

---

# Technology Outlook 2019

Version française

## Impressum

### Auteurs

Christophe Ballif, Rebecca Buller, Max Erick Busse-Grawitz, Ulrich Claessen, Andreas Conzelmann, Alessandro Curioni, Lukas Czornomaz, Reinhard Czichy, René Dändliker, Djordje Filipovic, Willy Gehrler, Bernhard Gerster, David Grosspietsch, Daniel Gygax, Gerrit Hagens, Manfred Heuberger, Pavel Hora, Paul Keller, Wolfgang Kröger, Thomas Kuchler, Andreas Kunz, Roland Küpfer, Christian Leinenbach, Frank Liebisch, Urs Mäder, Niko Manopulo, Roger Marti, Hans-Peter Meyer, Bradley Nelson, Andrew Paice, Sven Panke, Thomas Puschmann, Michael Raghunath, Peter Richner, Thomas J. Schmidt, Roland Siegwart, Adriaan Spierings, Lars Sommerhäuser, Bernhard Tellenbach, Andrea Vezzini, Erich Windhab

### Steering (Conseil scientifique de la SATW)

Hans Altherr, Bernhard Braunecker, Robert Frigg, René Hüsler, Peter Seitz, Ulrich W. Suter, Alessandro Tschabold

### Direction du projet

Claudia Schärer

### Rédaction

Beatrice Huber, Adrian Sulzer

### Review

Tony Kaiser

### Traduction

Maud Capelle

### Graphisme

Andy Braun

### Photos

Fotolia

Mars 2019

# Avant-propos

La comparaison des performances de l'industrie suisse et de celles de notre concurrence globale revient souvent à un constat aussi positif que peu différencié. Cela peut inciter à se reposer sur ses lauriers et à exploiter en tant que simples «cash cows» les domaines d'activité qui opèrent actuellement avec succès sans grands investissements dans la recherche et le développement. bercé par les résultats, on en oublie d'œuvrer au renouvellement et à l'innovation. On gaspille les avantages que confère un domaine d'activité profitable, bénéficiant encore souvent d'un personnel informé, expérimenté, motivé et adapté aux besoins de la recherche et du développement. En y regardant de plus près, il apparaît pourtant vite que l'innovation et l'adaptation s'imposent.

Tout observateur du paysage industriel global en aura pris conscience: le renouvellement est devenu plus important. La pression à l'innovation s'accroît sur les entreprises établies. Le temps disponible entre invention et entrée sur le marché diminue. Afin de pouvoir survivre, les entreprises doivent décider plus en amont de la trajectoire de renouvellement de leur portefeuille de produits, ainsi que de leur stratégie pour s'affirmer dans la course à l'innovation.

Pour devenir actif plus tôt dans cette course à l'innovation, il faut aussi être informé plus tôt. En 2015, la SATW avait présenté à cet effet en guise de ballon d'essai son premier Technology Outlook. Il avait reçu un accueil favorable, mais il souffrait encore de certaines faiblesses et de certains angles morts. Le Technology Outlook 2017 y a remédié en assurant la couverture de domaines importants mais «négligés». L'expérience des quatre années écoulées a montré que, pour un Technology Outlook, un intervalle de deux ans permettait le bon recul par rapport aux méandres et aux convolutions d'un environnement industriel en pleine mutation et au battage médiatique qui les accompagne. Vous tenez donc en main le Technology Outlook 2019. Marquant une étape importante, le Comité a confié au Conseil scientifique de la SATW la responsabilité du projet «Technology Outlook». Le contenu et l'envergure de la publication en ont certainement bénéficié. Comparé aux éditions précédentes, les auteurs ont approfondi leurs recherches, mieux structuré les contenus et adopté une approche plus quantitative. Les mécanismes de contrôle de qualité de la SATW, assurant l'appréciation critique des textes par différentes instances, ont bien fonctionné. L'élaboration du manuscrit dans sa forme finale doit beaucoup au travail de rédaction du Secrétariat. Je remercie vivement toutes les personnes impliquées!

Au nom du Conseil scientifique, je vous souhaite une lecture stimulante. Nous espérons que le Technology Outlook 2019 pourra vous être précieux.



Ulrich W. Suter | Président du Conseil scientifique de la SATW

# Sommaire

<b>Avant-propos</b>	<b>3</b>
<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>Importance des technologies pour la Suisse</b>	<b>8</b>
<b>Comparaison internationale</b>	<b>13</b>
<b>Description des technologies</b>	<b>20</b>
<b>Le monde numérique</b>	<b>20</b>
<b>Blockchain</b>	<b>21</b>
La technologie blockchain comme base de services web	21
<b>Cybersécurité</b>	<b>22</b>
Cryptographie et informatique quantique	22
<b>Industrie 4.0</b>	<b>23</b>
Réalité augmentée – applications industrielles	23
Jumeau numérique	24
Machines connectées	25
<b>Intelligence artificielle</b>	<b>26</b>
Analyse de big data	26
Machines apprenantes et réseaux neuronaux	27
<b>Robotique</b>	<b>28</b>
Drones	28
Robotique collaborative	29
<b>Énergie et environnement</b>	<b>30</b>
<b>Gestion de l'énergie</b>	<b>31</b>
Systèmes énergétiques décentralisés	31
Réseaux intelligents	32
Stockage futur de l'énergie	33
<b>Sources d'énergie renouvelables</b>	<b>34</b>
Géothermie	34
Photovoltaïque	35
<b>Agriculture</b>	<b>36</b>
Sources alternatives de protéines	36
Utilisation de drones dans l'agriculture de précision	37
Production alimentaire durable	39

<b>Mobilité</b>	<b>40</b>
E-mobilité: véhicules et infrastructures électriques	40
Concepts de mobilité	41
Véhicules automatisés	42
<b>Habitat intelligent</b>	<b>43</b>
Villes intelligentes	43
Bâtiments intelligents	45
<b>Procédés de fabrication et matériaux</b>	<b>46</b>
<b>Fabrication additive</b>	<b>47</b>
Développement de matériaux pour la fabrication additive	47
Procédés liés à la fabrication additive	48
<b>Matériaux du futur</b>	<b>49</b>
Bioplastiques	49
Fibres fonctionnelles	50
<b>Photonique et technologie de la lumière</b>	<b>52</b>
Traitement de surface au laser	52
Télécommunications optiques spatiales	54
La photonique en tant que technologie habilitante	55
<b>Sciences de la vie</b>	<b>56</b>
<b>Production chimique durable</b>	<b>57</b>
Biocatalyse et biosynthèse	57
Procédés de fabrication en continu	59
Biologie synthétique	61
<b>Médecine de précision</b>	<b>62</b>
Robots chirurgicaux	62
Alimentation personnalisée	63
Diagnostic point-of-care	64
<b>Médecine régénérative</b>	<b>65</b>
Bio-impression 3D: imprimer des organes	65
Culture de masse de cellules souches	66

A large array of solar panels is shown from a low angle, receding into the distance. The sun is low on the horizon, creating a bright, golden glow and casting long, soft shadows across the panels. The sky is filled with scattered, white clouds. The overall scene conveys a sense of clean, renewable energy.

# Introduction

L'une des missions principales de la SATW porte sur l'identification précoce de nouvelles technologies potentiellement disruptives qui s'avéreront importantes pour l'économie et la société suisses dans les trois à cinq années à venir. Tous les deux ans, la SATW compile à cet effet un rapport public d'identification précoce qui présente ces technologies et évalue leur importance. La troisième édition de ce Technology Outlook est enrichie de plusieurs nouveautés.

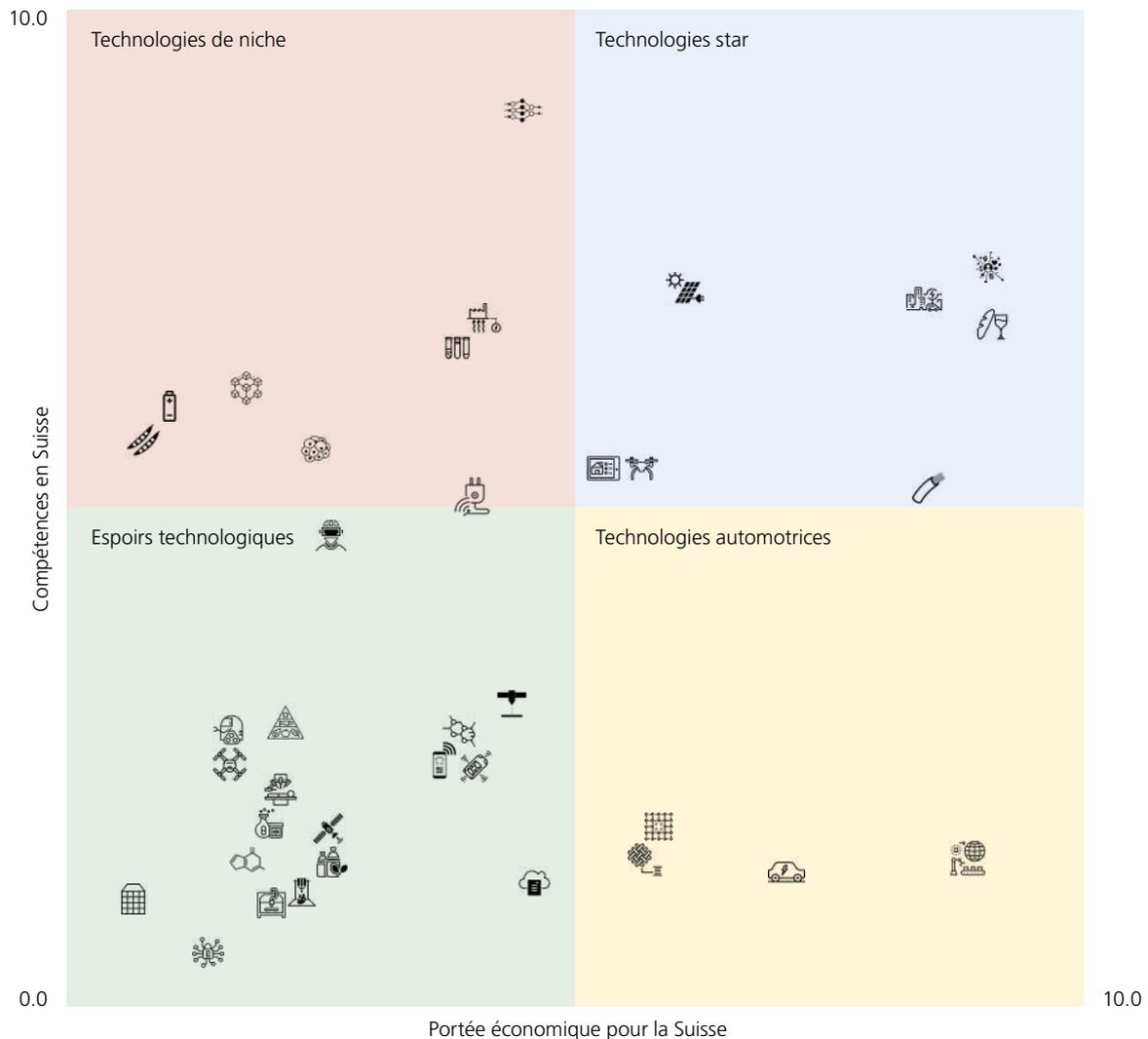
La grille de lecture permettant d'identifier les technologies pertinentes a ainsi été à la fois élargie et affinée: le rapport recense cette fois 37 technologies issues des domaines les plus conséquents pour l'économie suisse. Cette liste a été compilée en étroite collaboration avec le Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI) et plus de 70 expertes et experts. La sélection tient compte de l'importance des technologies pour la Suisse et de leur degré de maturité technologique. Certaines technologies comme les cryptomonnaies, les capteurs intelligents ou l'énergie éolienne ne figurent donc pas dans le rapport, soit parce qu'elles ne correspondent pas à l'horizon visé de trois à cinq ans, soit parce qu'elles sont peu pertinentes pour l'économie suisse. La SATW a conscience que certaines des technologies décrites relèvent plus de l'ordre du domaine thématique que de celui de la technologie individuelle. Cela s'explique par la perception de ces développements technologiques dans le monde politique et au sein de l'opinion publique, phénomène également observable dans des publications européennes comparables.

Pour la première fois, le Technology Outlook est enrichi d'une dimension semi-quantitative. Ces informations s'appuient sur les connaissances de nos expertes et experts ainsi que sur des recherches approfondies, et elles permettent d'évaluer la signification relative des différentes technologies pour la Suisse. «Star», «automotrice», «niche» ou «espoir» – sur la base des informations compilées, chaque technologie est affectée à l'un de quatre quadrants définis par la portée économique et les compétences en Suisse. Il sera intéressant d'observer comment les positions des technologies évolueront d'ici la quatrième édition du Technology Outlook dans deux ans.

Autre nouveauté de ce Technology Outlook: la comparaison internationale, que la SATW et le SEFRI considèrent précieuse et souhaitable. L'analyse de posts et de tweets concernant les technologies recensées publiés sur les comptes officiels d'universités européennes sur les réseaux sociaux permet de comparer la Suisse à une sélection de pays européens. Même si des technologies comme l'«analyse de big data» ou la «blockchain» dominent les discussions universitaires dans la plupart des pays, il existe aussi de nettes disparités. Ces différences concordent avec la perception publique de l'orientation industrielle respective des pays.

Nous adressons tous nos remerciements aux nombreux auteur(e)s: sans leur engagement et leurs connaissances, il aurait été impossible de mener à bien une publication d'une telle exhaustivité. Nous vous remercions de votre intérêt et vous souhaitons une excellente lecture riche en nouvelles perspectives.

# Importance des technologies



**Graphique 1: Importance relative des technologies pour la Suisse**

L'axe horizontal indique la portée économique des technologies pour la Suisse, l'axe vertical les compétences disponibles en Suisse.<sup>1</sup>

Sous forme de diagramme à quatre quadrants, le graphique 1 indique pour les technologies recensées dans le Technology Outlook leur portée économique (axe horizontal) et les compétences en Suisse (axe vertical), ces dernières dépendant de l'intensité des activités de recherche universitaires et industrielles. La temporalité est celle d'un instantané incluant la perspective de l'avenir proche, car la portée économique tient compte aussi bien du chiffre d'affaires actuel que du chiffre d'affaires potentiel futur. Il s'agit du chiffre d'affaires généré par des en-

treprises établies en Suisse avec la vente de produits et de services dans le monde entier. Le chiffre d'affaires comprend aussi les activités de montage ou de service effectuées en Suisse pour des produits importés. L'axe vertical – les compétences en Suisse – représente le nombre des équipes de recherche universitaires et industrielles actives en Suisse. Le graphique 2 montre les cinq technologies présentant respectivement la plus grande portée économique (à gauche) et les plus grandes compétences en Suisse (à droite).

# pour la Suisse

## Technologies de niche

-  Sources alternatives de protéines
-  Blockchain
-  Systèmes énergétiques décentralisés
-  Géothermie
-  Machines apprenantes
-  Culture de masse de cellules souches
-  Diagnostique point-of-care
-  Stockage futur de l'énergie

## Espoirs technologiques

-  Bio-impression 3D
-  Réalité augmentée
-  Véhicules automatisés
-  Biocatalyse et biosynthèse
-  Bioplastiques
-  Jumeau numérique
-  Drones dans l'agriculture de précision
-  Robotique collaborative
-  Procédés de fabrication en continu
-  Cryptographie et informatique quantique
-  Développement de matériaux pour la fabrication additive
-  Concepts de mobilité
-  Traitement de surface au laser
-  Robots chirurgicaux
-  Télécommunications optiques spatiales
-  Alimentation personnalisée
-  Biologie synthétique
-  Procédés liés à la fabrication additive

## Technologies star

-  Analyse de big data
-  Drones
-  Production alimentaire durable
-  Photonique
-  Photovoltaïque
-  Villes intelligentes
-  Bâtiments intelligents

## Technologies automotrices

-  E-mobilité
-  Fibres fonctionnelles
-  Réseaux intelligents
-  Machines connectées

### Technologies «star», «automotrices», «niche» et «espoir»

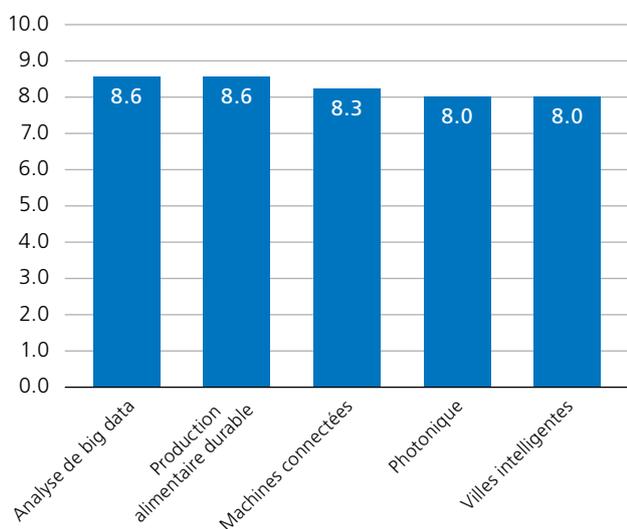
Les technologies situées dans le quadrant bleu en haut à droite sont les technologies «star». La Suisse y possède de fortes compétences nourries par des activités intenses de recherche universitaire et industrielle, et leur portée économique est considérable. Elles assurent à la Suisse des revenus importants et créent des emplois. Leur positionnement est donc excellent pour un développement ultérieur positif. Il s'agit de renforcer ces technologies et de saisir les opportunités de nouveaux domaines d'activité commerciale. Cela nécessite des efforts supplémentaires

et soutenus; les entreprises et les instituts de recherche actifs dans les technologies de ce quadrant ne doivent pas se reposer sur leurs lauriers. Il leur faut valoriser plus largement les connaissances et le savoir-faire acquis.

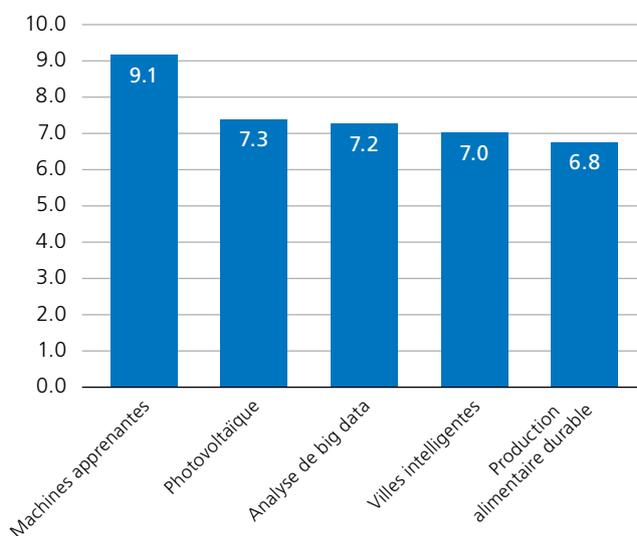
Les technologies dans le quadrant jaune en bas à droite relèvent d'un «heureux hasard» pour la Suisse. Alors que les compétences en Suisse y sont plutôt peu développées, c'est-à-dire que peu d'organismes de recherche se penchent sur ces thématiques, elles génèrent un chiffre d'affaires important. Ces technologies sont «automotrices». Il s'agit de technologies parvenues à maturité, bien

<sup>1</sup> Cette liste a été compilée en étroite collaboration avec le Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI) et plus de 70 expertes et experts. La sélection tient compte de l'importance des technologies pour la Suisse et de leur degré de maturité technologique.

### Portée économique pour la Suisse



### Compétences en Suisse



### Graphique 2: Top 5 des technologies pour la Suisse

Le graphique de gauche montre les cinq technologies dont la portée économique est la plus grande pour la Suisse, le graphique de droite les cinq technologies pour lesquelles les compétences sont les plus élevées en Suisse.<sup>2</sup>

établies, dont le développement actuel est plutôt lent. Mais cette situation pourrait changer et il faut surveiller leur évolution de près. Il pourrait s'avérer payant à l'avenir d'investir dans la formation et la formation continue ainsi que dans la recherche fondamentale et appliquée.

Le quadrant rouge en haut à gauche contient des technologies de «niche». Les investissements consacrés à ces technologies doivent faire l'objet d'un examen critique: les compétences en Suisse en termes d'intensité des activités de recherche sont élevées mais les retombées économiques sont plutôt faibles, posant la question du retour sur investissement et du potentiel futur de ces technologies. Certaines technologies comme les «machines apprenantes» sont sur le point de passer du statut de «niche» à celui de «star», tandis que d'autres comme le «stockage futur de l'énergie» en sont encore loin. Il s'agit d'améliorer la commercialisation et d'établir de nouveaux domaines d'activité commerciale. Il faut également viser la numéri-

sation des processus de fabrication internes afin de baisser les coûts de production et d'augmenter le chiffre d'affaires et le bénéfice.

Dans le quadrant vert en bas à gauche se trouve le grand groupe des «espoirs» technologiques. Leur portée économique est encore faible et l'intensité modérée des activités de recherche qui leur sont consacrées limite aussi les compétences. Le marché prospecté par les entreprises suisses n'est pas (encore) mûr, même si le degré de maturité technologique de certaines technologies est déjà relativement élevé. Mais ce quadrant contient aussi de nombreuses technologies émergentes dont le potentiel futur est incertain. Il est donc important de suivre de près et d'analyser l'évolution de ces technologies et de déterminer leur potentiel commercial international. Afin de promouvoir ces technologies, il semble indiqué de mettre en réseau les partenaires universitaires et industriels et d'établir des plateformes d'échange.

<sup>2</sup> Les cinq technologies présentant les valeurs les plus élevées sur l'axe horizontal sont considérées comme les cinq technologies dont la portée économique est la plus grande pour la Suisse, celles présentant les cinq valeurs les plus élevées sur l'axe vertical comme les cinq technologies pour lesquelles les compétences sont les plus élevées en Suisse.

## Méthode

Afin de déterminer la position des différentes technologies dans les quatre quadrants, huit indicateurs ont été évalués pour chaque technologie: chiffre d'affaires 2017, potentiel commercial dans les cinq années à venir, cadre légal-réglementaire en Suisse, acceptation par la société suisse, nombre de

groupes de recherche universitaires dans ce domaine en Suisse, compétence de ces groupes de recherche universitaires exprimée par l'indice  $h^3$  moyen, nombre d'entreprises en Suisse avec des activités R&D dans ce domaine, compétence de ces entreprises en comparaison internationale. Les plages de valeurs ont ensuite été transposées vers un système de points.

Chiffre d'affaires 2017 ( $C_A$ ), basé sur des estimations d'expert(e)s, des rapports sectoriels et financiers, des bases de données statistiques et des recherches en ligne:

<b>Niveau</b> (en millions de CHF)	< 10	10–99	100–499	500–999	$\geq 1000$
<b>Points</b>	1	2	3	4	5

Potentiel commercial dans les cinq années à venir ( $P_C$ ), évaluation d'expert(e)s:

<b>Niveau</b>	faible	moyen	élevé	très élevé
<b>Points</b>	0.4	0.8	1.2	1.6

Cadre légal-réglementaire en Suisse ( $L_R$ ), évaluation d'expert(e)s:

<b>Niveau</b>	défavorable	neutre	optimal
<b>Points</b>	0.8	1	1.2

Acceptation par la société suisse ( $A_S$ ), évaluation d'expert(e)s:

<b>Niveau</b>	entravant	neutre	encourageant
<b>Points</b>	0.9	1	1.1

Nombre de groupes de recherche universitaires dans ce domaine en Suisse ( $R_U$ ), basé sur les indications d'expert(e)s et des recherches en ligne:

<b>Niveau</b>	< 10	10–19	20–39	40–49	$\geq 50$
<b>Points</b>	1	2	3	4	5

<sup>3</sup> L'indice  $h$  permet de quantifier la réputation internationale d'un(e) scientifique dans son milieu spécialisé. Il est fonction du nombre de citations de ses publications. Un indice  $h$  élevé signifie qu'un nombre élevé des publications d'un(e) scientifique est souvent cité dans d'autres publications.

Compétence des groupes de recherche universitaires ( $C_u$ ), exprimée par l'indice h moyen des groupes de recherche actifs dans ce domaine en Suisse<sup>4</sup>:

<b>Niveau</b>	< 20	20–34	≥ 35
<b>Points</b>	0.8	1	1.2

Nombre d'entreprises en Suisse avec des activités R&D dans ce domaine ( $R_i$ ), basé sur les indications d'expert(e)s, des rapports sectoriels et financiers et des recherches en ligne:

<b>Niveau</b>	< 10	10–29	30–69	70–99	≥ 100
<b>Points</b>	1	2	3	4	5

Compétence de ces entreprises en comparaison internationale ( $C_i$ ), évaluation d'expert(e)s:

<b>Niveau</b>	faible	moyen	élevé
<b>Points</b>	0.8	1	1.2

### Transposition des niveaux des indicateurs en positions le long des axes horizontal et vertical du diagramme à quatre quadrants:

La position d'une technologie sur l'axe horizontal (portée économique pour la Suisse) a été déterminée au moyen de la formule suivante:

$$C_A * (P_C + L_R + A_S)$$

Les différents indicateurs sont dotés d'un poids différent. Le chiffre d'affaires, basé sur des chiffres solides, a été défini comme indicateur principal, les trois autres indicateurs venant le moduler. L'influence du potentiel commercial sur l'évolution du chiffre d'affaires est considéré comme plus importante que celle du cadre légal-réglementaire, à son tour plus forte que celle de l'acceptation sociétale. Cette pondération est reflétée dans la transposition des plages de valeurs vers le système de points.

La position d'une technologie sur l'axe vertical (compétences en Suisse) résulte de la formule suivante:

$$R_u * C_u + R_i * C_i$$

Les nombres de groupes de recherche universitaires et industriels sont définis comme les deux indicateurs principaux, modulés par leurs compétences respectives, ce qui se reflète dans la transposition des plages de valeurs vers le système de points.

Il résulte de ces calculs des valeurs allant de 2.1 à 19.5 pour l'axe horizontal et de 1.6 à 12 pour l'axe vertical. Afin de simplifier la représentation, ces montants ont été soumis à une transformation linéaire de manière à ce que, pour les deux axes, la valeur minimale possible soit de 0.0 et la valeur maximale possible de 10.0.

<sup>4</sup> Source: ResearchGate <https://www.researchgate.net/>

# Comparaison internationale

Le diagramme à quatre quadrants montre l'importance relative des différentes technologies pour la Suisse. En revanche, il ne livre pas d'informations sur leur importance pour d'autres pays européens. Il faudrait pour cela recueillir et rechercher les données pertinentes pour tous les pays souhaités, du moins pour les principales technologies, ce qui représenterait une tâche immense et difficilement réalisable.

Afin de jeter malgré tout un regard au-delà de nos frontières et rendre possible une comparaison d'ordre international, nous avons utilisé un outil de l'entreprise LinkAlong (<https://linkalong.com>), startup de l'EPFL spécialisée dans l'analyse intelligente et personnalisée de big data. LinkAlong utilise comme base de données les réseaux sociaux tels Twitter, Instagram et Facebook ainsi que les sites web qui y sont référencés: pour le Technology Outlook 2019, nous avons analysé les tweets et les posts des comptes officiels de 1300 établissements européens de l'enseignement supérieur. Afin de n'inclure que des sources possédant une forte crédibilité, nous avons délibérément restreint notre analyse aux canaux de communication officiels des établissements, excluant les communications de leurs membres individuels. Les données livrent donc un aperçu des préoccupations actuelles du monde universitaire: dans quels pays et avec quel degré d'intensité quelles technologies sont-elles discutées? Cet aperçu ne permet toutefois pas de conclusions directes quant à la portée économique de ces technologies.

## Méthode

Pour le graphique 3, tous les posts mentionnant l'une des 37 technologies du Technology Outlook 2019 publiés au cours de la période du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre 2018 ont été comptabilisés séparément pour la Suisse, l'Allemagne, la France, le Royaume-Uni, l'Italie, les Pays-Bas, l'Autriche et la Suède. Le nombre de technologies varie selon les graphiques car tous les pays ne discutent pas des 37 technologies. Le nombre total de posts sur toutes les technologies discutées dans un pays est défini comme 100%. Le nombre de posts concernant une technologie individuelle est exprimé en pourcentage de cette totalité et représenté dans un diagramme circulaire. Chaque secteur de diagramme représente une technologie individuelle, sa taille reflétant la fréquence relative des mentions de cette technologie pour un pays.

Pour le graphique 4, tous les posts concernant les technologies du Technology Outlook 2019 publiés au cours de la période du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre 2018 ont été comptabilisés séparément pour la Suisse, l'Allemagne, la France, le Royaume-Uni, l'Italie, les Pays-Bas, l'Autriche et la Suède. Pour chaque pays, le nombre de posts sur les cinq technologies les plus fréquemment mentionnées est exprimé en pourcentage de la totalité des posts sur l'ensemble des technologies du Technology Outlook 2019 et reporté dans un diagramme en étoile. Les montants indiqués sur l'axe correspondent au pourcentage d'une technologie individuelle par rapport à l'ensemble des technologies du Technology Outlook 2019. Le diagramme en étoile ne contient que les technologies appartenant aux cinq technologies les plus fréquemment mentionnées dans l'un des huit pays.

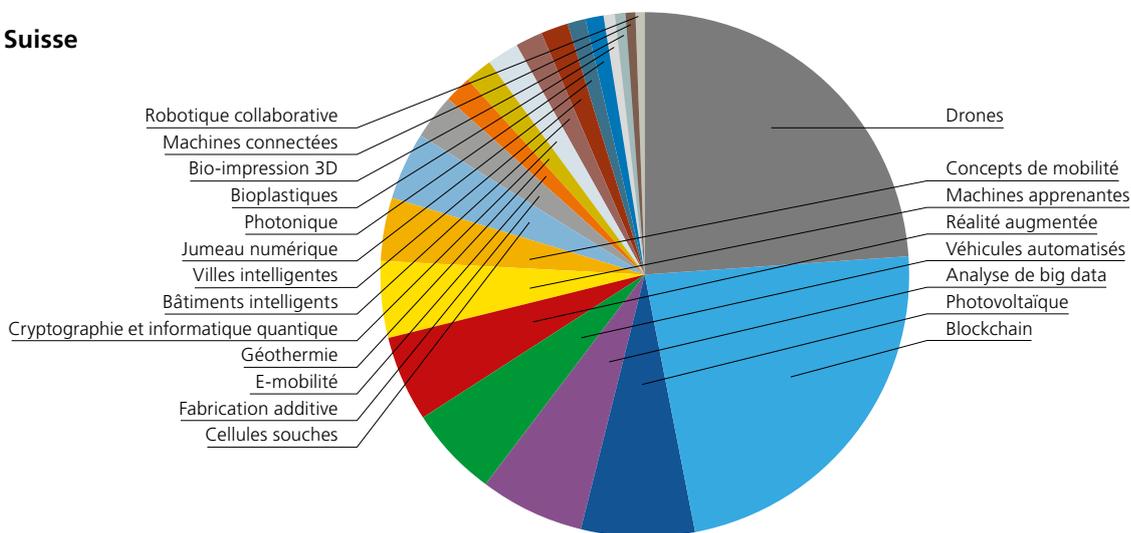
Le **graphique 3** illustre les mentions des différentes technologies sur les réseaux sociaux pour la Suisse et sept autres pays pour la période du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre 2018. Il est frappant de constater qu'en Suisse, en France, en Italie et en Autriche, une ou deux technologies dominent la discussion sur les réseaux sociaux: en Suisse il s'agit des «drones» et de la «blockchain», en France de l'«analyse de big data» et de la «blockchain», en Italie de l'«analyse de big data» et en Autriche de la «blockchain» et de l'«analyse de big data». En Allemagne, au Royaume-Uni, aux Pays-Bas et en Suède, ce sont des groupes de quatre ou cinq technologies qui génèrent la majorité des posts. La composition de ces groupes diffère selon les pays.

L'«analyse de big data», la «blockchain» et la «réalité augmentée» font l'objet de discussions intenses sur les comptes de réseaux sociaux d'établissements de l'enseignement supérieur dans la quasi-totalité des pays étudiés. Ces technologies semblent constituer un axe de recherche majeur pour de nombreuses universités. Mais le nombre élevé de posts publiés est certainement dû aussi à l'amplitude des termes: en particulier dans le cas de l'«analyse de big data» et de la «réalité augmentée», il s'agit plutôt de domaines thématiques que de technologies individuelles. D'autres technologies ne sont mentionnées que dans peu de pays: ainsi les «sources alternatives de protéines» en Allemagne, en France et en Italie, la «biocatalyse et biosynthèse» en Allemagne et en Italie, les «systèmes énergétiques décentralisés» en Allemagne et aux Pays-Bas, le «stockage futur de l'énergie» en Allemagne, en France et en Italie, et les «robots chirurgicaux» en Allemagne, au Royaume-Uni et en Italie.

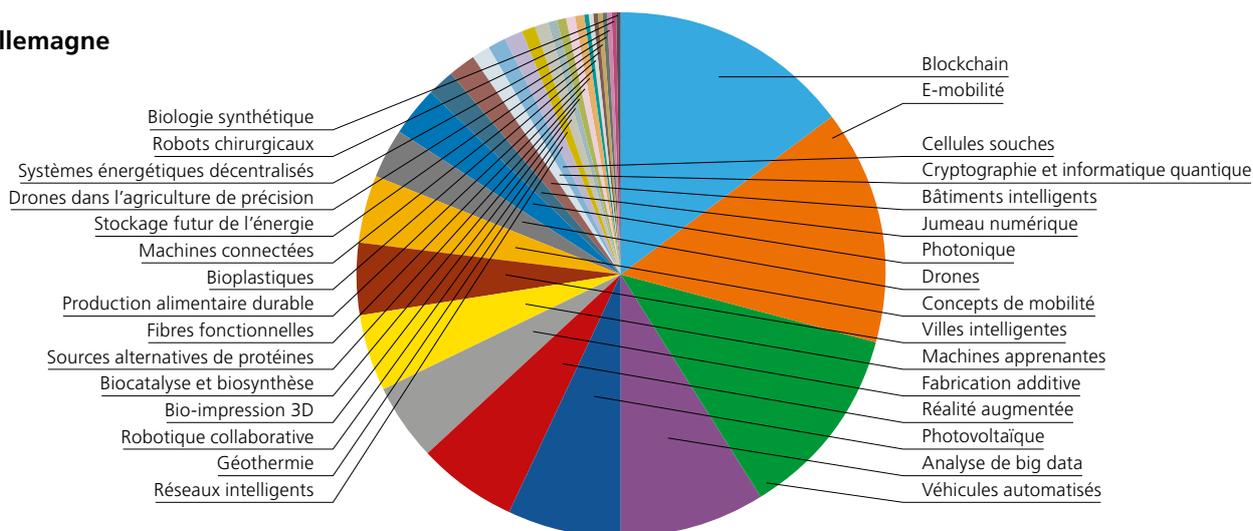
L'analyse des réseaux sociaux révèle aussi quels pays discutent largement des technologies situées en Suisse dans le quadrant vert (en bas à gauche) des «espoirs technologiques» (graphique 1). La «fabrication additive» est présente aux Pays-Bas, les «concepts de mobilité» en Italie et aux Pays-Bas, et l'«e-mobilité» en Allemagne. Ces technologies semblent susciter plus d'intérêt dans les autres pays qu'en Suisse.

Il apparaît que, dans chacun des huit pays, la fréquence de discussion du thème de l'«e-mobilité» est comparable à celle des «véhicules automatisés» ou des «concepts de mobilité». Dans certains pays, le thème des «villes intelligentes» est discuté avec une fréquence comparable à celle des thèmes «e-mobilité», «concepts de mobilité» ou «véhicules automatisés». Les thèmes apparentés en termes de contenu font donc l'objet de discussions d'une intensité comparable.

## Suisse

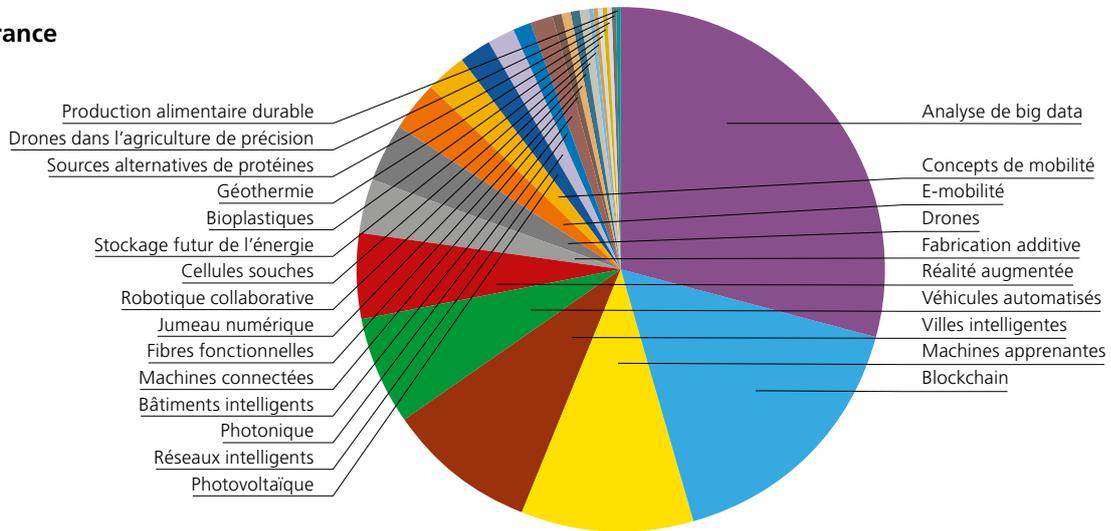


## Allemagne

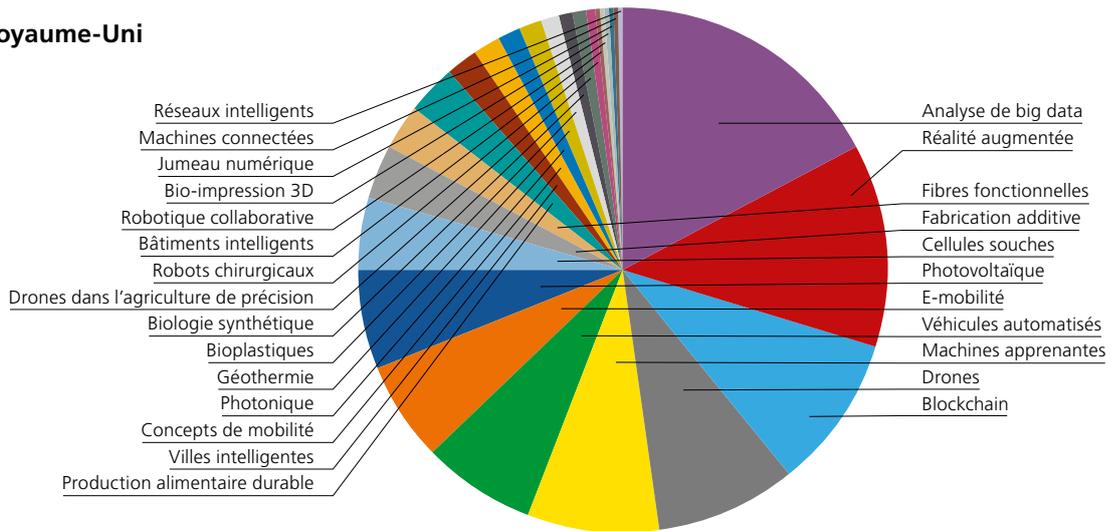


Le **graphique 3** illustre les mentions des différentes technologies sur les réseaux sociaux pour la Suisse, quatre de ses pays voisins et trois autres pays européens pour la période du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre 2018. La taille des secteurs reflète la fréquence relative. →

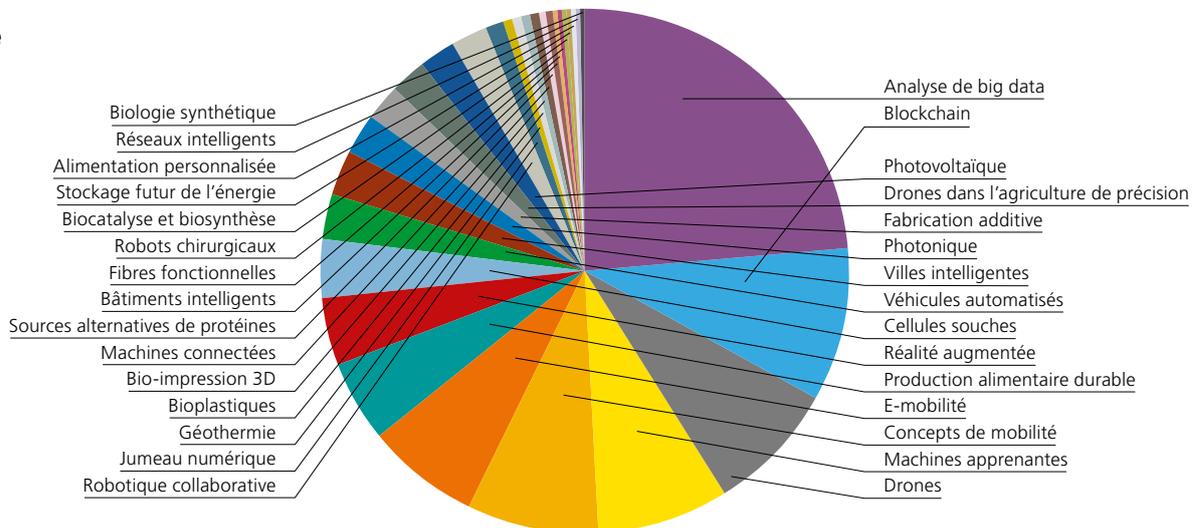
## France



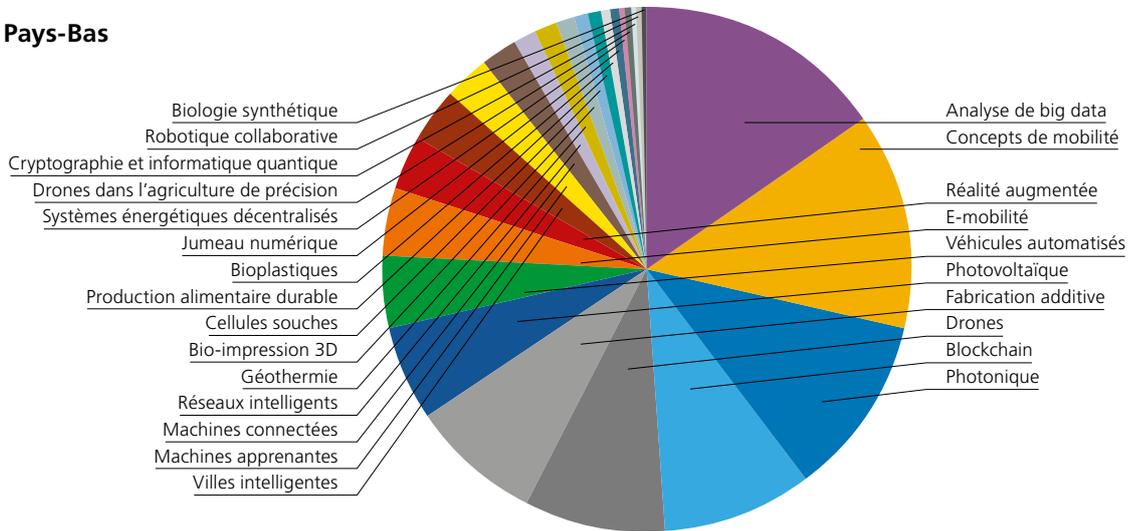
## Royaume-Uni



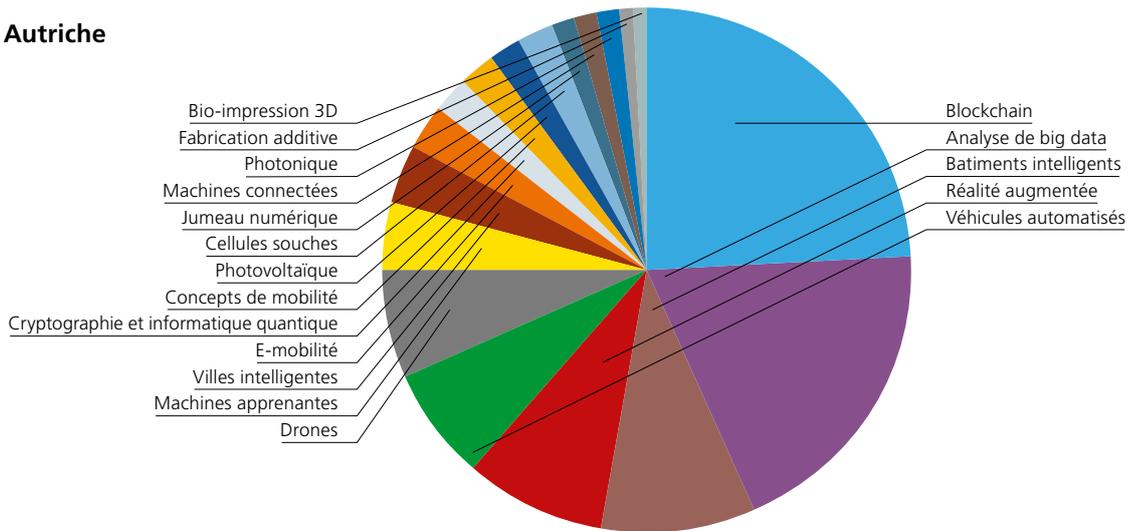
## Italie



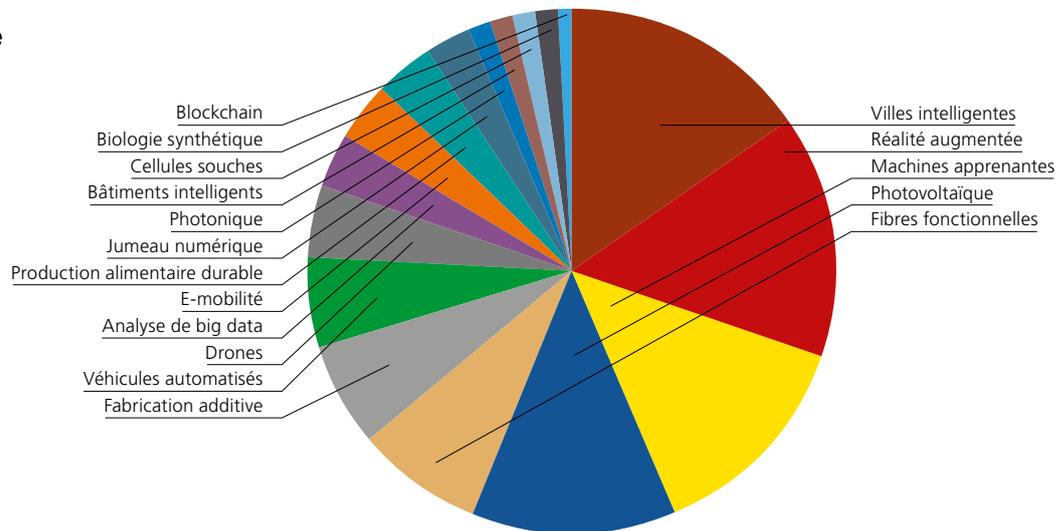
### Pays-Bas



### Autriche



### Suède



Le **graphique 4** montre le top 5 des technologies pour la Suisse et sept autres pays européens pour la période du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre 2018. Si l'on compare la Suisse à ses pays voisins, de nettes différences apparaissent. En Suisse, les thèmes dominants sont les «drones» et la «blockchain». La Suisse est aujourd'hui considérée comme «Silicon Valley des drones», une réputation corroborée par ce nombre élevé de posts sur les réseaux sociaux. Et pourtant, dans le diagramme à quatre quadrants (graphique 1), la technologie des drones rate de peu le top 10 des technologies en termes de compétences en Suisse. Cela est probablement dû au fait que les activités de recherche sont limitées principalement à quelques établissements de l'enseignement supérieur. Ces établissements semblent toutefois être très bien positionnés à l'international, sans quoi la bonne réputation de la Suisse dans le domaine des drones demeurerait inexplicable. Les établissements suisses de l'enseignement supérieur ont créé différents centres consacrés au thème de la «blockchain»; l'EPFL et l'ETH Zurich ainsi que les universités de Bâle, Lucerne et Zurich sont très actives dans ce domaine. Le communiqué de presse de la Confédération en date du 14 décembre 2018 intitulé «Le Conseil fédéral veut continuer d'améliorer le cadre juridique régissant la blockchain et la DLT»<sup>5</sup> a également entraîné de nombreux posts de la part de ces établissements. Loin derrière, on trouve la «photovoltaïque», l'«analyse de big data» et les «véhicules automatisés». Les technologies les plus discutées sur les réseaux sociaux sont donc principalement des technologies pour lesquelles les auteur(e)s du Technology Outlook identifient en Suisse une compétence de recherche élevée: les quatre technologies qui réunissent le plus de posts se trouvent dans les deux quadrants supérieurs (graphique 1). Seuls les «véhicules automatisés» se situent dans le quadrant des «espoirs technologiques».

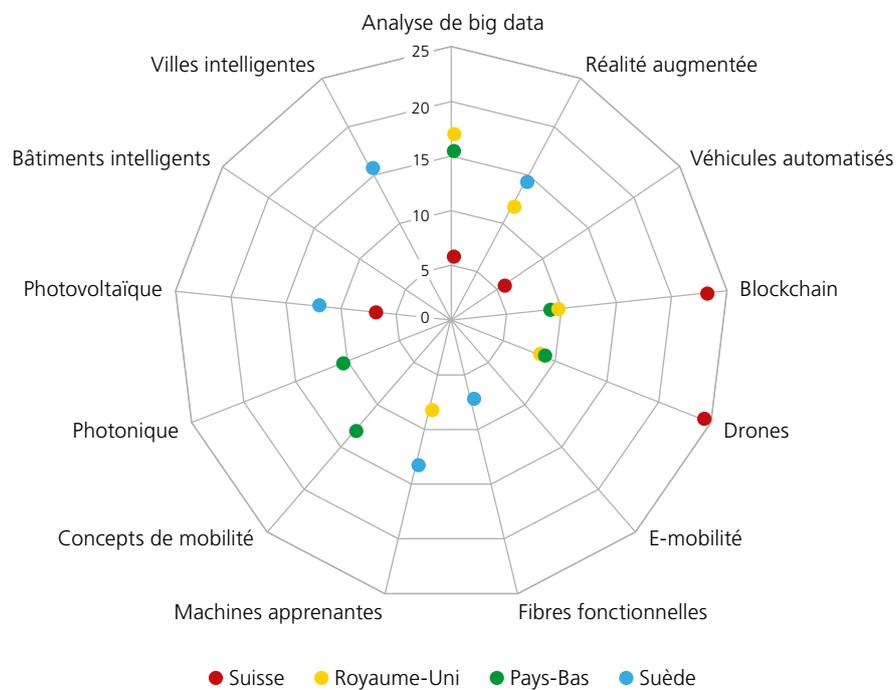
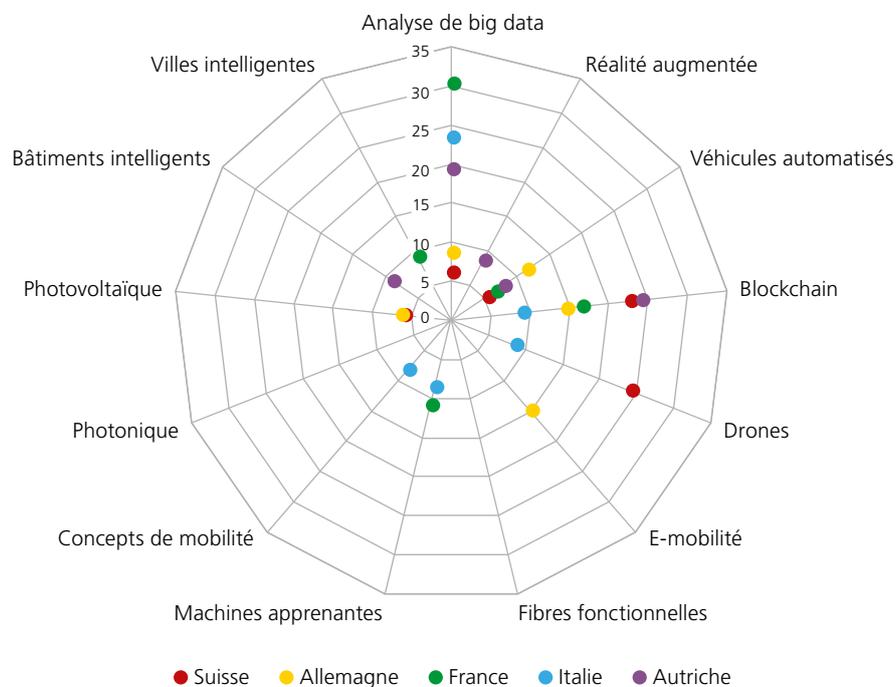
En Allemagne, en revanche, outre la «blockchain» ce sont les thèmes de l'«e-mobilité» et des «véhicules automatisés» qui dominent. Ce constat coïncide avec la perception publique de l'orientation industrielle du pays et l'importance élevée de son industrie automobile. Un nombre important de posts se rapportent aussi à l'«analyse de big data» et à

la «photovoltaïque». En France, la discussion est dominée par l'«analyse de big data», la «blockchain», les «machines apprenantes», les «villes intelligentes» et les «véhicules automatisés». En Italie et en Autriche aussi, l'«analyse de big data» et la «blockchain» dominent le débat universitaire, suivis de loin par les «drones», les «machines apprenantes» et les «concepts de mobilité» pour l'Italie, et les «bâtiments intelligents», la «réalité augmentée» et les «véhicules automatisés» pour l'Autriche. Au Royaume-Uni, la majorité des tweets et des posts est consacrée à l'«analyse de big data», suivie de la «réalité augmentée», la «blockchain», les «drones» et les «machines apprenantes». Une image toute différente apparaît pour les Pays-Bas et la Suède. Aux Pays-Bas, tout comme en France, au Royaume-Uni et en Italie, la thématique «analyse de big data» occupe la première place. Mais, à l'exception de la «blockchain», les places deux à cinq sont occupées par des technologies qui ne suscitent généralement que peu d'intérêt dans les autres pays, à savoir les «concepts de mobilité», la «photonique» et les «drones». En Suède, les technologies les plus fréquemment mentionnées se distinguent nettement de celles des autres pays européens. Sans surprise, les «villes intelligentes» arrivent en tête: en 2017, Göteborg a remporté pour la deuxième fois le titre de «most sustainable city in the world» du Global Destination Sustainability Index. La liste se poursuit avec la «réalité augmentée», les «machines apprenantes», la «photovoltaïque» et les «fibres fonctionnelles», cette dernière technologie n'apparaissant dans le top cinq des posts d'aucun autre pays.

L'analyse des posts sur les réseaux sociaux officiels des établissements de l'enseignement supérieur ne permet pas de conclusions directes quant à la portée économique d'une technologie. Mais elle reflète de manière directe et actuelle les activités de recherche des établissements et permet des déductions quant à leurs axes thématiques majeurs. L'existence de bases solides en matière de recherche universitaire a probablement des répercussions favorables pour la réussite économique. Cette approche est passionnante et prometteuse, même si sa validation demande encore du temps.

---

<sup>5</sup> <https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiques.msg-id-73398.html>



Le **graphique 4** montre les cinq technologies réunissant le plus de posts en Suisse, dans quatre de ses pays voisins (Allemagne, France, Italie et Autriche) et dans trois autres pays européens (Royaume-Uni, Pays-Bas et Suède) pour la période du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre 2018. Pour chaque pays, le nombre de posts recensés sur les réseaux sociaux pour les différentes technologies est indiqué en pourcentage du nombre total de posts concernant toutes les technologies du Technology Outlook.

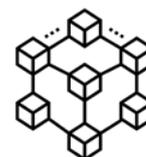
# Le monde numérique

## La technologie blockchain comme base de services web

**Thomas Puschmann** (Université de Zurich)

**Quadrant:** technologie de niche

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

«Blockchains» et «registres distribués (distributed ledgers)» sont souvent qualifiés de «technologies». À proprement parler, il s'agit cependant de listes d'éléments de données liés de manière cryptographique. Les blockchains et les registres distribués présentent les caractéristiques suivantes: stockage décentralisé des données et validation décentralisée au moyen de mécanismes de consensus (p.ex. preuve de travail [proof of work] et preuve d'enjeu [proof of stake]), auditabilité et persistance. On distingue les formes «publiques (permissionless)» (cercle d'utilisateurs anonyme resp. pseudonyme) et «privées (permissioned)» (cercle d'utilisateurs connu et restreint). Un problème non encore résolu du mécanisme proof-of-work pour les blockchains et les registres distribués publics est sa forte consommation d'énergie. Des mécanismes de consensus alternatifs pour la validation de transactions comme p.ex. le proof-of-stake n'en sont encore qu'au stade d'étude. Les «contrats intelligents (smart contracts)» vont pour leur part au-delà d'une simple structure de données: ils présentent des contenus sémantiquement interprétables resp. lisibles par machine pouvant déclencher des transactions automatiques.

Différentes études estiment comme «élevé à très élevé» le potentiel futur des blockchains et des registres distribués. Dans une étude publiée en 2018, le *World Economic Forum* (WEF) calcule ainsi des gains d'efficacité d'environ 1 billion de USD à l'échelle mondiale pour le seul domaine du financement du commerce international (trade finance). D'autres domaines d'application sont: la logis-

tique (*Maersk* prévoit d'optimiser sa logistique de conteneurs), le commerce (*IBM* et *Walmart* développent un système de sécurité alimentaire), les assurances (*B3i* développe un dispositif de contrat intelligent pour les contrats d'assurance), le secteur de l'énergie (*Axpo* développe une solution pour les marchés d'énergie pair-à-pair), les transports (*Novotrans* stocke des données d'inventaire pour les réparations ferroviaires) ou les administrations publiques (les Pays-Bas développent un système de contrôle frontalier des données de passagers).

### Implications pour la Suisse

Les applications citées ci-dessus sont aussi valables pour la Suisse. D'autres exemples en Suisse sont: *Modum* (chaîne logistique pharmaceutique), *Swiss Prime Site* (gestion immobilière et location) et *UBS* (Utility Settlement Coin, financement du commerce international, etc.). Outre les gains d'efficacité qu'ils permettent de réaliser, la blockchain et les registres distribués créent aussi de nombreux nouveaux domaines d'activité, p.ex. dans le domaine des services (identité numérique), du développement logiciel (nouveaux services web, applications distribuées [distributed apps ou dApps]) et des services spécialisés (p.ex. juridiques). Leur mise en œuvre dépend d'au moins trois facteurs critiques de réussite: la disponibilité de talents et leur formation dans l'enseignement supérieur, un écosystème performant réunissant enseignement supérieur, acteurs établis et startups (avec un bon accès à du capital-risque) et un cadre légal et réglementaire souple. La Suisse dispose d'un bon écosystème mais elle doit encore faire des progrès en matière de formation de talents et d'accès au capital-risque.

## Cryptographie et informatique quantique

Bernhard Tellenbach (ZHAW)

Quadrant: espoir technologique



### État des lieux à l'international et en Suisse

Lorsqu'il s'agit de protéger des informations et des liaisons de communication sensibles, il est essentiel de disposer de méthodes cryptographiques – c'est-à-dire de procédés de chiffrement – sûres. Les procédés courants aujourd'hui sont basés sur la décomposition en produit de facteurs premiers et le calcul de logarithmes discrets. On compte parmi eux le chiffrement Rivest-Shamir-Adleman (chiffrement RSA), largement utilisé p.ex. pour les signatures numériques, ou le procédé Diffie-Hellman utilisé pour générer une clé commune pour la protection d'une communication. Les importants progrès réalisés dans le développement d'ordinateurs quantiques représentent un défi pour ces procédés car les ordinateurs quantiques maîtrisent de manière très efficace la décomposition en produit de facteurs premiers et le calcul de logarithmes discrets.

Il existe sur le principe deux approches pour contrer la menace des ordinateurs quantiques: la cryptographie post-quantique (post-quantum cryptography PQC) et la distribution quantique de clé (quantum key distribution QKD). PQC est un terme collectif désignant les procédés cryptographiques dont la sécurité repose sur des problèmes mathématiques que les ordinateurs quantiques ne savent pas résoudre beaucoup plus vite que les ordinateurs traditionnels. La QKD permet un échange de clé sécurisé dont la sécurité se fonde sur des lois physiques concernant l'état de photons. Dans ce contexte, la puissance de calcul et les capacités des ordinateurs (quantiques) n'ont pas d'incidence.

Les deux approches ont livré de premières solutions et de premiers produits, mais ceux-ci n'ont pas encore été beaucoup mis à l'épreuve. Les organisations internationales et nationales de sécurité informatique comme l'office fédéral allemand *BSI*, l'agence européenne *ENISA*, l'organisme de normalisation européen *ETSI* et l'agence américaine *NIST* reconnaissent que de grands efforts en matière de recherche, de standardisation et d'innovation technique sont encore nécessaires avant de parvenir à une pénétration du marché. Il est également difficile de savoir avec précision d'ici quand apparaîtront des ordinateurs quantiques et des procédés assez puissants pour casser les systèmes cryptographiques vulnérables. *Gartner* estime le risque comme peu élevé actuellement, mais hautement pertinent à l'horizon de cinq à dix ans. Lors du développement ou de l'acquisition de nouveaux systèmes, il est donc important de prévoir dès aujourd'hui au moins une trajectoire de mise à niveau pour l'utilisation d'algorithmes post-quantiques. Comme ces derniers ne sont pas compatibles avec les systèmes cryptographiques existants, leur propagation ne devrait se faire que lentement, en particulier pour les systèmes à longue vie utile. La durée d'un tel processus de remplacement peut se mesurer aux nombres de systèmes en ligne qui continuent de supporter l'algorithme de chiffrement RC4 considéré depuis des années comme peu sûr.

### Implications pour la Suisse

Malgré le leadership technologique d'*ID Quantique* dans le marché QKD et de divers groupes de recherche et entreprises de renom (entre autres l'*ETH Zurich* et *IBM Research – Zurich*) dans le domaine de la recherche, l'importance du secteur pour la recherche et l'économie suisses est encore faible. Elle devrait cependant nettement augmenter dans les cinq années à venir. Il s'agit donc de maintenir le leadership technologique.

## Réalité augmentée – applications industrielles

Andreas Kunz (ETH Zurich)

Quadrant: espoir technologique

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

La réalité augmentée – ou plutôt: réalité mixte – combine la perception visuelle d'objets réels et virtuels. Elle mène à un élargissement de la réalité perçue par le biais d'appareils techniques. L'objectif est la représentation d'informations supplémentaires. Cette technologie revêt une importance croissante due en particulier à la prise en compte du monde réel. La réalité mixte associe les informations virtuelles aux processus de production en cours de manière adaptée à la situation, p.ex. lors de la maintenance, de la préparation de commandes ou de la surveillance de processus. Les objets virtuels et les objets réels sont ainsi soumis à une fusion croissante, donnant lieu plus récemment au terme de «réalité croisée» (cross reality XR). Les applications se trouvent typiquement dans la formation et l'enseignement, le développement de produit et la production (industrie 4.0) ainsi qu'en médecine.

### Implications pour la Suisse

La mise à disposition d'informations dans le champ de vision des utilisateurs ouvre des possibilités multiples, que ce soit dans la distribution (représentation de variantes d'un produit) ou dans le service (mise à disposition de données pour le personnel technique). La Suisse est bien positionnée dans ce domaine: des entreprises de grande et de moyenne taille utilisent déjà la XR avec succès dans le développement et la production. La disponibilité croissante des systèmes techniques rend la XR de plus en plus intéressante aussi pour les petites entreprises, tendance qui devrait s'accroître dans les cinq années à venir. Les entreprises suisses actives en recherche et en développement dans le domaine de la XR sont bien positionnées à l'international et proposent dans leurs secteurs respectifs des solutions hautement spécialisées.

## Jumeau numérique

**Pavel Hora** et **Niko Manopulo** (ETH Zurich)

**Quadrant:** espoir technologique

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

La représentation virtuelle de processus au moyen d'une simulation par ordinateur appartient aujourd'hui pour la quasi-totalité des applications techniques aux outils courants de planification, de dimensionnement et d'optimisation. Jusqu'à présent, les approches étaient pour la plupart purement déterministes, impliquant donc des résultats prédéterminés. En revanche, la représentation de processus de fabrication complexes et imbriqués présente des défis majeurs en termes de précision de modèle, de temps de calcul et de gestion des données. L'exécution des calculs s'appuie aujourd'hui non seulement sur des programmes à large application (general purpose) mais aussi de plus en plus sur des outils de simulation axés sur des applications spécifiques (special purpose), qui permettent une structure simplifiée des modèles virtuels. Une nouvelle tendance porte sur l'intégration directe de modèles virtuels dans un contrôle «intelligent» en cours de processus (inline). Utilisant aussi bien des données générées de manière numérique que l'analyse de mesures directes, on crée des «jumeaux numériques» qui constituent une réplique du processus réel et agissent comme véritables «cerveaux» de processus intelligents et autocorrectifs. Ces développements forment un élément important de nouveaux concepts de l'industrie 4.0.

### Implications pour la Suisse

Ce sont surtout de grandes entreprises à la production hautement automatisée et robotisée qui disposent d'une compétence élevée en matière de simulation. L'industrie automobile allemande, qui a déjà largement intégré des processus de l'industrie 4.0, en est une illustration frappante. L'intégration de ces technologies est bien moins marquée chez les PME en Suisse. Elles ne disposent ni de la compétence nécessaire en matière de simulation ni d'une expérience suffisante dans le développement d'outils logiciels nouveaux et indépendants. Il est probable que ces entreprises s'associeront au sein de nouveaux réseaux afin de favoriser une maîtrise numérique qui requiert un vaste éventail de compétences. Relever ce défi avec succès nécessitera un grand nombre de spécialistes formés en conséquence. La demande d'informaticiens industriels à orientation technique va donc augmenter. Il s'agira d'en former un nombre suffisant dans les années à venir.

## Machines connectées

Pavel Hora et Niko Manopulo (ETH Zurich)

Quadrant: technologie automotrice

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Le terme «machines connectées» recouvre des efforts universitaires et industriels visant la numérisation continue et intégrale de sites industriels, unifiant le flux de données entre différentes stations/opérations. Cette forme de communication inter-machines pleinement intégrée crée des possibilités d'optimisation nouvelles dans la planification industrielle, avec une augmentation sensible de la transparence des processus globaux. Cette tendance devrait donc s'accroître dans les années à venir. Au-delà des aspects positifs des machines connectées intelligentes, il s'agit aussi de nommer quelques défis de taille: l'accroissement de la souplesse des processus va souvent de pair avec l'accroissement de leur complexité. L'intégration de capteurs et d'actionneurs augmente le coût des investissements et les coûts d'entretien. L'exploitation exige un personnel formé pour assurer la maintenance des installations. Ces installations doivent donc générer une valeur ajoutée importante. Par conséquent, tous les processus ne s'avéreront pas adaptés. C'est peut-être l'une des raisons pour lesquelles la diffusion des machines connectées progresse jusqu'à présent plutôt lentement, à l'exception de l'automatisation et de la robotisation dans la fabrication.

### Implications pour la Suisse

L'évolution numérique peut s'illustrer à l'exemple de véhicules disposant d'un nombre toujours croissant de systèmes d'assistance: aujourd'hui déjà, une voiture sans système de navigation intégré est quasiment impensable. Bientôt, l'équipement standard comprendra des systèmes autonomes. Mais l'exemple du secteur automobile montre aussi toute la difficulté et le caractère onéreux du développement de tels systèmes. L'industrie mécanique générale suivra cette évolution. Le moteur principal en sera la valeur ajoutée pour l'utilisateur. De nouvelles études réalisées en Allemagne sur la mise en œuvre d'applications d'industrie 4.0 font pour partie état de faibles gains de productivité. En technologie, ce qui est faisable n'est ainsi pas nécessairement toujours aussi judicieux. L'évaluation du degré de numérisation souhaitable doit donc se faire au cas par cas pour chaque application. Afin de relever les nouveaux défis des machines connectées, il est probable que des entreprises dotées de différents domaines de compétence mettront en place des partenariats stratégiques. Un grand nombre des projets initiaux sont aujourd'hui soutenus dans le cadre de projets européens. Les PME suisses feraient donc bien de s'impliquer activement dans ces nouveaux réseaux. Afin de parvenir à la masse critique nécessaire, il faut mettre en place des coopérations sectorielles permettant la mise en œuvre de projets pilote englobant tous les composants.

## Analyse de big data

Alessandro Curioni et Lukas Czornomaz (IBM Research – Zurich)

Quadrant: technologie star



### État des lieux à l'international et en Suisse

La disponibilité croissante de données entraîne une véritable explosion de l'analyse de big data, favorisée à son tour par l'augmentation continue de la vitesse des réseaux, le nombre d'appareils connectés et la puissance de calcul accrue des systèmes. On assiste aujourd'hui à une forte consolidation du secteur, permettant d'utiliser avec une efficacité et une efficacité accrues des volumes de données en expansion exponentielle qui livrent des connaissances précieuses. Les systèmes actuels peuvent recueillir, gérer et organiser des quantités énormes de données structurées. Les dernières avancées en matière d'intelligence artificielle (IA) ouvrent par ailleurs la voie au traitement de données non structurées. Les technologies de l'IA rendent possibles un grand nombre d'applications par l'utilisation de grandes structures de données. Elles livrent des connaissances profondes en apprenant à partir des données et de l'interaction avec les utilisateurs.

### Implications pour la Suisse

En Suisse, l'analyse de données massives est en train de transformer de nombreux secteurs. Elle bouleverse le suivi de clientèle dans le secteur bancaire, modifie la prise de décision dans la banque d'investissement et améliore la détection de fraude. Les assurances bénéficient de grandes plateformes de données pour le traitement automatisé des sinistres et leur modèle commercial va changer avec l'analyse personnalisée des risques. Dans l'industrie pharmaceutique, la découverte de nouveaux médicaments est bouleversée par l'assimilation et la mise en œuvre des constats scientifiques de la chimie organique. Avec l'avènement

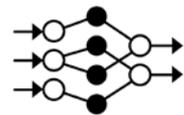
d'usines intelligentes (industrie 4.0), l'industrie manufacturière est en train de vivre une quatrième révolution: de grands volumes de données et des technologies de l'IA sont utilisés pour permettre la prise de décision autonome et optimiser en continu la productivité, la qualité et la fiabilité.

Les solutions d'analyse de big data jouent aujourd'hui déjà un rôle important dans l'économie suisse. Leurs répercussions positives pourraient être démultipliées si les PME aussi en faisaient un usage plus large, en particulier dans les domaines de l'électrotechnique, du commerce de détail, des services, des machines et de l'horlogerie. L'analyse de données massives permet aux PME de mieux se positionner face à des concurrents de taille supérieure, de générer de nouvelles connaissances et ainsi d'établir et de maintenir un leadership technologique. L'analyse et la prévision des comportements du marché et de la clientèle leur permettent de mieux répondre aux demandes des clients. Pour que les PME puissent pleinement exploiter le potentiel des applications pour données massives, il faut simplifier la mise à disposition, le recueil, l'étiquetage et la reconfiguration des données. La valeur et le potentiel commercial de grands volumes de données dépendent de leur qualité et de leur fiabilité. L'importance de la protection des données et de la vie privée offre à la Suisse la possibilité de se positionner en tant que refuge pour données. La mise en place d'un cadre réglementaire favorable et d'un marché des données ouvert stimulerait l'analyse de big data en faisant tomber les silos de données entre entreprises et secteurs et en encourageant l'évaluation et l'échange de données, tout en assurant la protection des données, la sécurité et la confiance.

# Machines apprenantes et réseaux neuronaux

Alessandro Curioni et Lukas Czornomaz (IBM Research – Zurich)

**Quadrant:** technologie de niche



## État des lieux à l'international et en Suisse

Les technologies de l'IA comme les algorithmes d'apprentissage automatique et les réseaux de neurones artificiels peuvent être entraînées à exécuter certaines tâches avec une efficacité et une précision pouvant compléter voire dépasser les capacités humaines. Les technologies d'IA les plus populaires comme les réseaux d'apprentissage profond (deep learning) s'inspirent vaguement de la manière dont apprend le cerveau humain. Ces derniers sont typiquement composés de couches de nœuds (neurones) reliés par des poids de connexion variables (synapses). Chaque neurone peut transmettre une information à un autre groupe de neurones sur la base de l'état des valeurs d'entrée pondérées. Ces pondérations s'adaptent au fil de l'apprentissage. L'augmentation spectaculaire de la puissance de calcul disponible dans le cloud et dans les superordinateurs, les avancées de la recherche en matière d'IA et la consolidation récente de grandes plateformes de données ont assuré aux technologies de l'IA un grand succès et une grande visibilité. Les méthodes d'apprentissage automatique modifient notre quotidien à vue d'œil: reconnaissance vocale, traductions linguistiques, interaction vocale naturelle avec les machines, analyse d'images et reconnaissance faciale ont modifié la manière dont les êtres humains interagissent entre eux et avec les entreprises. Cependant, le potentiel disruptif de ces technologies de l'IA repose sur leur intégration à de vastes plateformes de données. Les méthodes d'apprentissage automatique sont ainsi au cœur de l'automatisation du recueil, de l'étiquetage et de la classification de données au sein de grandes plateformes de données. Cela va augmenter leur acceptation et énormément accélérer leur déploiement dans tous les secteurs et dans les entreprises de toutes tailles, avec des changements disruptifs pour les banques, les services, le commerce de détail, la fabrication, l'industrie pharmaceutique et les assurances.

## Implications pour la Suisse

La Suisse a fait figure de leader dans le développement de technologies d'IA et reste aujourd'hui encore très bien positionnée grâce à son écosystème exceptionnel pour la recherche universitaire et industrielle en matière d'apprentissage automatique. Il faut maintenir les investissements dans la recherche et un environnement favorable aux affaires et à l'innovation. À l'avenir, la recherche devrait se concentrer sur le développement de méthodes d'apprentissage automatique stables, précises et robustes basées sur des données réelles à haute dimension (p.ex. médicales, industrielles etc.). La Suisse a l'opportunité de jouer un rôle de pionnier dans la définition de normes et la certification de systèmes d'IA. Au vu de l'utilisation croissante de l'IA, il est important de s'assurer que ces modèles sont éthiques et sûrs: ils ne doivent pas contenir de préjugés concernant l'âge, le sexe, la nationalité ou la religion, doivent exécuter leurs tâches dans le cadre de limites définies et ne doivent pas être vulnérables face aux attaques de nature prévisible. Il ne faut pas non plus sous-estimer le besoin d'améliorer la perception publique des technologies de l'IA.

## Drones

**Roland Siegwart** (ETH Zurich)

**Quadrant:** technologie star

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

La technologie des drones civils, c'est-à-dire le développement d'objets volants inhabités à usage civil, a connu un développement spectaculaire ces 15 dernières années. Beaucoup de ces nouvelles technologies, de concepts novateurs d'objets volants aux algorithmes nécessaires pour le contrôle et la navigation, émanent d'établissements suisses de l'enseignement supérieur, et tout particulièrement de l'ETH Zurich et de l'EPFL. La Suisse a ainsi établi un leadership international dans le domaine des drones civils; de multiples startups ont été créées et des entreprises établies ont été attirées. Les drones à usage militaire existent depuis longtemps. Cependant, un certain nombre de facteurs ont contribué au développement particulièrement rapide de drones à usage civil: technologies peu coûteuses comme les centrales inertielles (IMU) pour la stabilisation des drones dans l'espace, les GPS ou les caméras de navigation, et technologies annexes pour un réglage robuste et une navigation autonome. Dans le secteur des drones de consommation, aujourd'hui dominé par des entreprises chinoises (*DJI* en tête), les ventes annuelles excèdent de loin le million d'exemplaires. Mais le secteur des drones professionnels connaît une croissance encore plus forte: aujourd'hui déjà, ces appareils sont largement utilisés dans les domaines de la cartographie ainsi que de la surveillance et de l'arpentage aériens. Par ailleurs, on utilise de plus en plus de drones semi-auto-

nomes en agriculture (surveillance des champs), en cas de catastrophe (incendies, catastrophes naturelles, sauvetages) ou pour des tâches de transport. Tandis que les drones actuels opèrent surtout dans l'espace aérien, les drones de demain seront aussi capables de se mouvoir au contact de leur environnement grâce à de nouveaux concepts de vol et à des systèmes de navigation avancés. Cela ouvre la voie à de nouvelles applications dans l'inspection d'infrastructures, le nettoyage et la peinture des bâtiments, le secteur de la construction et beaucoup d'autres.

### Implications pour la Suisse

Les établissements suisses de l'enseignement supérieur sont à la pointe internationale en ce qui concerne la technologie et ses applications possibles, et nos startups sont elles aussi en train d'établir un leadership international. Dans les années à venir, il s'agira de continuer à développer cette position dans la recherche et sur le marché afin d'acquérir définitivement le statut de «Silicon Valley des drones». Toutes les conditions sont réunies. Grâce à une coopération étroite entre universités, startups, organismes réglementaires (*Office fédéral de l'aviation civile OFAC*), entreprises partenaires établies et clients finaux, la Suisse peut procéder au développement pérenne de ce marché passionnant, à haute pertinence économique et en pleine expansion, au profit de la société et de l'économie tout entières.

# Robotique collaborative

Max Erick Busse-Grawitz et Ulrich Claessen (maxon motor)

Quadrant: espoir technologique



## État des lieux à l'international et en Suisse

Les activités de fabrication de nombreuses PME suisses sont définies par des lots de taille majoritairement restreinte et une variance élevée des produits. D'où un dilemme: confier la production à des êtres humains, dont la maîtrise et la dextérité compensent souvent le salaire horaire élevé et peuvent les rendre plus productifs que des automates ou des robots? Ou revoir à grands frais la conception des produits afin de les adapter aux besoins de l'automatisation et de la robotique? La robotique collaborative remédie partiellement à ce questionnement. Les robots collaboratifs (cobots) sont des robots qui partagent l'espace de travail avec l'humain et savent interagir avec lui (définitions selon ISO 10218 et 15066). Afin d'assurer la sécurité de cette collaboration, les normes exigent des vitesses inférieures à 1,5 m/s et des énergies cinétiques de moins de 40 joules. Au lieu de céder entièrement les opérations aux robots, l'être humain continue donc d'assurer les tâches pour lesquelles il est plus adroit. Les manipulations simples et routinières sont confiées aux robots. La répartition des tâches en «compliquée» et «simple» rend impérative la coopération entre les robots et les êtres humains, car les deux types de travail sont étroitement imbriqués lors des processus de production.

La robotique collaborative n'en est qu'à ses débuts mais elle jouera certainement un rôle important à l'avenir. En effet, des cycles d'innovation toujours plus courts et des tailles de lot toujours plus petites exigent une souplesse que les formes d'automatisation rigides ne peuvent pas fournir. La robotique permet par ailleurs des processus reproductibles sans effets de fatigue et ainsi une qualité constante. Dans l'industrie suisse, axée sur une forte création de valeur, cet aspect est tout particulièrement important. Afin d'exploiter ce potentiel de manière rentable, les robots doivent être accessibles en termes de coûts ainsi que facilement configurables et programmables, ce qui est de plus en plus souvent le cas.

Il existe encore un fort potentiel inexploité en matière de robotique collaborative. Cela est dû à l'existence de nombreuses limitations techniques, mais aussi à la peur de la perte d'emplois et du changement. Comme la majorité des produits sont commercialisés dans des marchés élastiques, une structure de prix rationalisée grâce aux robots crée plus d'emplois qu'elle n'en détruit. Les coûts d'investissement, souvent perçus comme dissuasifs pour la robotique plus classique, sont moins élevés pour la robotique collaborative, car elle peut se passer de nombreux éléments de sécurité requis par les robots rigides. Les systèmes auxiliaires de caméra deviennent également de plus en plus abordables et faciles d'emploi. L'utilisation croissante de l'intelligence artificielle dans l'automatisation favorise cette tendance. Les applications actuelles typiques de la robotique collaborative doivent tenir compte de l'agilité encore faible et de la limitation de vitesse imposée par les normes en vigueur. Les robots collaboratifs sont donc aujourd'hui utilisés surtout pour la manutention de composants légers et pour de simples opérations d'assemblage. Dans les cinq années à venir, l'apprentissage direct des robots collaboratifs au contact humain restera limité à des contenus plutôt simples.

## Implications pour la Suisse

Avec son important secteur de fabrication industrielle et ses coûts salariaux élevés, la Suisse est prédestinée à utiliser la robotique collaborative. Si la Suisse est considérée comme «Silicon Valley des robots volants», elle a en revanche du retard dans le développement de robots collaboratifs. Dans ce domaine, ce sont actuellement le Danemark, l'Allemagne et la Suède qui mènent le jeu en Europe. De nombreuses startups gravitent autour de grandes entreprises. La Suisse dispose d'excellentes cartes en termes de formation et de cadre réglementaire, qui devraient lui permettre de se rattraper. La tendance à la robotique collaborative va s'accélérer lorsque l'amélioration des robots et la simplification de leur programmation démultiplieront les applications possibles dans la production.



# Énergie et environnement

## Systemes énergétiques décentralisés

David Grosspietsch (Fonds de technologie et ETH Zurich)

Quadrant: technologie de niche



### État des lieux à l'international et en Suisse

Les systèmes énergétiques décentralisés sont des systèmes ou des groupements de plusieurs bâtiments équipés pour produire de l'énergie renouvelable, qui combinent différents vecteurs énergétiques tels l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène et qui comprennent des technologies de stockage (p.ex. batteries, stockage thermique) et de transformation de l'énergie (p.ex. pompes à chaleur, électrolyseur). L'objectif est de couvrir une majeure partie de la consommation d'énergie par une production locale en utilisant la flexibilité de ses propres stockages et la transformation de vecteurs énergétiques (power-to-heat/gas).

Malgré un investissement initial élevé, les systèmes énergétiques décentralisés présentent de nombreux avantages comme la baisse des coûts énergétiques grâce à des taux d'autoconsommation plus élevés ou le lissage de pics de puissance grâce au stockage et à la transformation d'énergie. Cela permet d'augmenter la flexibilité du réseau basse tension et d'éviter éventuellement un développement du réseau. Autres avantages possibles: l'intégration de la mobilité à base d'électricité, de gaz ou d'hydrogène et la mise à disposition d'autres prestations comme l'énergie de réglage. La Suisse compte elle aussi déjà plusieurs exemples réussis de systèmes énergétiques décentralisés, de la maison individuelle au site industriel. L'immeuble énergétiquement autonome de *Walter Schmid AG* à Brütten, en exploitation depuis la mi-2016, fournit une illustration éloquentes des champs d'application futurs. On peut également imaginer des quartiers urbains interconnectés au sein d'un même réseau énergétique ou des systèmes en autarcie dans des régions plus reculées. L'interaction harmonieuse de différents acteurs, institutions et technologies est cruciale pour la mise en place à large échelle de systèmes énergétiques décentralisés.

### Implications pour la Suisse

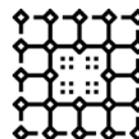
À l'avenir, la tendance aux systèmes énergétiques décentralisés va se renforcer en raison de l'évolution globale des coûts technologiques et du couplage des secteurs de l'électricité, de l'industrie, des transports et de la chaleur (et du froid). Comme le secteur suisse du bâtiment et de l'énergie est plutôt innovant en comparaison internationale, la Suisse dispose de nombreuses opportunités économiques, en particulier dans le développement, le financement, la mise en œuvre et l'exploitation de tels systèmes. À court et à moyen terme, la capacité à développer des solutions système intégrées avec de multiples configurations technologiques et un grand nombre de parties prenantes continuera cependant de constituer un défi.

## Réseaux intelligents

Roland Küpfer (BKW)

Quadrant: technologie automotrice

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Le terme «réseaux intelligents (smart grids)» est actuellement le plus cité du secteur de l'énergie. Selon la Stratégie énergétique 2050, ils garantissent l'équilibrage entre d'un côté l'électricité injectée à base de sources d'énergie traditionnelles tout comme décentralisées et renouvelables, et d'un autre côté la consommation décentralisée. L'électricité à production fortement fluctuante et tributaire des conditions météorologiques forme une nouvelle composante qui, à moyen terme, mettra les réseaux au défi en termes de stabilité de tension et de fréquence. En effet, le lieu et les pics d'injection de l'électricité produite à partir de nombreuses sources d'énergie renouvelable décentralisées ne sont connus qu'au dernier moment. Mais les réseaux électriques sont toujours conçus en vue des charges de pointe. Si le réseau de distribution devait tenir compte de la charge de pointe de toutes les nouvelles sources d'énergie, il faudrait dépenser des dizaines de milliards de francs suisses pour le développer. C'est pourquoi les efforts se concentrent sur l'aménagement d'une gestion intelligente des réseaux.

Un système de réglage géré au moyen de l'exploitation de données et de technologies de communication doit permettre de répondre à ces défis. Afin de garantir la stabilité future du réseau, des systèmes de mesure intelligents sont nécessaires pour traiter les données. La mise en place de «compteurs intelligents» est un élément important. Dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050, ils remplaceront les compteurs d'énergie traditionnels, le taux de couverture visé d'ici 2028 étant de 80%. La collecte de données par le biais de compteurs intelligents doit contribuer à équilibrer les fluctuations du réseau. En pratique: un excédent d'électricité est détecté et le réseau intelligent active des unités de consommation supplémentaires comme les chaudières afin d'absorber cet excédent. En cas d'insuffisance d'électricité, le réseau

augmente son obtention à partir de sources traditionnelles. À l'avenir, la planification économique et fiable des réseaux revêtera une grande importance. Des règles de base portant sur l'utilisation et la sécurité des données sont aujourd'hui en cours d'élaboration, en particulier pour l'utilisation de données concernant les profils de charge qui permettent des conclusions quant aux comportements des utilisateurs. Il est également important de poursuivre les recherches concernant un stockage de l'électricité peu coûteux et hautement performant dans le contexte de réseaux intelligents qui influenceront à l'avenir sur la conception des produits. Les appareils, les technologies de l'habitat et les stations de recharge pour voitures électriques se transformeront en consommateurs d'électricité intelligents qui communiqueront avec des réseaux intelligents et livreront donc des informations importantes pour leur réglage. Les gestionnaires de réseaux de distribution font face au défi majeur du grand écart entre la physique traditionnelle de la transmission de courant et les possibilités créées par la numérisation.

### Implications pour la Suisse

Aujourd'hui, l'approvisionnement de la population suisse en énergie est excellent. La Stratégie énergétique 2050 vise à atténuer la consommation croissante d'électricité, encourager la responsabilité individuelle au moyen d'une meilleure connaissance de sa consommation, et optimiser la consommation. Grâce à son savoir technologique, la Suisse est très bien équipée pour implémenter avec succès des réseaux intelligents, même si l'intensité des activités de recherche est encore faible. Cependant, la numérisation augmente la complexité de manière exponentielle. Il faut gérer l'augmentation massive, le transport fiable et le cryptage nécessaire des données ainsi que le réglage des réseaux à partir des données recueillies, tout cela face à une multiplication des injections privées de courant.

## Stockage futur de l'énergie

**Thomas Justus Schmidt** (PSI)

**Quadrant:** technologie de niche

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Les technologies de stockage futures visent à créer des dispositifs de stockage de l'énergie à grande échelle, capables d'équilibrer le décalage saisonnier entre production et consommation d'électricité pouvant résulter de la transition d'un approvisionnement en énergie de ruban fossile et nucléaire vers un approvisionnement fluctuant en électricité renouvelable. Étant donnée l'acceptation dont bénéficie la Stratégie énergétique 2050 au sein de la population suisse (adoption de la loi sur l'énergie par le peuple en mai 2017), il est probable que cette transition aura effectivement lieu, affectant fortement le réseau de transmission si aucune nouvelle technologie de stockage ne devenait disponible d'ici 2030.

Actuellement, les technologies de stockage courte durée disponibles pour la chaleur et l'électricité, p.ex. les batteries, parviennent à équilibrer les pics de production et de consommation, mais il reste des questions à régler concernant leurs coûts et leur fiabilité afin de les rendre plus attractives.

À l'avenir, des systèmes de stockage longue durée s'avéreront indispensables afin de réduire la dépendance par rapport aux importations d'énergie et les coûts de l'électricité en hiver. Ces types de dispositifs de stockage, p.ex. le power-to-gas ou les centrales d'accumulation à air comprimé, sont en cours de développement. Pour la Suisse comme pour tout autre pays concerné, ils seront indispensables pour atteindre les objectifs climatiques.

### Implications pour la Suisse

Il existe des scénarios énergétiques qui se passent de stockage longue durée. Mais ils reposent sur un réseau électrique en Suisse et dans les pays voisins qui serait conçu premièrement pour absorber les charges de pointe et deuxièmement en vue d'importations d'électricité suffisantes en provenance de pays présentant un excédent de production même en hiver. La forte dépendance de la politique énergétique des pays voisins, les coûts potentiellement élevés et la vulnérabilité d'un tel système constitueraient pour la Suisse des risques considérables que les technologies de stockage longue durée permettraient de réduire.

Il est fortement recommandé de continuer à étudier les options de stockage d'énergie longue durée connues à l'échelle de laboratoire, de les évaluer et de les faire passer à l'échelle de systèmes de grande envergure. Avec les *Swiss Competence Centers for Energy Research (SCCER)* et autres programmes d'encouragement, la Suisse a posé des bases solides pour mener à bien le développement des technologies nécessaires. Il faut pour cela que les réseaux de recherche demeurent intacts et puissent continuer de croître. Le manque actuel de modèles commerciaux dans le domaine du stockage longue durée est donc critique car il complique la recherche de partenaires industriels prêts à investir dans des développements à long terme et ainsi capables de continuer à faire vivre les réseaux.

## Géothermie

Willy Gehrler (SATW et Géothermie-Suisse)

Quadrant: technologie de niche



### État des lieux à l'international et en Suisse

L'énergie géothermique est de la chaleur stockée dans le sous-sol. La chaleur provient de la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre et des échanges thermiques avec les zones plus profondes de la Terre. Le terme «géothermie» se compose des mots grecs «geo» (terre) et «thermos» (chaleur). Des températures supérieures à 1000° C prévalent sur 99% de la masse du globe terrestre. On ne rencontre des températures inférieures à 100° C que sur un millième de cette masse, soit dans les 3 km les plus proches de la surface du globe. L'énergie d'origine géothermique est non émettrice de CO<sub>2</sub> et disponible 24 heures sur 24, 365 jours par an. Il s'agit en outre d'une ressource pratiquement illimitée car la désintégration radioactive dans les profondeurs terrestres produit une chaleur constante.

À une profondeur de 10-20 mètres, la température terrestre en Europe centrale s'élève à environ 12° C. C'est jusqu'à cette profondeur que le climat influe sur la température. Dans les couches plus profondes, la loi du gradient géothermique prévaut, soit une augmentation moyenne de la température d'environ 1° C tous les 33 mètres. La géothermie hydrothermale exploite l'eau chaude déjà existante dans les couches terrestres. En revanche, pour la géothermie pétrothermale, de l'eau froide est pompée dans les profondeurs du sol. Afin de créer un passage pour l'eau, les roches compactes et chaudes sont soumises à une fracturation hydraulique afin d'y produire de petites fissures. L'eau circulant à travers ces fissures se réchauffe et peut être affectée à différents usages suivant la profondeur. Jusqu'à 440 mètres, on parle de géothermie de faible profondeur pour chauffer (pompe à chaleur) et refroidir les bâtiments, y compris la production d'eau chaude, ou pour fournir de la chaleur de processus pour les pépinières et les piscines. La géothermie de moyenne

profondeur (jusqu'à 3000 mètres et environ 100° C) sert à chauffer des quartiers résidentiels, des immeubles de bureaux ou des sites industriels. Enfin, la géothermie de grande profondeur (à partir de 3000 mètres et au-delà de 130° C) sert à produire de l'électricité.

### Implications pour la Suisse

Rapporté à sa population, la Suisse a le pourcentage le plus élevé de sondes géothermiques avec pompes à chaleur. Le nombre de nouvelles installations est en forte hausse depuis des années. Aujourd'hui, environ 5% de l'énergie thermique est obtenue au moyen de sondes géothermiques et de pompes à chaleur. Il n'existe pas encore de statistiques concernant la substitution de climatiseurs par l'exploitation de la température terrestre de faible profondeur d'environ 12° C. À ce jour, les installations hydrothermales et pétrothermales de grande profondeur n'existent qu'à l'étranger. En Suisse, les projets prévus dans les années à venir incluent entre autres les suivants: Haute Sorne, Canton/Ville de Genève, La Côte, Triengen, Horgen, Avenches. Mais dans le monde entier, ces développements n'en sont encore qu'à leurs débuts. Grâce à la nouvelle loi sur l'énergie, la Suisse investit fortement dans la recherche. Actuellement, environ 80 chercheurs travaillent au *laboratoire souterrain du Grimsel* et au *Bedretto Deep Underground Lab*. Des projets commerciaux à Bâle, Saint-Gall et Zurich n'ont pas encore rencontré le succès escompté. À Genève, de premiers forages de moyenne profondeur sont en cours en vue d'une injection dans le réseau de chauffage urbain. À travers le monde, l'utilisation d'énergie géothermique augmente de manière fulgurante, en particulier la géothermie de grande profondeur pour la production d'électricité (p.ex. aux États-Unis, aux Philippines, en Indonésie, au Mexique ou en Turquie) et pour la production de chaleur (p.ex. en Chine, aux États-Unis, en Suède, en Turquie et au Japon).

# Photovoltaïque

**Christophe Ballif** (EPFL et CSEM)

**Quadrant:** technologie star

---



## État des lieux à l'international et en Suisse

La photovoltaïque (PV) concerne la transformation directe de lumière en électricité. La technologie requiert des semi-conducteurs, des modules et des cellules photovoltaïques ainsi que des composants électriques comme des maximum power point trackers et des onduleurs. La photovoltaïque couvre aussi tous les aspects de l'installation comme les systèmes de montage et l'intégration dans les bâtiments, les différents domaines d'application (systèmes isolés, couplage au réseau, mobilité) et d'autres aspects incluant la planification, la surveillance, l'entretien et la prévision. En 2017, 98 gigawatt (GW) de nouvelle puissance de pointe photovoltaïque ont été installés à travers le monde. Grâce aux efforts de recherche et de développement et à la production de masse, la photovoltaïque devient la source d'électricité la moins coûteuse. Aujourd'hui, les grands systèmes fournissent de l'électricité à moins de 4 centimes d'euro par kWh, donc moins cher que toute autre nouvelle centrale (y compris au charbon). Les petits systèmes produisent de l'électricité au prix final consommateur de typiquement 8 à 30 centimes/kWh ou moins. La photovoltaïque a le potentiel de devenir la principale source d'électricité au monde. Combinée à l'énergie hydraulique et éolienne, parfois à un réseau de transmission en courant continu haute tension et à des systèmes de stockage courte et longue durée (batteries, chaleur, eau, power-to-gas) ainsi qu'à une gestion de la demande, la photovoltaïque peut être intégrée au système énergétique de manière efficace.

Pour sérieusement s'attaquer au changement climatique, l'installation annuelle de nouvelles installations photovoltaïques devrait se situer entre 600 et 1000 GW à l'échelle mondiale, donc un multiple de son niveau actuel. L'ère solaire n'en est donc qu'à ses débuts. Une diffusion plus large de la PV nécessite une baisse des coûts des composants

d'encore 20-40% et une nette augmentation du taux de rendement. Pour un module moyen composé de cellules au silicium cristallin, qui couvrent 95% du marché, ce taux s'élève à 17,5%; dans les dix années à venir, il devrait passer à 22–24%. En utilisant une approche dite «multi-jonction», c'est-à-dire en combinant dans les cellules des semi-conducteurs de différents matériaux, il devrait être possible d'atteindre un rendement de module de 25–30%. Grâce à une durée de vie prolongée dépassant nettement les 25 ans et grâce à une fabrication personnalisée et locale, la photovoltaïque devrait s'imposer plus fortement dans le secteur des bâtiments. Les applications de la PV dans le domaine de la mobilité, p.ex. sur les toits de voitures, sont en cours d'expansion. Toutes ces améliorations rendront la PV encore moins coûteuse et créeront des moyens supplémentaires de gestion de l'électricité. Il est donc justifié de poursuivre les efforts d'amélioration de ces technologies.

## Implications pour la Suisse

Le progrès technique fait de la photovoltaïque une source utile et économique d'électricité écologique. En Suisse, 2 GW de photovoltaïque installée couvrent 3% des besoins annuels d'électricité (estimation mi-2018). Une légère augmentation du taux d'installation (de 250–300 MW/an ces dernières années à 400–450 MW/an) permettrait d'atteindre d'ici 2040 une production annuelle de 12 TWh, ce qui correspond à la contribution minimale de la PV prévue par la Stratégie énergétique 2050 (20% de l'électricité). Il ne s'agit là pourtant que d'une fraction du potentiel technique de la PV en Suisse. Il existe ici de nombreux instituts de recherche et entreprises actifs tout au long de la chaîne de valeur photovoltaïque, et de nombreux systèmes PV à travers le monde contiennent des éléments de production suisse. Tant les instituts de recherche que le secteur photovoltaïque high-tech (qui fabrique p.ex. des équipements et des composants) se situent à la pointe de la technologie. La

forte pression de l'industrie chinoise, qui construit aujourd'hui déjà des installations de production, exige des entreprises suisses une innovation permanente afin de maintenir leur part de marché. Elles sont par ailleurs obligées de développer des produits et des services à plus

haute valeur ajoutée: les installations spéciales en îlot, les produits PV intégrés aux bâtiments, les dispositifs de mesure, les logiciels et les applications dans le domaine de la mobilité devraient ainsi permettre de conquérir des marchés de niche en Suisse et en Europe.

---

## Agriculture

### Sources alternatives de protéines

**Erich Windhab** (ETH Zurich)

**Quadrant:** technologie de niche

---



#### État des lieux à l'international et en Suisse

Depuis trois à cinq ans, de nouvelles sources de protéines à base d'insectes et de micro-algues occupent une place grandissante à côté de sources traditionnelles comme les céréales, les légumineuses et les tubercules. Évaluer la durabilité de ces nouvelles ressources nécessite des analyses poussées de leur cycle de vie. Ces analyses n'auront cependant du sens que lorsqu'on disposera de procédés de production et de fabrication, de caractéristiques de produit détaillées et de premières réactions quant à l'appréciation des consommateurs.

En parallèle, on observe une tendance intéressante à la durabilité pour certaines ressources conventionnelles, en particulier pour les protéines issues de légumineuses et de graines oléagineuses. Cette tendance s'appuie sur la pratique du «flexitarisme» qui gagne du terrain dans la génération des «millennials», dont l'alimentation est principalement végétarienne ou végane, avec une consommation

limitée de viande. Les protéines végétales texturées utilisées comme succédané de viande rencontrent donc un intérêt croissant. Ces produits, au besoin complétés par des fibres alimentaires, présentent une empreinte écologique durable et devraient à l'avenir bénéficier d'une demande croissante. En outre, ces protéines peuvent souvent s'obtenir ou être récupérées à partir de flux secondaires d'autres productions alimentaires.

#### Implications pour la Suisse

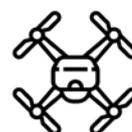
Les technologies de texturation de protéines telles l'extrusion haute pression en milieu humide, l'impression 3D multi-échelle ou le multi jet powder fusion devraient fortement se développer dans les années à venir. D'importants taux de croissance sont attendus pour les produits en résultant, qui peuvent au besoin être enrichis de fibres à valeur nutritionnelle. La Suisse est bien positionnée en termes de recherche pour bénéficier de cette tendance.

## Utilisation de drones dans l'agriculture de précision

Frank Liebisch (ETH Zurich)

Quadrant: espoir technologique

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Les processus agricoles précis et automatisés font l'objet d'une demande croissante y compris en Suisse afin de réduire les coûts et de préserver les ressources. L'utilisation combinée de moyens auxiliaires électroniques et mécaniques pour augmenter l'efficacité agricole relève de l'«agriculture de précision». Ce mode d'agriculture permet de sécuriser les rendements, d'augmenter les volumes et de réduire les impacts environnementaux néfastes, dus p.ex. aux déperditions de produits phytosanitaires. La population formule des exigences croissantes de réduction de ces impacts environnementaux. À l'avenir, les robots et les drones joueront un rôle important car ils sont optimisés pour des tâches spécifiques et peuvent ainsi exécuter les opérations dans les champs de manière plus efficace dans le temps et dans l'espace.

Aujourd'hui, les drones sont utilisés en agriculture principalement pour des missions de surveillance et d'épandage. La surveillance par drone livre déjà des informations et des images actuelles à haute résolution pour des sites en partie difficilement accessibles (p.ex. prairies, cimes), utilisées surtout pour le conseil et la cartographie agricoles. Le sauvetage de faons à l'aide de caméras infrarouge en est un exemple. L'utilisation de cartes pour une modulation intra-parcellaire des interventions dans les champs, telle qu'elle est en partie pratiquée à grande échelle dans des pays européens voisins, n'est pas encore courante en Suisse. Parmi les causes possibles, on peut citer les prix très faibles des engrais (p.ex. l'azote), des recommandations officielles de fertilisation sans mesures technologiques de fertilisation intra-parcellaire ou des réglementations légales. Les drones pour l'épandage d'adjuvants agricoles sont utilisés principalement pour la protection des cultures. On peut citer comme exemple concluant les capsules contenant des trichogrammes utili-

sées contre la pyrale du maïs, donc une méthode de lutte biologique au moyen d'insectes antagonistes. Il s'agit entre-temps d'une méthode standard en Suisse et dans l'UE, dont l'automatisation robuste a entraîné une nette amélioration de l'efficacité. En revanche, la pulvérisation de produits phytosanitaires liquides est soumise à des contraintes légales plus strictes et elle est nettement plus difficile à mettre en œuvre. Elle se trouve encore en phase de développement au niveau technique et juridique. La Suisse est néanmoins à la pointe internationale du développement d'applications pour drones dans la viticulture, surtout sur terrains escarpés. Ces technologies devraient gagner en importance y compris dans d'autres domaines comme la culture maraîchère, mais aussi pour des interventions préventives de précision dans les grandes cultures.

La Suisse est à la pointe mondiale du développement de la technologie des drones. Cela concerne surtout la technologie des capteurs, les systèmes de guidage et le traitement des données. Même si l'utilisation de drones dans l'agriculture suisse est actuellement encore faible, cette technologie présente un potentiel particulièrement intéressant pour l'agriculture diverse et fortement structurée du pays. La technologie à base de drones est souvent plus souple et parfois moins coûteuse que p.ex. les systèmes à base de tracteurs.

### **Implications pour la Suisse**

La Suisse dispose de bonnes conditions pour le développement de technologies de drones agricoles car il y existe des connaissances dans la quasi-totalité des domaines concernés, et ce de la recherche fondamentale à la recherche appliquée. Il s'agit surtout de créer des liens avec la pratique, d'encourager les solutions dans les exploitations agricoles et d'améliorer leur facilité de mise en œuvre. Il peut être utile de faire appel à cet effet à des instruments adaptés de promotion de la recherche et du transfert de technologies. L'intégration de ces technologies dans les processus agricoles actuels s'effectuera plutôt lentement. Par rapport à

l'étranger, on peut nommer différents facteurs défavorables, tels les prix relativement faibles des engrais et des matières premières ou des subventions agricoles peu liées à l'efficacité de production. En outre, le cadre légal pour l'utilisation de drones est actuellement en cours de modification. Et enfin, les drones ne jouent quasiment aucun rôle dans la formation des agriculteurs, des conseillers agricoles et de nombreux ingénieurs agronomes et apparentés. Il s'agit de créer des conditions cadre claires et positives, et de mettre en place les capacités requises pour étendre le rôle de la Suisse en tant que pionnière de la technologie des drones au domaine agricole à l'horizon de cinq à dix ans.

## Production alimentaire durable

Erich Windhab (ETH Zurich)

Quadrant: technologie star

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Avec ses 17 objectifs de développement durable, le *Programme de développement durable à l'horizon 2030 de l'ONU* («*Agenda 2030*») appelle clairement à mettre en place un système alimentaire durable et pérenne, en particulier les objectifs 2 et 12 (Objectif 2: Éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture durable; Objectif 12: Établir des modes de consommation et de production durables). La recherche européenne dans le domaine de l'alimentation, proche de l'industrie, en a déduit six objectifs stratégiques (voir entre autres les initiatives «*EIT Food*» et «*Food 2030*»). Avec l'adoption de l'Agenda 2030, la communauté internationale a créé un nouveau cadre de référence global, qui guide l'action de la Suisse en matière de développement durable. Un premier état des lieux indique que l'Agenda 2030 et ses objectifs sont fermement ancrés en Suisse mais que certains défis subsistent pour atteindre les objectifs fixés d'ici 2030.

### Implications pour la Suisse

Des mesures s'imposent en Suisse concernant la recherche alimentaire tout au long de la chaîne de valeur et les objectifs 2 et 12, tout particulièrement tributaires de développements en technologie alimentaire. Les principaux défis sont: (1) Consommation croissante des ressources qui dépasse de loin les limites de capacité planétaires et qui déplace l'impact environnemental vers les pays producteurs; (2) Pollution azotée et érosion de la biodiversité dues à l'usage élevé de produits phytopharmaceutiques et d'antibiotiques ne répondant pas encore aux objectifs écologiques de l'agriculture; (3) Malnutrition favorisant des maladies telles le diabète, l'obésité ou les problèmes cardiovasculaires, responsables d'environ 80% des dépenses de santé en Suisse. L'étude prospective «*Foresight Study*» réalisée par le *World Food System Center* de l'*ETH Zurich* a identifié certains aspects déterminants pour la durabilité du système alimentaire que des mesures de technologie alimentaire pourraient contribuer à résoudre:

- Efficience d'utilisation de l'énergie et des nutriments le long de la chaîne de valeur
- Réduction des déchets alimentaires et des déperditions dans la chaîne de valeur
- Habitudes et pratiques alimentaires durables
- Résistance aux antibiotiques
- Analyse d'impact d'une production alimentaire locale vs. globale

La quasi-totalité des quelque 2200 entreprises du secteur alimentaire suisse (98% de PME) abordent les aspects de la durabilité dans leurs objectifs. Avec environ 62'000 emplois directs et un chiffre d'affaire annuel d'environ 25 milliards de CHF, elles représentent 5,3% du PIB suisse.

## E-mobilité: véhicules et infrastructures électriques

**Andrea Vezzini** (BFH)

**Quadrant:** technologie automotrice

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Le respect des objectifs climatiques de l'Accord de Paris nécessite la transformation du système de transport actuel, basé sur des carburants fossiles, en un système durable présentant un niveau minimal d'émissions de CO<sub>2</sub> et de besoins en énergie primaire, ainsi que des émissions quasiment non polluantes. En Suisse, un tiers des émissions de gaz à effet de serre est occasionné par les transports. Si l'on considère uniquement les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux combustibles et aux carburants, la part des transports (15 millions de tonnes en 2017) s'élève même à 44%. C'est l'e-mobilité qui doit permettre de réaliser la transition nécessaire en répondant aux besoins en mobilité tout en tenant compte des différents aspects de la durabilité, s'appuyant sur des véhicules à propulsion électrique et stockage d'énergie. Une étude détaillée du *SCCER Mobility* montre qu'à moyen-long terme, la décarbonation de la mobilité n'est possible que par l'électrification de la propulsion. Les deux trajectoires d'électrification qui se font face sont d'une part les véhicules à batterie électrique et d'autre part les véhicules à pile à combustible utilisant l'hydrogène comme vecteur énergétique. La mise en place rapide d'une production d'électricité exempte de CO<sub>2</sub> et d'une infrastructure de recharge performante constitueront des facteurs décisifs. D'autres tendances internationales en matière de mobilité sont: l'essor de l'urbanisation (mégapoles) et de la numérisation (véhicules autonomes) ainsi que l'évolution des mentalités (économie collaborative).

### Implications pour la Suisse

À court et moyen terme, il s'agira de mettre en place l'infrastructure nécessaire à l'électrification de la mobilité. Si le pourcentage de véhicules à batterie électrique devait augmenter aussi fortement que prévu dans les cinq années à venir pour passer à 10–20% des nouveaux véhicules en 2025, la mise en place de l'infrastructure de charge correspondante s'impose. Dans ce contexte, les secteurs suisses de l'énergie, de la finance et de la technologie peuvent jouer un rôle déterminant. Partout en Europe, les constructeurs automobiles traditionnels manifestent un intérêt croissant pour le développement de leurs propres réseaux de bornes de recharge rapide. Il incombe au législateur de définir dès que possible le cadre nécessaire. L'industrie automobile suisse est traditionnellement une industrie de sous-traitance. La livraison de pièces et de matériel représente environ les deux-tiers de son chiffre d'affaires. À long terme, la production de pièces pour moteurs à combustion devrait reculer et faire place à la production de composants pour la mobilité électrique, créant des opportunités pour de nouveaux acteurs de marché.

## Concepts de mobilité

**Thomas Küchler** (Schweizerische Südostbahn AG)

**Quadrant:** espoir technologique

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

La mégatendance dans le développement de nouveaux concepts de mobilité concerne l'automatisation des véhicules sur la route et sur le rail. Pour les véhicules routiers, l'automatisation devrait se faire de manière progressive, de l'actuelle automatisation partielle à l'automatisation complète après 2030. Pour les véhicules ferroviaires, on constate actuellement d'importants efforts visant une forte augmentation des capacités grâce aux technologies digitales. Une autre tendance majeure concerne le développement de nouvelles solutions sur la base de technologies existantes. Dans la plupart des cas, ces solutions sont conçues en tant que substitut du véhicule de l'utilisateur ou en guise de complément aux transports en commun, pour répondre aux besoins du «dernier kilomètre». Une approche, en cours d'étude, consiste à développer de nouvelles offres à la demande avec des véhicules routiers pleinement automatisés. Une troisième tendance porte sur le couplage de toutes les offres de mobilité en une chaîne de transport unique et continue à maillons multiples, permettant de fournir des prestations de transport porte-à-porte simples d'utilisation. On observe actuellement aussi que des prestataires externes au secteur de la mobilité cherchent à compléter leurs produits et leurs services par des prestations de mobilité. Ces développements sont le plus souvent axés sur des besoins et des objectifs sectoriels et ne tiennent que peu compte des potentiels de la mobilité multimodale.

### Implications pour la Suisse

En résumé, la mobilité fait actuellement face à deux défis: d'une part, la manière dont nous utilisons la mobilité va fortement évoluer. D'autre part, les frontières entre différents modes de mobilité, p.ex. transports individuels/publics, vont s'estomper. Il reste à déterminer quelles exigences en découleront pour les infrastructures et le développement territorial. Dans ce contexte, la disponibilité des données relatives à la mobilité constitue une question centrale. Contrairement aux transports publics, dans le cas des transports individuels ces données sont fortement décentralisées, souvent privatisées et non accessibles aux tiers. Une combinaison judicieuse des sources de données est cependant indispensable pour développer et gérer la mobilité de demain et pour apporter des solutions intelligentes aux problèmes de capacité.

## Véhicules automatisés

**Bernhard Gerster** (BFH) et **Wolfgang Kröger** (ETH Zurich)

**Quadrant:** espoir technologique

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

La mobilité automatisée – ou largement assistée – est un thème technologique majeur, qui touche de nombreux domaines en tant qu'un aspect de la transformation numérique. Les véhicules actuels, dotés d'aides à la conduite de plus en plus performantes, sont aujourd'hui déjà techniquement capables d'exécuter de manière autonome certaines tâches (niveau 3 de la norme SAE J3016 de la *SAE International*). C'est l'étape précédant l'automatisation élevée, où le véhicule se déplace de manière autonome de A vers B mais demeure équipé d'un volant et de pédales (niveau 4 de la norme SAE J3016). Les véhicules autonomes sans volant ni pédales (niveau 5) dont l'autonomie de conduite n'est pas limitée à des trajets définis ou à des réseaux routiers restreints, nécessitent encore des avancées considérables en termes techniques et législatifs et sont donc exclus de nos considérations.

Le passage au niveau 4 et le déploiement initial de ces véhicules font déjà l'objet de controverses. Plutôt qu'une évolution lente et progressive, il semble possible que nous assistions dans un avenir proche à des «sauts quantiques», probablement avec le déploiement de flottes de camions. Le développement de véhicules sans champ d'application restreint ne doit pas être confondu avec l'utilisation de taxis et de bus autonomes en périphérie urbaine et dans des zones urbaines délimitées. En Suisse, de petites navettes sont déjà à l'essai à faible niveau de complexité, c'est-à-dire sur des trajets et des réseaux routiers préparés, à Sion, à Fribourg et à Neuhausen; d'autres suivront. A Singapour circule toute une flotte de taxis autonomes et *Waymo* a obtenu la première autorisation d'opérer en Californie des taxis sans accompagnateur. Ces projets pilote posent des exigences bien moindres en termes de perception de l'environnement,

d'interprétation et de capacité décisionnelle des systèmes que l'utilisation plus large et générale de véhicules au niveau 4.

La tendance à la mobilité automatisée revêt une grande importance, notamment en raison des attentes majeures et parfois peu réalistes qui s'y rattachent: meilleur taux de remplissage des routes et des véhicules, facilitation de nouveaux concepts de mobilité et modèles commerciaux, baisse des coûts surtout dans le domaine de la logistique, nouveaux modes de mobilité pour les personnes jeunes et âgées, et gains de temps grâce à l'abolition de tâches de conduite fastidieuses. La technologie génère pourtant aussi des craintes et du scepticisme, rendant vulnérable son acceptation par les utilisateurs. Il s'agit d'avancer avec prudence: la fiabilité et le degré de validation des systèmes informatisés sont mis en doute, la protection des gigantesques volumes de données générés est dépeinte comme problématique, et des questions émergent concernant la contrôlabilité, la responsabilité, et la pratique d'autorisation. Des logiciels, des systèmes de capteurs et d'autres matériels (p.ex. de nouvelles micro-puces), qui ensemble rendent les conducteurs quasiment superflus, sont déjà en cours de développement et d'essai. Cela inclut les algorithmes nécessaires d'apprentissage automatique et de reconnaissance des formes, c'est-à-dire d'intelligence artificielle. En vue d'une introduction réussie, il s'agit d'optimiser le système complet et de l'intégrer à des concepts de mobilité d'ordre plus global, arbitrant par exemple entre les exigences de minimisation des coûts et de sécurité. La cohabitation de véhicules conduits par des humains et de véhicules automatisés présente des difficultés à ne pas sous-estimer; il s'agit entre autres de régler des questions d'autorisation.

### Implications pour la Suisse

Les systèmes automatisés sont un axe central de recherche et de développement à l'EPFL et à l'ETH Zurich, dans différentes hautes écoles spécialisées et chez des constructeurs automobiles de premier plan et de grands équipementiers. De plus en plus de PME innovantes s'y consacrent également. La Suisse, pays hautement développé à forte densité de circulation, tire des bénéfices de systèmes de transport automatisés/autonomes pour les personnes et les marchandises. Elle est par

ailleurs bien positionnée pour participer activement à leur expérimentation et à leur introduction. Même si la Suisse ne dispose pas d'une industrie automobile propre, son savoir-faire spécialisé et ses performances avérées en la matière ouvrent de nouveaux champs d'action et de nouvelles opportunités commerciales à l'industrie de la sous-traitance automobile, aux grandes entreprises (logistique, transport de personnes et de marchandises, assurances) et aux PME (technologie des capteurs, développement de systèmes et de logiciels).

---

## Habitat intelligent

### Villes intelligentes

**Andrew Paice** (Hochschule Luzern)

**Quadrant:** technologie star

---



#### État des lieux à l'international et en Suisse

La mutation technologique et la numérisation représentent des défis majeurs pour les villes. Ces enjeux concernent tout particulièrement la mise à disposition de ressources (eau, électricité, lumière) et d'infrastructures (mobilité, gestion des déchets), mais également l'interaction directe des citoyens avec l'administration municipale. Tous ces domaines peuvent être bouleversés par les technologies numériques. Des technologies clé comme l'analyse de données massives ou l'Internet des objets sont disponibles et peuvent être utilisées pour optimiser la circulation urbaine. La communication peu coûteuse et sans fil (p.ex. la technologie Long Range Wide Area Network LoRaWAN), l'utilisation facile de capteurs à longue autonomie de batterie et

les logiciels en mode cloud pour la gestion et l'analyse des données permettent de créer un environnement intelligent à l'échelle de la ville tout entière. A l'international, plusieurs villes et communes ont fait appel à ces possibilités technologiques pour mettre en œuvre différents aspects de la vision «smart city». La gestion de l'éclairage constitue souvent la première étape, suivie de systèmes de gestion du stationnement et de gestion du trafic. Aujourd'hui, des capteurs intelligents sont intégrés aux réseaux d'alimentation afin de faciliter leur gestion intelligente. L'avènement de l'intelligence artificielle rend possibles de nombreuses nouvelles applications, mais fait également apparaître de nouveaux risques comme le «profilage» de certains citoyens ou de certains bâtiments.

Malgré la disponibilité des technologies nécessaires, la mise en place d'une ville intelligente constitue un défi majeur en raison de la complexité du système et du grand nombre d'applications possibles. Typiquement, la faisabilité et l'utilité pour les parties concernées font l'objet d'une démonstration dans le cadre de projets pilote. Il demeure cependant des problèmes majeurs de sécurité et de protection des données qu'il s'agit de résoudre afin de favoriser l'acceptation publique.

### **Implications pour la Suisse**

Il existe en Suisse un fort intérêt pour les villes intelligentes. Saint-Gall a initié des projets pilote dès 2015. Bâle a élaboré une stratégie et suit une approche à large assise combinant projets de démonstration et de recherche. D'autres villes comme Genève et Zurich développent une stratégie ou lancent des projets pilote souvent associés à des projets de recherche internationaux. On peut citer à titre d'exemples: un projet d'éclairage à Winterthur, un laboratoire vivant pour l'étude d'aspects sociaux à Bellinzona ou une mobilité et des systèmes de gestion du stationnement intelligents à Genève. Il est intéressant de noter que les services industriels municipaux font souvent figure de moteurs des technologies «smart city». Ils y voient la possibilité de réduire les coûts et de développer des modèles commerciaux axés sur les services. Il existe en outre des groupements d'intérêt comme *Smart City Hub Switzerland* ou *CityZen*, et l'*Office fédéral de l'énergie* dispose d'un programme de recherche «Bâtiments et villes» axé sur l'énergie.

Les principaux facteurs technologiques favorisant l'avènement des villes intelligentes sont les taux de propagation des technologies de réseau de l'Internet des objets et des réseaux de communication comme la 5G. Le potentiel économique des villes intelligentes est énorme et augmente encore au vu d'une convergence possible avec les technologies «smart home/smart building». Parmi les obstacles à cette évolution, on compte les coûts et les processus de décision (politiques), la complexité de l'intégration de tous les aspects au sein d'un système fonctionnel, et enfin la recherche d'arguments convaincants favorisant l'adhésion de toutes les parties concernées. Dans cet environnement hautement complexe, l'une des décisions centrales que devront prendre les villes portera sur le choix de leurs partenaires technologiques: vaudra-t-il mieux accorder sa préférence à des partenaires établis mais souvent internationaux ou choisir des partenaires locaux? Ces derniers sont garants de souplesse mais ne peuvent éventuellement pas assurer la continuité opérationnelle. Les startups et les PME suisses ont de nombreuses possibilités de proposer une assistance technologique et des modèles de service novateurs. L'enjeu consiste pour elles à gagner la confiance des villes et à fonder ensuite une entreprise pérenne afin d'assurer la continuité nécessaire. L'enjeu pour les villes consiste à créer une identité numérique et à concrétiser les initiatives «smart city» dans l'intérêt de leurs citoyens. Dans les cinq à dix années à venir, l'introduction d'innovations «smart city» et d'innovations dans les services devrait connaître un essor majeur.

## Bâtiments intelligents

Peter Richner (Empa)

Quadrant: technologie star

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Les termes «smart home» ou «bâtiment intelligent» ne possèdent pas de définition exacte mais désignent des bâtiments connectés et équipés en technologies de l'information et des capteurs. L'Internet des objets ou les services en mode cloud présentent un potentiel d'application pour le domaine des bâtiments. Les systèmes passifs et la planification intelligente peuvent également contribuer à rendre un bâtiment «intelligent». Les solutions dites intelligentes doivent cependant autant que possible fournir l'action désirée sans intervention de la part de l'utilisateur. On peut citer comme exemple les algorithmes de gestion du chauffage et de la climatisation, qui tiennent compte de prévisions mises à jour en continu pour le mode d'utilisation du bâtiment et les données météorologiques. Ou encore les systèmes de surveillance permettant aux personnes âgées de continuer à vivre chez elles de manière indépendante plus longtemps. Dans une société moderne et technologique, les solutions intelligentes en matière de bâtiments adaptés aux besoins des personnes handicapées, de protection contre les incendies, d'énergie, de sécurité sismique et de confort revêtent une grande importance. Le potentiel le plus important concerne la réaction intelligente à des modifications à court, moyen et long terme des modes d'utilisation et/ou des conditions environnementales.

### Implications pour la Suisse

Dans une société moderne et technologique, le potentiel des solutions intelligentes dans la construction et l'exploitation des bâtiments est énorme. Le défi réside dans la mise en œuvre pratique des nouveaux concepts. L'intégration de solutions fortement associées au reste du bâtiment doit être assurée de la planification à la réalisation et à l'exploitation. L'interaction nécessaire entre le secteur du bâtiment, d'esprit plutôt traditionnel, et de nouveaux intervenants fortement influencés par les technologies de l'information peut s'avérer complexe. Pour les solutions add-on tels les paquets d'extension ou les programmes supplémentaires, p.ex. les appareils ménagers à commande vocale, l'acceptation des usagers et la création d'une valeur ajoutée tangible sont déterminantes. La recherche universitaire et industrielle en Suisse est bien positionnée et très active: elle devrait donc pouvoir se saisir de cette tendance avec succès.

A bundle of fiber optic cables is shown from a low angle, fanning out towards the top right. The cables are illuminated from within, creating a series of bright, glowing points of light that trail off into the distance. The overall color palette is a range of blues, from deep navy to bright cyan and white at the light sources.

# Procédés de fabrication et matériaux

## Développement de matériaux pour la fabrication additive

Christian Leinenbach, Lars Sommerhäuser (Empa) et Adriaan Spierings (inspire)

Quadrant: espoir technologique



### État des lieux à l'international et en Suisse

Le développement de matériaux pour la fabrication additive (additive manufacturing) porte sur les matières plastiques, les métaux, les céramiques et les matériaux composites dont la composition est adaptée de manière optimale aux conditions et aux exigences des procédés de fabrication additive, rendant ainsi possibles de nouveaux produits à performance améliorée. L'objectif est double: d'une part, il s'agit d'élargir la gamme des matériaux adaptés aux procédés additifs. D'autre part, les procédés additifs doivent permettre de produire de nouveaux matériaux impossibles à réaliser avec des procédés de fabrication conventionnels. Les conditions particulières de la transformation additive permettent ainsi p.ex. de figer des états instables dans les métaux, de combiner différents matériaux en cours de fabrication ou de modifier localement les propriétés des matériaux.

La production de matériaux spécifiques pour les procédés de fabrication additive connaît donc un essor important. Ces matériaux permettent de fabriquer des composants dotés de nouvelles fonctions ou de propriétés plus intéressantes que les composants de fabrication conventionnelle. Seule l'utilisation de matériaux optimisés à cet effet permet d'exploiter pleinement le potentiel industriel de la fabrication additive.

### Implications pour la Suisse

La Suisse est bien positionnée dans le domaine de la science des matériaux et du développement de technologies. Du côté de la recherche, les institutions du domaine des EPF, les organismes de recherche comme *inspire* et certaines hautes écoles spécialisées jouent un rôle important. Du côté de l'industrie, il existe également en Suisse différentes entreprises disposant des compétences nécessaires au développement de ces matériaux et des procédés associés. Alors que jusqu'à présent les avancées en matière de fabrication additive étaient dues surtout aux constructeurs de machines et d'installations – en particulier en Allemagne et aux États-Unis – à l'avenir l'accent sera mis plus fortement sur les matériaux et les procédés. Dans ce domaine, qui n'en est encore qu'à ses débuts mais qui connaît un développement rapide, la Suisse a la possibilité d'accéder à une position de leader technologique international. Cependant – comme le font déjà d'autres pays européens ou les États-Unis – la Suisse doit également mettre en place à cet effet des instruments adaptés de promotion de la recherche et de transfert de technologie.

## Procédés liés à la fabrication additive

Lars Sommerhäuser (Empa) et Adriaan Spierings (inspire)

Quadrant: espoir technologique

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Les procédés liés à la fabrication additive comprennent toute la gamme des procédés additifs actuellement disponibles ou en cours de développement, y compris différents procédés en amont ou en aval, nécessaires à la production de composants et de produits fonctionnels. On peut citer comme exemples les technologies à base de poudre comme le frittage sélectif par laser (selective laser sintering SLS) et la fusion sélective par laser (selective laser melting SLM) pour les composants plastiques et métalliques, les procédés à base de filament comme le dépôt de fil fondu (fused deposition modeling FDM) pour les plastiques ainsi que les procédés à base liquide comme la stéréolithographie (SLA). Les exemples de nouveaux procédés prometteurs actuellement encore en cours de développement incluent l'impression de pièces métalliques par projection de matière (binder jetting BJ), les technologies de fabrication additive de grandes structures à l'échelle du mètre ainsi que de nouvelles applications à l'échelle micro et nano.

Dans ce contexte, l'industrialisation des procédés de fabrication additive fait figure de méta-tendance, impliquant en particulier l'automatisation accrue et l'intégration plus poussée au sein de chaînes de production conventionnelles, l'assurance de la qualité des processus et des produits, et la réduction des coûts de fabrication. Il ne faut pas sous-estimer la portée de cette tendance. Les applications et les composants de fabrication additive présentent un potentiel d'innovation considérable qu'il s'agit de mettre en œuvre de manière économique et qualitative. Des exemples d'application pratique présentant un intérêt pour la Suisse se trouvent dans l'industrie des plastiques,

la construction légère (secteurs aéronautique et spatial), la construction de machines, la technologie médicale et l'industrie des turbines, donc dans des domaines qui contribuent au positionnement international exceptionnel de la Suisse en matière d'innovation.

### Implications pour la Suisse

En comparaison internationale – en particulier par rapport à l'Allemagne, au Royaume-Uni, aux États-Unis et à la Chine – la Suisse s'est montrée plutôt inactive en matière de promotion de l'industrie et de la recherche pour le développement de procédés industriels de fabrication additive. La tendance à l'industrialisation croissante de ces technologies revêt cependant une grande importance car elle nécessite de nouvelles idées et un savoir-faire dans le développement continu et la mise en œuvre de technologies ainsi que des concepts novateurs d'assurance qualité. Ce sont là des domaines dans lesquels la Suisse peut mettre à profit ses forces traditionnelles. Le développement de nouvelles technologies additives, l'industrialisation plus poussée de la fabrication additive et la qualification de technologies additives pour des applications spéciales sont des domaines qui offrent à la Suisse la possibilité de faire valoir ses compétences dans un marché à forte croissance. La Suisse peut et doit contribuer à faire passer les technologies de la fabrication additive au niveau suivant en termes de qualité et de coûts. Répondre à ces défis occupera certainement la recherche et l'industrie suisses pour les cinq à huit années à venir. Dans ce contexte, il est essentiel que la politique s'engage à promouvoir l'ingénierie de fabrication en Suisse. Il faut par ailleurs mettre en place des structures, des programmes et des priorités d'encouragement adaptés.

## Bioplastiques

**Urs Mäder** (SATW), **Roger Marti** (HES-SO Fribourg) et **Hans-Peter Meyer** (Expertinova AG)

**Quadrant:** espoir technologique



### État des lieux à l'international et en Suisse

Les bioplastiques sont issus de biomasse renouvelable. Ils ne doivent pas être confondus avec les plastiques biodégradables, car ils ne sont pas conçus a priori de manière à être biodégradables.

Outre les matériaux dits «drop-in» – plastiques biosourcés chimiquement identiques aux plastiques issus de ressources fossiles – il existe aussi de plus en plus de nouveaux monomères ou polymères issus de ressources renouvelables. Ils remplacent toujours plus souvent les produits classiques issus du pétrole. On peut citer comme exemple le polyéthylène furanoate (PEF), fabriqué entièrement à base de matières premières végétales. L'une de ses composantes, l'acide furane dicarboxylique, est un produit chimique de base pour de nombreux plastiques biosourcés pouvant être obtenu à base de déchets végétaux grâce à un processus à plusieurs étapes. Par rapport au PET auquel il ressemble, le PEF présente de meilleures propriétés barrière à l'oxygène et au CO<sub>2</sub>, ce qui le rend intéressant pour l'industrie de l'emballage. Les biopolymères fonctionnels de qualité sont utilisés de manière croissante pour des applications spéciales par exemple en biomédecine, pour l'impression 3D de nouveaux organes et dans l'industrie de l'emballage.

Dans un avenir proche, les plastiques biosourcés seront plus largement présents sur le marché mais leur part au marché global, en expansion continue, demeurera inchangée à quelques pourcents seulement. Afin de changer la donne, il faut d'une part mettre en place un dispositif de contrôle réglementaire. D'autre part, il serait souhaitable de renforcer les efforts de recherche afin d'accompagner la diffusion en particulier dans l'industrie de l'emballage. On peut citer comme parfait exemple le projet européen *BioSmart* réalisé en partenariat avec la *Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg*, qui a pour objectif de développer des emballages intelligents, biosourcés et compostables. D'autres monomères intéressants issus de ressources naturelles sont encore en cours d'étude. Des recherches actives portent sur les biopolymères fonctionnels, en particulier pour des applications high-tech qui interagissent avec l'environnement ou réagissent aux influences externes. Les polyhydroxycarboxylates constituent un développement prometteur: leur structure et leurs propriétés peuvent être adaptées sur mesure pour des applications spécifiques.

### Implications pour la Suisse

Les applications de biopolymères en technologie médicale et dans le domaine de la formulation et de l'emballage représentent autant d'opportunités pour l'industrie suisse. Mais l'industrie automobile et l'agriculture sont également concernées. Les partenaires scientifiques et industriels et les instances réglementaires devraient être réunis afin de formuler ensemble les principaux problèmes et solutions. Il faut également sensibiliser le public aux plastiques biosourcés et/ou biodégradables.

## Fibres fonctionnelles

**Manfred Heuberger** (Empa), **Paul Keller** (Avery Dennison Materials Europe) et **Urs Mäder** (SATW)

**Quadrant:** technologie automotrice

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Les fibres fonctionnelles sont d'ores et déjà largement utilisées pour de multiples applications pratiques, surtout pour la fabrication de vêtements fonctionnels de sport et de loisirs et en tant que matériau isolant, composite et de renfort dans les industries du bâtiment et du papier. Parmi les autres applications encore en phase d'essai ou déjà en application pratique, on peut citer:

- Les fibres à effet microbien (par absorption ou diffusion de substances antibactériennes)
- Les fibres superabsorbantes destinées aux produits médicaux et cosmétiques
- Les fibres à absorption et à diffusion contrôlées d'eau pour emballages alimentaires
- Les fibres pour l'élimination sélective de métaux lourds des eaux usées

Pour beaucoup d'applications techniques, on associe aux fibres des additifs lors du processus de filage afin de créer de nouvelles propriétés, ou alors elles sont traitées avec un apprêt. Lors du processus de fabrication, il est également possible de modifier la structure des fibres: outre les fibres conventionnelles rondes, on peut fabriquer des fibres creuses, plates ou autres.

La combinaison de méthodes de fabrication innovantes et de nouveaux matériaux comme les nanoparticules pourrait permettre de développer des fibres fonctionnelles aux propriétés inédites. Ces possibilités devraient faire l'objet d'un examen approfondi, d'une évaluation de leur potentiel et, le cas échéant, d'un encouragement. Quelques applications présentant un potentiel intéressant:

- Fibres composites combinant différents matériaux dotés de propriétés de surface particulières. Il peut s'agir par exemple de fibres à deux composantes avec une gaine extérieure qui fond à une température moins élevée que le cœur et se fond dans le matériau environnant (matrice)
- Fibres avec des nanoparticules comme l'argent pour des textiles innovants offrant une protection contre les incidences mécaniques ou électromagnétiques comme l'électricité, la radiation ou la chaleur
- Fibres à substances actives liquides microencapsulées ou à noyau liquide
- Fibres biodégradables utilisables comme substituts pour les textiles non tissés synthétiques dans les domaines domestique, cosmétique et agricole
- Fibres haute tolérance pour applications médicales, p.ex. pour remplacer des vaisseaux sanguins, pour la cicatrisation des plaies en cas de brûlures étendues ou pour l'administration dosée de médicaments par la peau ou dans le corps

Une tendance importante porte actuellement sur le développement d'une nouvelle génération de fibres ignifuges aux fortes propriétés mécaniques comme la résistance à la traction. Les États-Unis tout comme l'UE s'efforcent actuellement de bannir les retardateurs de flammes bromés et halogénés de différents produits, en particulier des plastiques et des textiles. Les recherches des dix dernières années environ ont livré de nouveaux composés organiques phosphoriques respectueux de l'environnement mais hautement efficaces. Ils peuvent ainsi être utilisés en quantités si minimes que les propriétés mécaniques des fibres restent largement intactes. Dans les cinq années à venir, cette tendance technologique devrait produire des fibres novatrices à base de différents polymères aux propriétés ignifuges améliorées.

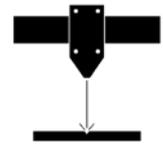
### **Implications pour la Suisse**

Comme la Suisse travaille à la pointe de la recherche en matière de retardateurs de flammes, l'industrie suisse est en pole position pour s'assurer des droits de propriété intellectuelle et pour développer des marchés existants ou de nouveaux marchés à haute création de valeur. Ces développements devraient également s'avérer stimulants dans d'autres domaines de la transformation de polymères (compounding, films et pellicules, moulage par injection).

## Traitement de surface au laser

**Andreas Conzelmann** (TRUMPF Schweiz AG)

**Quadrant:** espoir technologique



### État des lieux à l'international et en Suisse

Le terme «traitement de surface» couvre une multitude de procédés qui modifient les propriétés d'un matériau ou structurent une surface afin d'y apposer un marquage. Le traitement de surface utilise typiquement des sources de rayonnement laser de puissance de sortie moyenne. Ces lasers opèrent en mode continu (onde entretenue), pulsé (impulsions de l'ordre de la micro/nanoseconde) ou à impulsions ultra-courtes (impulsions de l'ordre de la pico/femtoseconde). Ces cinq dernières années, le développement de sources de rayonnement laser à puissance de sortie élevée ou à impulsions ultra-courtes de l'ordre de la femtoseconde, combiné à la disponibilité d'éléments optiques, de systèmes de guidage du faisceau et de capteurs associés, a rendu possibles de nouveaux procédés. Quant aux procédés existants, leur qualité a pu être améliorée et leur durée raccourcie. Ces dernières années, la photonique a ouvert la voie de manière décisive à l'industrialisation de nombreux produits novateurs. En 2017, le marché mondial des sources de rayonnement laser pour le traitement de surface s'élevait à environ 2 milliards de USD, soit environ 20% du marché total des lasers.

Le traitement des surfaces joue un rôle dans la quasi-totalité des secteurs, ainsi la construction automobile, les batteries, les écrans, l'électronique, la communication, la technologie aérospatiale, la technologie médicale, l'alimentation, la technologie de sécurité, l'horlogerie et la bijouterie, l'électronique grand public ou la technologie de défense. Les principaux moteurs du traitement des surfaces sont les suivants:

- Besoin de nouveaux procédés de production à haute densité d'énergie et de puissance
- Exigences croissantes relatives à la fonctionnalité ou à la résistance à l'usure des surfaces en raison de hausses de productivité
- Besoin de traçabilité des pièces et des produits tout au long de la chaîne des processus et de la chaîne logistique au moyen de codes ou de texte
- Nouvelles réglementations dans les secteurs des technologies aérospatiales, médicales et autres, qui imposent des marquages haute résistance tout au long de la chaîne des processus

Les nouveaux procédés de traitement de surface incluent par exemple des processus de cristallisation pour la production d'affichages OLED ou LCD, le détachage d'écrans souples de leur matériau de support ou le traitement de verres durcis. Les marquages laser au moyen de lasers nanoseconde conventionnels entraînent en règle générale des modifications de structure des aciers, avec risque de corrosion. En revanche, l'utilisation de lasers à impulsions ultra-courtes a permis un véritable saut technologique et des marquages extrêmement résistants à la corrosion. Les brèves échelles de temps pendant lesquelles une impulsion laser pico/femtoseconde interagit avec un matériau permettent de créer des structures de surface inhabituelles, augmentant par exemple les capacités d'absorption ou d'émission, ou fournissant un soutien catalytique

à un processus électrochimique. Les progrès énormes réalisés dans le revêtement d'une grande variété de matériaux avec une précision subnanométrique rendent possible la production de nouveaux composés et couches. En combinaison avec des matériaux optiquement actifs et des guides d'onde spéciaux, il devient possible de produire des éléments de construction, capteurs ou commutateurs optiques intelligents et actifs. Une microstructuration adaptée permet d'utiliser des techniques d'assemblage novatrices afin d'influer par exemple sur les propriétés thermiques ou tribologiques d'un matériau.

Les mégatendances que sont la numérisation, la globalisation l'individualisation et la sécurité mèneront à des exigences accrues en matière de traçabilité des unités de montage, des produits et des pièces tout au long de la chaîne des processus et de la chaîne logistique. D'autres tendances comme la connectivité, la mobilité et la néo-écologie rendront plus importants la structuration de surface de métaux, de semi-conducteurs et de polymères, l'enlèvement de couches et les procédés liés à la production d'affichages et d'écrans. Le domaine de l'électromobilité nécessitera à l'avenir des milliers de lasers pour le décapage de fils pour la production de moteurs électriques.

### **Implications pour la Suisse**

Le volume du marché suisse de la photonique, qui couvre essentiellement les sources et systèmes de rayonnement laser ainsi que les composants, revêtements et capteurs optiques, est d'environ 4 milliards de CHF, dont environ 400 millions de CHF pour les lasers et systèmes laser de traitement de surface. Ce sous-segment présente une croissance annuelle moyenne de 8% et une part d'exportations de plus de 90%. Selon les experts, la part des composants photoniques dans l'ensemble des produits développés et produits par l'industrie MEM en Suisse augmentera d'aujourd'hui 40% à plus de 60% au cours des dix années à venir. Ces chiffres montrent que l'industrie suisse contribue fortement au marché mondial de la photonique. La part au produit intérieur brut est significative et continuera d'augmenter. Afin de maintenir leur position de pointe dans le domaine du traitement de surface, outre la recherche fondamentale les établissements suisses de l'enseignement supérieur doivent consacrer plus d'attention aux technologies «habilitantes» (enabling technologies) comme la photonique. La quasi-totalité des quelque 20 instituts suisses de l'enseignement supérieur actifs dans la recherche photonique ont ainsi rejoint le *réseau thématique national (RTN) Swisss photonics*. Ils étayent leurs activités de recherche avec une offre éducative à niveau bachelor, master et doctorat. Depuis quatre ans, il existe également des cursus spécialisés en photonique.

## Télécommunications optiques spatiales

Reinhard Czichy (Synopta)

**Quadrant:** espoir technologique

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Le terme «télécommunications optiques spatiales» (optical space communication) désigne la transmission de données entre satellites dans l'espace ou vers la Terre au moyen de liaisons optiques dans l'espace, utilisant des lasers dans la plage spectrale du proche infrarouge. La fréquence porteuse de ces systèmes de transmission de données – et donc aussi la largeur de bande de transmission disponible – dépasse de plusieurs ordres de grandeur celle de systèmes à fréquence radio. Cette technologie ouvre donc l'accès à de nouvelles ressources en termes de largeur de bande.

En Europe, l'expérimentation de télécommunications optiques spatiales à taux de transfert élevé (> 1 gigabit/s) entre satellites en orbite terrestre basse a débuté en 2007. En 2016, l'Agence spatiale européenne (ESA) a mis en service le premier satellite à terminal optique pour une utilisation opérationnelle en orbite géostationnaire. À partir de 2019, d'autres satellites de ce type doivent être mis en service en tant que stations relais dans le cadre du programme *European Data Relay Satellite (EDRS)*, permettant ainsi la transmission optique de données à partir de satellites d'observation de la Terre. Suite à la démonstration aboutie de cette technologie dans l'espace, des projets sont en cours à l'échelle internationale pour développer des constellations de satellites commerciaux à liaisons op-

tiques, axées sur les services mobiles offrant un taux de transfert très élevé et une couverture globale. Ces constellations disposent de liaisons de données optiques entre les satellites ainsi qu'avec des stations terrestres. Étant donné les besoins toujours croissants de capacité de transmission et la tendance à l'amélioration continue des services mobiles, les télécommunications optiques spatiales connaîtront dans les années à venir un essor fulgurant dans tous les segments. Cela concerne les systèmes (mise en place/exploitation de réseaux de satellites), le développement d'équipements et de composants (terminaux optiques pour satellites et stations terrestres), mais aussi le développement d'applications et de services.

### Implications pour la Suisse

Les télécommunications optiques spatiales regroupent un grand nombre de technologies complexes qui existent en Suisse. Elles stimulent les applications innovantes et font avancer tant l'industrie que les services dans le domaine des télécommunications. La recherche et l'industrie suisses se sont impliquées dans ces développements dès le début, faisant valoir avec succès leurs compétences respectives et s'assurant ainsi un bon positionnement. Néanmoins, un engagement fort de la Confédération, reflet d'une planification stratégique à long terme, demeure nécessaire pour renforcer la compétitivité à l'international et développer des produits commercialisables.

## La photonique en tant que technologie habilitante

René Dändliker (SATW)

Quadrant: technologie star

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

La photonique réunit deux domaines de la physique, l'optique et l'électronique. Elle forme la base du développement d'importantes applications techniques et industrielles. Selon la Commission européenne, elle figure parmi les six «technologies clés génériques (key enabling technologies KET)», également appelées «technologies habilitantes». Les technologies de la photonique ouvrent la voie dans une multitude de domaines: traitement des images, écrans/affichages, sources lumineuses (laser, LED), technologie médicale et sciences de la vie, composants et systèmes optiques, technologie de la communication, photovoltaïque, technologie de fabrication et de mesure, technologie de l'information, technologie de la sécurité et de la défense. L'industrie suisse (en particulier les PME) est déjà active dans beaucoup de ces domaines, qui présentent une croissance annuelle persistante de 6-8%.

Les technologies de mesure photoniques permettent une surveillance des processus sans contact et en temps réel. Il s'agit là d'aspects décisifs pour l'industrie 4.0 et l'Internet des objets. La saisie et le traitement de données massives ouvrent également de nouveaux champs d'application pour les liaisons et les réseaux optiques (fibres optiques, optique intégrée). Les applications comme la production de données spatiales tridimensionnelles en temps réel se basent sur la saisie multidimensionnelle de données et d'images au moyen de caméras haute résolution ou de scanners optiques (Lidar), et génèrent des quantités de données extrêmement importantes qui doivent être traitées en temps réel avec des algorithmes intelligents. De

plus, les nouvelles méthodes de représentation comme la réalité virtuelle et la réalité augmentée offrent d'intéressantes possibilités à l'industrie suisse de la photonique, avec ses connaissances uniques au monde dans la fabrication de composants et de systèmes optiques miniaturisés. L'importance de la photonique aujourd'hui est comparable à celle de l'électronique au milieu du 20<sup>ème</sup> siècle.

### Implications pour la Suisse

L'industrie suisse est déjà présente sur le marché avec de nombreux produits utilisant des technologies photoniques. L'industrie et la recherche scientifique suisses sont bien positionnées. Mais la concurrence internationale est forte et la promotion de l'innovation menée depuis des années à niveau très élevé dans d'autres pays livre aujourd'hui des résultats évidents (surtout en Allemagne mais aussi en Chine, en Corée et aux États-Unis). La Suisse ne dispose pas de programmes d'encouragement équivalents. Cependant, les établissements suisses de l'enseignement supérieur n'en sont pas moins très actifs dans ce domaine: recherche fondamentale dans les universités, à l'ETH Zurich et à l'EPFL, projets réalisés dans le cadre du *Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS)* et surtout des *Pôles de recherche nationaux (PRN)*, et enfin recherche appliquée et axée sur les besoins de l'industrie dans les hautes écoles spécialisées, la plupart du temps dans le cadre de projets de courte durée *Innosuisse* et de missions industrielles. Les PME, piliers essentiels de l'industrie suisse, sont des innovateurs performants mais le manque d'encouragement financier des technologies photoniques leur fait perdre du terrain par rapport à leurs concurrents étrangers.

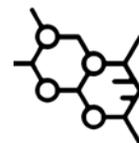


# Sciences de la vie

## Biocatalyse et biosynthèse

Rebecca Buller (ZHAW)

Quadrant: espoir technologique



### État des lieux à l'international et en Suisse

À l'avenir, l'industrie chimique fera face à une pression publique nettement plus forte: il ne s'agit pas seulement de tenir compte d'objectifs économiques dans la planification d'entreprise à long terme, mais aussi de satisfaire à des exigences sociales et écologiques dans la production. Les progrès scientifiques et techniques des dix dernières années ont établi la biocatalyse et la biosynthèse (l'utilisation d'enzymes et de microorganismes en chimie de synthèse) comme des compléments praticables et écologiques à la chimie organique traditionnelle. Les enzymes sont par exemple utilisés pour la production de molécules chirales (c'est-à-dire non superposables à leur image dans un miroir) et, autant que possible, pour éviter de faire appel à un groupe protecteur. L'utilisation de biocatalyseurs permet ainsi de raccourcir les processus et de réduire les coûts. L'utilisation de matières premières bon marché ou de déchets (agricoles) dans les processus biosynthétiques est une autre possibilité de création de valeur. Des étapes de processus biocatalytiques sont utilisées dans la production de molécules pharmaceutiques vedettes. Les approches biosynthétiques sont utilisées en chimie fine pour la production d'arômes, de parfums et de nutraceutiques, mais aussi pour la production de produits chimiques en vrac à base de ressources durables.

On peut citer comme champ d'application futur le développement de nouvelles substances chimiques. L'amélioration du degré de maturité technologique d'un nombre accru de familles d'enzymes permettra à l'industrie chimique de réaliser des réactions complémentaires à la chimie organique et d'élargir ainsi la gamme des molécules pouvant être produites. Outre l'implantation industrielle de familles d'enzymes peu explorées, on peut utiliser à cet effet des enzymes produits par conception assistée par ordinateur ou des enzymes dont le spectre de réaction a été élargi par l'intégration de cofacteurs artificiels.

À l'avenir, la biocatalyse devrait également jouer un rôle important au vu de l'indépendance ambitionnée par rapport aux énergies fossiles. L'inquiétude face au changement climatique et la volatilité des coûts de l'énergie fossile font aujourd'hui figure de forces motrices globales pour la valorisation de biomasse en tant que ressource de production. Le développement efficient de l'économie biosourcée repose cependant dans une large mesure sur la création d'une importante boîte à outils biocatalytiques et biosynthétiques, permettant de transformer la biomasse disponible en une multitude de produits.

### **Implications pour la Suisse**

En Suisse, les grandes entreprises pharmaceutiques, les entreprises de chimie fine et l'industrie des parfums et des arômes consacrent une part importante de leur recherche enzymatique au développement de processus. Les façonniers comme *CordenPharma Schweiz*, *RohnerChem* et *Siegfried* manifestent également un intérêt croissant à étendre leur expertise en matière de synthèse chimique à des compétences biocatalytiques, car le développement de savoir-faire dans le domaine de la biocatalyse est considéré comme facteur décisif pour l'acquisition de futurs clients. Ce sont cependant surtout les grandes entreprises qui profitent activement des promesses de la biocatalyse. Les PME n'exploitent pas encore

pleinement le potentiel de ce domaine prometteur. Cette disparité s'explique principalement par des facteurs «soft» comme la disponibilité limitée de personnel formé et la capacité R&D plus restreinte des petites entreprises. Afin de renforcer la position de la Suisse dans ce secteur high-tech, il est donc essentiel de faire dialoguer science et économie. Le programme de mise en réseau «*Innovation in Biocatalysis*», financé par la Confédération au titre des contributions liées à des projets 2017-2020, favorise cet échange et contribue à l'émergence d'une communauté dynamique dans le domaine de la biocatalyse en Suisse. D'autres programmes de ce genre sont nécessaires afin que la biocatalyse et la biosynthèse puissent déployer tout leur potentiel industriel.

## Procédés de fabrication en continu

**Djordje Filipovic** (Novartis)

**Quadrant:** espoir technologique

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Traditionnellement, les produits pharmaceutiques sont fabriqués par lots. Cette méthode de production est aujourd'hui encore la méthode dominante: des matériaux définis sont «traités» pendant une période de temps définie et ensuite validés en tant qu'unité de production (lot). Habituellement, cela implique plusieurs processus séparés et consécutifs. Les produits sont analysés hors ligne et validés pour l'étape suivante. Ces derniers temps, la fabrication en continu (continuous manufacturing) a pris une importance croissante. Les matériaux parcourent toutes les étapes du processus en flux continu: l'ajout des matières de base et des additifs ainsi que le retrait et la validation des produits finis se font en continu. La validation s'effectue en temps réel sur la base d'analyses des processus en ligne/sur ligne et d'algorithmes de contrôle.

La fabrication en continu offre de nombreux avantages par rapport à la fabrication par lots: production plus sûre et moins coûteuse avec des systèmes hautement spécifiques et fortement individualisés, délais de commercialisation plus courts, installations de production plus compactes et donc plus respectueuses de l'environnement, exigences moindres en termes de mise à l'échelle et de maintenance, et possibilité d'«auto-optimisation». Autre avantage essentiel: le contrôle de qualité intégré en temps réel, condition de base de la fabrication en continu. Les installations de production en continu constituent des plateformes souples: les mêmes lignes peuvent servir au développement de processus et à la production, permettant de développer plus rapidement de nouveaux processus. Les coûts et les temps de mise à l'échelle s'en trouvent massivement réduits. Par ailleurs, l'éventail des solutions chimiques est plus large: comme les volumes de réaction sont plus petits, il devient p.ex. possible d'appliquer des étapes de réactions exothermiques

«plus risquées» ou des pressions plus élevées, ce qui permet la synthèse de nouvelles molécules. Suivant les besoins, le volume de production est variable en continu. En outre, ces plateformes sont mieux adaptées à la mise en œuvre de solutions patient médicamenteuses personnalisées.

L'un des principaux obstacles à l'introduction de la fabrication en continu était l'absence de cadre réglementaire pour ce nouveau paradigme de production. Ces dernières années, sous l'égide de l'agence américaine des médicaments *FDA*, de nombreuses incertitudes ont été levées, favorisant grandement l'étude et l'exploration de ces possibilités. De nombreux équipementiers ont également entrepris des efforts importants en matière de développement de solutions pour la fabrication en continu. Plusieurs entreprises proposent maintenant également des solutions de surveillance et d'analyse des processus ainsi que des plateformes intégrées de contrôle des processus. De nouveaux fabricants sont récemment entrés sur le marché, permettant à l'industrie de bénéficier de solutions meilleures et plus compétitives.

Les grandes entreprises pharmaceutiques ouvrent la voie dans la mise en œuvre de ce nouveau paradigme. Mais les PME ont elles aussi commencé à évaluer les possibilités et les avantages de la fabrication en continu. Entre-temps, de premiers produits développés en vue d'une fabrication en continu ont obtenu des autorisations de mise sur le marché, p.ex. *Orkambi* de *Vertex Pharmaceuticals*. Il y a peu, un premier fabricant a par ailleurs été autorisé à passer d'un procédé de fabrication par lots à un procédé de fabrication en continu. On observe aussi un nombre croissant de collaborations étroites entre institutions universitaires et industrie, comme p.ex. le *Novartis-MIT Center for Continuous Manufacturing*.

### **Implications pour la Suisse**

La Suisse est en principe bien positionnée, même si les applications sont limitées à de grands producteurs. Les aspects principaux à prendre en compte sont le développement de concepts, les équipements et l'automatisation. La collaboration avec les établissements de l'enseignement supérieur en matière de développement de concepts mériterait d'être améliorée et échoue souvent pour des questions de propriété intellectuelle. La collaboration est aussi possible avec des

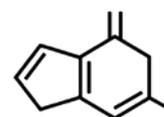
acteurs de niche pour le développement et l'application d'équipements techniques, la commercialisation étant ensuite assurée par le partenaire industriel. Un élargissement des activités devrait avoir des répercussions importantes pour la Suisse car le changement de paradigme naissant ne peut être accéléré que par des innovations supplémentaires. Il en découlerait aussi des opportunités pour les acteurs universitaires et privés de plus petite taille.

## Biologie synthétique

Sven Panke (ETH Zurich)

Quadrant: espoir technologique

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Le terme «biologie synthétique» recouvre habituellement les activités visant à faire de la biotechnologie une «véritable» discipline d'ingénieurs. Il s'agit donc de procédés permettant l'application de systèmes biologiques tels des cellules ou des tissus à des problèmes chimiques, diagnostiques ou médicaux suivant des méthodes d'ingénierie classiques. Ces activités reposent sur l'hypothèse qu'il est ainsi possible d'accélérer considérablement la construction de cellules prototype, d'intégrer aux cellules de nouvelles propriétés plus complexes et d'améliorer fortement les chances de réussite de ces efforts. Ces méthodes incluent par exemple les simulations mathématiques de prototypes biologiques avant leur construction, la standardisation de l'utilisation de composants et de méthodes de mesure biologiques ou la séparation des activités de conception et d'exécution. Ce dernier aspect concerne tout particulièrement la possibilité de synthétiser chimiquement des séquences d'ADN d'une longueur jusqu'à présent inédite (jusqu'à des chromosomes entiers d'organismes unicellulaires). Les bioingénieurs consacrent donc de plus en plus de temps à la planification de prototypes et font exécuter autre part la fastidieuse programmation biologique. Les propriétés biologiques contrôlées, modifiées ou même entièrement créées par les bioingénieurs deviennent effectivement de plus en plus complexes. Il apparaît donc constamment de nouvelles possibilités d'application de la biologie synthétique, en particulier dans les domaines de la production chimique, de la diagnostique, de la médecine et de la pharmacie. Les applications sont multiples: construction de circuits génétiques,

fortes améliorations du diagnostic et de la thérapie de maladies telles la goutte, le diabète et même le cancer, production plus durable de produits chimiques toujours plus complexes ou même approches radicalement novatrices dans des domaines comme la production biologique de matériaux haute performance.

### Implications pour la Suisse

Dans la jeune discipline de la biologie synthétique, la Suisse joue un rôle clé. L'ETH Zurich a établi un haut-lieu de la discipline avec le *Department of Biosystems Science and Engineering* à Bâle, qui bénéficie du maillage avec une puissante industrie pharmaceutique et se situe à la pointe mondiale en matière d'applications et de simulations médicales. D'autres institutions jouent également un rôle de premier plan, ancrées dans la tradition d'excellence de la biotechnologie suisse. Différentes startups ont émergé de la ETH et d'autres institutions. Cependant, même si la Suisse est très bien positionnée en matière de formation et de mise en pratique, elle doit se montrer attentive aux évolutions à venir. Les exigences en matière d'infrastructure évoluent de manière fulgurante et l'espace économique suisse sera probablement bientôt trop petit pour assurer une infrastructure complète. En Europe, seul le Royaume-Uni investit dans la biologie synthétique une énergie comparable à la Suisse. Les pays voisins sont nettement moins avancés dans ce domaine. Les nouveaux développements dans la synthèse de grandes molécules d'ADN – aspect à long terme probablement central pour une réussite durable en matière de biologie synthétique – sont quasiment limités aux États-Unis.

## Robots chirurgicaux

Bradley Nelson (ETH Zurich)

Quadrant: espoir technologique



### État des lieux à l'international et en Suisse

La robotique médicale est un bon exemple de l'implantation croissante de technologies toujours plus avancées dans le domaine de la santé. La combinaison de capacités humaines et de technologies assistées par ordinateur permet d'améliorer la qualité des interventions et des traitements médicaux: l'intelligence artificielle est mise au service du processus diagnostique, les résultats cliniques sont analysés en détail, et il devient possible de mettre à profit des produits médicaux intelligents. Le terme de «robotique médicale» ne couvre pas seulement les interventions chirurgicales mais aussi les thérapies, l'administration de médicaments et la physiothérapie. Le succès commercial le plus remarquable dans ce domaine est le système opératoire Da Vinci de *Intuitive Surgical*. Depuis 2000, plus de trois millions d'interventions chirurgicales ont été réalisées avec ce système et la capitalisation boursière de l'entreprise s'élève entre-temps à environ 60 milliards de USD. De manière générale, le secteur des robots médicaux est connu pour ses marges élevées. Il convient toutefois de garder à l'esprit qu'il n'existe pas d'études randomisées contrôlées démontrant une amélioration des résultats cliniques. Cet état de fait n'a jusqu'à présent pas eu de répercussions négatives. Différents acteurs majeurs du secteur de la santé sont récemment entrés sur le marché, dont *Johnson & Johnson* et *Medtronic*. Les technologies novatrices et complexes qui interagissent directement avec l'environnement physique nécessitent des années voire des décennies pour parvenir à maturité. Dès qu'elles sont établies, elles peuvent cependant faire figure de moteur économique majeur sur le long terme. Leur valeur économique consiste à faire émerger en tant que sous-traitants clé toute une série d'industries de haute précision.

### Implications pour la Suisse

Comme partout ailleurs, en Suisse aussi on revendique des soins de santé de meilleure qualité à moindres coûts. Ces exigences paradoxales se manifestent actuellement entre autres par une diminution du remboursement des coûts pour des interventions courantes; c'est là l'une des motivations principales pour l'appel à des solutions robotiques. Par exemple, au cours des dix dernières années la demande d'injections dans le corps vitré pour traiter les affections de la rétine a fortement augmenté, tandis que le remboursement des coûts a diminué de 630 CHF par injection en 2017 à 150 CHF en 2018. Les chirurgiens ophtalmologues ne sont pas prêts à risquer la qualité des soins et les hôpitaux sont moins motivés à pratiquer la procédure, malgré le fait qu'elle arrête la perte progressive de la vision pour 10% de la population. La solution logique consiste à mettre en place des procédures robotisées permettant à des médecins hautement qualifiés de pratiquer plus d'interventions à qualité égale mais à moindres coûts. Il en va de même pour toute une série d'autres procédures médicales, p.ex. les échographies cardiaques et les ablations par cathéter. Cependant, les obstacles à la robotisation de ces procédures sont élevés tant du point de vue de la recherche que de celui de l'industrie.

La Suisse n'a que tardivement identifié la pleine portée de la robotique médicale, malgré des tendances nettes en termes du nombre d'interventions assistées par robot, de la forte rentabilité du secteur et de la perspective de bénéfices économiques à long terme. La Suisse peut bénéficier tant sur le plan médical que sur le plan économique d'investissements renforcés dans la robotique médicale de la part de l'État et de l'industrie. L'alternative reviendrait à une délocalisation croissante de nos services de santé vers la Silicon Valley et l'Asie.

## Alimentation personnalisée

Erich Windhab (ETH Zurich)

**Quadrant:** espoir technologique

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

L'alimentation personnalisée a pour objectif de répondre aux besoins individuels des consommateurs en termes de préférences, d'acceptation, de nutrition et de santé. Les besoins individuels relatifs à la santé peuvent être déterminés de manière toujours plus détaillée grâce aux progrès dans le décryptage individuel du patrimoine génétique avec identification de certains risques ou intolérances, aux possibilités d'auto-surveillance par outils de diagnostic à domicile (p.ex. les technologies portables ou wearables permettant de procéder à des mesures physiologiques), au décryptage attendu de la composition de la flore intestinale et aux nouvelles connaissances concernant l'axe de signalisation intestin-cerveau. Cependant, la fabrication industrielle aura du mal à répondre à cette différenciation. Dans la filière alimentaire, on assistera donc à une personnalisation plus poussée à proximité immédiate de la préparation et de la consommation des aliments (cuisines, restauration collective, restaurants). La tendance technologique est donc au développement de processus et d'ustensiles culinaires mettant l'accent sur les possibilités de «co-création»: la production industrielle prépare des composants de base modulaires que les consommateurs accommodent ou combinent à titre individuel et à leur convenance. Il en découle de nouvelles exigences en termes de coordination des technologies alimentaires et culinaires («cuisine du futur») et en termes de formats d'emballage, de stockage et de vente.

### Implications pour la Suisse

La Suisse compte un grand nombre d'entreprises tout au long de la filière alimentaire industrielle. À ceci s'ajoutent des consommateurs faisant preuve d'une préférence marquée pour la qualité et l'individualité, et prêts à en payer le prix. Les conditions cadre sont donc réunies pour accéder à un rôle de pionnier industriel dans les cinq années à venir.

## Diagnostique point-of-care

**Daniel Gygax** (FHNW)

**Quadrant:** technologie de niche

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Les dispositifs diagnostiques in vitro sont des produits médicaux utilisés pour le diagnostic de maladies et le suivi de mesures thérapeutiques dans les laboratoires centraux des hôpitaux ou dans les laboratoires privés spécialisés. Ces analyses portent sur des biomolécules comme les protéines et les lipides, des cellules humaines et des microorganismes. Les échantillons soumis à analyse sont prélevés à partir du sang, de la salive, des urines ou d'autres matériaux biologiques. Cette forme de collecte de données diagnostiques est hautement professionnalisée et livre des données de très haute qualité. L'inconvénient est que les patients doivent se trouver à l'hôpital ou chez le médecin pour procéder au prélèvement.

La diagnostique point-of-care (diagnostique POC) est une branche de la diagnostique in vitro. Elle a pour objectif de rapprocher la réalisation d'un test du patient. L'application la plus connue est la surveillance et le traitement de la glycémie chez les personnes souffrant de diabète. L'auto-surveillance ou les auto-tests requièrent un dispositif de test simple et robuste qui sera associé à l'avenir à des services de santé mobiles (mHealth, télémédecine). L'avantage principal est le gain de temps entre la réalisation du test et le lancement de mesures thérapeutiques: à l'avenir, les tests pourront être réalisés dans les pharmacies, par les organismes de soins à domicile et dans les maisons de retraite et de santé. Cela suppose que le dispositif s'inscrive dans un concept global de mHealth. Du point de vue technique, un appareil de mesure se compose principalement de trois modules différents: biocapteur, convertisseur de signal et processeur de signal. L'objectif est de représenter les données sous forme facilement lisible par l'utilisateur. Les appareils actuels permettent déjà de représenter les données

dans le temps sous forme tabulaire ou graphique. Les écarts par rapport aux valeurs cible sont faciles à identifier. Ces données mises en forme peuvent être transmises directement pour interprétation au médecin traitant, à la clinique, à des *eedoctors* ou à d'autres prestataires télémédicaux comme *Medgate*. Outre ces aspects purement techniques, le développement d'un dispositif diagnostique POC doit tenir compte des aspects suivants: identification de prédispositions génétiques à certaines maladies, diagnostic et surveillance de maladies et de leur évolution, maniabilité des appareils pour les patients, et coûts.

### Implications pour la Suisse

En 2016, environ 430'000 personnes travaillaient dans le secteur de la santé ou dans l'industrie pharmaceutique, soit un employé sur douze. L'industrie pharmaceutique-diagnostique appartient aux secteurs à forte innovation et création de valeur. La part des exportations est supérieure à 40%. Outre *Roche*, fournisseur global de dispositifs diagnostiques, il existe en Suisse un grand nombre de PME proposant des appareils, des solutions informatiques, des services de médecine de laboratoire ou des réactifs. Dans le cadre de la transformation numérique et en association avec une approche mHealth, la diagnostique POC a la possibilité d'assurer une surveillance pleinement mobile de l'état de santé des patients, augmentant leur autonomie et leur responsabilité ainsi que l'efficacité et la productivité des traitements. Pour la Suisse, la fabrication de produits intégrés basée sur des compétences interdisciplinaires (construction d'appareils, technologies de l'information, sciences de la vie, psychologie appliquée, formation, commercialisation et distribution) représente une chance de faire face à la concurrence globale en proposant de nouvelles modalités de traitement.

## Bio-impression 3D: imprimer des organes

Michael Raghunath (ZHAW)

Quadrant: espoir technologique

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Dans le domaine de l'ingénierie tissulaire, la bio-impression 3D – la fabrication additive de tissus et d'organes – s'est établie comme une technologie d'avenir prometteuse. La bio-impression 3D se distingue de la simple impression de biomatériaux: des cellules vivantes sont soit déposées de manière ciblée sur des structures imprimées, soit imprimées sur un support dans un biomatériau dit «bio-encre» suivant un agencement spatial précis. Il est ainsi possible de construire des tissus artificiels couche par couche, livrant donc un résultat plus complexe que la production de tissus au moyen de procédés standard – ensemencement non orienté de cellules sur un matériau support. Les modèles tissulaires plus complexes reproduisent mieux l'activité physiologique des tissus humains. Cet aspect revêt une importance croissante pour l'industrie pharmaceutique, lui permettant d'améliorer les tests prédictifs *in vitro* et de réduire les expérimentations animales. Dans l'UE, les expérimentations animales pour tester les cosmétiques et leurs ingrédients sont désormais interdites. Les tissus cutanés et oculaires artificiels biologiquement pertinents revêtent ici une grande importance. En médecine régénérative, la bio-impression 3D permet d'intégrer aux constructions de tissus des structures vasculaires, chose auparavant impossible.

### Implications pour la Suisse

La Suisse est bien positionnée dans tous les domaines pouvant bénéficier de la bio-impression 3D, notamment l'industrie pharmaceutique et cosmétique ainsi que la médecine clinique. Le pays compte aussi de nombreuses entreprises actives dans des domaines pertinents pour la bio-impression 3D: automatisation (électronique, logiciels de contrôle), pièces mécaniques (buses d'impression, valves, bras robotisés) et culture cellulaire (milieux, plastique). La Suisse peut se maintenir à l'international si elle promeut l'intégration de la technologie dans des processus industriels et médicaux existants et si elle favorise le maillage des partenaires industriels et scientifiques concernés. Des pays asiatiques comme la Corée ou Singapour ont déjà élaboré des stratégies nationales dans ce domaine. Aux États-Unis, le partenariat public-privé *BioFabUSA*, doté de 300 millions de USD, poursuit depuis 2016 l'objectif d'encourager des projets dans le domaine de la fabrication bio-additive. La Suisse dispose avec *regenHU* d'un leader mondial de la bio-impression mais elle ne possède actuellement pas de stratégie nationale visant un leadership technologique global. Les dispositifs d'encouragement existants pour la fabrication additive excluent le domaine de la biofabrication/fabrication bio-additive avec des cellules vivantes. Afin de maintenir la compétitivité à l'international, il faut mettre en place à l'échelle nationale des programmes et des initiatives de recherche au niveau de la recherche fondamentale fortement axée sur l'application.

## Culture de masse de cellules souches

**Gerrit Hagens** (HES-SO Valais-Wallis)

**Quadrant:** technologie de niche

---



### État des lieux à l'international et en Suisse

Avec les avancées en matière de transplantation d'organes et de tissus, la pénurie d'organes et la demande croissante de donneurs sont devenues et demeurent des obstacles importants. La recherche scientifique a donc commencé à développer des alternatives, proposant des thérapies à base de cellules souches humaines (human stem cells HSC). Il est aujourd'hui généralement admis que l'utilisation de cellules souches humaines est hautement prometteuse pour les applications biotechnologiques, pharmaceutiques et médicales comme la thérapie cellulaire, l'ingénierie tissulaire ou la médecine régénérative. Les cellules souches humaines peuvent s'auto-renouveler et générer des cellules spécialisées par différenciation. Elles sont définies par leur origine et leur capacité de différenciation: les cellules souches pluripotentes (PSC) sont capables d'un auto-renouvellement illimité et d'une différenciation en n'importe lequel des plus de 200 types cellulaires du corps. Il existe deux sources de PSC: les cellules souches embryonnaires (ESC) et les cellules souches pluripotentes induites (iPSC). Il existe aussi des cellules souches multipotentes, isolées à partir de sources comme des cellules souches mésenchymateuses; contrairement aux PSC, leur différenciation est limitée à un certain nombre de types de cellules. Au vu de leurs multiples applications R&D et industrielles, il est évident que la demande de cellules souches ne cesse de croître. De nombreux efforts sont entrepris pour cultiver des cellules souches à grande échelle et les différencier de manière efficiente et homogène en types de cellules souhaités. La plupart des laboratoires multiplie les cellules souches sur des surfaces planes en culture bidimensionnelle, dite monocouche. La production de grands nombres de cellules passe par la multiplication des boîtes de culture, méthode très fastidieuse, coûteuse et laborieuse.

### Implications pour la Suisse

Le grand défi pour les producteurs de cellules souches consiste à développer des processus de production à grande échelle conformes à la loi et économiques. Ces processus nécessitent des systèmes de production automatisés, contrôlés et évolutifs. La tendance s'éloigne actuellement des systèmes de culture bidimensionnels et tend vers des systèmes de culture en suspension (cultures 3D) dans des bioréacteurs à usage unique sous conditions contrôlées. Ces systèmes sont la condition de base pour des thérapies par cellules souches à prix abordables et ils nécessitent une collaboration entre chercheurs biomédicaux et ingénieurs. Le marché global des cellules souches grandit et devrait atteindre 5 à 10 milliards de USD d'ici 2022. Mais la production de cellules souches à grande échelle n'en est qu'à ses débuts. En Suisse, les organismes de recherche publics et privés forment des chercheurs et des ingénieurs de premier plan. La Suisse est donc bien positionnée pour jouer un rôle important dans le développement des processus de production souhaités en bioréacteurs.

**Abréviations**

BFH	Haute école spécialisée bernoise
CSEM	Centre suisse d'électronique et de microtechnique
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz
HES-SO	Haute école spécialisée de Suisse occidentale
PSI	Paul Scherrer Institut
ZHAW	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften



**satw** it's all about  
technology

Académie suisse des sciences techniques SATW  
St. Annagasse 18 | 8001 Zurich | 044 226 50 11 | [info@satw.ch](mailto:info@satw.ch) | [www.satw.ch](http://www.satw.ch)