléter l'ingénierie du projet et de construire l'installation. Pour l'ingénieur procédés impliqué dans cette phase, il s'agit essentiellement de participer aux choix des équipements, des modules et des fournisseurs puis de s'assurer de leur bonne prise en compte dans l'ensemble de la documentation du projet.

En fin de projet, un jumeau numérique de l'installation pourra être mis à disposition de l'opérateur, basé sur l'ensemble des données consolidées tout au long des différentes phases d'ingénierie. Un portail d'accès aux données de l'installation sera également disponible et permettra l'accès à l'ensemble des outils qui seront utilisés lors de la phase opérationnelle (base de données de l'installation, outils de suivi temps réel, de maintenance, d'inspection, de suivi de l'intégrité...). Ce portail permet de partager les données ou d'y accéder dès lors qu'elles sont validées.

A l'avenir, le jumeau numérique et les différentes bases de données feront partie des principaux livrables d'un projet. Leur tenue à jour sera critique pour la vie des installations mais permettra de

conserver une meilleure connaissance de l'état des installations et une meilleure gestion des modifications.

Phase d'exploitation

La mutation technologique en cours conduit à une intégration de la digitalisation dans les équipements de Génie des Procédés. Ces équipements connectés à leur environnement extérieur sont à même de devenir de plus en plus intelligents (capteurs de mesures physiques intégrés). L'Académie des Technologies a édité un panorama exhaustif des systèmes qui pourront être mis en œuvre dans l'industrie des procédés en particulier³. L'avancée majeure de l'industrie manufacturière peut être un tremplin de transferts de connaissance et de savoir-faire pour le bénéfice de l'industrie des procédés : « Ce système agrège les industries manufacturières, les industries de process et un pan important des services à l'industrie, les *High-Intensity Knowledge Services* (HIKS) ».

Parmi les différents outils de l'industrie du futur, ceux relatifs à la maintenance ont une place de choix. C'est pourquoi les nouveaux outils pourraient apporter de la valeur ajoutée à l'activité de maintenance, telles que la télémaintenance, la réalité virtuelle et la prédiction de fin de vie d'un équipement. Bien entendu plusieurs de ces techniques sont déjà déployées dans l'industrie de l'aéronautique mais sont loin d'être vulgarisées dans l'industrie des procédés. Anticiper les pannes grâce à l'agrégation et l'analyse des données des équipements de production, c'est ainsi que la maintenance prédictive devient un enjeu pour les industriels.

Pionnières dans l'innovation collaborative, les industries de procédés doivent continuer dans cette pratique afin de faire émerger de nouvelles idées et réaliser des projets d'innovation de rupture. Il s'agira de tirer profit des avancées des technologies de l'information pour accroître l'innovation ouverte selon ces deux mécanismes : chercher des idées et des expertises au-delà des frontières (géographiques, culturelles, scientifiques ou techniques) de l'entreprise ou proposer ses expertises vers de nouveaux domaines. Ces approches devraient permettre d'identifier de nouveaux enjeux managériaux et de mettre en évidence des modèles organisationnels permettant de supporter ces formes d'émergence d'expertise.

Quelle formation pour l'ingénieur procédés ?

Les mutations technologiques s'accroissent au rythme de la globalisation des applications et de la poussée des contraintes de la transition énergétique et du développement des énergies renouvelables. Ces ruptures technologiques initiées dans les laboratoires de R&D des entreprises fournisseurs de solutions, en partenariat avec des universités ou des écoles d'ingénieurs, ne cessent d'être développées pour relever les défis de demain. Il est légitime de nous demander si les contenus d'enseignement d'hier sont toujours valables aujourd'hui et s'ils permettent de préparer à bon escient les futurs ingénieurs à leur employabilité de demain.

3 Industrie du futur : du système technique 4.0 au système social, rapport de l'Académie des Technologies, Alain Cadix rapporteur, décembre 2017.

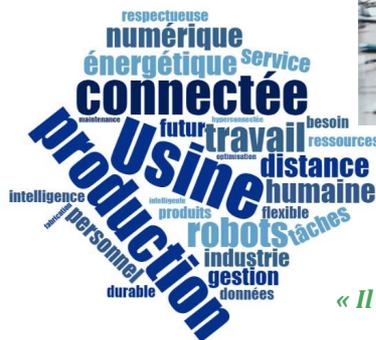
Le socle de base en génie des procédés

Que ce soit aux niveaux français, européen ou international, les formations sont désormais décrites en termes de compétences. Celles-ci restent générales et correspondent aux activités que les diplômés sont appelés à exercer dans leurs futurs métiers. Si on se base sur les recommandations de l'European Accredited Engineer (EUR-ACE®)⁴, pour les formations européennes, ces compétences concernent 8 domaines :

- Connaissances et compréhensions (en mathématique, physique, chimie, biologie...),
- Analyse (d'un procédé, d'un produit chimique... complexes évidemment !),
- Conception (d'un procédé, d'un produit chimique, complexes également !), en particulier les élèves doivent être capables d'intégrer les outils et méthodes d'intensification des procédés pour jouer leur rôle de vecteur de connaissances vers l'industrie.



L'ingénieur du futur vu
par les étudiants
d'aujourd'hui



« Nous grandissons avec un écran devant les yeux, mais sommes éduqués avec un crayon dans la main. Sommes-nous en adéquation avec la société ? »

« Il est crucial d'adapter la formation aux besoins de l'industrie 4.0. Mais quels sont ces besoins, comment les remplir ? »

Dans le cadre de leur projet de fin d'études, deux groupes d'élèves-ingénieurs en Génie des Procédés, à l'ENSIC (Nancy) et à l'ENSACET (Toulouse), ont été amenés à partager leur vision de l'usine du futur et à réfléchir à son impact sur l'évolution de la formation⁵. Les étudiants toulousains se sont appuyés sur un questionnaire diffusé largement aux anciens élèves, aux enseignants, aux membres de la SFGP couvrant les dimensions technologiques, organisationnelles, sociétales et environnementales.

⁵ Clara Masson-Vancostenoble, *l'Ingénieur procédés entre, savoir acquis et Industrie 4.0*, ENSIC, Projet Recherche et Développement 2018-2019, sous la responsabilité d'Eric Schaer et Jean-Claude André - Nicolas Barrabes, Embrun Gadin, Salomé Lécuyer, Sara Schulligen, ENSACET, projet de 1^{ère} année, sous la responsabilité de Xuân-Mi Meyer, 2019

⁴ <https://www.enaee.eu/>

- Capacité à développer des recherches (expérimentales, bibliographiques, numériques),
- Compétences métier : connaissance des appareillages, des logiciels, des normes, des aspects liés à l'hygiène, la sécurité et l'environnement, ou encore à la gestion humaine et financière,
- Prise de décisions (en intégrant les aspects éthiques, sociaux, financiers ... et techniques),
- Communication (l'importance de l'anglais n'est plus à démontrer ; les diplômés doivent aussi communiquer avec leurs pairs, et avec la société en général),
- Formation continue : le temps de formation initiale ne permet pas de couvrir ou d'approfondir tous les concepts liés à l'usine du futur. Il paraît indispensable de développer l'apprentissage tout au long de la vie d'autant plus que la dynamique des changements dans la production industrielle ne fera que devenir plus tendue.

Génie des procédés et digitalisation

L'importance du numérique dans le travail des ingénieurs en Génie des Procédés n'est plus à démontrer. Que ce soit pour la description de phénomènes physiques, chimiques, réactifs, physico-chimiques, thermodynamiques, hydrodynamiques, multiphasiques... les méthodes numériques permettent désormais de décrire des phénomènes complexes, souvent très fortement couplés, et apportent des solutions complémentaires concernant l'analyse, la modélisation et l'extrapolation des phénomènes observés. Il est important que les diplômés soient formés à l'utilisation de logiciels dédiés, mais soient aussi capables de développer des codes de calcul spécifique. La modélisation/simulation, revient en force car elle permet de faire de la « donnée » un élément fondamental pour comprendre et maîtriser le procédé. Elle permet d'analyser, de capitaliser et de créer de la performance continue au travers de nouveaux modèles ou simulations. C'est ainsi que la formation de base et continue de l'Ingénieur du Futur devra renforcer cette dimension.

L'intégration des nouvelles technologies digitales nécessite de développer de nouvelles compétences ou d'en approfondir certaines. Il est difficile pour les ingénieurs procédés de maîtriser l'ensemble des technologies du numérique en plus des connaissances de bases spécifiques à leur domaine. De la même manière, les spécialistes du numérique ne peuvent pas être des experts des opérations unitaires de génie chimique. Il convient donc d'offrir les conditions permettant aux deux communautés de travailler ensemble et donner à chacun les connaissances minimales nécessaires à une interaction efficace.

Le traitement des données, ou « Big Data », qui concerne aussi l'apport du numérique à la gestion des entreprises et l'optimisation globale des systèmes de production annonce aussi une forte évolution des métiers de l'ingénieur. Les nouveaux outils permettent de connecter entre eux l'ensemble des moyens de production avec des retombées instantanées sur la production, la prise de décision, la gestion des stocks et la coordination des différents métiers. Dans ce contexte, le futur diplômé se devra d'être à l'aise avec ces outils. On parle ici de traitement du signal, de dynamique des systèmes, contrôle-commande...

Enfin, l'intelligence artificielle ne pourra être absente du bagage de l'ingénieur. Les technologies associées (*machine learning, reasoning, computer vision/speech recognition, natural language processing*) devraient permettre des améliorations disruptives dans les industries sur le plan de la

performance mais également de la création de valeur. Elles impacteront le développement produit, les activités de R&D, l'exploitation des unités et la chaîne logistique.

Il convient de souligner ici l'importance pour les écoles d'ingénieur de recruter des élèves avec un bon niveau en mathématiques et en informatique, ayant un attrait pour les industries de transformation de la matière et de l'énergie ainsi que pour les services associés.

Formation à et par la recherche

La formation des jeunes chercheurs doit également contribuer à construire l'usine du futur. Les doctorants devront travailler avec les outils numériques, qui prennent en charge les technologies de production et apprendre à gérer des produits intelligents basés sur les exigences des clients. L'objectif de la formation sera de donner aux étudiants une compréhension globale et relativement générique des interrelations et des dépendances entre les processus intimes des procédés, l'informatique et l'automatisation. La collaboration entre le monde universitaire et l'industrie est cruciale. La production du savoir par la recherche, la diffusion du savoir par l'éducation ainsi que l'utilisation et l'application du savoir par l'innovation est l'approche appropriée. L'ingénieur du futur devra soutenir le développement de machines toujours plus puissantes et autonomes, les centres de formation et de recherche devront également intégrer ces évolutions et se positionner au cœur des processus d'innovation.



Les laboratoires de recherche, incubateurs de jeunes pousses...

Les start-up issues des laboratoires doivent permettre un développement plus rapide des compétences et des technologies clés.

A l'issue d'une thèse portant sur l'intensification d'un photobioréacteur au **GEPEA** (Génie des Procédés Environnement – Agroalimentaire) à Saint-Nazaire, Charlène Thobie a rejoint **AlgoLight**, une spin-off qui vise à valoriser la technologie de culture de micro-algues développée et brevetée dans le cadre du projet collaboratif Priam associant le laboratoire, l'institut Pascal et **Brochier Technologies**. La structure va s'installer sur la nouvelle plate-forme de recherche **Algosolis**, créée par le GEPEA pour relever les défis de l'extrapolation des procédés utilisant des micro-algues.



« Au-delà des connaissances et des méthodes acquises, ma thèse m'a permis de tisser un réseau scientifique propice à l'établissement de futures collaborations. C'est un beau challenge de travailler pour développer une start-up et le fait d'être en contact étroit avec des chercheurs du domaine permet de rester à la pointe de l'innovation » - Charlène Thobie.

Challenges & opportunités

On le voit au travers des exemples illustratifs précédents, l'usine du futur n'est pas UNE. Dans le domaine de la transformation de la matière comme dans d'autres métiers, c'est d'abord une organisation humaine et technologique qui répond et s'adapte aux enjeux sociétaux, environnementaux, technologiques, économiques, sans oublier ceux de la demande de ses clients.

De multiples usines du futur sont donc possibles. Contexte local, histoire et taille d'entreprise, type de marché desservi, vision de son devenir... autant de facteurs qui modulent la forme que peut prendre une usine dans le futur.

En tant qu'entité organisée, l'usine du futur est et restera un lieu qui crée des biens et services et innove pour les mettre à disposition. A ce titre elle est engagée dans une dynamique à la fois de progrès et de résultats. Elle se veut attractive et engageante pour son personnel, responsable et intégrée à son écosystème, flexible et compétitive sur son marché, créatrice de valeur pour ses clients.

Dans ce cadre, l'usine du futur dans le domaine des procédés de transformation de la matière fait face en France et en Europe à un certain nombre de défis et d'opportunités, liés à une présence industrielle historique et un contexte d'évolution concurrentiel et sociétal fort et fortement renouvelé.

Quelles sont donc les forces et plus grands atouts actuels pour favoriser l'émergence de l'usine du futur en France ?

Nous retiendrons :

- ▶ **un réseau académique, industriel et technologique actif,**
- ▶ des **pôles de compétitivité** pour rassembler et connecter académie, PME et grands groupes, ainsi que des compétences et métiers divers, ce qui favorise l'interdisciplinarité y compris dans le tissu industriel,
- ▶ **une vraie culture de l'instrumentation et du traitement de données**, y compris hors des domaines de la chimie et du raffinage qui ont une très forte culture historique en ce sens. Elle s'appuie sur un riche tissu industriel et de compétences bien formé,
- ▶ un **engagement existant et croissant dans la mutation environnementale**, avec la chimie verte, avec une culture de l'optimisation des procédés et le soutien social par des acteurs individuels engagés (dont les créateurs de start-up) ou institutionnels,

- ▶ une **formation d'ingénieurs "à la française"**, avec des ingénieurs de spécialité et des ingénieurs plus généralistes et transverses, favorisant la réceptivité à de nouvelles approches et à l'innovation.

Quelles sont aussi les opportunités sur lesquelles peut s'appuyer l'environnement industriel pour développer l'usine du futur ?

Elles apparaissent multiples et touchent tous les niveaux d'une entreprise. De multiples possibilités d'adaptation apparaissent selon les entreprises, possibilités dont le sens et la pertinence dépendent d'une culture locale du changement, de l'adaptation et du progrès.

Nous retiendrons :

- ▶ **L'exploitation des nouveaux développements technologiques tirés par les énergies renouvelables et poussés par les progrès dans la connaissance du matériau** : l'électrochimie pour les piles et batteries électrolytiques, la pile à hydrogène, la chimie du silicium, les matériaux à changement de phase...
- ▶ **Le développement des procédés et services dans le cadre d'une économie circulaire** : l'approche d'économie circulaire est une tendance de fond extrêmement lourde, imposée par la massification de nos productions et usages de matériaux et soutenue par la transition écologique. C'est aussi un territoire largement vierge qui recèle un grand potentiel de développement. Le développement d'une économie circulaire poussée (i.e. avec transformation après usage pour servir d'entrant comme pour le granulat bâtiment) implique de repenser le processus et pas seulement la technique, sans oublier l'économie.
- ▶ **La gestion des connaissances** : toute industrie est l'expression d'une maîtrise concrétisée de connaissances ; le maintien, la transmission et le développement des connaissances dans un secteur sont de vrais sujets, surtout dans un monde où une partie de la connaissance est publiée « en ligne ». L'apparition de nouvelles manières de transmettre, comme le développement de modules de formation en ligne, et l'apport de l'Intelligence Artificielle pour des formations sur mesure ou plus spécifiques, témoignent d'un secteur en profonde mutation.
- ▶ **L'exploitation des opportunités de la digitalisation** :
 - multiplication des capteurs (IoT),
 - apparition de nouveaux capteurs favorisant la synthèse automatisée et intelligible des infos,
 - extension de la télésurveillance à différentes échelles de temps (long comme très court),
 - répartition dans l'espace de la surveillance des procédés avec différents niveaux de compétence.

La collecte des données au-delà des presque classiques systèmes d'information de laboratoire (LIMS en anglais) et la création de l'usine digitale sont en route : les "data-lake" exploitables par tous émergent, le contrôle industriel poursuit sa mutation avec la généralisation de l'idée du jumeau digital. La communication sécurisée de l'information à distance est une réalité via les réseaux de données (Internet). Elle permet le partage

collaboratif de l'information et favorise le développement de l'intelligence collective. Cela favorise le besoin de personnel à très forte compétence mais aussi à basse spécialisation.

- ▶ **L'exploitation des avancées technologiques des domaines connexes à la transformation des matériaux :** miniaturisation en instrumentation, progrès des capteurs et du traitement d'image, robotisation (logistique et manutention), nouveaux modes de fabrication (impression 3D, etc.), intégration des chaînes de design dans les projets, conception de procédés intensifiés (par les microtechniques par exemple).
- ▶ **La création de nouveaux services :** apport de plus-value, par une meilleure maîtrise des fabrications ou par service au client nouveau ou amélioré.
- ▶ **La mutation des réseaux de service aux usines :** réponse aux attentes dans l'accélération de la chaîne de conception des projets (modélisation intégrée E2E), amélioration de la flexibilité globale des chaînes et flux de production.

Ces opportunités d'évolution et de développement sont sous-tendues par les directions vers lesquelles l'industrie des procédés souhaite s'orienter. Les **grands thèmes vers lesquels se projette ce domaine d'activité** sont :

- ▶ **Développer une chimie verte et respectueuse de l'environnement :** intégration de la maîtrise des procédés d'épuration et de traitement, recyclage des déchets, élaboration de polymères et matériaux dans un cycle d'économie circulaire, maîtrise des ressources (amélioration du rendement, baisse des besoins énergétiques...).
- ▶ **Développer des produits et des services désirés par le client :** élargissement et adaptation de l'offre de service pour répondre aux attentes du client, accroissement de la disponibilité des produits dans des délais correspondant aux attentes du client.
- ▶ **Promouvoir des opérations orientées vers le client :** amélioration de la performance de la "supply chain", contrôle accru des coûts de transformation et de revient, maîtrise des évolutions (introduction de nouveaux produits, procédés, projets).
- ▶ **Construire des équipes performantes :**
 - un management autonome dans l'obtention de la performance et du progrès,
 - un management des compétences adapté aux enjeux de la démographie et de la flexibilité, qui favorise un apprentissage initial réussi, le développement continu des compétences et l'évolutivité des personnes,
 - des employés satisfaits et engagés,
 - un cadre de travail collectif épanouissant,
 - sur le plan technique, des comportements de sécurité, des travaux ergonomiques
- ▶ **Proposer des outils industriels au service de l'efficacité et de l'efficience :**
 - des standards et de l'interopérabilité au sein de chaque société: les fondamentaux culturels et techniques sont partagés, les cycles de vie des différents objets mis en œuvre (produit, machine, méthode...) sont gérés,
 - des technologies efficaces et productives et des méthodes de suivi et de contrôle à la hauteur des spécifications produit-procédé,
 - des outils et procédés flexibles. Ils ont reconfigurables, transposables... en fonction de la demande et la modularité des équipements est prévue dès leur conception,

- une digitalisation accrue pour le monitoring en temps réel des systèmes productifs (procédé, stocks, approvisionnements...) avec des instruments et capteurs plus nombreux et plus performants pour des interprétations plus riches (intelligence artificielle, machine learning, deep learning) favorisant une création de valeur,
- la mise en œuvre rapide des leviers de réduction de l’empreinte environnementale pour internaliser les coûts externes de leur traitement.

Ces aspirations seront concrètes et tangibles lorsque l’écosystème autour de l’usine les percevra. En pratique, cela signifie que l’usine pourra se positionner favorablement sur les multiples dimensions suivantes :

- ▶ **L’évolution et la modification profonde de la demande client auront été anticipées et prises en compte.** Ce thème est d’importance, les enjeux de la transition écologique devant amener à une forte évolution de la structure de la demande en produits chimiques et en matériaux issus de l’économie circulaire. L’impact du remplacement du véhicule à moteur à explosion par le véhicule électrique en fournit une illustration claire.
- ▶ **Le client sera satisfait, fidèle et partenaire du progrès.** Il disposera de produits et services personnalisés, suivis tout au long du cycle de vie, depuis la fabrication jusque dans les usages et la fin de vie, avec un cycle court d’innovation ou d’adaptation.
- ▶ **L’usine sera efficace, efficiente et intégrée dans son environnement.** Grâce à une communication et une visibilité au sein du milieu professionnel, dans la vie sociale et économique locale, l’usine est acceptée et plébiscitée dans la durée. En parallèle, ses indicateurs industriels de production (service au client, performance économique, santé et sécurité, impact environnemental, intensité capitalistique, qualité de fabrication, engagement des employés...) sont très satisfaisants et elle sait et peut mener avec diligence et efficacité des projets de modification.
- ▶ **Les salariés seront engagés et épanouis.** Cela est favorisé par une culture industrielle ainsi qu’une organisation et un développement des compétences permettant de bien vivre les transformations à venir. Les trajectoires de formation anticipent et développent le potentiel de mobilité professionnelle pour faire face aux risques de reconversion ou d’évolution des activités. Des indicateurs sociaux de satisfaction suivent cette situation et sont analysés et traités avec attention.
- ▶ **Les salariés seront continûment formés et développés.** Les centres de formation et de transmission des connaissances proposent des pistes d’évolution pour les contenus et des modes de formations des futurs opérateurs techniciens et ingénieurs. Elles sont évaluées puis largement diffusées.
- ▶ **La société et les plus jeunes en particulier sont intéressés par ces activités professionnelles.** Cette sensibilité est développée par une communication auprès du monde académique et universitaire et la mise en évidence par l’exemple des dimensions précédentes.



Le Génie des Procédés face aux enjeux industriels et sociétaux de l'usine du futur

Quelle vision de la SFGP ?

Ce document est d'abord le produit du travail intense d'un groupe d'experts en Génie des Procédés, passionnés par leur discipline et convaincus de son importance pour les évolutions industrielles et sociétales à venir. Il présente les nombreuses facettes du concept d'Usine du Futur et témoigne des transformations déjà en cours dans les industries de procédés, industries multi-secteurs de transformation de la matière et de l'énergie. Il témoigne aussi des évolutions nécessaires de l'enseignement, pour transmettre un savoir toujours plus étendu à des générations nées avec la révolution numérique.

Au final, ce livre blanc de la SFGP vise surtout à montrer que l'Usine du Futur est riche d'opportunités pour les économies occidentales. Au-delà du seul exercice de prospective, la SFGP veut présenter sa vision à 2050 des industries de procédés et proposer des actions concrètes pour accompagner cette transformation.

L'usine des industries de procédés en 2050

L'usine du futur sera intégrée à son environnement, répondant pour partie aux besoins en produits et en énergie de la boucle locale. Elle sera interdépendante des autres acteurs de cette boucle locale, avec lesquels elle devra se coordonner pour planifier sa production au coût global minimum, dans un but de création de valeur pour tous.

Son design s'appuiera assurément sur le concept d'intensification de procédé, qui permet de gagner en efficacité et de réduire sous-produits et pertes énergétiques. Cette plus grande performance opérationnelle se traduira également en une meilleure maîtrise des risques industriels, en toute transparence avec le citoyen. Cette plus grande transparence est rendue possible par le développement des capteurs connectés permettant le suivi efficace des interactions avec le milieu extérieur et des contrôles qualité.

La production sera décarbonée, par l'usage d'énergie renouvelable ou le développement de procédés biosourcés. La mobilisation et l'affectation des ressources devront se faire en concertation pour sélectionner la meilleure solution et limiter les transports. La recyclabilité des produits fait partie intégrante du cahier des charges, avec l'identification en amont des boucles de valorisation vers de nouveaux usages lorsque les propriétés d'application s'en trouvent dégradées.

L'usine elle-même sera recyclable, dans ses équipements ou ses modules intrinsèques. Le concept de modularité est en ce sens particulièrement attrayant, car il réduit les coûts de design et propose un nouveau paradigme d'extrapolation, par le "numbering-up" plutôt que le "scale-up". Les investissements sont ainsi mobilisés par paliers, pour mieux accompagner l'essor du marché et réduire les risques économiques. Cette modularité exige néanmoins une standardisation des équipements pour chaque opération unitaire, et donc une collaboration étroite des industriels pour définir et commercialiser ces standards.

Nous avons aussi défini les évolutions nécessaires de l'enseignement du Génie des Procédés, dans la forme, pour mieux répondre aux attentes des générations en symbiose avec les outils numériques, et dans le fond, pour maintenir les fondamentaux de la discipline tout en tenant compte du développement des outils de modélisation et du partage de l'expertise dans les réseaux.

Les actions proposées par la SFGP

Une vision a été développée par notre groupe de travail et le débat est donc ouvert : comment accompagner la transformation vers cette Usine du Futur ?

Sans doute faut-il élargir la vision et se confronter aux travaux d'autres groupes de réflexion dans le domaine des procédés ? Forte de son réseau d'industriels et d'académiques, couvrant les différents secteurs de l'industrie de procédés, la SFGP entend prendre part aux grandes initiatives françaises et européennes dans le domaine. Des contacts sont déjà engagés avec d'autres sociétés savantes, notamment l'AFM (Association Française de Mécanique) et la SFT (Société Française de Thermique) en vue de contribuer aux travaux de l'*Alliance Industrie du Futur*. Au niveau européen, la SFGP est déjà reconnue comme un partenaire de premier plan par la fédération européenne de génie chimique (EFCE), qui lui a confié l'organisation à Paris, en septembre 2018, du premier forum européen sur les nouvelles technologies, consacré à l'impression 3D.

La SFGP souhaite aussi associer les décideurs à sa démarche, en diffusant son livre blanc aux acteurs académiques, industriels et politiques. Des rencontres seront organisées pour sensibiliser ces décideurs et mobiliser des ressources pour valider les concepts avancés. Nous sommes convaincus que des étapes de démonstration sont nécessaires pour évaluer les performances techniques, économiques et environnementales des nouveaux concepts portés par l'usine du futur. Les enjeux sociétaux sont majeurs et les initiatives doivent être construites dans un esprit ouvert, associant public et privé et produisant des résultats visibles de tous, comme par exemple :

- ▶ des investissements d'infrastructures pour développer les "éco-clusters industriels" (procédés biosourcés, usines connectées, réseaux d'échanges d'énergie, usines de valorisation des sous-produits industriels...),
- ▶ le développement de nouvelles méthodes d'ingénierie, s'appuyant sur le concept de modularité et associant industries de procédés et équipementiers,
- ▶ le développement des outils numériques adaptés, par exemple des outils de réalité virtuelle partagés en synergie avec les besoins des industriels (design, formation, sécurité des procédés) et ceux des universitaires (enseignement, modélisation, études de cas réels industriels).

Ces grands enjeux sont à la croisée de nombreuses disciplines et le génie des procédés, science d'intégration par essence, apte à appréhender des problématiques transversales, est au cœur de cette mutation.

La transformation de nos procédés est un enjeu majeur pour une réindustrialisation responsable : Ensemble, mobilisons-nous pour relever le défi !

L'édition de ce livre blanc est une initiative de la **Commission Usine du Futur de la SFGP**.

Il a pu être réalisé grâce aux contributions de :

Laurent Baseilhac, Arkema
 Jean-Philippe Batard, Solvay
 Guillaume Briend, BDI
 Eric Camarasa, Seqens
 Thierry Cartage, Solvay
 Didier Caudron, Sanofi
 Julien Chalet, Evolis
 Jean-Pierre Dal Pont, SFGP
 Claude De Bellefon, LGPC Lyon
 Eric Dekeyzer, Total
 Sébastien Elgue, CRITT GPTE, Toulouse INP
 Laurent Falk, LRGP Nancy
 Raphaël Faure, Air Liquide
 Marc Ferrato, Mersen Boostec
 François Giger, SFGP
 Jean-Emmanuel Gilbert, Aquassay
 Stéphane Gilbert, Aquassay
 Christophe Gourdon, Toulouse INP-ENSIACET, LGC
 Philippe Grenier, Total
 Dominique Horbez, Solvay
 Jean-François Joly, IFPEN
 Paul-François Jullien, BDI
 Pierre Kiener, Michelin
 Jack Legrand, GEPEA Saint-Nazaire
 Jean-Sébastien Lhospitalier, Methelec
 Xuân-Mi Meyer, Toulouse INP-ENSIACET, LGC
 François Nicol, Veolia
 Martine Poux, Toulouse INP-ENSIACET, LGC
 Pascal Rousseaux, Processium
 Mongi Sakly, Sanofi
 Bernard Saulnier, Air Liquide
 Eric Schaer, LRGP Nancy



Crédits photographiques

p.11 : IFPEN	p.21bas : Bretagne Développement Innovation
p.12, 13 : Arkema	p.22, 23 : Aquassay
p.14 : LGC Toulouse	p.24 : Méthélec
p.15, 20 haut : Air Liquide/Caroline Bertail	p.25 : Seqens
p.16, 17, 21haut : Solvay	p.26 : Mersen Boostec
p.18 : Total	p.32 : Solvay/Shutterstock
p.19 : Adobe Stock/Fotolia	p.34 : Algosolis
p.20 : Veolia /Marielle Guigal	



Société Française de Génie des Procédés

28 rue Saint-Dominique 75007 PARIS

secretariat@sfgp.asso.fr

www.sfgp.asso.fr

Octobre 2019

ISBN : 978-2-910239-87-9