
Technology Outlook 2021

Version française

Impressum

Auteur·e·s

Thomas Anken, Christian Bach, Christophe Ballif, Fritz Bircher, Bernhard Braunecker, Rebecca Buller, Urs Burckhardt, Max Erick Busse-Grawitz, Vicente Carabias, Andreas Conzelmann, Alessandro Curioni, Reinhard Czichy, Patricia Deflorin, Gregor Dürrenberger, Xaver Edelmann, Regine Eibl, Andreas Fuhrer, René Gälli, Bernhard Gerster, André Golliez, Christian Grasser, Pierangelo Gröning, Daniel Gygax, Manfred Heuberger, Alessandra Hool, Hans-Peter Käser, Walter Karlen, Steffen Kelch, Christoph Kolano, Agathe Koller, Jens Krauss, Wolfgang Kröger, Thomas KÜchler, Roland KÜpfer, Andreas Kunz, Christian Laux, Daniel Liebhart, Katharina Link, Urs Mäder, Roger Marti, Hans-Peter Meyer, Bradley Nelson, Kristina Orehounig, Andrew Paice, Sven Panke, Greta Patzke, Adrian Perrig, Guido Piai, Thomas Puschmann, Michael Raghunath, Jörg Roth, Mark Rubin, Patrick Ruch, Christian Schaffner, Stefan Scheidegger, Daniel Schmid, Philipp Schmid, Thomas Justus Schmidt, Roland Siegwart, Lars Sommerhäuser, Adriaan Spierings, Thilo Stöferle, Bernhard Tellenbach, Anna Valente, Ilona Wettstein, Nicole Wettstein, Erich Windhab, Felix Wortmann, Tomas de Wouters, Shancong Yu, Manfred Zinn

Steering (Conseil scientifique de la SATW)

Hans Altherr, Walter J. Ammann, Bernhard Braunecker, Ulrich Claessen, Djordje Filipovic, Robert Frigg, Rolf Hügli, René Hüsler, Agathe Koller, Urs Mäder, Hans-Peter Meyer, Peter Seitz, Ulrich W. Suter, Alessandro Tschabold

Direction du projet

Claudia Schärer

Rédaction

Beatrice Huber, Esther Lombardini

Review

Tony Kaiser

Traduction

Maud Capelle (français) et Tanya Loringett (anglais)

Graphisme

Andy Braun

Photos

Adobe Stock

Avril 2021

Sommaire

Avant-propos	4
Introduction	5
Tendances européennes et comparaison avec la Suisse	6
Au fil du temps	7
Comparaison Suisse-Europe	10
Comparaison entre pays	11
Importance des technologies pour la Suisse	14
Quatre domaines de recherche	17
Technologies nouvellement recensées dans cette édition	18
Comment les technologies ont-elles évolué depuis la dernière édition?	19
Résumé	21
Méthode	22
Sélection des technologies	23
Analyse des réseaux sociaux	24
Importance des technologies pour la Suisse	25
Transposition dans le diagramme à quadrants	27
Technologies et domaines d'application	28
Le monde numérique	30
Énergie et environnement	50
Procédés de fabrication et matériaux	62
Sciences de la vie	70
Technologie et société	82
Tendances technologiques	86
Introduction	88
Le monde numérique	89
Énergie et environnement	96
Procédés de fabrication et matériaux	102
Sciences de la vie	104

Avant-propos

Ces dernières décennies, le monde est devenu plus riche et – gâté par les performances toujours croissantes de l'industrie – plus exigeant. Il est devenu totalement normal d'obtenir (et d'exiger) des entreprises de production des résultats chaque année meilleurs. Les acteurs·rices du marché se rendent bien compte qu'une croissance exponentielle n'est pas possible sur la durée, mais restent convaincu·e·s qu'une combinaison habile de produits aboutis, de présence commerciale forte et de nouveautés astucieuses devrait leur permettre de faire figure d'exception. Reste à savoir comment ces nouveautés peuvent être reconnues, comprises et mises à profit. Dans le monde entier, des «Technology Outlooks» ont donc été développés en tant qu'outils d'orientation très appréciés.

La SATW a publié son premier *Technology Outlook* il y a six ans. Cette version initiale était bien entendu d'envergure assez restreinte, mais les ingénieur·e·s et les chercheurs·ses suisses lui avaient réservé un accueil encourageant, et les contenus des éditions suivantes ont été progressivement enrichis. Avec cette quatrième édition, vous tenez en main un produit «abouti»; il prend appui sur ses prédécesseurs et a été étoffé de nouvelles perspectives.

La dominance du monde numérique apparaissait déjà dans l'édition 2019. Elle est encore plus marquée cette année.

Les articles consacrés aux technologies et aux domaines d'application sont – comme l'indique leur titre – axés sur l'application pratique, industrielle et commerciale: il s'agit d'applications 5G, de l'analyse de big data, de robotique collaborative, d'informatique quantique et de nombreux autres domaines. Les articles consacrés aux tendances technologiques préparent les lectrices et les lecteurs à des discussions plus vastes, avec des thématiques larges comme les systèmes autonomes, la cybersécurité, l'agriculture numérique et bien entendu l'omniprésente intelligence artificielle et les technologies quantiques.

Le rapport commence cette année avec une analyse comparative internationale (tendances européennes et comparaison avec la Suisse). Les données collectées avec soin pour plusieurs années permettent pour la première fois de mettre en évidence l'évolution dans le temps des forces et des faiblesses de différents pays.

Au nom du Conseil scientifique, je vous souhaite une lecture stimulante. Nous espérons que ce *Technology Outlook 2021* pourra vous être précieux.



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

Introduction

L'identification, la description et l'évaluation de technologies qui s'avéreront importantes pour l'économie et la société suisses dans les années à venir¹ appartiennent à la mission d'identification précoce de la SATW. Ces activités donnent lieu tous les deux ans à la publication du *Technology Outlook*, qui paraît en 2021 pour la quatrième fois déjà.

Le *Technology Outlook 2021* s'inscrit dans la continuité de l'édition 2019. Les technologies qui y étaient recensées ont été réévaluées quant à leur maturité technologique. Celles qui présentent un horizon de moins de trois ans jusqu'à leur maturité commerciale, comme par exemple les procédés de fabrication en continu, ont été écartées. En collaboration avec les deux organes d'identification précoce de la SATW, nous avons identifié 12 nouvelles technologies qui joueront un rôle important pour la Suisse et qui correspondent à l'horizon visé d'au moins trois ans jusqu'à maturité commerciale. Il s'agit entre autres de la photosynthèse artificielle, du microbiote et microbiome et des robots mobiles. Deux articles traitent par ailleurs d'aspects plus généraux de la numérisation: l'utilisation autodéterminée de données personnelles et la confiance dans les produits et les services numériques. Au total, le *Technology Outlook 2021* présente 45 technologies et domaines d'application.

Des pictogrammes ont été définis pour chacune des technologies. Une vue d'ensemble de ces pictogrammes est positionnée dans le rabat latéral en fin de publication.

Pour cette édition, la SATW a une fois de plus recueilli des informations quantitatives concernant les différentes technologies et compilé une mise à jour du diagramme à quadrants «portée économique des technologies pour la Suisse / compétences de recherche disponibles en Suisse». Pour la première fois, il devient ainsi possible d'identifier certaines tendances. La portée économique de certaines

technologies a-t-elle augmenté? Les compétences de recherche en Suisse se sont-elles développées pour certaines applications? Certaines technologies sont-elles en perte de vitesse? Grâce à la poursuite d'une collecte continue de données sur les réseaux sociaux, il devient également pour la première fois possible de procéder à une analyse des tendances au niveau international.

Les technologies présentées dans le *Technology Outlook* interagissent et permettent ainsi la mise en œuvre de tendances technologiques plus larges. La présente édition du *Technology Outlook* est donc enrichie d'une nouveauté: elle présente 13 tendances technologiques fortement médiatisées, parmi elles des thèmes transversaux comme l'économie circulaire, l'intelligence artificielle ou les villes intelligentes. Le *Technology Outlook* explique ces thématiques, sonde leur potentiel pour l'économie et la société suisses, et établit un lien direct avec les technologies individuelles. Il apparaît ainsi quelles technologies sont motrices pour l'évolution d'une tendance ou, à l'inverse, quelles technologies bénéficient de la progression d'une tendance.

La publication s'ouvre sur une perspective large avec une comparaison internationale des technologies et se concentre ensuite sur l'importance des différentes technologies pour la Suisse. Dans le chapitre final «Tendances technologiques», le rapport revient à une vue d'ensemble plus large.

Dr Claudia Schärer, directrice de projet du *Technology Outlook*, remercie les nombreux·ses auteur·e·s: sans leur engagement, leur patience et leur expertise, il aurait été impossible de mener à bien une publication d'une telle envergure et profondeur. Quant à vous, chers·ères lecteurs·rices, nous vous souhaitons une excellente lecture, dont nous espérons qu'elle s'avérera enrichissante. Vos retours et réactions sont toujours les bienvenus!

¹ Technology Readiness Level 4–7, maturité commerciale dans 3–5 ans. Plus de détails au chapitre «Méthode» à partir de la page 22.

Tendances européennes et comparaison avec la Suisse

Au fil du temps

Tandis que le *Technology Outlook 2019* ne pouvait présenter les résultats de sa comparaison internationale des technologies que sous forme d'instantané pour l'année 2018, il est aujourd'hui possible de procéder à une analyse des tendances. Quelles technologies sont à la tête des classements en Europe? Quelles sont les technologies qui «montent» depuis 2018? Lesquelles sont plutôt en perte de vitesse?

Depuis trois ans maintenant, la SATW suit les discussions sur les comptes officiels de 1300 établissements européens de l'enseignement supérieur sur les réseaux sociaux. Twitter est le canal le plus utilisé. À l'aide de l'outil de recherche LinkAlong (<https://linkalong.com>), nous inventorions et analysons les comptes Twitter officiels des établissements européens de l'enseignement supérieur par mots-clés. Nous avons délibérément concentré nos efforts sur les canaux de communication officiels des établissements afin de nous assurer que nos données proviennent principalement de sources possédant une pertinence et une crédibilité élevées.

Notre analyse des tendances européennes porte sur les données de sept pays. Il s'agit des pays voisins de la Suisse – l'Allemagne, la France, l'Italie et l'Autriche – et de trois pays pertinents pour la Suisse à titre de comparaison – le Royaume-Uni, les Pays-Bas et la Suède. Les données concernant la Suisse sont présentées séparément et ne sont donc pas comprises dans les données concernant les pays européens. Par rapport au *Technology Outlook 2019*, les mots-clés et les termes de recherche ont été revus et toutes les données pour les années 2018, 2019 et 2020 ont été nouvellement collectées et analysées. Les résultats de la publication actuelle ne peuvent donc pas être comparés directement à ceux de l'édition 2019, mais ils sont cohérents. En raison de la crise du coronavirus, les données de l'année 2020 sont à interpréter avec une certaine précaution, car le nombre de posts concernant les technologies du *Technology Outlook* a reculé en 2020.

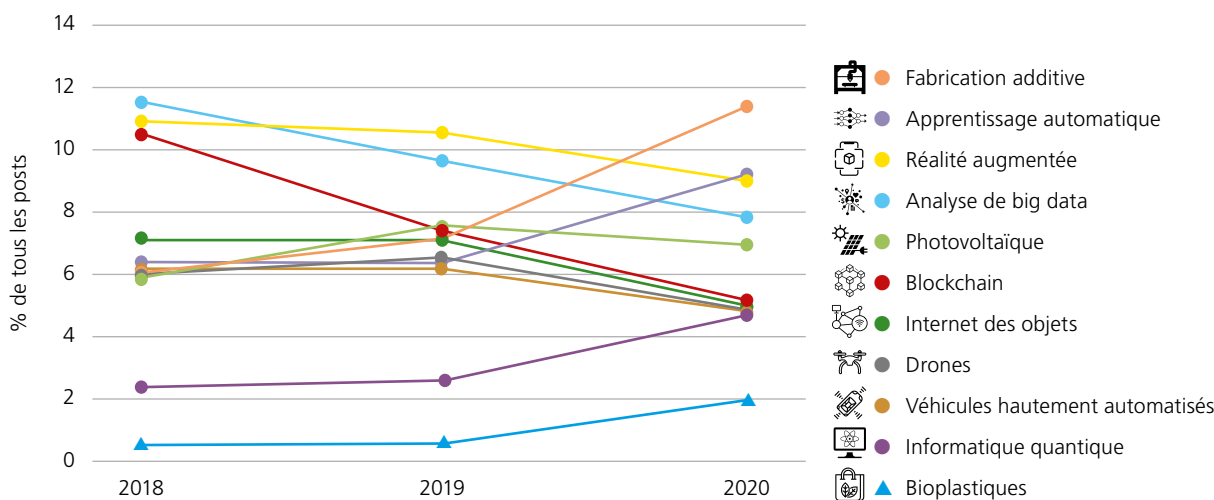
Le graphique 1 (page 8) montre comment a évolué la discussion du top 10 des technologies en Europe entre 2018 et 2020. Le graphique montre également le développement des bioplastiques, technologie qui a enregistré la plus forte progression du nombre de posts entre 2018 et 2020 en dehors du top 10.

Le top 10 contient un nombre frappant de technologies issues du domaine de recherche «monde numérique». Seules deux technologies, la fabrication additive et le photovoltaïque, sont issues d'autres domaines de recherche. D'une part, cela montre que les technologies numériques sont des thèmes jouissant d'une visibilité particulière. D'autre part, les technologies numériques recensées sont des technologies dites habilitantes («enabling technology»), du développement desquelles bénéficient de nombreux champs d'application.

En 2018, l'analyse de big data, la réalité augmentée et la blockchain dominaient les discussions universitaires; entre-temps, l'intensité de ces discussions sur les comptes de réseaux sociaux des établissements européens de l'enseignement supérieur a légèrement diminué. En 2020, c'est la fabrication additive qui a réuni le plus d'attention. Le pourcentage de posts se rapportant à la fabrication additive a presque doublé ces trois dernières années. En 2020, les posts concernaient principalement les masques de protection, les parois de protection en plexiglas et les ventilateurs, qui peuvent tous être fabriqués avec une imprimante 3D. De toute évidence, les établissements de l'enseignement supérieur saisissent eux aussi la possibilité de se présenter en phase avec l'actualité. →

Scannez le code QR pour consulter notre site web, qui propose des informations supplémentaires concernant les tendances européennes.



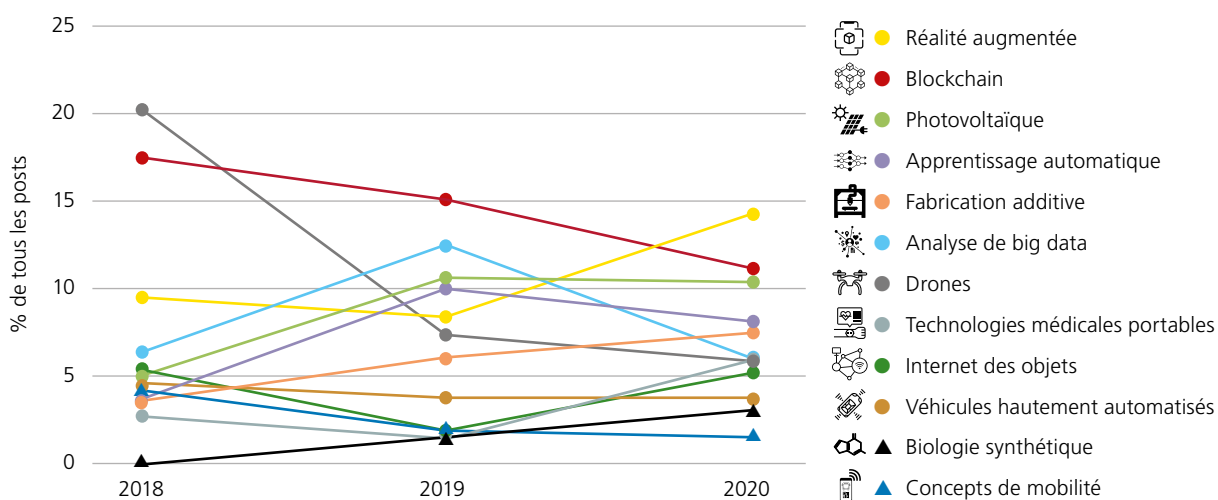


Graphique 1: Analyse des tendances 2018–2020 pour le top 10 des technologies dans les autres pays européens

Le graphique montre comment ont évolué les fréquences relatives des posts concernant les dix technologies les plus discutées en 2018, 2019 et 2020. Les moyennes des sept autres pays européens apparaissent en pourcentage du nombre total de posts concernant l'ensemble des technologies du *Technology Outlook 2021*. Outre le top 10 des technologies (cercles), le graphique inclut également les bioplastiques (triangles), technologie qui a enregistré la plus forte progression du nombre de posts ces trois dernières années en dehors du top 10.

Les thèmes de la blockchain et des véhicules hautement automatisés ont perdu en attention dans le discours universitaire européen. En revanche, on constate une forte augmentation des tweets consacrés aux bioplastiques. Cela pourrait être le reflet des efforts accrus de l'UE de réduire l'utilisation de plastiques à usage unique et d'encourager l'utilisation de biopolymères naturels.²

Il est intéressant de comparer ces résultats avec ceux de la Suisse. Le graphique 2 montre les tendances des années 2018 à 2020 pour le top 10 des technologies en Suisse. Tout comme le graphique 1, il inclut aussi des technologies n'appartenant pas au top 10 mais présentant des tendances fortes: la biologie synthétique avec la plus forte progression et les concepts de mobilité avec la plus forte baisse du nombre de posts.



Graphique 2: Analyse des tendances 2018–2020 pour le top 10 des technologies en Suisse

Le graphique indique pour les années 2018, 2019 et 2020 les fréquences relatives des posts concernant les différentes technologies en pourcentage du nombre total de posts concernant l'ensemble des technologies du *Technology Outlook 2021*. Outre le top 10 des technologies (cercles), le graphique inclut également la biologie synthétique avec la plus forte hausse et les concepts de mobilité avec la plus forte baisse du nombre de posts (triangles) en dehors du top 10.

On constate un glissement par rapport à 2018. Les concepts de mobilité attirent une attention moindre en Suisse et ont disparu du top 10. Ce déclin ne concerne pas seulement la discussion universitaire mais aussi l'importance de la technologie pour la Suisse, comme le montre la baisse du chiffre d'affaires constatée par les expert-e-s (voir graphique 5 au chapitre suivant, pages 14 et 15). Cette évolution s'explique par l'échec d'initiatives nationales. Les technologies médicales portables figurent nouvellement dans le top 10. Presque la moitié des posts en 2020 les concernant traite d'applications de traçage sanitaire. La biologie synthétique affiche une progression nette et constante des posts, qui correspond à l'estimation par les expert-e-s d'un potentiel commercial en hausse.

En 2020, ce sont la réalité augmentée, la blockchain et le photovoltaïque qui dominaient la discussion universitaire sur les réseaux sociaux en Suisse. Si le photovoltaïque a affiché une progression continue ces dernières années, la réalité augmentée s'est à nouveau renforcée après un léger déclin en 2019. Les posts couvrent surtout des applications dans la médecine, l'éducation et l'art; les applications industrielles en sont presque entièrement absentes. Les posts consacrés au photovoltaïque sont thématiquement très divers et couvrent entre autres de nouveaux développements de matériaux, de nouveaux domaines d'utilisation et des aspects écologiques. La Suisse, grâce également à ses nombreux groupes de recherche universitaires et industriels, semble bien équipée pour établir une position solide dans des marchés de niche.

En Suisse aussi, l'intensité des discussions concernant la fabrication additive a augmenté. La progression du pourcentage de posts consacrés à la fabrication additive est cependant moins marquée en Suisse que dans les autres pays européens. Comparés aux autres pays européens, les posts des établissements de l'enseignement supérieur suisses présentent une orientation plus fortement industrielle et ne discutent pas quasiment exclusivement d'applications liées à la crise du coronavirus.

Même si le thème de la blockchain fait encore l'objet de discussions nettement plus intenses en Suisse que dans la moyenne des autres pays européens, le pourcentage de posts a connu un fort recul depuis 2018. On semble assister à un certain désenchantement. Il est intéressant de noter que les posts concernant la blockchain sont entretemps souvent rédigés par des économistes et des juristes. Les drones ont fortement perdu en importance dans le discours universitaire suisse et ont chuté cette année à la place 7. Cela s'explique par le transfert croissant des développements technologiques vers les spin-offs et les start-ups fondés par les diplômé-e-s des établissements de l'enseignement supérieur³, un changement générationnel dans les rangs des établissements suisses de pointe et leur orientation croissante vers des robots marcheurs.

² *Welcome to European Bioplastics*. Consulté le 26 février 2021 sur <https://www.european-bioplastics.org/>

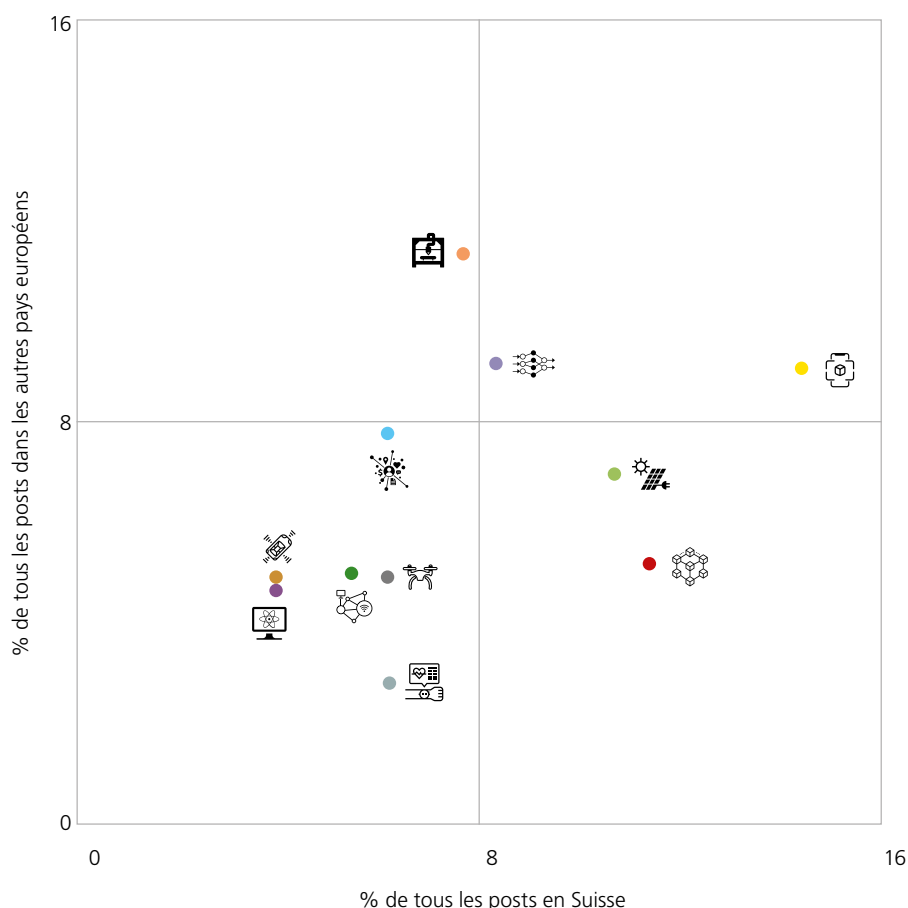
³ L'analyse n'inclut pas les posts des spin-offs et des start-ups.

Comparaison Suisse-Europe

Les différences entre la Suisse et l'Europe peuvent être visualisées graphiquement. Le graphique 3 compare les fréquences relatives des posts d'établissements de l'enseignement supérieur en Suisse (axe horizontal) aux fréquences relatives des posts d'établissements de l'enseignement supérieur dans les sept autres pays européens (axe vertical).

Le graphique peut être subdivisé en quatre quadrants. Dans le quadrant en haut à droite se trouvent les technologies discutées avec grande intensité sur les comptes de réseaux sociaux des établissements de l'enseignement supérieur aussi bien en Suisse qu'en Europe. Seuls la réalité augmentée et l'apprentissage automatique appartiennent à cette catégorie. Le photovoltaïque et plus particulièrement la blockchain, positionnés dans le quadrant en bas à

droite, sont discutés avec nettement plus d'intensité dans les milieux universitaires en Suisse qu'en Europe, ce qui correspond bien au classement de ces deux technologies parmi le top 3 suisse mais non européen. En revanche la fabrication additive, seule technologie positionnée dans le quadrant en haut à gauche, est plus souvent discutée en Europe qu'en Suisse. Dans le quadrant en bas à gauche se situent les technologies du top 10 présentant la plus faible intensité de discussion tant en Suisse qu'en Europe. Des différences apparaissent néanmoins: les technologies médicales portables, qui font l'objet d'une attention croissante en Suisse, sont nettement moins mentionnées sur les comptes de réseaux sociaux des établissements de l'enseignement supérieur en Europe. Une opportunité pour la Suisse?



Graphique 3: Comparaison de la fréquence relative de posts concernant les technologies des top 10 suisse et européen en Suisse et en Europe en 2020

L'axe horizontal présente pour 2020 les fréquences relatives en Suisse de posts concernant les différentes technologies en pourcentage du nombre total de posts consacrés à l'ensemble des technologies du *Technology Outlook 2021*. L'axe vertical présente les moyennes de pourcentages pour les sept autres pays européens. Une vue d'ensemble des pictogrammes est disponible dans le rabat latéral en fin de publication.

Comparaison entre pays

La ventilation des données pour les autres pays européens et leur comparaison au niveau des pays individuels est instructive. Le graphique 4 (pages 12 et 13) montre les mentions des technologies du top 5 et de la somme des autres technologies sur les réseaux sociaux pour la Suisse et six des sept autres pays sélectionnés pour l'année 2020. Les données ne sont pas détaillées pour la Suède car le nombre de posts était nettement moindre en 2020 par rapport aux années précédentes, ne permettant donc pas de conclusions fondées.

Au total, les top 5 technologiques des sept pays étudiés contiennent 13 technologies différentes. Les posts concernant les technologies du top 5 constituent partout environ 50% de tous les posts. Au Royaume-Uni, la fabrication additive domine et cumule 23% de tous les posts; les technologies qui se partagent la deuxième place, la réalité augmentée et les drones, parviennent chacune à tout juste 8%. Dans les autres pays, la diminution de la fréquence relative est plutôt graduelle. Les diagrammes circulaires montrent l'importance de la réalité augmentée et de l'apprentissage automatique. Les deux technologies figurent dans le top 5 de tous les pays sauf les Pays-Bas (il manque la réalité augmentée) et le Royaume-Uni (il manque l'apprentissage automatique). La fabrication additive appartient également au top 5 de tous les pays sauf l'Italie et les Pays-Bas.

Il est intéressant d'analyser plus précisément certaines particularités propres aux différents pays. Le photovoltaïque occupe la première place aux Pays-Bas et fait aussi l'objet de mentions très fréquentes en Suisse. Un nombre très élevé de ces posts en Suisse proviennent de l'EPFL, dont les activités de recherche en photovoltaïque se situent à la pointe mondiale. Les posts de chercheurs-ses aux Pays-Bas se rapportent entre autres à la mise en place d'installations photovoltaïques flottantes car la surface disponible pour des panneaux solaires y est très limitée.

Les véhicules hautement automatisés ne figurent dans le top 5 qu'en Allemagne et aux Pays-Bas. Ce résultat ne surprend pas en ce qui concerne l'Allemagne; l'industrie automobile y est un secteur économique majeur⁴. L'importance que revêt la technologie sur les comptes de réseaux sociaux des établissements néerlandais de l'enseignement supérieur n'est surprenante qu'à première vue. Le *Autonomous Vehicles Readiness Index* établi par KPMG pour 2019 place les Pays-Bas en tête – bien devant l'Allemagne⁵. L'étude constate qu'en comparaison internationale les Pays-Bas et Singapour offrent les meilleures conditions pour la conduite automatisée, entre autres en ce qui concerne l'infrastructure et l'acceptation par la population. Les posts des établissements néerlandais de l'enseignement supérieur discutent ainsi majoritairement de l'interaction entre véhicules autonomes et personnes ou autres usagers de la route.

On constate aux Pays-Bas et en Autriche une part élevée de posts concernant l'informatique quantique. Les établissements néerlandais de l'enseignement supérieur, la TU Eindhoven en tête, traitent de développements de matériaux comme de l'éventuelle mise en danger de la sécurité des données par les ordinateurs quantiques. En Autriche, ce sont principalement les universités d'Innsbruck, de Linz et de Vienne qui discutent des ordinateurs quantiques, couvrant des aspects divers allant d'avancées technologiques à des explications à visée de vulgarisation scientifique.

En Autriche, les posts consacrés à la thématique de la blockchain dominant la discussion universitaire. Celle-ci est menée par plusieurs universités et couvre un large éventail de sujets: avancées dans la recherche et progrès dans les applications industrielles et commerciales, mais aussi culturelles.

On note aussi l'intensité élevée des discussions portant sur le thème des drones sur les comptes de réseaux sociaux des établissements britanniques de l'enseignement supérieur.

⁴ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie – Automobilindustrie. Consulté le 26 février 2021 sur <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-automobilindustrie.html>

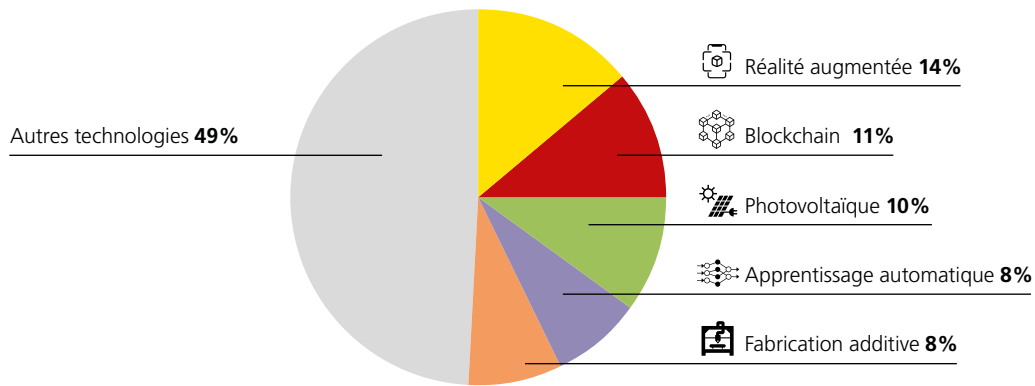
⁵ KPMG International (2019). 2019 Autonomous Vehicles Readiness Index. Consulté le 26 février 2021 sur <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2019/02/2019-autonomous-vehicles-readiness-index.pdf>

L'analyse des contenus des posts révèle un lien intéressant. Les chercheurs-ses britanniques y discutent des utilisations possibles de drones dans la lutte contre la pandémie du coronavirus, par exemple la surveillance du confinement ou la désinfection de grandes surfaces publiques par voie aérienne.

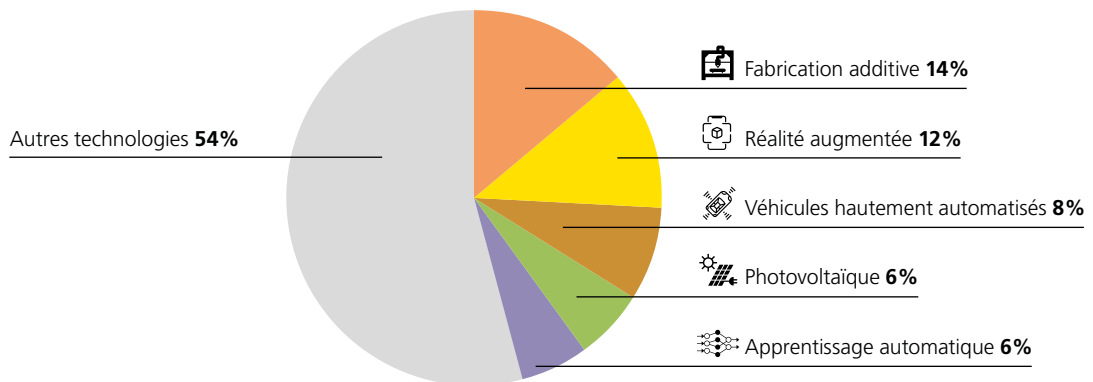
Les données livrent un aperçu des préoccupations actuelles: quelles technologies sont discutées dans quels

pays avec quel degré d'intensité? Même si les données ne permettent pas de conclusions directes quant à la portée économique d'une technologie, elles donnent des indications sur les activités de recherche des différents établissements de l'enseignement supérieur et leurs priorités thématiques. La recherche scientifique universitaire est à la base de développements industriels aboutis et profitables, et donc de la portée économique d'une technologie.

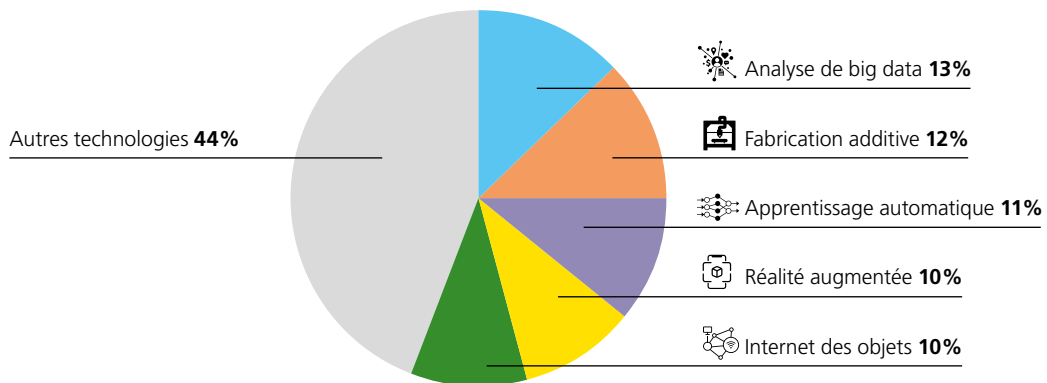
Suisse



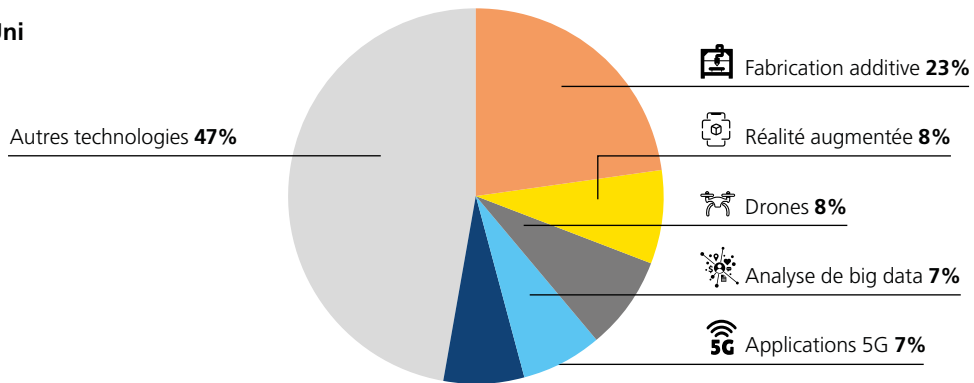
Allemagne



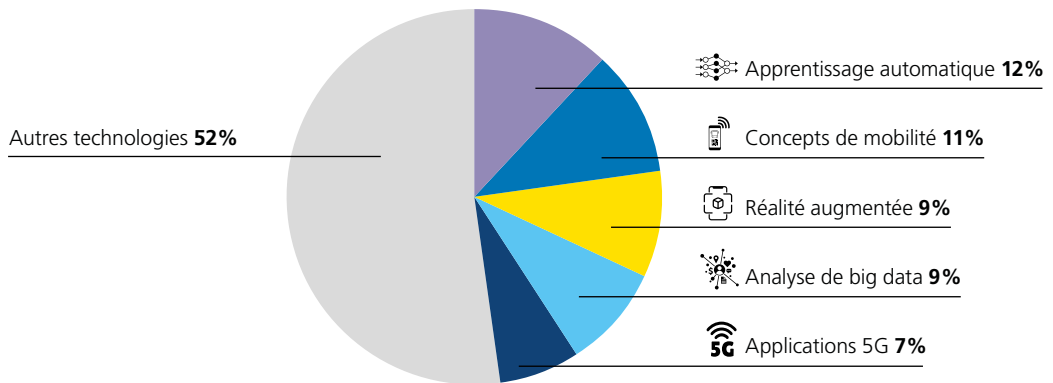
France



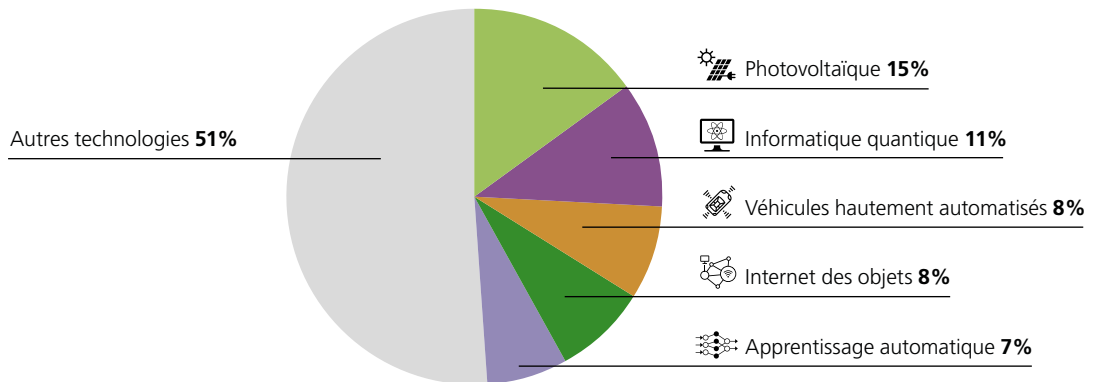
Royaume-Uni



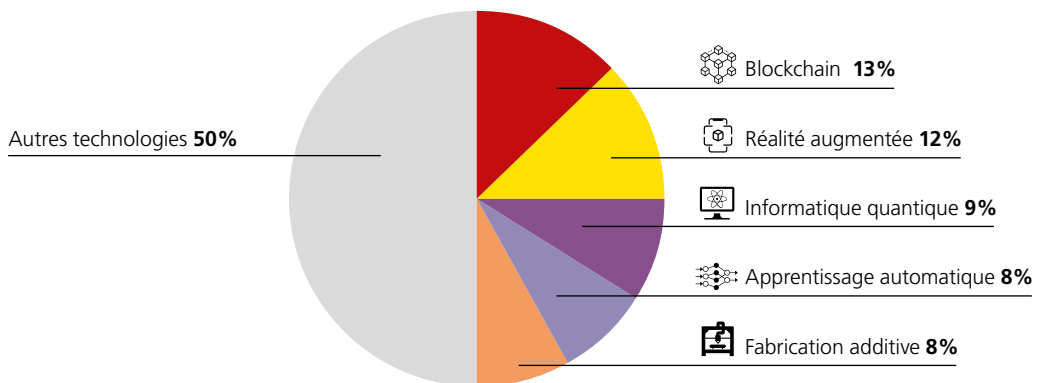
Italie



Pays-Bas



Autriche

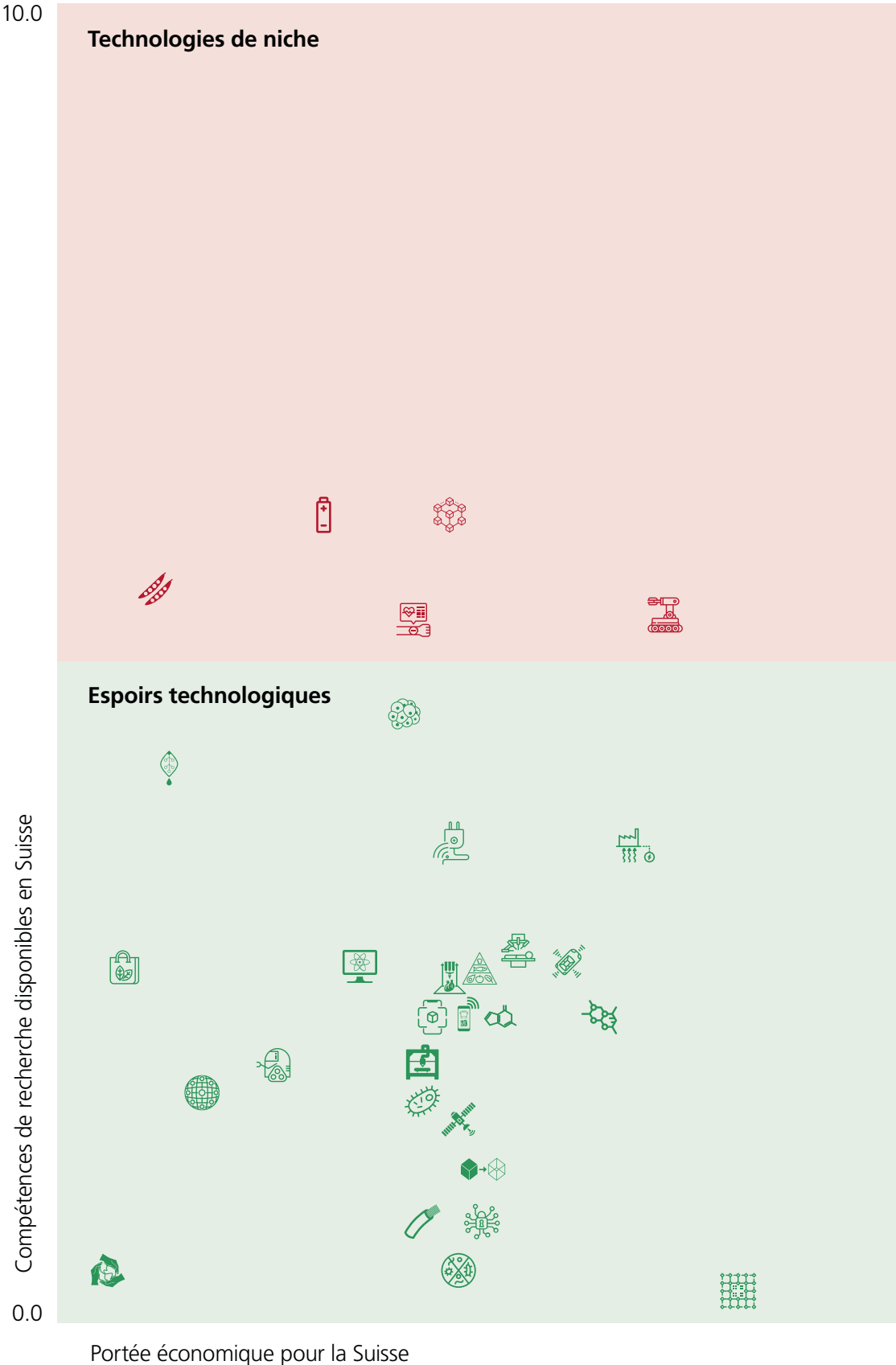


Le **graphique 4** indique la fréquence relative avec laquelle sont mentionnées les technologies du top 5 sur les réseaux sociaux en 2020 pour la Suisse et six des sept autres pays européens sélectionnés. Une même couleur correspond à une même technologie. Le secteur de diagramme gris pâle comprend l'ensemble des autres technologies hors top 5. La taille du secteur reflète la fréquence relative des posts consacrés aux différentes technologies par rapport au nombre total de posts par pays se rapportant aux technologies du *Technology Outlook 2021*.

Importance des technologies pour la Suisse

Graphique 5: Importance relative des technologies pour la Suisse

L'axe horizontal indique la portée économique des technologies pour la Suisse, l'axe vertical les compétences de recherche disponibles en Suisse.⁶ La «confiance numérique» et la «souveraineté des données» n'apparaissent pas dans le diagramme car il s'agit plutôt de modalités d'utilisation des technologies numériques que de technologies spécifiques. Une vue d'ensemble des pictogrammes est positionnée dans le rabat latéral en fin de publication.



⁶ Les détails de l'élaboration de cette représentation peuvent être consultés au chapitre «Méthode» à partir de la page 22.

Technologies star



Technologies automotrices



10.0

Scannez le code QR pour consulter notre site web, qui propose des informations supplémentaires concernant l'importance des technologies pour la Suisse. Des filtres vous permettent par ailleurs de procéder à votre propre sélection.



Sous forme de diagramme à quadrants, le graphique 5 (pages 14 et 15) cartographie l'importance des technologies pour la Suisse en se fondant sur l'appréciation d'expert-e-s, des rapports sectoriels et financiers, ainsi que nos propres recherches. L'axe horizontal indique la portée économique des technologies, mesurée par les quatre indicateurs suivants: chiffre d'affaires 2019, potentiel commercial dans les cinq années à venir, cadre légal-réglementaire et acceptation par la société suisse. L'axe vertical indique les compétences de recherche universitaires et industrielles en Suisse, également basées sur quatre indicateurs: nombre de groupes de recherche universitaires et leur compétence, nombre de groupes de recherche industriels et leur compétence. La temporalité de la portée économique est celle d'un instantané incluant la perspective de l'avenir proche. L'appréciation se fonde sur des chiffres se rapportant à l'année 2019. Comme elle inclut également une estimation de l'évolution du potentiel commercial, elle fournit aussi une indication sur les trois à cinq années à venir.

Le graphique est divisé en quatre quadrants représentant différentes importances des technologies pour l'économie suisse: les «technologies star» en haut à droite, les «technologies automotrices» en bas à droite, les «technologies de niche» en haut à gauche et les «espoirs technologiques» en bas à gauche.

Dans le quadrant bleu en haut à droite figurent huit technologies «star». La Suisse y possède de fortes compétences de recherche et leur portée économique est considérable. Elles assurent des chiffres d'affaires importants aux entreprises suisses et sous-tendent de nombreux emplois; les activités de recherche concernant ces technologies sont également intenses.

Les quatre technologies situées dans le quadrant jaune en bas à droite peuvent être qualifiées de technologies «automotrices». Bien que ces technologies ne fassent pas l'objet d'activités de recherche très intenses, elles forment la base de produits qui génèrent des chiffres d'affaires importants. Les technologies «automotrices» sont des technologies parvenues à maturité, largement établies, dont le développement actuel est plutôt lent. Il pourrait s'avérer payant d'investir dans l'établissement et le développement de compétences plus poussées.

Le quadrant rouge en haut à gauche contient des technologies «de niche». Ces cinq technologies font l'objet d'activités de recherche intenses, l'industrie et le monde universitaire y disposent de compétences élevées, mais malgré cela leur portée économique reste faible. Certaines de ces technologies pourraient devenir des «stars» si les conditions cadre sont porteuses et si leurs applications percent sur le marché. Il faut pour cela que les entreprises développent des modèles commerciaux innovants et pérennes permettant une grande variété d'applications.

Dans le quadrant vert en bas à gauche se trouvent les «espoirs» technologiques. Les 26 technologies situées dans ce quadrant représentent plus de la moitié des technologies recensées dans le *Technology Outlook*, un constat peu étonnant compte tenu du Technology Readiness Level⁷ pris en compte dans le *Technology Outlook*. Il s'agit de technologies pour lesquelles aussi bien les compétences de recherche universitaires et industrielles que la portée économique sont encore estimées comme faibles. Ces technologies nécessitent une observation constante et attentive, car leur évolution est incertaine.

⁷ Pour plus de détails sur les Technology Readiness Levels, consultez le chapitre «Méthode» à partir de la page 22.

Quatre domaines de recherche

Les technologies individuelles recensées dans le *Technology Outlook* peuvent être assignées à quatre domaines de recherche: «monde numérique», «énergie et environnement», «procédés de fabrication et matériaux» et «sciences de la vie». Le tableau 1 montre qu'un bon tiers des techno-

logies décrites dans cette publication sont des technologies numériques. Ce constat fait ressortir premièrement que les années à venir resteront marquées par la numérisation et deuxièmement qu'il reste nécessaire de pratiquer une politique numérique guidée par une vision d'ensemble.

	«Stars»	«Automotrices»	«Niches»	«Espoirs»	Total
Monde numérique	5	1	2	8	16
Énergie et environnement	2	1	1	6	10
Procédés de fabrication et matériaux	0	2	0	5	7
Sciences de la vie	1	0	2	7	10
Total	8	4	5	26	43

Tableau 1: Nombre de technologies par domaine de recherche et par quadrant

Lorsqu'on établit la moyenne des valeurs permettant de déterminer l'importance des différentes technologies, il apparaît que les compétences de recherche moyennes pour les technologies appartenant aux trois domaines de recherche «monde numérique», «énergie et environnement» et «sciences de la vie» sont nettement plus élevées que celles pour les technologies appartenant au domaine de recherche «procédés de fabrication et matériaux». Les technologies appartenant au domaine de recherche «monde numérique» ont par ailleurs en moyenne la plus grande portée économique. Cela s'explique probablement entre autres par le fait qu'un bon nombre des technologies issues de ce domaine de recherche sont des technologies habilitantes comme l'analyse de big data et l'apprentissage automatique, qui se situent dans le quadrant des «stars». Ces technologies habilitantes forment la base de nombreux produits et services dans différents domaines d'application.

Un tiers des technologies décrites dans ce *Technology Outlook* appartient au domaine de recherche «monde numérique». Ces technologies font l'objet d'un vif intérêt public et médiatique. Mais le *Technology Outlook* montre clairement que les technologies moins discutées issues des domaines de recherche «énergie et environnement», «procédés de fabrication et matériaux» et «sciences de la vie» jouent également un rôle central pour un développement pérenne, durable et profitable de l'industrie.

Technologies nouvellement recensées dans cette édition

Aux 31 technologies déjà recensées dans le *Technology Outlook 2019* s'ajoutent 12 nouvelles venues. Ces 43 technologies au total sont cartographiées dans le graphique 5 (pages 14 et 15). La nouvelle édition du *Technology Outlook* traite également de la «confiance numérique» et de la «souveraineté des données». Ces deux thématiques n'ont pas été analysées quant aux compétences disponibles et à la portée économique, car elles décrivent plutôt des modalités d'application qu'une technologie spécifique. Les technologies recensées pour la première fois dans le *Technology Outlook* apparaissent sur fond gris dans le rabat latéral en fin de publication. Il s'agit des technologies suivantes: «applications 5G», «propulsions alternatives pour véhicules», «matériaux antimicrobiens», «Internet des objets», «photosynthèse artificielle», «technologies médicales portables», «microbiote et microbiome», «robots mobiles», «informatique quantique», «nouvelle infrastructure Internet SCION», «recyclage de terres rares» et «isolateurs électriques conducteurs thermiques».

La plupart de ces technologies nouvellement recensées se situent dans le quadrant des «espoirs technologiques» ou tout juste dans celui des «technologies de niche». Deux technologies font figure d'exception: d'une part les «propulsions alternatives pour véhicules», classées en tant que «technologie automotrice» mais dont un examen plus attentif montre qu'il s'agit d'une mise à jour élargie de l'article consacré à l'«e-mobilité» dans le *Technology Outlook 2019*,⁸ et d'autre part l'«Internet des objets», classé en tant que «technologie star», qui remplace l'article «bâtiments intelligents»⁹ de la dernière édition. Contrairement à la notion de «bâtiments intelligents», les applications «Internet des objets» jouent aussi un rôle pour l'industrie, ce qui explique leur forte portée économique. Le développement à large échelle d'une infrastructure 5G fait de la 5G une technologie habilitante dotée d'un champ d'application potentiellement très vaste. C'est pour cela et en raison du vaste débat public les concernant que les «applications 5G» ont été incluses dans cette édition du *Technology Outlook*, même si la technologie de base a déjà dépassé le degré de maturité sur lequel se concentre le rapport.

⁸ cf. *Technology Outlook 2019*, p. 40

⁹ cf. *Technology Outlook 2019*, p. 45

On observe des évolutions positives pour l'apprentissage automatique, la fabrication photonique et la diagnostique point-of-care. Dans les deux années qui séparent les éditions 2019 et 2021 du *Technology Outlook*, le chiffre d'affaires réalisé avec des applications utilisant l'apprentissage automatique a doublé, permettant à la technologie d'avancer du statut de «niche» à celui de «star». Il est intéressant de constater que cette évolution se reflète aussi dans les comptes officiels de réseaux sociaux des établissements de l'enseignement supérieur: en Suisse comme dans la moyenne des sept autres pays européens, la fréquence relative des posts consacrés au thème de l'apprentissage automatique a nettement augmenté. Le chiffre d'affaires réalisé avec des applications de la fabrication photonique a également doublé en deux ans. La fabrication photonique est donc désormais classée en tant que «technologie automotrice» à la limite des «technologies star». On observe également une évolution positive sur l'axe de la portée économique pour la cryptographie quantique car il existe entre-temps de premières solutions de chiffrement difficilement décryptables même pour les ordinateurs quantiques, entraînant une hausse du potentiel commercial par rapport à la précédente édition. La diagnostique point-of-care a également évolué de manière positive: on y constate une augmentation aussi bien des compétences de recherche que de la portée économique, faisant passer cette technologie parmi les «stars». Comme la collecte des données s'arrête en 2019, cette évolution est indépendante de la pandémie du coronavirus.

On constate des évolutions plutôt inattendues pour les concepts de mobilité, les réseaux intelligents et la réalité augmentée. La portée économique moindre par rapport à 2019 évaluée pour les concepts de mobilité s'explique par un recul du chiffre d'affaires suite à l'échec de nombreux projets et initiatives dans ce domaine. Ce déclin se reflète également dans la baisse du nombre de posts sur les comptes de réseaux sociaux des établissements suisses de l'enseignement supérieur. Les réseaux intelligents sont supplantés de manière croissante par des cellules énergé-

tiques programmables, réduisant ainsi leur importance. L'évolution est moins claire dans le cas de la réalité augmentée. Comme le nombre de groupes de recherche est un facteur central de notre modèle pour déterminer les compétences de recherche, une diminution dans ce domaine telle qu'on a pu l'observer ces deux dernières années pour la réalité augmentée se répercute de manière négative sur l'appréciation des compétences de recherche. Cependant, la forte intensité avec laquelle la réalité augmentée est discutée sur les comptes de réseaux sociaux des établissements de l'enseignement supérieur indique que la technologie n'a en rien perdu en importance.

Pour les bioplastiques, on observe une évolution contraire de l'intensité des activités de recherche et de l'évolution du marché. Les efforts de recherche ont été intensifiés, mais la quantité de bioplastique utilisée a stagné en termes absolus face à une consommation de plastique croissante, si bien que la part du bioplastique au volume de plastique total est en baisse. Ce constat signale clairement un recul du potentiel commercial: malgré l'augmentation des compétences de recherche, la portée économique des bioplastiques est donc estimée comme nettement plus faible qu'il y a deux ans.

À l'inverse, il existe des technologies dont les positions ont bougé sans que l'on puisse constater une évolution dans le marché ou dans les compétences de recherche de l'avis des expert·e·s. Dans certains cas, cela s'explique par une caractérisation plus large ou plus étroite de la technologie, avec des répercussions directes sur le nombre de groupes de recherche concernés et l'estimation du chiffre d'affaires: ainsi le thème des machines connectées a été approché de manière plus large et celui des systèmes énergétiques décentralisés de manière plus étroite. Dans d'autres cas, le changement de position des technologies s'explique par la réévaluation des paramètres par de nouveaux·elles expert·e·s. C'est le cas de la géothermie, du jumeau numérique et de la culture de masse de cellules souches. Dans l'ensemble, les estimations des paramètres sont néanmoins cohérentes.

Résumé

Les trois technologies qui possèdent la portée économique la plus importante pour la Suisse sont: Internet des objets, machines connectées et analyse de big data. Ces trois technologies sont des produits de la numérisation et feront progresser encore la numérisation de l'industrie. Elles ont par ailleurs en commun d'être devenues au fil de ces dernières années de plus en plus abordables également pour les PME. Il est essentiel pour la compétitivité de la Suisse de disposer de conditions cadre qui permettent aux PME d'utiliser de telles technologies afin d'améliorer la qualité ou l'efficacité.

Les quatre technologies pour lesquelles la Suisse possède les compétences de recherche les plus élevées sont: l'apprentissage automatique, la diagnostique point-of-care et, se partageant la troisième place, les applications 5G et le photovoltaïque. La transformation accrue de ces compétences en modèles commerciaux créerait de nombreux emplois dans différents secteurs.

Depuis la publication du *Technology Outlook 2019*, les technologies dont la portée économique a le plus fortement augmenté sont l'apprentissage automatique, la fabrication photonique et la diagnostique point-of-care. Dans les trois cas, cette évolution s'appuie sur les compétences de recherche disponibles en Suisse. Il serait intéressant d'analyser plus précisément pourquoi et comment ces technologies sont parvenues à traduire des compétences de recherche en portée économique.

La plus forte augmentation des compétences de recherche a eu lieu pour les trois technologies suivantes: diagnostique point-of-care, fabrication photonique et bio-impression 3D. Dans les années à venir, il s'agira de rendre cette hausse des compétences de recherche valorisable pour l'industrie.

L'apprentissage automatique est donc non seulement l'étoile montante de l'année, mais aussi la technologie dans l'ensemble la mieux cotée de cette édition.

Méthode

Ce chapitre décrit la méthode qui sous-tend le *Technology Outlook 2021*. Dans un premier temps, il présente la manière dont nous avons procédé à la sélection des technologies. Ensuite, il détaille le procédé utilisé pour l'analyse des réseaux sociaux et explique sur quelles données se fonde le chapitre «Importance des technologies pour la Suisse» (à partir de la page 14)

Sélection des technologies

C'est le Conseil scientifique de la SATW qui a procédé à la sélection des technologies. En collaboration avec les directeurs-rices des plateformes thématiques, il a établi une liste provisoire de technologies. Le degré de maturité de ces technologies et leur importance pour la Suisse ont été éva-

lués par des expert-e-s. La liste finale ne contient plus que des technologies présentant un Technology Readiness Level (TRL) de 4–7 et une importance élevée pour la Suisse. Le Technology Readiness Level est un modèle permettant de décrire le niveau de maturité technologique.

TRL	Description
1	Observation du principe de base
2	Formulation du concept technologique
3	Preuve expérimentale de conception
4	Validation de la technologie en laboratoire
5	Validation de la technologie en environnement réel
6	Démonstration de la technologie en environnement réel
7	Démonstration du système à l'échelle prototype en environnement opérationnel
8	Qualification d'un système complet
9	Système réel démontré en environnement opérationnel

Tableau 2: Technology Readiness Level suivant le programme de recherche européen *Horizon 2020*

Analyse des réseaux sociaux

La SATW a fait appel à l'outil de recherche sémantique de l'entreprise suisse LinkAlong (<https://linkalong.com>), qui utilise comme base de données les réseaux sociaux tels Twitter, Facebook et Instagram ainsi que les sites web qui y sont référencés. Cet outil a permis de réunir pour les analyser tous les posts publiés sur les comptes de réseaux sociaux officiels d'établissements de l'enseignement supérieur en Suisse, en Allemagne, en France, au Royaume-Uni, en Italie, aux Pays-Bas, en Autriche et en Suède se rapportant aux différentes technologies recensées dans le *Technology Outlook*. Pour chacune des technologies décrites, une liste de termes de recherche a été établie, incluant les langues officielles des pays étudiés, différents noms utilisés pour une même technologie ainsi que leurs différentes orthographes possibles.

Il est ainsi possible de déterminer avec quelle fréquence une technologie particulière est mentionnée sur les comptes officiels de réseaux sociaux des établissements européens de l'enseignement supérieur. Comme la fréquence de publication des établissements de l'enseignement supérieur des différents pays varie fortement, la fréquence relative avec laquelle chaque technologie a été mentionnée a été déterminée par pays. La totalité des posts se rapportant aux technologies recensées dans le *Technology Outlook 2021* a été définie comme équivalant à 100%, permettant de calculer pour chaque technologie un pourcentage, la fréquence relative. Pour les séries temporelles (graphiques 1 et 2, page 8), les posts ont été compilés et analysés non seulement pour l'année 2020 mais aussi pour les années 2018 et 2019. Il devient ainsi possible d'observer comment évolue l'intérêt pour une certaine technologie au fil des ans.

Afin de déterminer la moyenne européenne, nous avons établi la moyenne des fréquences relatives des sept pays (graphique 1). La moyenne européenne représente donc la moyenne des pourcentages. Cette méthode de calcul présente l'avantage d'accorder un poids équivalent aux pourcentages de tous les pays. En effet, les établissements de l'enseignement supérieur en Allemagne et au Royaume-Uni sont nettement plus actifs sur les réseaux sociaux que par exemple en Autriche ou en Suède.

Les cinq technologies les plus fréquemment mentionnées dans chaque pays ont été transposées dans un diagramme circulaire afin d'établir un profil national (graphique 4, pages 12 et 13). Ces pourcentages peuvent ainsi être comparés de pays à pays.

Importance des technologies pour la Suisse

Afin de déterminer l'importance des technologies pour la Suisse et de compiler le graphique 5 (pages 14 et 15), huit paramètres ont été évalués pour chaque technologie du *Technology Outlook*. Quatre de ces paramètres visent à déterminer la portée économique et quatre autres les compétences de recherche disponibles en Suisse. Ces huit paramètres sont: chiffre d'affaires 2019 généré par des entreprises établies en Suisse avec la vente de produits et de services dans le monde entier, 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 le domaine concerné en Suisse, compétence de ces groupes de recherche universitaires en comparaison internationale exprimée par l'indice h moyen¹⁰, nombre d'entreprises en Suisse avec des activités R&D dans le domaine concerné, compétence de ces entreprises en comparaison internationale. Les plages de valeurs ont ensuite été transposées vers un système de points.

Chiffre d'affaires 2019 (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:

Niveau (en millions de CHF)	<10	10–99	100–499	500–999	≥ 1000
Points	1	2	3	4	5

Potentiel commercial dans les cinq années à venir (P_C), basé sur des évaluations d'expert-e-s:

Niveau	faible	moyen	élevé	très élevé
Points	0.4	0.8	1.2	1.6

Cadre légal-réglementaire en Suisse (L_R), basé sur des évaluations d'expert-e-s:

Niveau	défavorable	neutre	optimal
Points	0.8	1	1.2

Acceptation par la société suisse (A_S), basé sur des évaluations d'expert-e-s:

Niveau	entravant	neutre	encourageant
Points	0.9	1	1.1

¹⁰ L'indice h est basé sur les indications de ResearchGate. Les montants ont été comparés à ceux de Google Scholar afin de les plausibiliser.

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

Niveau	<10	10–19	20–39	40–49	≥ 50
Points	1	2	3	4	5

Compétence des groupes de recherche universitaires (C_U), exprimée par l'indice h moyen des groupes de recherche actifs dans le domaine concerné en Suisse:

Niveau	<20	20–34	≥ 35
Points	0.8	1	1.2

Nombre d'entreprises en Suisse avec des activités R&D dans le domaine concerné (R_I), basé sur des indications d'expert-e-s, des rapports sectoriels et financiers et des recherches en ligne:

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

Compétence de ces entreprises en comparaison internationale (C_I), basé sur des évaluations d'expert-e-s:

Niveau	faible	moyen	élevé
Points	0.8	1	1.2

Transposition dans le diagramme à quadrants

Les valeurs ainsi déterminées ont été transposées en une position sur l'axe horizontal (portée économique) au moyen de la formule suivante:

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

Les différents paramètres sont dotés d'un poids différent. Le chiffre d'affaires, basé sur des chiffres solides, a été défini comme paramètre principal, les trois autres paramètres agissant comme modulateurs. L'influence du potentiel commercial sur l'évolution du chiffre d'affaires est considérée 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 de recherche disponibles 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 paramètres 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 montants 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.

Technologies et domaines d'application

Le monde numérique	30
Applications 5G	31
Analyse de big data	32
Réalité augmentée	33
Blockchain	34
Machines connectées	36
Jumeau numérique	37
Drones	38
Véhicules hautement automatisés	39
Internet des objets	40
Robotique collaborative	41
Apprentissage automatique	42
Robots mobiles	43
Nouvelle architecture Internet SCION	44
Télécommunications optiques spatiales	45
Informatique quantique	46
Cryptographie quantique	47
Énergie et environnement	50
Propulsions alternatives pour véhicules	51
Systèmes énergétiques décentralisés	52
Géothermie	53
Photosynthèse artificielle	54
Concepts de mobilité	55
Production alimentaire durable	56
Photovoltaïque	57
Recyclage de terres rares	58
Réseaux intelligents	59
Stockage futur de l'énergie	60
Procédés de fabrication et matériaux	62
Fabrication additive – développement de matériaux	63
Fabrication additive – procédés	64
Matériaux antimicrobiens	65
Bioplastiques	66
Fibres fonctionnelles	67
Fabrication photonique	68
Isolateurs électriques conducteurs thermiques	69
Sciences de la vie	70
Bio-impression 3D	71
Sources alternatives de protéines	72
Biocatalyse et biosynthèse	73
Culture de masse de cellules souches	74
Technologies médicales portables	75
Robots médicaux	76
Microbiote et microbiome	77
Alimentation personnalisée	78
Diagnostique point-of-care	80
Biologie synthétique	81
Technologie et société	82
Souveraineté des données	83
Confiance numérique	84

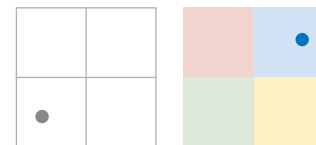


Le monde numérique



Applications 5G

Gregor Dürrenberger (FSM – Forschungsstiftung Strom et Mobilkommunikation) et **Christian Gasser** (ASUT)



La 5G – la cinquième génération de téléphonie mobile – comporte des éléments matériels et logiciels. Par rapport aux standards précédents, la 5G permet de transmettre plus de données mobiles de manière plus rapide et plus sûre. La 5G est nettement plus performante en termes de débit, de temps de latence et du nombre de connexions simultanées. La transmission d'un même volume de données occasionne donc un rayonnement et une consommation d'énergie moindres que les anciennes générations de télécommunications mobiles. En outre, la 5G utilise en règle générale des antennes adaptatives. Celles-ci n'émettent pas en continu dans toutes les directions mais ajustent leur direction de transmission et ciblent les signaux vers les appareils en train d'envoyer ou de recevoir des données.

État des lieux

La mise en place de réseaux 5G en Suisse a commencé début 2019. La hausse du trafic de données mobiles est un moteur clé de ce développement car les réseaux de téléphonie mobile existants arrivent à saturation. Des exigences environnementales strictes limitent la capacité et la performance, rendant nécessaire l'utilisation de technologies plus efficaces pour faire face au volume de données croissant. La 5G est un exemple classique de technologie dite «habilitante», en ce qu'elle offre une base infrastructurelle pour un large éventail d'applications. Elle rend possible de nouvelles solutions pour la commande sans fil et le contrôle de processus de production, la mise en réseau de capteurs et l'échange de données. Pour les infrastructures critiques (réseaux électriques, systèmes de gestion du trafic...), commandées de manière croissante par téléphonie mobile, la 5G présente l'avantage de pouvoir opérer ces systèmes dans des applications spécifiques scindées du reste du réseau mobile, ce qui augmente nettement leur sécurité. La 5G permet également de réserver des capacités de réseau – ce qui la rend particulièrement adaptée aux besoins des services d'urgence et des processus d'entreprise critiques. Le temps de latence de la 5G est bien plus faible que celui des anciens standards de téléphonie mobile, permettant de commander des processus et des machines en temps quasi réel. La recherche fondamentale se penche sur de nouvelles fréquences de transmission et sur les technologies d'antennes nécessaires. La recherche appliquée se concentre sur l'intégration de ces nouvelles technologies dans des processus commerciaux et informatiques existants ou nouveaux.

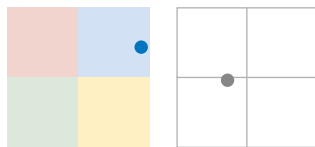
À la pointe internationale, on trouve la Corée du Sud et la Chine. En Suisse, des réseaux 5G sont en service depuis avril

2019. En juin 2020, 14 pays européens et la Norvège ont mis en service des réseaux 5G commerciaux. Outre les États-Unis et la Corée du Sud, la Suisse figure parmi les premiers pays au monde à proposer une offre commerciale de 5G. Il existe déjà en Suisse plusieurs projets pilote utilisant la 5G, ainsi dans l'agriculture (agriculture intelligente ou «smart farming»), dans l'industrie des machines (industrie 4.0), dans la couverture haut débit et dans la commande et le contrôle de trains (*Smart Rail 4.0*) ou le tourisme. La Suisse figure parmi les pays à la pointe mondiale en ce qui concerne le déploiement du réseau. Cependant, des prescriptions restrictives de protection contre le rayonnement et des refus d'autorisation de la part de communes et de cantons font obstacle à un déploiement complet et performant couvrant l'ensemble du territoire, et rendent le développement du réseau très coûteux en comparaison internationale.

Perspectives d'avenir

L'UE s'est fixé pour objectif d'étendre la couverture 5G à l'ensemble des zones urbaines et des voies de circulation d'ici fin 2025.

Grâce à la 5G, l'industrie espère augmenter l'automatisation de ses processus, permettant de réduire les temps de production et de limiter les temps d'arrêt. Il est aussi envisageable que les processus de production s'organisent de manière croissante selon un principe de flux tendu et qu'ils soient plus fortement individualisés. Selon une étude de l'ASUT, d'ici 2030 les technologies 5G généreront une valeur de production supplémentaire de plus de CHF 40 milliards, dont environ 88% reviendront aux secteurs utilisateurs. La création de bonnes conditions cadre pour la 5G par la politique et l'économie devrait favoriser la numérisation plus poussée.



Analyse de big data

Alessandro Curioni et Patrick Ruch (IBM Research – Zurich)

L'analyse de big data comprend les méthodes et les technologies utilisées pour dériver des résultats exploitables à partir de quantités de données vastes et variées. Les avancées en matière d'infrastructure de communication, d'infrastructure informatique et d'intelligence artificielle (IA) facilitent l'extraction d'informations à visée commerciale et technologique à partir de mégadonnées. Certains secteurs comme le secteur bancaire, les assurances, l'industrie pharmaceutique et le secteur manufacturier bénéficient de ces développements.

État des lieux

Le big data et l'IA sont aujourd'hui encore plus étroitement liés et synergiques. La croissance mondiale sera portée par les services de données et d'IA mis à disposition en nuage. L'avenir sera automatisé au moyen d'analyses de données assistées par IA, qui livreront en continu des résultats exploitables. Les PME peuvent accéder à tout un éventail de prestations proposées par les fournisseurs de services cloud, simplifiant l'adoption, la customisation et le déploiement de technologies d'IA pour l'analyse de big data. On assiste ainsi à la réduction d'anciennes barrières concernant le recrutement ou le développement interne de savoir-faire spécialisé et les investissements d'infrastructure. La gouvernance et la sécurité des données continuent à figurer parmi les principaux défis actuels et deviennent des critères de décision déterminants pour les entreprises en quête de solutions commerciales pour l'analyse de big data. De plus, les clients exigent de la souplesse en matière d'environnements cloud et cherchent à éviter la dépendance à un prestataire particulier. Les stratégies basées sur une infrastructure ouverte seront donc de plus en plus courantes.

Pour la Suisse, les constats du *Technology Outlook 2019* restent valables aujourd'hui. En termes d'opportunités commerciales, le secteur le plus prometteur pour le big data est le secteur bancaire, qui a contribué à accélérer l'adoption de technologies d'analyse de big data. Il est intéressant de noter que certaines grandes entreprises ont adopté et développé une stratégie big data dans le commerce de détail, les télécommunications et les transports en vue de services personnalisés et d'un profilage client. Il existe à ce jour peu d'indices d'un usage répandu de l'exploitation de big data parmi les PME.

Perspectives d'avenir

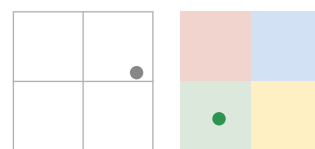
La combinaison de big data et d'IA jouera un rôle clé pour les initiatives de transformation numérique. La convergence attendue entre l'IA et l'informatique en périphérie («edge computing») fait figure de tendance majeure: selon une étude de *Gartner*, de plus en plus d'analyses de données – 50% en 2023 par rapport à 5% en 2019 – seront entreprises au plus près des sources de données. La capacité à traiter les données par informatique en périphérie deviendra essentielle à la prise de décision en temps réel. Les investissements croissants dans les services cloud publics pour augmenter la souplesse constituent une tendance persistante. La même étude prévoit que d'ici 2023, 75% de toutes les bases de données seront hébergées sur des plateformes cloud, avec des répercussions directes pour les fournisseurs de systèmes de gestion des données. En général, les environnements cloud seront très hétérogènes et les entreprises s'appuieront probablement sur un mélange de clouds privés sur site, de plusieurs clouds publics et de plateformes historiques. Cet environnement hybride multicloud favorisera l'adoption d'applications conteneurisées pouvant être exécutées sur toutes les plateformes. L'acquisition de données en temps réel combinée à l'analyse en streaming continuera à prendre de l'ampleur, permettant de développer des applications qui détectent, analysent et agissent en temps réel. Beaucoup d'entreprises qui cherchent à adopter des solutions big data butent sur la mise en place de mécanismes de gouvernance et de sécurité adaptés. Le monitoring et la démonstration de la fiabilité numérique deviendront des atouts économiques majeurs. La sécurité des données demeurera une priorité. Les entreprises doivent donc veiller à incorporer des pratiques robustes de sécurité et de protection des données tout au long de leur trajectoire de transformation numérique. →

En Suisse, les PME feront éventuellement face à des déficits de compétences et à des ressources limitées pour l'adoption de nouvelles technologies. Il en résulte une opportunité pour de nouvelles technologies de gestion des données qui automatisent les tâches manuelles et fastidieuses dans le domaine de la gestion, la gouvernance et l'administration des données. Des plateformes hybrides de gestion cloud sont en cours de développement pour simplifier la mise en place et le déploiement d'applications big data dans des environ-

nements combinant des ressources informatiques privées sur site et des ressources cloud publiques, permettant aux entreprises de toute taille de disposer de ressources de traitement des données pratiquement illimitées. Ces «usines» à big data permettent d'identifier toutes les sources de données de valeur au sein d'une entreprise pour parvenir rapidement à des constats commerciaux et technologiques. Les investissements continueront à se déplacer vers les plateformes d'intégration.

Réalité augmentée

Andreas Kunz (ETH Zurich)



Le terme «réalité augmentée» (RA) – ou plutôt «réalité mixte» (RM) – désigne la superposition visuelle d'informations générées par ordinateur (virtuelles) à des objets réels. On assiste également à un essor de la «réalité virtuelle» (RV), c'est-à-dire l'immersion complète dans un univers généré par ordinateur. Les applications de ces différentes technologies se trouvent typiquement dans la formation et l'enseignement, le développement de produit et la production, ainsi qu'en médecine. En Suisse, de nombreuses entreprises utilisent déjà avec succès la réalité augmentée.

État des lieux

Ces dernières années, des progrès considérables ont été réalisés dans le développement matériel, en particulier concernant l'élargissement du champ de vision des lunettes de réalité mixte comme le modèle *HoloLens II* de *Microsoft*. Les nouveaux appareils permettent une reconnaissance des gestes nettement améliorée et donc une meilleure interaction avec les objets virtuels insérés. La technologie de détection de position, indispensable pour les applications de réalité augmentée, a elle aussi été améliorée et miniaturisée. On peut citer à titre d'exemple la technique lidar, basée sur des semi-conducteurs et apparentée au radar, déjà disponible commercialement dans l'*Apple iPad Pro 2020*. La qualité d'image croissante crée de nouveaux défis pour l'interaction avec des objets virtuels, dont une meilleure reconnaissance des gestes ou la détection de position automatique doivent augmenter le naturel et l'intensité d'expérience.

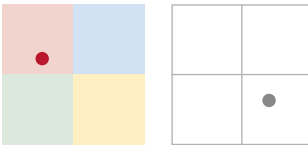
Ces dernières années, de nombreuses entreprises se sont établies en Suisse dans la production de contenus virtuels, leur représentation et différents aspects relevant de l'interaction. Un nombre croissant d'utilisateurs industriels misent par ailleurs sur les technologies de réalité virtuelle et mixte, par exemple pour la maintenance ou la formation. L'utilisation de ces nouvelles technologies dans les PME suisses représente cependant un défi pour les développeurs, car l'investissement doit être rapidement rentabilisé. Ces dernières années, l'engouement initial a laissé place à une approche plus sobre et à plus de discernement concernant les capacités des nouvelles technologies et l'intérêt de leur utilisation, menant à une certaine consolidation dans leurs domaines d'application. →

Perspectives d'avenir

Les appareils de réalité mixte actuellement disponibles sont encore trop chers pour une diffusion à large échelle. Dans les années venir, on peut s'attendre à une performance technique croissante couplée à une nette baisse des prix. La réalité mixte fera l'objet d'une utilisation accrue dans la formation d'utilisateurs·rices sur objets réels (véhicules, machines) et dans les activités de maintenance et d'entretien.

Les entreprises suisses sont bien positionnées à l'international et pourront atteindre une avance technologique grâce à des temps réduits de développement et de pro-

duction. À côté du service ou du produit, la valeur ajoutée numérique s'établira en tant que caractéristique à part entière et potentiel atout concurrentiel. Afin de maintenir leur position de pointe, les entreprises suisses doivent procéder à une définition précise de leurs besoins en vue d'un choix et d'un déploiement technologiques pertinents. Afin d'être informées de manière précoce des nouvelles possibilités technologiques, les entreprises devraient échanger directement avec les institutions de recherche, proposer des mémoires de niveau bachelor et master en concertation avec les établissements de l'enseignement supérieur, et engager des coopérations de recherche.



Blockchain

Thomas Puschmann (Université de Zurich)


«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·rices anonyme resp. pseudonyme) et «privées (permissioned)» (cercle d'utilisateurs·rices connu et restreint). 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 logiciel pouvant déclencher des transactions automatiques.

État des lieux

Ces dernières années, la standardisation a émergé en tant que nouveau facteur de réussite de la technologie blockchain. Actuellement, on assiste à une concurrence entre différentes blockchains comme *Ethereum* ou *Hyperledger*, et à l'élaboration de protocoles pour partie non interopérables. Des organismes comme le *World Wide Web Consortium (W3C)* sont donc en train d'élaborer des normes et des règles adaptées portant aussi sur l'utilisation transnationale. Une autre question qui se pose est la manière dont protéger la sphère privée des utilisateurs·rices si les pseudonymes peuvent être désanonymisés par la liaison de données. D'autres problèmes centraux, à ce jour non

encore résolus, sont le mécanisme proof-of-work et la forte consommation d'énergie. Des mécanismes de consensus alternatifs pour la validation de transactions, comme p.ex. le proof-of-stake, en sont toujours au stade d'étude.

La «Crypto Valley» suisse héberge quelques startups de renommée mondiale. Cinq d'entre elles sont des «licornes» valorisées à plus de USD 1 milliard: *Bitmain*, *Dfinity*, *Ethereum*, *Libra* resp. *Novi* et *Polkadot*. Mais le paysage entrepreneurial suisse est défini principalement par de jeunes startups, qui ne génèrent (pour le moment) qu'un faible chiffre d'affaires. De nombreux domaines d'application émergent en Suisse et à l'international. En Suisse, on peut



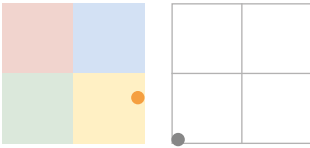
citer à titre d'exemples des solutions de contrats intelligents pour les contrats d'assurance (*B3i*), la gestion de la chaîne logistique pour l'industrie pharmaceutique (*Modum*), le financement du commerce international (*UBS*) ou des consortiums comme la *Swiss Digital Trade Platform* réunissant *Novartis*, *l'Assurance suisse contre les risques à l'exportation*, *La Poste Suisse*, *l'Université de Zurich* et *Zurich Insurance*.

La mise en œuvre de ces nouveaux domaines d'application est étroitement liée à au moins trois facteurs de réussite, dont l'évolution a été positive depuis 2019: (I) La disponibilité de talents et leur formation dans l'enseignement supérieur: les établissements de l'enseignement supérieur ont étoffé leur offre de cours. (II) Un écosystème performant réunissant enseignement supérieur, acteurs établis et startups, avec un bon accès à du capital-risque: le nombre de startups a augmenté, passant à 842 avec 4400 salarié·e·s en Suisse et au Liechtenstein. Pour la première fois, on compte parmi elles deux entreprises disposant d'une autorisation bancaire (*SEBA* et *Sygnum*). (III) Un cadre légal et réglementaire souple: le 17.06.2020, le Conseil national a approuvé une base légale favorable à l'innovation pour les applications et les modèles commerciaux décentralisés.

Perspectives d'avenir

De manière générale, les blockchains et les registres distribués avec leurs protocoles sous-jacents émergent comme la nouvelle infrastructure pour la prochaine génération de l'Internet («Internet des valeurs» ou «Internet of Value»). Les répercussions sont majeures non seulement pour les prestataires à forte composante informatique comme le secteur financier, mais – en combinaison avec l'Internet des objets – aussi pour l'industrie, par exemple pour la production, le négoce et la consommation d'électricité. Les habitations équipées de compteurs intelligents et de cellules photovoltaïques peuvent faire l'objet d'une gestion intelligente: les monnaies numériques soutiennent le négoce peer-to-peer et les contrats intelligents facilitent le négoce numérique et la production. Un consortium nommé *DLT-for-Power* a été établi à cet effet en Suisse dans le cadre de *l'Association suisse de normalisation (SNV)*. Un autre domaine d'application majeur concerne les monnaies numériques émises par les banques centrales («central bank digital currency», CBDC), comme par exemple un franc suisse numérique. On peut citer comme acteur dans ce domaine d'application le *BIS Innovation Hub* établi par la *Banque des règlements internationaux*.

À ce jour, la seule «killer application» en matière de blockchain est le *Bitcoin*. Un grand nombre d'autres applications se trouvent actuellement encore au stade expérimental. Elles concernent le commerce (*IBM* et *Walmart*), la logistique (*Maersk*), les transports (*Novotrans*) ou les administrations publiques (Pays-Bas). D'autres potentiels d'innovation existent dans le domaine de la durabilité écologique, par exemple la traçabilité de produits et de leurs composants ainsi que de leurs conditions de production dans l'ensemble de la chaîne logistique.



Machines connectées

Daniel Liebhart (ZHAW) et Philipp Schmid (CSEM)

Les machines connectées permettent de mettre en place une production hautement automatisée, connectée et anticipative, c'est-à-dire une usine intelligente («smart factory»). Une machine connectée est intelligente et interactive. Elle permet une fabrication flexible, efficace et extrêmement précise allant jusqu'à des tailles de lot très réduites voire des pièces uniques, et rend possibles des solutions innovantes.

État des lieux

Pour de nombreux pays à hauts salaires, cette technologie représente un facteur de réussite clé face à la concurrence internationale. La recherche et le développement se concentrent donc sur les thèmes suivants: optimisation des processus, contrôle de qualité en cours de processus («in-line»), solutions de «maintenance intelligente», flux d'information continus, souplesse élevée des robots de fabrication et de leurs bras manipulateurs ainsi que durabilité écologique de la production. Il en résulte de nombreuses applications pouvant être menées à maturité commerciale par les grandes entreprises, dans les centres de recherche des établissements de l'enseignement supérieur et autres institutions de recherche ainsi que par les PME et les startups.

Pour la Suisse, le défi est de transformer ces innovations aussi vite que possible en modèles commerciaux rentables. Il existe quelques entreprises en position de leader international, qui occupent une place significative pour l'économie suisse en raison de la qualification élevée de leur personnel et de leur grande compétitivité.

Perspectives d'avenir

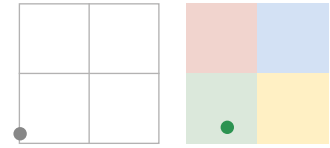
L'évolution technologique globale favorise les usines intelligentes et les automatisations de processus, car la puissance de calcul, le débit des réseaux et la possibilité de résoudre des tâches complexes par ordinateur se développent très rapidement. Les entreprises apprendront à gérer les risques de sécurité attenants. À l'avenir, il s'agira de mettre en œuvre les innovations étape par étape, avec patience et rigueur.

Grâce à son importante capacité d'innovation, la fabrication industrielle en Suisse maintiendra sa position sur le marché mondial. Il s'agit de poursuivre et de soutenir de manière ciblée les efforts de recherche appliquée. La performance du concept d'usine intelligente augmente à mesure de l'interaction entre informatique, ingénierie mécanique, ingénierie systèmes et expertise industrielle spécifique. Une bonne mise en réseau, la coordination et la collaboration entre talents œuvrant dans la recherche et dans la pratique sont donc nécessaires afin que les PME, colonne vertébrale de l'économie suisse, puissent en tirer des bénéfices maximaux.



Jumeau numérique

Andreas Kunz (ETH Zurich) et **Daniel Schmid** (ZHAW)



Un jumeau numérique est une réplique de produits ou de processus réels dans le monde virtuel, fournissant une «ombre numérique» à des fins de production et d'exploitation. Il faut pour cela développer des programmes de simulation, raccorder entre elles les étapes de fabrication et relier les données issues de la gestion du cycle de vie des produits à celles issues du progiciel de gestion intégrée. La fabrication est l'un des domaines d'application majeurs du jumeau numérique. Les étapes de travail manuelles offrent de nouvelles possibilités d'utilisation, par exemple dans l'interaction et la coopération personne-robot, dans l'aménagement de postes de travail virtuels ou dans la formation virtuelle et la télémaintenance. Outre l'aspect de la faisabilité technique, le défi est de maintenir l'équilibre économique entre dépenses et bénéfices. Les possibilités sont nombreuses et un concept avisé améliorera l'efficacité de l'entreprise. A contrario, un mauvais choix en termes d'approche et de solution aura l'effet inverse. Il faut par ailleurs être attentif aux modifications qu'entraînent ces innovations pour le personnel. Le changement peut mener à des résistances, qu'il s'agit d'amortir par un change management adapté.

État des lieux

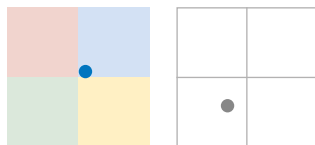
Le paysage industriel suisse, dominé par les PME, accuse un retard par rapport à d'autres pays dans lesquels de grandes industries comme l'industrie automobile jouent un rôle pionnier. D'une part le jumeau numérique est considéré comme une opportunité, d'autre part les investissements requis représentent un obstacle majeur – une situation à laquelle font aussi face d'autres pays. La comparaison avec les pays asiatiques montre que, surtout en Chine, le jumeau numérique fait l'objet d'une perception positive et d'un soutien important. En Suisse, les PME ne pourront tirer profit des concepts puissants liés à l'industrie 4.0 et à l'usine intelligente que si elles axent leur utilité sur les acteurs humains.

Perspectives d'avenir

Les opportunités qu'ouvre le jumeau numérique mèneront à une numérisation plus poussée de l'industrie et à une complexité croissante du développement de produits. À l'avenir, les produits disposeront d'une réplique dans le monde virtuel et ainsi d'une fonctionnalité et d'une performance accrues. Cette évolution se fera au bénéfice des clients. Mais la complexité croissante des processus constitue aussi un défi. Les PME doivent parvenir à développer leurs connaissances afin de déployer le jumeau numérique de manière profitable et d'assurer sa mise à jour constante. La question qui se pose aux PME est la suivante: comment générer des avantages pour la clientèle et à l'interne grâce au jumeau numérique et quels outils utiliser pour y parvenir? Tout comme son pendant physique, le jumeau numérique couvre l'ensemble du cycle

de vie, incluant développement, fabrication et exploitation. Dans les années à venir, la recherche et le développement porteront de manière renforcée sur cette chaîne globale. Une difficulté réside dans l'important temps de latence qui existe entre le développement d'un produit et le moment auquel on peut en recueillir les bénéfices. Un exemple: s'il s'agit de proposer des services basés sur l'exploitation de données dans le cadre d'une maintenance intelligente, le produit doit intégrer cette dimension dès son développement. À l'avenir, outre les données recueillies à des fins purement internes comme le contrôle de qualité ou l'optimisation des processus, une entreprise devra aussi en collecter pour des services de ce type. Les questions pressantes sont les suivantes: quelles sont les données nécessaires qui ne font pas encore l'objet d'une collecte? Mais aussi: quelles sont les données collectées dont personne n'a besoin? Les réponses à ces questions indiquent la voie à prendre pour tirer profit des innovations à venir.

L'industrie suisse doit sonder le potentiel du jumeau numérique. Le décalage temporel évoqué entre le développement d'un produit et la réalisation de ses bénéfices nécessite d'acquérir des expériences le plus rapidement possible. Même s'il ne s'agit pas de modifier immédiatement les modèles commerciaux établis, les domaines d'activité concernés doivent développer leur savoir-faire et engager de premières mesures.



Drones

Roland Siegwart (ETH Zurich)

Les drones professionnels sont largement utilisés dans les domaines de la cartographie ainsi que de la surveillance et de l'arpentage aériens. Ils font aussi l'objet d'une utilisation accrue en agriculture pour surveiller les champs, en cas de catastrophe, ou pour des tâches de transport.

État des lieux

Sous l'impulsion de l'ETH Zurich et de l'EPFL, la Suisse est devenue un centre névralgique de la technologie des drones et a créé de nombreuses startups dans ce domaine. Le pays a ainsi établi un leadership international dans le développement de nouveaux concepts et des technologies nécessaires à la navigation autonome en plein air et en intérieur. La technologie des drones est en train de devenir un domaine phare de l'économie suisse, économiquement signifiant et à croissance rapide, bénéficiant aussi de l'encouragement de l'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC). Il n'est pas surprenant que la technologie des drones figure parmi les technologies prometteuses dans la plupart des pays industrialisés de pointe. Les drones commerciaux, surtout ceux du leader mondial DJI, sont toujours plus autonomes et leur utilisation s'intensifie dans de nombreux domaines. Mais le volume des ventes pointe vers une saturation du marché grand public. En revanche, l'utilisation professionnelle de drones a fortement progressé. Les drones étant de plus en plus considérés comme une technologie d'avenir de haute importance, une petite guerre commerciale a éclaté entre les États-Unis et la Chine: les États-Unis ont fortement restreint les importations de drones chinois afin de favoriser leur propre industrie. Pour les constructeurs de drones suisses, cette situation est source de risques comme d'opportunités. La réglementation pour l'intégration des drones dans l'espace aérien public progresse; en Europe, la Suisse est à la pointe de ces efforts.

La recherche sur les drones en Suisse, dont le positionnement était déjà excellent, a continué à progresser. Les startups existantes se sont développées et d'autres ont été créées. L'OFAC prévoit de lancer en 2021 un outil en ligne pour l'intégration des drones dans l'espace aérien public: il permettra de renseigner l'itinéraire et l'horaire de vol prévus

et d'obtenir quasiment instantanément une autorisation. Cette innovation confèrera un avantage commercial considérable aux startups suisses et attirera les constructeurs de drones étrangers. Une réglementation claire et ouverte est décisive pour permettre à l'industrie des drones de se développer dans les meilleures conditions.

Perspectives d'avenir

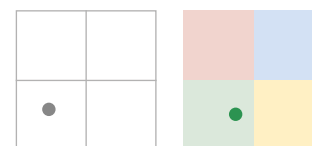
Dans les années à venir, la croissance du secteur concernera surtout l'utilisation de drones à usage professionnel. Des domaines déjà bien développés comme l'agriculture, la surveillance ou l'arpentage aériens se professionnaliseront et les exploitants de drones proposeront de nouveaux services. L'essor des drones de transport, rêve nourri depuis quelques années, se réalisera lentement mais sûrement, avec pour premiers domaines d'application les services de livraison ou les transports médicaux dans les zones reculées. Mais le transport de masse par drones peinera à s'imposer dans les zones à forte densité de population.

La dernière génération de drones est capable de voler non seulement en plein air mais aussi en intérieur et même en contact direct avec l'environnement. Il en résulte de nouveaux domaines d'application comme l'inspection de ponts ou de centrales de production d'énergie, au cours desquelles le capteur doit entrer en contact avec l'infrastructure avec la plus haute précision. Ces nouveaux drones touchent à des domaines d'activité qui nécessitaient jusqu'à présent des échafaudages, des grues ou des cordes. Dans ce domaine aussi, la Suisse est leader avec la startup Voliro. Outre le développement technologique mené par des startups, de nouvelles opportunités commerciales se créent pour la prestation de services par drones comme les prises de vue aériennes pour les sociétés immobilières, l'agriculture et les gestionnaires d'infrastructure.



Véhicules hautement automatisés

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



Les véhicules à automatisation partielle disposent de systèmes d'assistance leur permettant d'exécuter en autonomie certaines tâches de conduite (niveau 3). Dans des situations critiques, ces systèmes prévoient cependant une reprise du contrôle par le-la conducteur-riche. À un niveau d'automatisation élevée (niveau 4), le véhicule se déplace de manière autonome de A vers B dans une plage prédéterminée et se replace si nécessaire dans un état à faible risque. Ce n'est qu'au niveau 5 que le véhicule est capable d'assumer en toute situation la totalité des tâches de conduite.

État des lieux

Le développement de véhicules automatisés progresse vite, encouragé par des programmes publics et industriels. Les États-Unis, certains géants comme *Alphabet* ou *Baidu* ainsi que des coopérations de grands groupes automobiles jouent un rôle moteur. Avec sa «Roadmap 2019», l'Europe s'est fixé des objectifs ambitieux: les véhicules de tourisme et les véhicules utilitaires de niveau 3 et même 4 doivent bientôt être largement disponibles. Mais les experts tempèrent ces attentes, même si en novembre 2019 *Alphabet-Waymo* a testé en Arizona un véhicule autonome sans accompagnateur. La réalisation des niveaux 4 et 5 dépend de systèmes d'assistance avancés, dont la directive de sécurité de l'UE rendra certains obligatoires pour les nouveaux modèles à partir de 2022. L'introduction de véhicules de niveaux d'autonomie supérieurs devrait se faire par étapes, afin de pouvoir bénéficier de retours d'expérience. Des demandes croissantes de sauter les niveaux 3 ou 4 émanent cependant de la part des développeurs.

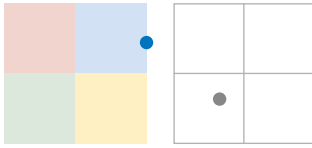
Le développement de systèmes automatisés pour le transport de personnes et de marchandises est un axe de recherche croissant de l'*ETH Zurich*, de l'*EPFL*, des hautes écoles spécialisées et des développeurs de capteurs, de systèmes d'analyse de sécurité, de logiciels et de véhicules spécialisés (p.ex. *Kyburz*). Avec la forte densité de son infrastructure de transports, son haut degré de mobilité et son expérience en matière de navettes autonomes, la Suisse joue un rôle croissant, en ce qui concerne un concept innovant de mobilité collective.

Perspectives d'avenir

Dans un premier temps, l'attention s'était concentrée sur les véhicules destinés au transport individuel. Aujourd'hui,

les efforts d'innovation sont centrés sur les véhicules spécialisés, par exemple des véhicules de livraison lents, des navettes et des flottes de taxis hors des centres-villes ainsi que des camions regroupés en convois routiers («pelotons» ou «platooning»). Un trafic mixte de véhicules traditionnels et autonomes en interaction avec d'autres usagers de la route est inévitable et présente des défis majeurs en termes de planification. En ce qui concerne la procédure d'autorisation de mise en circulation, contrairement à l'autocertification pratiquée aux États-Unis, l'Europe devrait s'en remettre à la solution déjà établie de la réception par type. Il reste à savoir quel niveau de sécurité devra concrètement être atteint et quels justificatifs devront être fournis. La mise à l'essai dans des conditions de trafic réelles étant trop coûteuse et fastidieuse, il faut trouver des alternatives: les efforts portent principalement sur le développement de scénarios critiques et les tests préliminaires sur bancs d'essai et dans des zones dédiées. Autres défis qui se précisent: les volumes de données colossaux (8 téraoctets par véhicule par heure) et la protection de ces véhicules hautement complexes face aux cyberattaques. L'opinion publique est ambivalente, oscillant entre attentes élevées (p.ex. gains de sécurité et de confort) et appréhensions profondes (p.ex. perte de contrôle).

Même si la Suisse ne dispose pas d'industrie automobile et de grands équipementiers, elle doit prendre le train en marche. Non seulement elle peut développer des solutions techniques spécialisées, mais elle peut aussi servir de laboratoire pour des solutions de mobilité innovantes et de nouveaux modèles commerciaux en cours de développement ou d'essai. La Suisse pourrait ainsi jouer un rôle pionnier: étant donné le marché lourd de plusieurs milliards qui se profile, un tel positionnement serait certainement avantageux.



Internet des objets

Felix Wortmann (Université de Saint-Gall)

Le terme «Internet des objets (Internet of Things, IoT)» désigne la connexion potentielle de chaque objet physique à l'Internet, entraînant une fusion des mondes physique et numérique et rendant possibles des produits et des services inédits. L'Internet des objets ne se concentre donc pas sur une technologie concrète mais sur la mise en réseau généralisée d'objets physiques. Parmi les domaines d'application concrets figurent p.ex. la ville intelligente («smart city»), l'habitat intelligent («smart home»), la fabrication intelligente («smart manufacturing») ou la mobilité intelligente («smart mobility»). Qu'il s'agisse de véhicules hautement automatisés, de maisons intelligentes, de moniteurs de forme physique à usage médical ou d'installations de production connectées: la puissance disruptive de l'Internet des objets modifiera en profondeur les logiques commerciales de nombreux secteurs.

État des lieux

De nombreuses applications IoT comme le suivi RFID dans la production ou le chauffage domestique connecté sont une réalité depuis déjà des années. Et pourtant, les entreprises manufacturières, fondement majeur de l'économie suisse, peinent tout particulièrement à mettre à profit l'Internet des objets. Le «paradoxe de la numérisation» décrit le phénomène mondialement observable selon lequel des investissements élevés dans la mise en réseau n'entraînent pas de hausse correspondante des rendements. En pratique, la question centrale est de savoir comment répondre à des problématiques client au moyen de prestations novatrices fondées sur l'Internet des objets. Cela paraît simple, mais pour de nombreuses entreprises de l'industrie manufacturière il s'agit là d'un changement de culture radical. On entend souvent dire à mots couverts: «Nous pouvons connecter mais l'IoT opère par le biais de services numériques – et notre entreprise ne pense tout simplement pas en termes de services». La recherche appliquée dans les établissements de l'enseignement supérieur et dans l'industrie se concentre donc de plus en plus sur la manière de traduire les nouvelles possibilités techniques en succès commercial.

Perspectives d'avenir

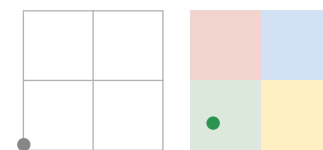
L'Internet des objets se développe en continu. L'exemple des véhicules connectés et hautement automatisés montre que l'IoT ne peut pas être considéré isolément mais qu'il faut tenir compte de deux autres technologies clé: d'une part l'intelligence artificielle, qui transforme les objets connectés en objets intelligents. Et d'autre part, la création de valeur s'effectue toujours plus dans des écosystèmes décentralisés. Les plateformes technologiques décentralisées comme p.ex. la blockchain permettent aux objets de communiquer de manière sûre et directe avec d'autres objets – sans recourir à un serveur central. À l'avenir, les objets connectés deviendront des acteurs de plus en plus autonomes et indépendants.

L'industrie manufacturière joue un rôle central en Suisse. Les répercussions de l'Internet des objets y sont considérables. Non seulement la mise en réseau permet d'améliorer les processus internes (usine intelligente), mais l'IoT rend aussi possibles de nouveaux produits et services (produits intelligents). Les années à venir montreront si l'industrie suisse parvient à se saisir de manière systématique des opportunités qu'offre la mise en réseau afin de défendre voire d'étendre sa position solide. De toute manière, la numérisation rebattra les cartes: des entreprises hautement innovantes, en particulier en Asie, se pressent sur le marché. L'exemple de *Tesla* montre bien qu'on ne peut pas se reposer sur son avance du moment. Il s'agit surtout de faire preuve de courage, de pragmatisme et d'esprit d'entreprise, et de savoir prendre le risque de tenter et de réaliser des choses nouvelles.



Robotique collaborative

Max Erick Busse-Grawitz (maxon motor ag)



Des robots qui collaborent avec les humains, les déchargent de tâches pénibles ou monotones, et rationalisent ainsi le processus de production – les robots collaboratifs, ou «cobots», peuvent répondre à ce besoin. Mais la technologie n’est pas encore à la hauteur de ces attentes. C’est pourquoi la robotique collaborative reste un espoir technologique et n’atteint pas encore le statut de technologie star.

État des lieux

Le terme «robotique collaborative» est défini précisément dans les normes ISO 10218 et ISO 15066, et comprend la collaboration sporadique ou continue entre personnes et robots. Ces collaborations impliquent une interaction directe et adaptée à la situation: soit le robot devient plus lent lorsqu’il avance dans la zone de travail de collaborateurs·rices humain·e·s, soit l’application robotique est si sûre que les cobots et les personnes peuvent travailler main dans la main. Le grand défi consiste à rendre les applications robotiques à la fois sûres et rentables: pour les lots de grande taille, les automates dédiés représentent la meilleure solution. Pour les lots de petite taille, il est bien moins coûteux de confier la tâche à un·e employé·e que de programmer un robot. Ne restent donc que les tailles de lot moyennes, pour lesquelles les automates ne se justifient pas et le déploiement de salarié·e·s serait trop coûteux. Aujourd’hui, cela représente un nombre limité d’applications: dans la plupart des cas, les cobots seraient trop chers et trop lents. Ceci est dû aux exigences de sécurité et au manque actuel de maturité technologique. Les exigences de sécurité d’ordre général sont définies entre autres dans les normes ISO 13849 ou IEC 62061 ainsi qu’ISO 10218-1 et -2, et elles sont précisées pour les robots collaboratifs dans la norme DIN ISO/TS 15066:2017-04. Cette dernière se fonde sur des approches et des solutions connues de la recherche scientifique mais n’ayant pas encore percé dans la pratique industrielle. Les déficits technologiques concernent

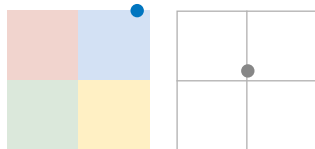
le contrôle de force rapide à faible inertie, les stratégies attendantes de commande en impédance et leur mise en œuvre dans des solutions robotiques industrielles facilement programmables. En revanche, des avancées ont été réalisées en trois points: les bras manipulateurs intelligents et les peaux robotiques intelligentes combinent capteurs et actionneurs. Des progrès ont été réalisés en matière de logiciels concernant la facilité d’utilisation des interfaces et la facilité de programmation. Par ailleurs, plusieurs fabricants proposent désormais des solutions intégrées avec des cobots sur des plateformes mobiles.

La situation en Suisse est toujours la même: il existe de nombreuses PME avec des petites tailles de lot, une variance et des coûts salariaux unitaires élevés, qui présentent donc de bonnes conditions pour l’utilisation de la robotique collaborative. Pourtant, tant en Suisse qu’à l’international, les robots collaboratifs ne s’imposent que lentement dans les activités de production. En Suisse, les ventes de cobots reculent et un certain désenchantement se fait sentir. Les cobots ne sont pas simplement une alternative aux collègues de travail qu’on pourrait programmer de manière intuitive. C’est pourquoi on trouve encore aujourd’hui des cobots dans des tâches à basse fréquence, comme la maintenance de pièces dans des processus de fabrication et de traitement par machine. Les tâches assignées aux cobots relèvent en règle générale des «4D»: dull, dirty, dangerous, disallowed. →

Perspectives d'avenir

L'utilisation de cobots deviendra intéressante lorsque les mentalités auront évolué et que les produits et l'infrastructure de production seront conçus en vue de processus de production automatisés («design for automation»). Cela peut par exemple s'effectuer au moyen de formes spécifiques ou de marquages adaptés aux caméras. Toujours est-il que les technologies clé nécessaires à une utilisation productive des cobots progressent constamment mais lentement. Des avancées sont prévisibles en matière de bras manipulateurs à souplesse de réaction intégrée et mesure de force rapide, de reconnaissance d'objet moins coûteuse

et plus robuste, et de programmabilité plus intuitive. Avant tout achat, les entreprises de toute taille devraient discuter de ces sujets avec d'éventuels partenaires de recherche, en particulier les hautes écoles spécialisées actives dans le domaine de la robotique collaborative. Celles-ci proposent des approches efficaces pour réduire les coûts et améliorer la robustesse du processus de production, ou la possibilité d'évaluer les robots de manière neutre et indépendante. Les axes de recherche à long terme sont la programmation intuitive par tâches et le travail «main dans la main» entre robots et personnes avec reconnaissance d'intention et ajustements dynamiques.



Apprentissage automatique

Alessandro Curioni et Patrick Ruch (IBM Research – Zurich)

L'apprentissage automatique est une forme d'intelligence artificielle (IA). Il s'agit d'un processus d'entraînement d'algorithme logiciel au moyen de données d'exemple plutôt que de programmation explicite. Les algorithmes d'apprentissage automatique basés sur des réseaux neuronaux ont permis des avancées spectaculaires en matière de reconnaissance vocale, de traduction et d'analyse d'image. La combinaison de l'apprentissage automatique et du big data présente un potentiel de disruption pour différents secteurs.

État des lieux

Au cours des deux années passées, plusieurs avancées majeures ont été réalisées dans le domaine de l'apprentissage automatique, parmi elles les réseaux antagonistes génératifs («generative adversarial networks», GAN), qui produisent de la parole ou des vidéos artificielles et font avancer la compréhension des résultats de modèles d'IA. Il existe cependant plusieurs barrières à l'entrée, comme les compétences du personnel, la compréhension du cas d'utilisation commerciale et la disponibilité de données exploitables. Les outils qui fournissent des méthodes d'apprentissage automatique ont aussi fait des progrès importants, les services cloud simplifiant, accélérant et gouvernant son déploiement. La question de la confiance dans l'apprentissage automatique demeure un défi majeur. Il faut pouvoir s'assurer que les systèmes d'IA sont exempts de biais, livrent des résultats explicables, peuvent faire l'objet d'audits tout au long de leur cycle de vie et sont sûrs, sécurisés et respectueux de la protection des données.

La Suisse joue un rôle pionnier dans la recherche en IA et devrait par conséquent prendre les devants en matière de certification de systèmes d'IA, de promotion d'une IA exempte de biais et d'information du public. Les décideurs-politiques doivent donc agir pour répondre aux préoccupations principales concernant la présence de biais, l'éthique, l'explicabilité, la confidentialité et la sécurité de l'IA. En 2019, le Conseil fédéral a publié une analyse des défis et des recommandations concernant l'IA en Suisse. Cette analyse souligne l'importance que les décideurs-politiques répondent aux défis nommés plus haut. Il faut lancer des initiatives pour renforcer les interactions entre parties prenantes académiques, économiques et politiques. Avec la définition de champs d'action et de responsabilités en Suisse, un pas décisif a été franchi en vue de l'adoption plus généralisée de l'apprentissage automatique. L'engouement suscité par les technologies de l'IA peut mener à des attentes irréalistes qui augmentent au final la probabilité d'échec des projets d'IA. Les entreprises doivent remédier à ce risque par l'établissement de stratégies d'IA averties et avisées. →

Perspectives d'avenir

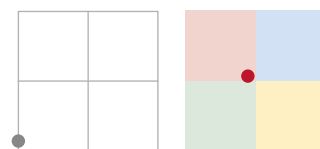
Le développement continu de l'apprentissage automatique en nuage devrait favoriser l'adoption de l'IA dans les entreprises, leur permettant d'intégrer et de déployer rapidement l'apprentissage automatique en bénéficiant d'un usage souple de ressources de traitement des données et de développement. Un potentiel disruptif réside dans la distribution d'IA à la périphérie des systèmes informatiques où les données sont collectées (page 32). Cela augmentera l'efficacité d'entraînement de réseaux neuronaux profonds, réduisant les besoins d'interaction humaine. Une fois embarquée en périphérie, l'IA ouvrira de nouveaux champs d'application incluant des robots, des machines et

des drones intelligents. Le degré d'automation que rend possible l'apprentissage automatique présente un potentiel de disruption pour les modèles commerciaux et les structures de coûts. D'ici 2024, les entreprises qui mettent à profit l'IA devraient réagir 50% plus vite que leurs pairs face aux sollicitations de leur clientèle, de leur concurrence, des autorités de régulation et de leurs partenaires.

Les entreprises suisses qui préparent l'adoption de l'IA devraient prioriser les cas d'utilisation, s'assurer l'accès aux compétences requises et établir une stratégie d'IA avisée afin de faire les bons choix de plateformes et de technologies en termes de gouvernance et de scalabilité.

Robots mobiles

Agathe Koller (OST)



La robotique mobile concerne des systèmes autonomes mobiles évoluant dans des environnements non structurés et dynamiques. Ces robots s'adaptent à des circonstances changeantes, évoluent dans leur environnement de façon indépendante, et agissent de manière autonome et ajustée à la situation. La robotique mobile couvre un large éventail d'applications en intérieur et en extérieur et comprend des robots terrestres, volants, sous-marins et marcheurs.

État des lieux

Actuellement, la plupart des robots sont déployés de manière stationnaire et dédiés à des applications industrielles précises. Les avancées dans la technologie des capteurs, les systèmes de contrôle et de commande et la mise en réseau, couplées à une baisse des prix, permettent d'automatiser toujours plus de processus avec souplesse et flexibilité au moyen de systèmes robotiques mobiles. L'utilisation de robots mobiles augmente en particulier dans le domaine de la logistique, où ils assurent le transport de marchandises dans les centres de production et de distribution. À l'aide de multi-capteurs, d'algorithmes de navigation et de commande, les robots mobiles évoluent de manière autonome dans les ateliers de production. Ils prennent des décisions de manière indépendante. Ces capacités cognitives jouent aussi un rôle important pour d'autres domaines d'application prometteurs comme l'exploration, l'inspection ou la maintenance d'installations.

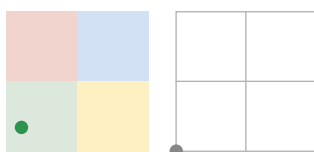
La Suisse joue un rôle clé dans le développement de solutions robotiques mobiles. Les principaux axes de recherche incluent la capacité de perception et d'adaptation des systèmes mobiles. Les hautes écoles et les universités suisses, en particulier l'*ETH Zurich* et l'*EPFL*, sont à la pointe internationale dans ces sujets. De nombreuses startups se sont créées en Suisse dans le domaine de la robotique mobile.

Perspectives d'avenir

À l'avenir, les systèmes robotiques mobiles pourront effectuer des tâches de moins en moins spécifiques. Ils disposeront des capacités leur permettant de se configurer eux-mêmes, permettant au même robot d'accomplir différentes tâches et de couvrir des besoins changeants. Dans les activités de production, les robots mobiles travailleront de manière collaborative au sein d'équipes hybrides personnes-robots. Les lignes de production plutôt statiques deviendront ainsi des unités dynamiques et autoconfigurables. Des innovations en matière d'intelligence artificielle et de technologie de navigation augmenteront nettement la performance et la pertinence de la robotique

mobile. Les domaines d'application futurs incluent en particulier la sécurité et l'agriculture. Les robots mobiles pourront être déployés pour la recherche et le sauvetage de personnes dans des zones de catastrophe ou pour la protection des cultures et le désherbage. D'autres domaines d'application sont en cours d'étude, comme p.ex. les robots d'assistance, qui facilitent le quotidien de personnes en situation de handicap physique.

L'utilisation croissante de robots mobiles a le potentiel de modifier en profondeur de nombreux secteurs économiques, parmi eux le commerce, la production industrielle, l'agriculture, la logistique, la technique médicale et les transports. La robotique influera également sur le quotidien dans la vie privée. Le déploiement des robots mobiles nécessite la mise en place de normes de sécurité homogènes ainsi que de conditions cadre éthiques, juridiques et sociales. Leur utilisation dépendra par ailleurs fortement de l'acceptation des utilisateurs-rices.



Nouvelle architecture Internet SCION

Adrian Perrig, Ilona Wettstein et Shancong Yu (ETH Zurich)

La numérisation croissante de toutes les sphères de vie et de tous les domaines de l'économie requiert un Internet sûr. L'Internet repose actuellement sur le Border Gateway Protocol (BGP), quasiment inchangé depuis 30 ans, qui assure le routage des paquets de données. À chaque nœud du réseau, le protocole détermine le chemin vers le nœud suivant. Lorsqu'elles transitent par ces nœuds, les données peuvent facilement être attaquées, détournées ou copiées. Il existe bien certaines solutions pour répondre aux problèmes que présente ce protocole, comme par exemple l'installation de lignes privées. Mais ces solutions sont coûteuses et manquent de souplesse. SCION est une nouvelle architecture Internet qui s'appuie sur et va au-delà de l'infrastructure de réseau de l'Internet. L'itinéraire qu'empruntent les paquets de données pour transiter est défini dès leur expédition. Il n'est donc pas possible de réorienter ou de détourner les données. Certains nœuds peuvent être évités de manière ciblée. SCION améliore ainsi grandement la fiabilité de la transmission, ce qui apparaît parfois aussi dans une vitesse de transmission supérieure. Le BGP pourrait donc devenir superflu. Cette nouvelle architecture Internet peut être déployée à l'échelle souhaitée et elle est extensible par-delà les frontières nationales et institutionnelles.

État des lieux

Les entreprises ont besoin de pouvoir expédier des données de manière sûre par des réseaux vastes et ramifiés. Mais l'étendue et la ramification des réseaux rendent ces envois vulnérables aux perturbations et aux attaques. La sécurité de l'infrastructure est aussi un enjeu pour les acteurs de petite taille, par exemple lorsqu'ils souhaitent mettre en place des possibilités de paiement électronique mais ne disposent pas des ressources financières nécessaires pour installer leur propre ligne.

Les fondements de SCION ont été développés à l'*ETH Zurich*. Entre-temps, des groupes de recherche d'autres universités ont également participé aux efforts de développement. Au sein d'un consortium, des fournisseurs d'accès à Internet suisses et étrangers opèrent comme in-

tégrateurs et fournisseurs de prestations. La Suisse est pionnière non seulement dans le développement mais aussi dans l'utilisation de SCION. Plusieurs banques suisses utilisent SCION pour un échange de données sûr et hautement disponible. Le gouvernement utilise ainsi SCION pour une communication sûre avec les ambassades. Des efforts sont actuellement en cours pour établir au moyen de SCION des réseaux sectoriels permettant un échange d'informations sûr par-delà différents fournisseurs d'accès.

Perspectives d'avenir

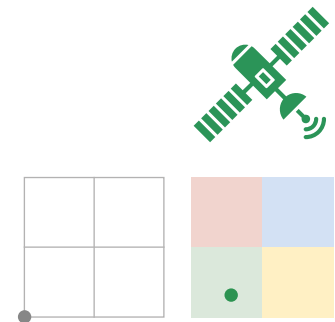
Dans les cinq années à venir, il s'agira de continuer à développer SCION en vue d'applications IoT (Internet des objets). Pour que SCION s'établisse et prenne la relève du BGP, des fournisseurs d'accès à Internet du monde entier doivent ajouter SCION à leur gamme de produits. Les pre-

miers fournisseurs d'accès à Internet internationaux soutiennent SCION et proposent désormais les produits correspondants. Des préparatifs sont en cours avec d'autres fournisseurs d'accès à Internet. Il est prévu d'établir une fondation avec pour objectif de coordonner les efforts de développement futurs et de mettre en place un standard de certification.

Comme pour beaucoup de projets de logiciels open source, le développement et l'implantation de SCION sont tributaires de la formation d'une communauté internationale active. Face à ce défi, le regroupement de certains secteurs économiques ou de certains pays en un espace de données sûr basé sur SCION pourrait s'avérer précieux. La Suisse pourrait jouer un rôle pionnier dans la mise en place de tels réseaux sectoriels.

Télécommunications optiques spatiales

Reinhard Czichy (Synopta)



Le terme «télécommunications optiques spatiales» (ou «optical space communication») désigne la transmission de données entre satellites ou de satellites 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 la largeur de bande de transmission disponible – dépasse largement celle de systèmes à fréquence radio: la longueur d'onde laser de 1,55 μm correspond par exemple à une fréquence de 270 THz; les systèmes à radiofréquence commerciaux des satellites travaillent aujourd'hui dans des plages allant jusqu'à 40 GHz. Cette technologie ouvre donc l'accès à de nouvelles ressources en termes de largeur de bande.

État des lieux

La mise à l'essai expérimentale de télécommunications optiques spatiales à taux de transfert > 1 gigabit/s entre satellites en orbite terrestre basse (OTB) 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 (GEO). Aujourd'hui, on trouve en service deux satellites GEO en tant que stations relais et quatre satellites d'observation de la Terre en OTB équipés de systèmes de transmission optique de données. En parallèle au développement continu de ces systèmes aux États-Unis et en Europe, ces dernières années des technologies ont été développées pour la transmission de données à taux de transfert très élevé (téra-bit/s) entre stations terrestres et satellites. Elles permettent une architecture système inédite pour la distribution des données. Les défis portent sur les commandes à distance hautement complexes du système et certains aspects de la technologie laser et de l'optique.

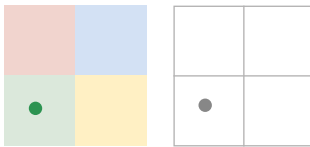
Les télécommunications optiques spatiales regroupent un grand nombre de technologies complexes (laser, technologie des matériaux, mécanique, microélectronique, optique et logiciels) pour lesquelles la Suisse dispose de fortes compétences. La recherche et l'industrie suisses se sont impliquées dans ces développements dès le début, faisant valoir avec succès leurs compétences respectives et s'assurant ainsi un bon positionnement. Les défis qui se posent pour l'industrie suisse résultent principalement du soutien important dont bénéficie la concurrence étrangère dans le cadre de programmes technologiques nationaux.

Perspectives d'avenir

Outre des applications pour les agences spatiales et les services gouvernementaux, le succès rencontré lors de l'utilisation de cette technologie dans l'espace encourage la poursuite des efforts de développement portant sur des constellations de satellites commerciaux à liaisons optiques 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'entre les satellites et les 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 connaissent un essor fulgurant. Cela concerne la mise en place et l'exploitation de réseaux de satellites, le développement d'équipements et de composants (terminaux optiques pour satellites et stations terrestres), mais aussi le domaine des services et le développement d'applications innovantes.

L'industrie suisse peut fournir des composants et des équipements de haute qualité à destination de satellites ou de stations terrestres, ainsi que mettre en place des modèles commerciaux performants pour la gestion et l'exploitation d'informations en temps réel. Néanmoins, un engagement fort et ciblé du gouvernement suisse demeure nécessaire pour renforcer la compétitivité à l'international et développer des produits commercialisables.



Informatique quantique

Andreas Fuhrer et **Thilo Stöferle**

(IBM Research – Zurich, Société Suisse de Physique)

Comparés à la technologie numérique dominante, les calculateurs quantiques utilisent systématiquement les principes de base de la mécanique quantique (superposition et intrication quantiques).

État des lieux

Certains problèmes resteront insolubles même avec les plus grands ordinateurs classiques car les ressources de calcul nécessaires pour la solution (mémoire, temps de calcul) augmentent de manière exponentielle avec la taille du problème. Par contraste, les ressources de calcul requises par les ordinateurs quantiques pour de tels problèmes n'augmentent que de manière modérée. On peut citer à titre d'exemple des tâches d'optimisation complexes, pour lesquelles le nombre de configurations possibles à vérifier augmente si rapidement avec la taille du problème que les ordinateurs conventionnels n'ont aucune chance d'y parvenir. Pour certains problèmes, les ordinateurs quantiques peuvent vérifier toutes ces configurations en même temps, présentant donc un potentiel énorme par rapport aux systèmes classiques. Au début, ils seront déployés dans les centres de données en complément aux ordinateurs centraux classiques.

Il existe aujourd'hui différentes plateformes matérielles: pièges à ions, circuits supraconducteurs, boîtes quantiques semi-conductrices et systèmes photoniques. Ces dernières années, la recherche a énormément progressé en ce qui concerne le contrôle de ces systèmes quantiques. Il existe de premiers ordinateurs quantiques commerciaux d'*Alpine Quantum Technologies*, *Google*, *Honeywell*, *IBM*, *IonQ* et *Rigetti* comptant jusqu'à environ cent qubits. Même si leur performance est encore limitée

par l'instabilité inhérente aux systèmes quantiques, ils permettent déjà de résoudre de premiers problèmes difficiles à résoudre avec des ordinateurs classiques. À l'international, un écosystème très actif a émergé. De premières applications sont à l'étude pour différents domaines et des chaînes logistiques sont en cours de mise en place pour des composants spécifiques aux différentes plateformes matérielles. Le positionnement de la Suisse en recherche quantique est excellent. Cependant, au-delà de plusieurs grandes entreprises, seules quelques PME sont actives dans ce domaine, surtout en tant que sous-traitantes de composants de pointe pour les systèmes informatiques quantiques complexes.

Perspectives d'avenir

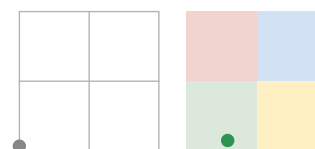
Dans les années à venir, le développement de hardware se concentrera sur l'augmentation du nombre de qubits et cherchera à réduire voire idéalement éliminer entièrement, les erreurs pouvant apparaître lors des calculs. Du côté des applications, on assiste à des activités intenses de développement d'algorithmes répondant à des problèmes d'optimisation des industries chimique, financière, pharmaceutique, logistique, des transports et autres. La complexité des défis à relever est telle que les prochaines étapes de développement des calculateurs quantiques seront probablement assurées par des collaborations de recherche de grande envergure et des centres de recherche industriels. →

La Suisse doit faire attention à ne pas passer à côté de cette évolution. À l'international, il existe encore un certain potentiel pour les PME et les startups suisses dans le domaine des logiciels quantiques et dans certains domaines du matériel informatique quantique. Dans les cinq années à venir, l'utilisation d'ordinateurs quantiques en cloud devrait passer de la recherche et de l'enseignement à de premières applications industrielles. Il est important de s'impliquer et d'agir dès maintenant, et cela ne vaut pas seulement pour les grandes entreprises de l'industrie

financière et pharmaceutique. Les entreprises de plus petite taille devraient elles aussi vérifier l'intérêt que pourraient présenter les ordinateurs quantiques pour accomplir des tâches nécessitant une forte puissance de calcul. En ce qui concerne les fabricants et les constructeurs, en particulier dans les domaines de la haute fréquence, des matériaux, de la microtechnologie et de l'optique, ils devraient étudier l'utilisation possible de leurs composants de pointe dans les chaînes logistiques des ordinateurs quantiques, et le cas échéant les optimiser à cet effet.

Cryptographie quantique

Bernhard Tellenbach (ZHAW)



Lorsqu'il s'agit de protéger des informations et des liaisons de communication sensibles, il est essentiel de disposer de méthodes cryptographiques sûres. La cryptographie quantique joue un rôle important pour faire face aux menaces posées par les ordinateurs quantiques. D'une part, elle permet des procédés de chiffrement qui reposent sur des lois physiques concernant l'état de particules de lumière (quanta) et qui contrairement aux procédés actuels sont résistants aux capacités des ordinateurs (quantiques). Dans ce contexte, la distribution quantique de clé («quantum key distribution», QKD) constitue une technologie centrale qui permet de convenir d'une clé de manière sécurisée par un canal qui ne l'est pas. D'autre part, la cryptographie quantique permet aussi le développement de procédés au moyen desquels les ordinateurs quantiques peuvent attaquer de manière beaucoup plus efficace que les ordinateurs classiques certains des standards cryptographiques les plus répandus aujourd'hui. Pour contrer cette menace, on a développé des 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. Ces procédés sont réunis sous le terme collectif de cryptographie post-quantique («post-quantum cryptography», PQC).

État des lieux

Des progrès importants ont été accomplis ces derniers temps. La QKD fait face à un facteur limitant majeur, qui est la distance maximale à laquelle elle peut opérer avec succès. Ces dernières années, l'utilisation de QKD a été étendue à des distances longues (plus de 500 km) et à des territoires vastes (2000 km²) ainsi qu'à des taux de transfert élevés (10 Mbits/s). De nouveaux protocoles ont été proposés pour pouvoir assurer la distribution quantique de clé sur des distances encore plus longues. D'autres avancées concernent la sécurité de la distribution quantique de clé face à des attaques au niveau des détecteurs. Malgré ces avancées et la réalisation de certains jalons comme l'ouverture d'un nouveau segment dans le réseau quantique du Royaume-Uni, l'utilisation pratique de la

QKD reste très limitée. Le déploiement à grande échelle de la distribution quantique de clé sans qu'il soit nécessaire de faire confiance aux gestionnaires du réseau QKD nécessiterait la mise en place de répéteurs quantiques.

Dans le domaine de la cryptographie post-quantique, le *National Institute of Standards and Technology (NIST)* américain continue à travailler au processus de standardisation pour signatures à résistance quantique, chiffrement asymétrique à clé publique et algorithmes d'échange de clé. Malgré la participation de la Suisse à la course à de nouveaux standards PQC et le leadership d'*ID Quantique* dans le domaine de la QKD, la cryptographie quantique ne joue encore qu'un faible rôle pour le pays. →



Perspectives d'avenir

S'il existe déjà différents produits et solutions utilisant la cryptographie post-quantique ou intégrant du moins une trajectoire de mise à niveau, il est encore difficile de savoir quelles approches s'imposeront. Les procédés publiés à ce jour l'ont été à titre purement informatif. Un jalon important est attendu pour 2022–2024 avec la finalisation par le *NIST* du processus de standardisation pour les procédés de signature et de négociation de clé à résistance quantique. Ces procédés devraient alors être intégrés à des solutions de sécurité courantes et parvenir d'ici 2030 à un degré de diffusion significatif. L'année 2030 constitue aussi l'horizon le plus proche auquel le gouvernement américain veut avoir finalisé sa transition à la cryptographie post-quantique – ce qui semble indiquer que les ordinateurs quantiques devraient encore se faire attendre.

Le domaine de la distribution quantique de clé compte lui aussi déjà différents produits et solutions. Mais en raison de limitations diverses comme l'utilisation sur de longues distances, ils ne font pas encore l'objet d'un usage répandu. Malgré les avancées décrites, à court terme cette situation ne devrait pas beaucoup évoluer. Avec l'exposé de position publié en mars 2020 par le *National Cyber Security Centre (NCSC)* britannique, des voix critiques s'élèvent par ailleurs pour déconseiller toute utilisation actuelle de la distribution quantique de clé.

Malgré leur participation à la course aux nouveaux standards PQC, pour les chercheurs-ses suisses l'importance de la cryptographie post-quantique demeure faible. Pour l'économie, la conversion aux procédés de la cryptographie post-quantique crée des opportunités pour des produits et des services innovants. La situation est inverse pour la distribution quantique de clé: malgré la position dominante d'*ID Quantique*, son importance économique pour la Suisse est actuellement plutôt faible et le restera dans les années à venir. En revanche, les activités de recherche augmentent, surtout si l'on tient compte de la recherche concernant les fondements de la QKD. Il s'agit de maintenir le leadership technologique dans le domaine de la distribution quantique de clé.

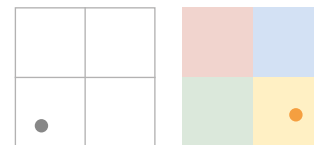


Énergie et environnement



Propulsions alternatives pour véhicules

Christian Bach (Empa)



Environ 1,3 milliard de véhicules sont aujourd’hui immatriculés dans le monde – environ 90% d’entre eux sont dotés de moteurs essence et diesel conventionnels, les autres de systèmes de propulsion alternatifs. Suivant la directive européenne 2014/94/EU, ces derniers comprennent les véhicules à propulsion électrique partielle et complète, et tous les véhicules opérant avec des carburants autres que l’essence ou le diesel. Aujourd’hui, ils comprennent 40% de véhicules opérant à l’éthanol/méthanol, 40% au gaz/gaz liquide et 20% de véhicules hybrides/électriques.

État des lieux

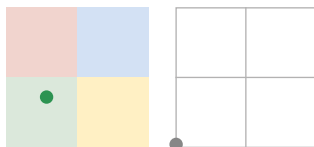
La part des propulsions alternatives devrait fortement augmenter. On peut distinguer deux principaux axes de développement: l’électrification des systèmes propulsifs et l’électrification des carburants. L’électrification des systèmes propulsifs a été initiée par des avancées en matière de technologie de batterie, rendant possibles des autonomies et des taux de charge autrefois impensables. Elle s’étend de l’hybridation simple, à l’hybridation complète, jusqu’aux systèmes purement électriques à batterie ou pile à combustible. Les axes de recherche principaux se situent dans l’optimisation de la gestion énergétique comme la récupération ou l’utilisation des rejets thermiques pour chauffer l’habitacle, l’optimisation de la gestion de recharge et le développement de matériaux non critiques à capacité de stockage plus élevée pour les batteries.

L’électrification des carburants couvre la production d’hydrogène et d’hydrocarbures de synthèse. Dans une première étape, de l’électricité renouvelable est utilisée pour décomposer l’eau en oxygène et en hydrogène. Cet hydrogène est ensuite utilisé soit directement dans des véhicules à hydrogène soit indirectement par transformation en hydrocarbure avec du CO₂ pour la propulsion de véhicules hybrides ou conventionnels. En raison de la sensibilité élevée aux coûts de l’énergie, les efforts de recherche portent principalement sur l’augmentation du rendement.

Perspectives d’avenir

Tous les systèmes qui reposent sur des énergies renouvelables parviennent à des niveaux d’émissions de CO₂ semblablement faibles. L’évolution du marché dépend donc en premier lieu des coûts globaux. Pour tous les systèmes de propulsion, ceux-ci sont en grande partie externes aux véhicules eux-mêmes et se situent par exemple dans l’infrastructure ou dans le stockage et la mise à disposition de l’énergie. En tenant compte de tous les aspects, on peut s’attendre pour l’utilisation principalement locale/régionale de voitures de tourisme et de véhicules utilitaires à une part élevée de propulsions électriques (batterie et pile à combustible). Pour les utilisations interrégionales, longue distance ou impliquant des charges lourdes, les véhicules devraient à l’avenir opérer au moyen de carburants de synthèse.

La Suisse est technologiquement bien positionnée dans ces deux axes de développement tant en matière d’institutions de recherche que d’entreprises industrielles. Il est décisif de maintenir une ouverture technologique et des conditions concurrentielles afin de promouvoir au mieux les innovations dans les deux domaines.



Systèmes énergétiques décentralisés

Kristina Orehounig (Empa)

Les systèmes énergétiques décentralisés se basent sur le regroupement local de plusieurs bâtiments pour l'utilisation commune de différents vecteurs énergétiques (p.ex. biomasse, gaz, géothermie, mazout ou énergie solaire) et de différentes technologies de conversion et de stockage (p.ex. batteries, photovoltaïque ou couplage chaleur-force). Un tel système énergétique permet de gérer de manière optimale la production et la demande d'énergie en termes tant spatiaux que temporels, et de réduire les pointes de charge.

État des lieux

Les efforts de recherche et de développement portent actuellement entre autres sur l'identification, la quantification et l'exploitation des potentiels de flexibilité du réseau électrique. Comment rendre plus souples et flexibles les besoins et la production d'énergie afin d'éviter de devoir développer encore le réseau et rendre possible l'intégration des sources d'énergie fluctuantes que sont le soleil et le vent? Pour appréhender le plein potentiel des systèmes énergétiques décentralisés, il faut prendre en compte dans leur globalité les secteurs du gaz, de la mobilité, de l'électricité et de la chaleur. La mise à disposition locale de prestations comme l'énergie de réglage, mais aussi un large éventail d'options de transformation d'énergie qui peuvent être utilisées de diverses manières pour les bâtiments, la mobilité ou l'industrie, (p.ex. power-to-X, donc la conversion d'électricité en vecteurs énergétiques gazeux ou liquides), donnent la mesure du potentiel que présente le couplage des secteurs. Les coûts d'investissement des systèmes énergétiques décentralisés sont actuellement encore très élevés. À l'avenir, grâce aux effets d'échelle et à l'utilisation de sources d'énergie renouvelables, les coûts de revient de ces systèmes devraient cependant se réduire de manière massive.

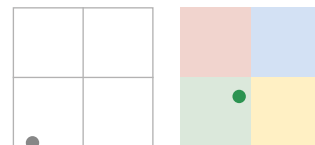
Le Conseil fédéral vise l'ouverture du marché de l'électricité pour encourager l'innovation en matière d'approvisionnement en énergie, renforcer les énergies renouvelables indigènes et atteindre les objectifs climatiques, car la Suisse accuse un retard par rapport à ses voisins européens dans le développement des énergies solaire et éolienne. Les exigences réglementaires constituent une difficulté non encore résolue pour l'ouverture plus poussée du marché de l'électricité. En revanche, de premiers modèles commerciaux pour les systèmes énergétiques décentralisés ont été mis en place depuis 2018 avec l'autorisation de communautés d'autoconsommation, qui produisent et gèrent du courant solaire de manière autonome au sein de regroupements locaux.

Perspectives d'avenir

Si l'ouverture plus poussée des marchés de l'énergie et le couplage des secteurs devaient s'effectuer dans les années à venir, les systèmes énergétiques décentralisés gagneront en importance, créant de nombreuses opportunités nouvelles pour les entreprises suisses. On peut citer à titre d'exemples le développement, la planification et l'intégration de systèmes énergétiques renouvelables, de technologies de stockage, de conversion et de réseau, le domaine de l'habitat intelligent, mais aussi de nouveaux modèles de distribution, des solutions de contracting et autres services énergétiques permettant de faire progresser la transformation du système énergétique. En parallèle, les villes et les communes joueront un rôle croissant dans la mise en œuvre de ces développements, car ces derniers augmentent massivement leur marge de manœuvre dans le domaine de l'énergie.

Géothermie

Katharina Link (Géothermie-Suisse)



L'énergie géothermique est de la chaleur stockée dans le sous-sol. Des températures supérieures à 1000 °C prévalent sur plus de 99% de la masse du globe terrestre. La géothermie permet donc d'accéder à une énergie non émettrice de CO₂ – et ce à tout moment. La géothermie hydrothermale exploite l'eau chaude présente naturellement dans certaines couches terrestres. En revanche, pour la géothermie pétrothermale, de l'eau est pompée dans les profondeurs du sol afin d'y créer ou d'y élargir des passages artificiels. Les deux technologies opèrent suivant un principe circulaire: l'eau chaude est pompée des profondeurs vers la surface par un premier forage, la chaleur en est extraite à des fins de production d'électricité et/ou d'énergie thermique, et l'eau refroidie est réacheminée vers le sous-sol par un deuxième forage. Plus l'emplacement du réservoir est profond, plus la température de l'eau est élevée. Jusqu'à environ 500 mètres et 30 °C, on parle de géothermie de faible profondeur pour chauffer et refroidir les bâtiments. Les sondes géothermiques en constituent l'utilisation la plus courante. La géothermie de moyenne profondeur (jusqu'à 3000 mètres et environ 100 °C) sert à chauffer des immeubles de bureaux, des sites industriels et des quartiers entiers, ou à alimenter des réseaux de chaleur à distance. Enfin, la géothermie de grande profondeur (à partir de 3000 mètres et au-delà de 120 °C) peut servir à produire de l'électricité.

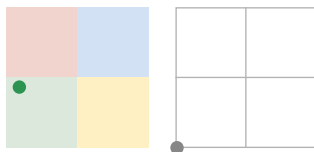
État des lieux

Rapporté à sa population, la Suisse a le pourcentage le plus élevé au monde de sondes géothermiques, avec une tendance à la hausse qui se maintient. Aujourd'hui, environ 4% de la chaleur nécessaire au chauffage et à la production d'eau chaude provient de la géothermie. Il n'existe pas encore de statistiques concernant l'utilisation de la géothermie à des fins de climatisation. Les installations géothermiques de faible profondeur sont un élément essentiel pour la mise en place de réseaux thermiques intelligents: les réseaux dits d'anergie peuvent approvisionner une zone qui s'y prête en froid comme en chaleur. La Suisse est à la pointe mondiale de la technologie dans ce domaine. En revanche, les installations géothermiques de moyenne profondeur y sont encore rares, alors même que cette technologie est bien établie dans nos pays voisins et dans de nombreux autres pays à travers le monde. Les installations pétrothermales n'existent quant à elles qu'à l'étranger.

Perspectives d'avenir

Les installations hydrothermales sont bien établies dans le monde entier, mais elles dépendent des ressources naturelles d'eau chaude disponibles dans les sous-sols. La technologie pétrothermale permet de s'affranchir de cette dépendance. Elle se situe donc au cœur des efforts de recherche et de développement ainsi que de projets pilote et de projets de démonstration. La Suisse est l'un des pays les plus actifs dans ce domaine.

Dans les années à venir, les projets suivants de géothermie hydrothermale et pétrothermale sont prévus en Suisse: *AGEPP*, *Energie Vinzel*, *Geo2Riehen* et *Haute Sorne*. À Genève, de premiers forages hydrothermaux de moyenne profondeur sont en cours pour un approvisionnement en chaleur à distance. Grâce à la nouvelle loi sur l'énergie, des investissements importants sont consacrés à la recherche en Suisse. Environ 80 chercheurs-ses travaillent actuellement au *Bedretto Underground Laboratory for Geoenergies*. Leurs projets d'envergure internationale améliorent les procédés technologiques et font nettement baisser les coûts. Le potentiel de la géothermie en Suisse est énorme pour tous les types d'utilisation. Au fil des activités de recherche, la géothermie de moyenne et de grande profondeur s'établira aussi en Suisse. Elle joue un rôle important pour l'atteinte des objectifs climatiques et contribue de manière significative à la création de valeur locale.



Photosynthèse artificielle

Greta Patzke (Université de Zurich)

On qualifie de photosynthèse artificielle les procédés qui utilisent la lumière du soleil pour produire des combustibles. Ces procédés imitent la photosynthèse naturelle, c'est-à-dire le processus par lequel les plantes produisent de la biomasse à partir d'eau et de dioxyde de carbone. Dans la photosynthèse artificielle, l'eau est décomposée en hydrogène et en oxygène et le CO₂ est réduit pour générer des produits de base. Contrairement à d'autres technologies basées sur la lumière, comme par exemple le photovoltaïque ou la production de combustible thermo-chimique solaire, les procédés de photosynthèse artificielle se passent d'ajout de biomasse ou de sources externes d'énergie électrique.

État des lieux

Les «feuilles artificielles» dans lesquelles se déroulent ces processus chimiques nécessitent la maîtrise de processus complexes. La lumière du soleil doit être utilisée de manière efficace pour produire les différents porteurs de charge pour les procédés chimiques. Ces porteurs de charge actionnent les processus de production de combustible en décomposant les molécules d'eau ou de CO₂. La recherche actuelle en photosynthèse artificielle se concentre, dans une grande partie, sur la composition photoélectrocatalytique et aussi le développement de systèmes hybrides. Ces derniers utilisent des constats de la biologie synthétique avec pour objectif de concevoir de nouveaux composants moléculaires. À travers le monde, plus de cent groupes de recherche sont actifs dans le domaine de la photosynthèse artificielle et d'autres domaines apparentés, travaillant à en comprendre les principes de base et élaborant des prototypes. Le concours *Fuel from the Sun: Artificial Photosynthesis*, lancé par l'UE en 2017, a pour objectif de faire avancer l'état de développement actuel. Les efforts de recherche portent aussi sur les questions des coûts, de l'efficacité et de la stabilité des matériaux impliqués.

Perspectives d'avenir

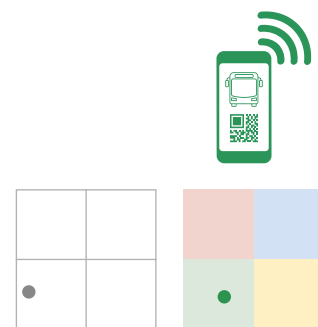
L'objectif est d'augmenter dans un avenir proche la capacité de rendement à environ 10% d'efficacité de conversion solaire-hydrogène. D'ici 2050, l'ambition est d'augmenter le rendement à 30%. À l'avenir, la photosynthèse artificielle pourrait bénéficier des recherches menées en matière de captage de CO₂ et du développement de composants photovoltaïques. Le stockage direct d'éner-

gie solaire dans des combustibles et dans d'autres produits chimiques a le potentiel d'être plus efficace que les procédés basés sur la biomasse. La conversion directe d'énergie solaire évite en outre d'avoir à opérer des arbitrages entre la production de denrées alimentaires et la production de carburant.

La recherche et les entreprises suisses sont idéalement positionnées pour jouer un rôle de premier plan dans le développement de technologies disruptives de conversion directe solaire-hydrogène, même s'il ne s'agit là que d'une étape intermédiaire vers la production durable d'ammoniac et d'autres matières premières essentielles. Les *Programmes nationaux de recherche* suisses dans le domaine de la recherche énergétique, combinés à un nombre croissant de coopérations de recherche internationales, forment une base solide pour de futures avancées conceptuelles. Dans le domaine apparenté de l'ingénierie solaire thermo-chimique, la Suisse est à la pointe mondiale, et on a réalisé ces dernières années des bioréacteurs technologiquement aboutis et d'autres projets de conversion d'électricité en gaz. En tant que petit pays, la Suisse peut fortement bénéficier de technologies comme la photosynthèse artificielle afin de différencier encore son portefeuille énergétique et de renforcer son indépendance. Le domaine de la photosynthèse artificielle présente en outre de nombreuses opportunités d'exporter des innovations. À terme, ces innovations pourraient permettre de traiter l'eau. Des collaborations solides et pérennes entre les établissements de l'enseignement supérieur et les grandes entreprises sont nécessaires pour relever les défis à venir.

Concepts de mobilité

Thomas Küchler (Schweizerische Südostbahn AG)



Les concepts de mobilité ont pour ambition de réunir différents modes de transport en un service unique de manière simple et aussi complète que possible du point de vue des usagers·ères. Dans ce contexte, un rôle clé revient aux véhicules automatisés et partagés.

État des lieux

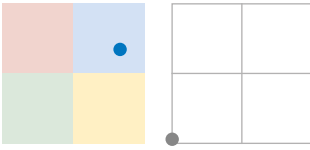
Après de premiers succès à Helsinki, Singapour et Vienne, les concepts de mobilité innovants n'ont connu qu'un essor marginal ou ont dû être abandonnés en raison d'un manque de succès commercial. Dans l'ensemble, aucune avancée notable n'est à signaler. Les véhicules automatisés pourraient changer la donne. Mais les constructeurs automobiles ont fortement revu à la baisse leurs ambitions de calendrier concernant leur déploiement, car la transition du mode de fonctionnement actuel à un mode d'opération automatisé sera moins simple que prévue. En particulier, le trafic mixte et l'augmentation progressive du degré d'automatisation constituent des écueils majeurs pour l'introduction de véhicules automatisés. Poussée par le débat sur le climat, l'industrie automobile se concentre donc sur le développement de nouvelles technologies de propulsion. Des constructeurs automobiles de premier plan ont suspendu leurs projets de mobilité malgré la notion persistante que ces concepts pourront contribuer de manière décisive à réduire les émissions de CO₂. Le défi principal auquel font face les nouveaux concepts de mobilité relève du morcellement du domaine des transports. Aujourd'hui, seuls les grands fournisseurs de services Internet disposent des conditions et des données nécessaires pour faire progresser la mobilité connectée; ce n'est pas le cas des compagnies de transports en commun ou des pouvoirs publics. Actuellement, la plupart des offres qui se créent sont donc axées principalement sur des intérêts commerciaux. Il existe également le risque que les pouvoirs publics aient trop peu d'influence sur les offres proposées.

Aucun des projets de mobilité initiés en Suisse (p.ex. l'application de mobilité de *CarPostal* ou *abilio*) n'a encore pu concrétiser durablement la mise en réseau des différents moyens de transport. Certains de ces projets ont été abandonnés. Actuellement, seuls des projets d'envergure régionale sont encore en développement. Outre un secteur des transports morcelé, l'un des principaux obstacles auxquels font face les solutions de mobilité concerne la viabilité de leur modèle commercial pour tous les acteurs impliqués. Les différents essais menés à bien indiquent que la mise en œuvre de nouvelles offres de mobilité nécessite une infrastructure de données neutre et désintéressée. La mise en place d'entités ad hoc a montré que la plupart de ces obstacles peuvent être surmontés.

Perspectives d'avenir

Les concepts de mobilité réglementés à l'échelle nationale peuvent apporter une contribution majeure à la maîtrise des défis qui se posent en termes d'aménagement du territoire, de protection de l'environnement et de gestion du trafic. Les obstacles à surmonter pour leur mise en œuvre sont moins d'ordre technique et commercial que d'ordre organisationnel.

Si la Suisse ne met pas rapidement en place un concept de mobilité réglementé à l'échelle nationale, il sera difficile d'éviter un glissement irrémédiable vers les groupes Internet internationaux. Le regroupement de toutes les ressources et projets pertinents du pays dans une initiative à gouvernance démocratique par la base créerait les conditions optimales pour la consolidation de concepts de mobilité réglementés à l'échelle nationale.



Production alimentaire durable

Erich Windhab (ETH Zurich)

La production alimentaire durable applique une approche systémique à l'ensemble de la chaîne de valeur en intégrant les aspects écologiques, économiques et sociaux. Il s'agit de parvenir tout d'abord localement puis globalement à un état d'équilibre dynamique. Il faut pour cela procéder à une analyse multidimensionnelle qui représente les différents critères de manière équilibrée tout au long de la chaîne de valeur.

État des lieux

La chaîne de valeur alimentaire s'étend de la production primaire de matières premières agricoles à la transformation alimentaire, à l'emballage, au stockage, au transport, à la distribution, à la vente et enfin à la préparation de repas et à leur consommation. Afin de tenir compte des aspects socio-économiques de la consommation d'aliments et de parvenir à une pertinence significative pour une analyse de durabilité globale, la chaîne de valeur devrait être complétée par les éléments de la digestion et de la santé. Car la mauvaise alimentation peut également impacter la durabilité: même si les aliments consommés sont produits suivant des critères de durabilité optimaux, une mauvaise alimentation engendre des maladies dont les répercussions et les traitements impactent négativement le bilan de durabilité. L'analyse axée sur l'aspect technologique ne tient pas compte de l'aspect de la santé, car celui-ci est traité dans l'article «Alimentation personnalisée». En 2020, l'*Agenda 2030* de l'ONU avec ses 17 objectifs de développement durable (ODD) a été perturbé par la pandémie du Covid-19 et certains objectifs semblent par conséquent inatteignables. Un ajustement des ODD est en cours de discussion.

Le système et l'industrie alimentaires suisses ont largement intégré les ODD à leurs objectifs. Depuis la publication des ODD en 2015, des progrès visibles ont été réalisés en Suisse. Il reste à voir si les répercussions de la pandémie du Covid-19 entraîneront une révision à la baisse ou une réorientation de certains objectifs. La combinaison de l'ODD 3 («Bonne santé et bien-être») et de l'ODD 12 («Modes de consommation et de production durables») fait émerger de nouveaux axes de travail et modèles commerciaux, qui accordent aussi une importance plus grande à la prévention des maladies par l'alimentation. Ces compétences sont disponibles dans l'industrie suisse et devraient y être plus fortement activées.

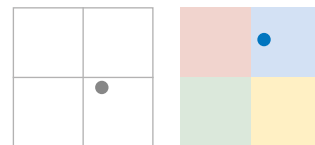
Perspectives d'avenir

D'un point de vue technologique, il est possible d'aménager les chaînes de valeur alimentaires de manière écologiquement et économiquement plus durables au moyen d'une meilleure intégration, interaction et flexibilisation de ses composantes. Ceci nécessite des technologies transversales qui tiennent compte de la diversité particulière de ces chaînes de valeur et des conditions spécifiques. Il s'agit par exemple de la robotique, des procédés de fabrication additive, de la biotechnologie, de la numérisation et de l'intelligence artificielle, de l'automatisation des processus et de la technologie de capteur en temps réel. Ces technologies transversales doivent éventuellement être adaptées aux exigences particulières de l'industrie alimentaire en termes d'hygiène et de sécurité. L'utilisation de la blockchain et de cryptomonnaies permet d'assurer transparence et traçabilité tout en garantissant la souveraineté des données et le respect de la sphère privée. À l'avenir, la gestion sûre de grands volumes de données jouera un rôle décisif dans l'ensemble des chaînes de valeur. Au niveau politique global, il faudrait envisager un élargissement du Codex Alimentarius afin d'attribuer des standards à la qualité nutritive et écologique des aliments.

Les entreprises suisses disposent de compétences majeures dans les technologies transversales nommées et occupent même dans certains cas une position dominante à l'international. La quasi totalité des quelque 2200 entreprises du secteur alimentaire suisse abordent les aspects de la durabilité dans leurs objectifs. Avec environ 62'000 emplois et un chiffre d'affaires annuel d'environ CHF 25 milliards, elles représentent 5,3% du PIB suisse. Une action concertée est nécessaire pour atteindre les objectifs de durabilité du pays et élaborer des potentiels commerciaux.

Photovoltaïque

Christophe Ballif (EPFL)



Le photovoltaïque (PV) est la transformation directe de lumière en électricité au moyen de cellules et de modules solaires. Il comprend également les composants qui permettent d'utiliser cette électricité, les aspects de l'installation comme les systèmes de montage et l'intégration dans les bâtiments, différents domaines d'application, ainsi que la planification, la surveillance, l'entretien, la prévision et l'intégration dans le système électrique.

État des lieux

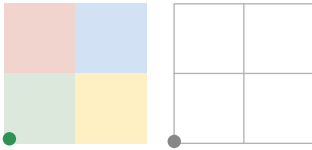
Le marché mondial du PV a poursuivi sa croissance continue avec presque 130 GW de nouvelles installations par an, atteignant au total près de 760 GW en 2020. Dans un basculement rapide, les modules c-Si monocristallins ont pris la relève des modules c-Si multicristallins. Grâce à la chute des prix du silicium monocristallin et à leur taux de rendement plus élevé, ils constituent aujourd'hui plus de 70% du marché. Plus de 90% des fabricants de cellules photovoltaïques ont adopté la technologie PERC («passivated emitter and rear cell»), qui permet un gain d'efficacité absolue de 1,5–2,5% au niveau des cellules. En 2020, les modules PERC courants atteignaient un taux de rendement de 19–20%. En parallèle, le prix du module a baissé à 0,2–0,25 USD/watt. Grâce à des améliorations dans la construction et l'exploitation de parcs solaires, dans les pays à fort ensoleillement le coût de production du courant solaire est extrêmement bas (moins de 2 centimes d'euro par kWh).

En Suisse, l'installation de PV a augmenté en 2020, avec 430–460 MW supplémentaire. Des scénarios récents indiquent que 35–50 GW de photovoltaïque (au lieu des 12 GW initialement prévus dans la Stratégie énergétique), combinés à l'électrification des transports et à l'utilisation de pompes à chaleur, permettraient de réaliser en grande partie la décarbonation du pays. Les toits et les façades des bâtiments en Suisse offrent un potentiel de production de 67 TWh de courant solaire (~65 GW de puissance). Mais des mesures supplémentaires sont nécessaires pour faire passer la mise en place d'installations PV en Suisse à plus de 1 GW/an.

Perspectives d'avenir

Plusieurs études récentes montrent comment le solaire, l'éolien et le stockage d'énergie peuvent devenir les piliers fondamentaux de la transition énergétique. Même si le photovoltaïque est aujourd'hui concurrentiel sur certains marchés, son encouragement réglementaire et financier est nécessaire pour augmenter le volume global des nouvelles installations à 1000 GW par an d'ici 2030, niveau minimum requis pour soutenir pleinement les efforts mondiaux de décarbonation. Dans les cinq années à venir, il faut donc non seulement augmenter continuellement la puissance des modules et accroître le marché des technologies de pointe pour modules en silicium, mais aussi intensifier les recherches en matière de technologies présentant un taux de rendement supérieur à 30% (par exemple les cellules solaires tandem/pérovskite) à bas prix. Il faut par ailleurs trouver des moyens d'injecter de grandes quantités de courant solaire dans le système énergétique et de l'y stocker à court et long terme.

Tant les instituts de recherche suisses que le secteur photovoltaïque high-tech pour les équipements et les composants occupent toujours une position solide à l'international, avec des innovations et des produits majeurs dans un environnement fortement concurrentiel. Une opportunité pour l'industrie suisse réside dans la conquête de marchés de niche en Suisse et en Europe pour les produits à forte valeur ajoutée. On peut citer à titre d'exemples les produits spéciaux à rendement ultra-élevé, les systèmes en îlot, les éléments PV intégrés aux bâtiments, colorés, flexibles ou légers, les dispositifs de mesure, les logiciels de gestion du courant solaire ou de simulation système, et les solutions de mobilité solaire pour véhicules et bateaux.



Recyclage de terres rares

Xaver Edelmann (World Resources Forum) et
Alessandra Hool (Entwicklungsfonds Seltene Metalle, ESM Foundation)

Des ressources sont considérées comme critiques lorsqu'elles présentent une importance économique majeure et une probabilité élevée de difficultés d'approvisionnement. Il existe de nombreuses listes de matières premières dites critiques. Presque toutes contiennent des métaux de haute technicité comme les terres rares, les métaux du groupe du platine, le cobalt, le niobium, le tantale, l'antimoine, le gallium, le germanium et l'indium. Une demande élevée ainsi que des positions de monopole et une faible fiabilité de production sont des facteurs essentiels de la criticité des matières premières. À ceci s'ajoutent des risques écologiques et sociaux dans la chaîne d'approvisionnement. Un taux de recyclage faible ainsi que la non substituabilité par des matières premières alternatives influent également de manière décisive sur la criticité. Le recyclage comprend la collecte, le tri, le désassemblage de produits ou de composants et la séparation des différents matériaux de départ. Les causes de la criticité et les possibilités de recyclage diffèrent fortement suivant la matière première concernée.

État des lieux

Une cause majeure des faibles taux de recyclage est que les matières premières concernées ne sont utilisées qu'en quantités minimales, rendant souvent impossible un recyclage rentable. Pour les métaux de grande valeur – p.ex. l'or en électronique ou les métaux du groupe du platine dans les catalyseurs – le recyclage fonctionne bien. En raison des grandes quantités utilisées et de leur faible mélange, le recyclage du cobalt des batteries de véhicules électriques est lui aussi prometteur, et de nombreux pays le mettent déjà en œuvre en prévision de la transition de la mobilité. Dans ce même contexte, le recyclage de lithium progresse également. En ce qui concerne les métaux de terres rares, un recyclage rentable est déjà réalisable pour certains aimants – p.ex. dans les turbines éoliennes et les disques durs. Un facteur important tient à la fiabilité et au systématisme du retour des produits. Des innovations sont donc nécessaires en matière non seulement de réutilisation et de revalorisation mais aussi de systèmes logistiques et commerciaux.

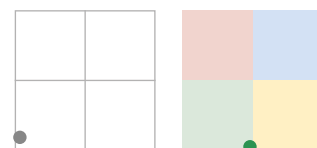
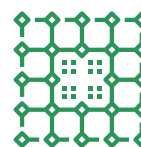
Perspectives d'avenir

Il est à prévoir que les client-e-s deviendront de plus en plus attentif-ve-s aux problématiques d'ordre social et écologique dans les chaînes d'approvisionnement. Il est également possible que la sécurité des approvisionnements redevienne un sujet. Les efforts de recyclage de métaux critiques doivent être renforcés en vue d'une économie circulaire. À l'avenir, le recyclage de batteries de véhicules électriques ainsi que de composants photovoltaïques et éoliens jouera un rôle important. Ces domaines sont par ailleurs particulièrement adaptés à la mise en œuvre de modèles commerciaux durables.

En Suisse, les quantités de matières premières critiques recyclables sont souvent trop faibles pour être économiquement rentables. Étant donné ces faibles quantités, l'utilisation de matériaux nouveaux présente par ailleurs souvent un impact limité sur les coûts. Seules des entreprises spécialisées disposent du savoir-faire nécessaire en matière de recyclage. La part des produits recyclés est donc souvent encore faible. Il est important d'identifier quelles compétences techniques pour le recyclage de métaux spécialisés peuvent être développées à l'interne et où il est judicieux de collaborer et de s'associer à d'autres entreprises et systèmes – y compris à l'étranger. En même temps, il s'agit de rester attentif aux développements géopolitiques et – compte tenu de la sensibilisation croissante de la société aux enjeux de durabilité – d'œuvrer à la transparence des chaînes d'approvisionnement. De nouveaux modèles commerciaux sont à développer en matière non seulement de recyclage mais aussi d'augmentation de l'efficacité des ressources.

Réseaux intelligents

Roland Küpfer (BKW)



Les réseaux intelligents, ou «smart grids», ont pour objectif d'équilibrer d'un côté l'électricité injectée à base de sources traditionnelles ou décentralisées et d'un autre côté leur consommation décentralisée. Dans le *Technology Outlook 2019*, les réseaux intelligents apparaissent dans le quadrant jaune des «technologies automotrices». Il s'agit de technologies parvenues à maturité, bien établies, dont le développement actuel est cependant plutôt lent et pour lesquelles les compétences en Suisse sont plutôt faibles. Mais cette situation pourrait et devrait vite évoluer.

État des lieux

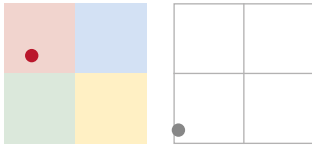
La production décentralisée d'électricité est de plus en plus répandue, entraînant une demande accrue de solutions permettant d'optimiser les courbes de charge. En parallèle, la flexibilité de la demande devient un enjeu croissant. Ces développements induisent une transformation fondamentale du secteur de l'énergie, qui va bien au-delà de la stabilisation des réseaux et de la réduction des pointes de charge. À ceci s'ajoutent les nouveaux concepts de mobilité et les infrastructures de recharge pour véhicules électriques, qui constituent un défi supplémentaire pour la flexibilisation de la répartition des charges. Les réseaux d'approvisionnement électrique doivent être conçus en vue des charges maximales possibles. D'un point de vue économique, l'exploitation de flexibilités s'impose afin de minimiser les extensions de réseau que pourraient nécessiter ces différentes évolutions. Il s'agit donc d'optimiser l'utilisation de l'infrastructure existante à faibles coûts d'exploitation et de réduire les besoins d'extension des réseaux, avec à la clé des économies se chiffrant par milliards. Le développement des sources d'énergie renouvelables augmente la complexité dans les réseaux avec des fluctuations imprévisibles de l'injection d'énergie. Les réseaux intelligents, couplés à une analyse intelligente des données, équilibrent la production et la consommation, et contribuent à piloter l'équilibrage de charge de manière à éviter une surcharge de l'infrastructure et une extension des réseaux.

Les défis qui se posent dans le secteur suisse de l'énergie sont connus: le décalage entre l'horizon de planification et l'impératif constant de sécurité de l'approvisionnement complique l'action immédiate. Par ailleurs, l'accord sur l'électricité avec l'UE n'est pas encore conclu et par conséquent la sécurité d'approvisionnement du pays n'est pas assurée. La crise du coronavirus a clairement montré que les pays s'occupaient en premier lieu de l'approvisionnement de leur propre population, faisant ressortir l'importance de l'autosuffisance en matière d'accès à l'énergie. La nécessité de modifier la législation actuelle peine à s'imposer dans les esprits.

Perspectives d'avenir

Avec l'augmentation des sources d'énergie décentralisées renouvelables, la considération d'ensemble de la production et de la consommation d'énergie est propulsée au premier plan. Tous les acteurs du marché de l'énergie, y compris les gestionnaires de réseau, doivent coopérer au mieux pour équilibrer la mise à disposition et l'utilisation de l'énergie.

À moyen terme, la Suisse doit trouver un moyen de maîtriser l'imprévisibilité croissante de la mise à disposition et de la consommation d'énergie due à la transition énergétique. Elle risque autrement de faire face à des coûts immenses de développement de son infrastructure de réseau. Un changement de paradigme s'impose dans le dimensionnement des réseaux et dans l'interprétation des données pour déterminer quels développements sont véritablement nécessaires. Les défis de la transition énergétique, en particulier concernant la planification et la commande des réseaux d'énergie, ramènent les réseaux intelligents du statut de technologie automotrice à celui d'espoir technologique.



Stockage futur de l'énergie

Jörg Roth et Thomas Justus Schmidt (PSI)

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. À l'avenir, des systèmes de stockage longue durée s'avéreront indispensables afin de réduire la dépendance par rapport aux importations d'énergie et de faire baisser les coûts de l'électricité en hiver.

État des lieux

Ces dernières années, on a pu observer un questionnement et une activité accrue chez les fournisseurs d'énergie au niveau tant national qu'international. Le secteur gazier réfléchit ouvertement à la manière dont il pourrait mieux intégrer le biogaz ou l'hydrogène dans l'approvisionnement en énergie. En Allemagne, les paiements compensatoires ont cessé pour de premiers parcs éoliens, qui doivent désormais commercialiser eux-mêmes l'ensemble de leur production. L'exemple de l'Allemagne du Nord montre bien que les surcapacités qui apparaissent par moments ne peuvent être valorisées qu'au moyen de solutions de stockage. Il en résulte pour la première fois un marché pour les dispositifs de stockage. En parallèle, le contexte commercial se détériore de plus en plus pour les technologies fossiles. En conséquence, des acteurs majeurs comme MAN mettent sur le marché des solutions de stockage et l'industrie pétrochimique travaille au développement de matières de base, de combustibles et de carburants renouvelables pour remplacer les ressources énergétiques fossiles. Dans le domaine du transport de marchandises, les piles à combustible et l'hydrogène attirent une attention croissante. À moyen terme, le secteur de la sous-traitance doit optimiser les composants techniques et les procédés de fabrication pour les batteries et les piles à combustible. L'industrie chimique doit s'orienter vers les matières premières de synthèse et pouvoir livrer des produits comme des électrodes de batterie et des membranes. Ces deux années passées, le développement de modèles commerciaux adaptés aux dispositifs de stockage s'est légèrement amélioré.

En l'état actuel des choses, la Suisse dispose des options suivantes pour un approvisionnement en énergie durable: force hydraulique, solaire, éolien et géothermie. À partir des profils de production du solaire et de l'éolien au cours d'une année et des prévisions des besoins en énergie, il est possible d'estimer quelle quantité d'énergie doit être soit transportée de l'été vers l'automne et l'hiver au moyen de dispositifs de stockage soit importée en l'absence de technologies

de stockage. L'exercice d'optimisation se joue dans le triangle importations, réseaux d'énergie et stockage. Les questions de l'importation et des réseaux d'énergie font depuis longtemps l'objet de recherches en Suisse, mais le domaine des stockages d'énergie saisonniers est plus récent. Ces sept dernières années, la Suisse a étudié, évalué et développé à échelle de laboratoire les options connues de stockage d'énergie sur le long terme. Elle a ainsi établi une base solide pour la mise en œuvre: les technologies pour un avenir énergétique durable et confortable sont disponibles à échelle de laboratoire et doivent maintenant être menées à pleine maturité commerciale. Il s'agit donc de transformer la compétence scientifique en modèles économiques performants.

Perspectives d'avenir

Ces prochaines années révéleront comment évoluera l'économie hydrogène et s'il deviendra possible de produire de manière peu coûteuse du méthane, du méthanol ou des composés semblables à partir d'hydrogène, de biomasse ou de CO₂ atmosphérique. En ce qui concerne le stockage de chaleur, des dispositifs de stockage par sorption ou des accumulateurs de glace sont prêts à l'emploi.

L'opportunité s'offre à la Suisse de remanier son système énergétique aujourd'hui dominé par les coûts de combustibles (pétrole, gaz, uranium) de telle manière que les dépenses futures soient affectées à des installations de production d'énergie renouvelable (géothermie, photovoltaïque, power-to-X, force hydraulique et éolien) qui conservent leur valeur. Le système énergétique suisse peut ainsi devenir plus robuste et moins dépendant des marchés des matières premières. Étant donné que la production de composants pour l'avenir énergétique est un domaine en pleine évolution et que le marché est seulement en train de se créer, les activités de développement technologique recèlent un potentiel économique important. Il s'agit d'identifier ce potentiel dans le contexte des modèles commerciaux actuels et de créer et d'exploiter des opportunités en échangeant avec la clientèle, les fournisseurs et les partenaires de développement.

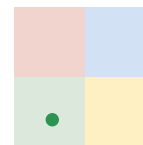
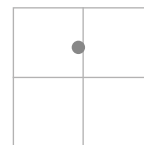


A close-up photograph of a copper coil, likely a heat exchanger or condenser. The coil is made of many parallel copper tubes, which are highly reflective and show bright highlights. In the upper left, a hand is visible, holding a tool that appears to be adjusting or working on the coil. The background is dark and out of focus, emphasizing the texture and color of the copper.

Procédés de fabrication et matériaux

Fabrication additive – développement de matériaux

Fritz Bircher (HES-SO-Fribourg), Lars Sommerhäuser (Empa),
Adriaan Spierings (inspire) et Anna Valente (SUPSI)



Les matériaux comme les métaux, les matières plastiques, les céramiques et les matériaux composites doivent être adaptés aux conditions et aux exigences très spécifiques des procédés de fabrication additive – une notion qui s’était établie il y a des années plus particulièrement dans le domaine des matières plastiques. C’est le seul moyen de rendre possibles de nouveaux produits haute performance, de satisfaire aux exigences de qualité élevées de l’industrie et de proposer des solutions innovantes pour des marchés aussi divers que les bâtiments et les travaux publics, la technique médicale et l’aérospatial.

État des lieux

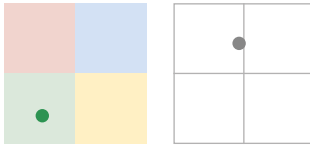
Le développement de nouveaux composés métalliques et céramiques est une tendance relativement nouvelle et croissante. À l’international, le développement de matériaux pour la fabrication additive a progressé ces dernières années à différents niveaux et tout au long de la chaîne des processus. Ces avancées ont également porté sur l’augmentation des capacités de production, car l’industrie a compris que les matériaux adaptés à des processus spécifiques possédaient des caractéristiques et donc des atouts commerciaux uniques. Ce besoin de capacités de production accrues se renforcera encore avec le développement d’outils de modélisation avancés combinés pour certains avec des éléments d’intelligence artificielle.

La Suisse ne participe à cette tendance que de manière limitée. Cela s’explique par le nombre restreint mais néanmoins croissant d’entreprises qui développent des installations de production ou des matériaux additifs. L’utilisation d’outils de modélisation avancés est par ailleurs encore très limitée car ces outils sont basés sur la multiphysique et doivent couvrir plusieurs ordres de grandeur en termes de dimensions et de temporalité pour modéliser des composants de grande taille et de forme complexe. En règle générale, leur utilisation est donc limitée aux activités de recherche.

Perspectives d’avenir

Dans les années à venir, une attention accrue sera accordée aux développements dans le domaine des multimatériaux et des matériaux à gradients ainsi que des matériaux biodégradables pour l’économie circulaire.

La Suisse dispose d’une grande expertise dans le développement de nouveaux matériaux et de procédés associés. En combinaison avec une application plus large de la modélisation de procédés et de matériaux, les entreprises suisses pourraient en tirer un avantage compétitif dans des domaines tels les métamatériaux, l’impression 4D et l’économie circulaire. Mais cela présuppose que la Suisse continue à se concentrer sur ses atouts et ses points forts établis, que la numérisation s’étende aussi au développement de matériaux et de processus, et que les entreprises puissent bénéficier des compétences disponibles dans le pays en matière de recherche. Le développement de matériaux pour la fabrication additive doit faire l’objet d’un encouragement ciblé qui tienne compte de l’ensemble de la chaîne de valeur des matériaux innovants, y compris la capacité de production. C’est là une force traditionnelle du secteur des matières plastiques. Mais la production de matériaux avancés pourrait aussi comprendre des poudres métalliques, des photopolymères ou d’autres matériaux intelligents et permettre à la Suisse d’atteindre une position d’excellence dans le domaine des matériaux intelligents et de la production numérique. Il en résulterait de nouveaux modèles commerciaux et de nouvelles opportunités tout au long de la chaîne de fabrication.



Fabrication additive – procédés

Fritz Bircher (HES-SO-Fribourg), Lars Sommerhäuser (Empa),
Adriaan Spierings (inspire) et Anna Valente (SUPSI)

La fabrication additive («additive manufacturing», AM) est un terme qui regroupe un ensemble de technologies par lesquelles les objets sont fabriqués non pas par usinage ou par découpe mais par agglomération de matériau(x). Les technologies de fabrication additive couvrent l'éventail complet des procédés de traitement des métaux, des matières plastiques et des céramiques. Les développements en cours concernent l'ensemble de la chaîne de valeur, y compris les outils de pré-traitement, les procédés et les machines de fabrication additive, et les technologies de post-traitement.

État des lieux

Les tendances majeures des activités de développement portent sur des technologies pour la fabrication de grandes pièces métalliques, y compris en série, et plus généralement sur des gains de productivité. Les efforts se concentrent sur les approches multilasers, les technologies avancées de dévidage de fil ou l'automatisation de chaînes de processus; l'utilisation d'outils de simulation permet d'appliquer ces approches à plusieurs ordres de grandeur. D'autres développements majeurs en plein essor touchent à des aspects de l'industrie 4.0 comme l'intégration d'intelligence artificielle et de méthodes de traitement des données dans la commande des machines. Ces développements offrent à de nouveaux acteurs du marché de la fabrication additive la possibilité de proposer des solutions pour des concepts de machine de pointe à moindre coût. De nouveaux défis émergent au niveau du traitement des données, du maniement des machines et des capteurs: il est essentiel de les résoudre pour une meilleure gestion des processus et une certification rapide des pièces issues de la fabrication additive.

La Suisse participe partiellement à ces tendances. De plus en plus d'entreprises suisses acquièrent des compétences dans l'application de la fabrication additive ou investissent dans des activités propres de fabrication additive. La Suisse joue par ailleurs un rôle croissant dans la recherche en fabrication additive. Celle-ci bénéficie du soutien indispensable de plateformes de coopération publiques et industrielles comme *IBAM*, la *SATW* et *Swissmem*.

Perspectives d'avenir

De nouvelles technologies de fabrication additive sont sur le point d'être mises en œuvre à échelle industrielle. Dans ce contexte, l'impression par projection de liant («binder

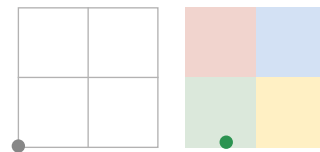
jetting», BJ) et les procédés de projection directe de matériaux gagnent en attrait car ils promettent des gains de productivité considérables. En même temps, on voit augmenter l'intérêt pour les procédés et les technologies par extrusion pour la fabrication de structures à l'échelle du micromètre.

L'industrialisation plus poussée de la fabrication additive requiert des connaissances spécialisées traditionnellement disponibles en Suisse, entre autres dans les domaines suivants: simulation et ingénierie mécanique, utilisation et intégration de la fabrication additive, intelligence artificielle, traitement de grands ensembles de données, automatisation de la production de composants industriels pour acheteurs dans des marchés fortement réglementés. La Suisse devrait soutenir ces efforts de développement et se concentrer sur des installations de pointe ainsi que sur la surveillance et la commande de processus pour la production de composants à haute valeur ajoutée. Il faut soutenir des initiatives pour le développement de technologies haute performance de prochaine génération qui tiennent compte de l'ensemble de la chaîne de valeur, des combinaisons de processus et du traitement multimatériaux pour l'impression 4D. Les entreprises suisses pourront ainsi exploiter les possibilités de la fabrication additive tout au long de la chaîne de valeur, faire progresser l'automatisation de la production et fabriquer des produits à forte valeur ajoutée et performance améliorée, encore plus spécifiquement axés sur les besoins individuels de leur clientèle. L'industrie pourra ainsi réagir plus activement à l'évolution des besoins, rester compétitive et préserver des emplois en Suisse. Un écosystème actif d'établissements de recherche, d'acteurs industriels et de plateformes doit favoriser la formation d'ingénieur-e-s, l'échange de connaissances spécialisées et le soutien à l'innovation.



Matériaux antimicrobiens

René Gälli (Livinguard AG) et Christoph Kolano (AVA Biochem AG)



Les maladies infectieuses causées par les bactéries, les champignons et les virus comptent parmi les causes de décès les plus fréquentes. Les germes multirésistants qui se développent dans les hôpitaux et les infections qui en résultent sont particulièrement problématiques parce qu'ils sont dus à des bactéries qui résistent à un grand nombre d'antibiotiques. Afin de réduire la transmission de microorganismes, on utilise entre autres des substances à action antimicrobienne (biocides) pour désinfecter les surfaces. On utilise également de plus en plus des polymères antimicrobiens pour la fabrication ou le revêtement d'objets plastiques auto-désinfectants. La plupart de ces matériaux sont basés sur l'ajout d'un biocide au polymère. Les polymères sous forme de fibres sont généralement imprégnés de biocides après leur transformation en textile. Les biocides remontent à la surface, où ils détruisent les microorganismes. On utilise souvent comme biocides des métaux comme le cuivre, l'argent et le zinc ou des substances antimicrobiennes organiques. Ce procédé a pour inconvénient que les biocides sont éliminés des polymères au lavage. Leur effet s'en trouve réduit et les biocides entrent en contact direct avec les êtres humains et l'environnement, ce qui contribue au développement de résistances.

État des lieux

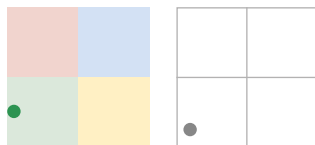
L'utilisation de biocides est strictement réglementée dans le monde entier, mais c'est en Europe que ces dispositions sont les plus strictes. Le durcissement continu de la législation et les exigences qui en découlent constituent des obstacles majeurs pour les entreprises innovantes et les startups. La Suisse ne compte par conséquent que peu d'entreprises actives dans la production et l'utilisation de biocides appliqués à des polymères. Ces dernières années, la recherche a porté son attention sur des polymères à action antimicrobienne sans ajout de biocides: la plupart de ces polymères présentent une faible charge positive. Comme les microorganismes possèdent une surface cellulaire à charge négative, ils sont liés à la surface positive des polymères et ainsi détruits physiquement. Ces polymères restent stables et sont moins toxiques pour l'être humain et l'environnement. Le risque d'apparition de résistances est nettement moindre que pour les polymères contenant des biocides. En Suisse, différents établissements de recherche se penchent sur ces surfaces antimicrobiennes. Une autre approche, suivie par plusieurs petites startups en Suisse et en Allemagne du Sud, utilise des systèmes (photocatalyseurs, enzymes, etc.) qui créent des biocides in situ. Les deux approches sont possibles dans le cadre de la législation actuelle. Mais comme elles déploient un effet biocide, leur innocuité pour l'être humain et l'environnement doit être attestée au moyen de mises à l'essai très coûteuses.

Perspectives d'avenir

En 2026, les plastiques antimicrobiens devraient présenter un potentiel commercial de USD 65 milliards. Le volume de

marché en Suisse se situera entre USD 800 millions et un milliard. Parmi les principaux moteurs du marché figurent les exigences d'hygiène croissantes dans différents domaines, p.ex. la production de surfaces antimicrobiennes pour les appareils et les instruments médicaux ou les vêtements professionnels et de protection dans les secteurs de la santé et des soins. Les champs d'application possibles dépassent le domaine médical: les polymères antimicrobiens peuvent aussi être utilisés pour l'emballage et le stockage d'aliments, dans les produits sanitaires, pour le traitement des eaux ou pour la fabrication de surfaces dans les transports en commun ou les avions. Ces développements présentent des opportunités majeures pour les entreprises suisses innovantes de l'industrie chimique, de la transformation des plastiques, de l'industrie des machines, de la technique médicale, de l'industrie alimentaire, du traitement des textiles, de l'industrie des emballages et du traitement des eaux.

Les innovations et leurs applications sont entravées par la complexité de la législation sur les substances chimiques. Beaucoup de petites entreprises sont dans l'impossibilité de s'y retrouver et d'y consacrer les ressources nécessaires. La mise en place d'un centre de compétences suisse axé sur les questions réglementaires et sur le développement des applications et doté des moyens financiers nécessaires pour procéder aux essais concernant l'incidence environnementale et toxicologique encouragerait la mise en œuvre de technologies innovantes et améliorerait les perspectives commerciales des entreprises suisses dans ce domaine d'activité prometteur.



Bioplastiques

Roger Marti (HES-SO Fribourg), **Hans-Peter Meyer** (Expertinova AG)
et **Manfred Zinn** (HES-SO Valais-Wallis)

Le terme «bioplastiques» désigne des matières plastiques soit produites à partir de biomasse renouvelable mais non biodégradables («agroplastiques»), soit biodégradables et produites à partir de ressources non renouvelables comme le pétrole ou également à partir de biomasse renouvelable. Contrairement à une idée largement répandue, il existe donc des bioplastiques non biodégradables. Actuellement, plus de 400 millions de tonnes de plastiques sont produites chaque année dans le monde, impactant potentiellement l'environnement sous forme de micro- et de nanoplastique. Mais il existe aussi des bioplastiques dotés de propriétés exceptionnelles pouvant être mises à profit.

État des lieux

En Suisse, la consommation de matières plastiques par habitant est encore en hausse et elle est nettement supérieure à d'autres pays européens. En 2019, 187 pays ont signé un accord de l'ONU pour contrôler et réduire les flux transfrontaliers de déchets plastiques. La même année, le Parlement européen a approuvé une interdiction de vente pour certains produits plastiques à usage unique. L'UE a par ailleurs décidé de retirer de la circulation dès 2021 les plastiques oxo-dégradables qui se dégradent par fragmentation mais ne sont pas dégradables biologiquement par des microorganismes. Et le Costa Rica veut même interdire tout plastique à usage unique à partir de 2021.

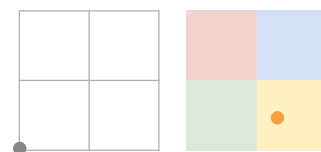
Les bioplastiques pour produits de masse sont fabriqués dans de nombreux pays, mais pas en Suisse. L'utilisation de matériaux écologiquement durables et innovants dans l'industrie de l'emballage reste faible dû au manque de mécanismes de contrôle réglementaires et d'activités de recherche. Mais les choses se mettent lentement à bouger. Nestlé a ainsi créé à Lausanne l'*Institut Nestlé des sciences de l'emballage*, dédié au développement de solutions d'emballage fonctionnelles, sûres et respectueuses de l'environnement. Il existe à travers le monde environ 140 entreprises actives dans le développement et la production de bioplastiques, le plus souvent pour la fabrication de produits de masse. La situation est différente en Suisse. En raison de la faible disponibilité de matières premières, l'attention s'y concentre sur les bioplastiques de haute qualité pour des applications spéciales p.ex. dans l'industrie automobile, l'agriculture ou la technique médicale. En collaboration avec des établissements de l'enseignement supérieur, certaines entreprises innovantes font déjà leurs preuves dans ce domaine restreint à haute valeur ajoutée.

Perspectives d'avenir

Le thème des plastiques et plus particulièrement des bioplastiques conservera toute son actualité à l'international. Les acteurs suisses dans ce domaine présentent des axes d'activité différents, ne sont pas organisés en réseau et ne disposent d'aucune plateforme. Outre une mise en réseau et une union des forces, il conviendrait d'élaborer une vision et une stratégie cohérentes pour l'espace économique suisse en matière de bioplastiques. Il s'agit aussi de renforcer la sensibilisation et l'information des utilisateurs-rices finaux-ales concernant les bioplastiques. Les travaux de recherche et de développement récemment lancés pour de nouveaux bioplastiques de pointe par exemple à base de protéines méritent d'être soutenus. Il est encore trop tôt pour mettre en place en Suisse des mécanismes de contrôle réglementaires pour l'encouragement des bioplastiques.

Fibres fonctionnelles

Manfred Heuberger (Empa) et Urs Mäder (SATW)



Outre les avantages inhérents à leur forme fibreuse, les fibres fonctionnelles peuvent répondre à des exigences supplémentaires spécifiques à certaines applications. On peut ainsi citer l'effet antimicrobien, l'absorption d'eau élevée, la diffusion de substances actives ou l'effet protecteur contre différentes influences externes. Dans les années à venir, les fibres fonctionnelles auront un rôle à jouer en Suisse dans les domaines des sciences de la vie, de la santé et de la technologie.

État des lieux

La recherche concernant les fibres fonctionnelles se concentre sur des fonctionnalités additionnelles à haute valeur ajoutée dans le domaine de la conductivité d'électricité et de lumière ainsi que de l'absorption ou de la diffusion de substances actives. Les domaines d'application s'étendent de la communication à la technique médicale. En particulier, grâce à la combinaison de différentes matières synthétiques, les fibres multicomposées peuvent répondre à de nouvelles exigences techniques et permettent de nouvelles variations dans l'équilibre entre stabilité et dégradabilité. Le *Mobility Assisting teXtile eXoskeleton* de l'entreprise *MyoSwiss* constitue un exemple d'application réjouissant: des fibres à deux composantes et enveloppe fusible sont utilisées pour faire passer des structures d'un état flexible à un état rigide ou l'inverse.

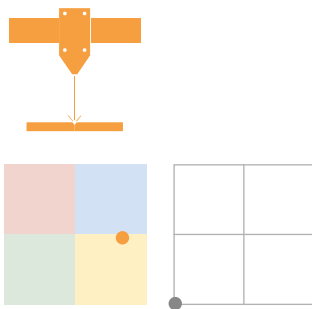
Le développement de substances ignifuges novatrices mentionné dans le *Technology Outlook 2019* a poursuivi son essor, menant à la commercialisation de fibres ignifuges PET et polyoléfine ainsi que de textiles pour utilisation en extérieur et dans les espaces publics. La Suisse présentera ces produits à l'*Expo 2020*, qui se tiendra en 2021 à Dubaï. Une découverte majeure porte sur le fait que, même en faible concentration, ces substances ignifuges à base de phosphore permettent une stabilisation chimique des fontes de polyester, ce qui peut s'avérer avantageux pour les processus de recyclage.

La crise du coronavirus nous a rappelé l'importance de l'adsorption de gouttelettes d'aérosol et de l'interaction de particules biologiques avec les surfaces de fibres comme celles de masques. Le développement plus poussé de telles structures de surface représente un défi pour les chercheurs du monde entier.

Perspectives d'avenir

En Suisse et à l'international, les exigences envers les fibres tendent vers la durabilité écologique des matériaux et des processus. La grande stabilité des fibres de synthèse produites à base de matières premières fossiles et leurs faibles coûts de processus freinent cependant la production ambitionnée de fibres biosourcées qui se décomposent vite après utilisation. De plus en plus, le développement de telles fibres dépend de processus adaptés. Il s'agit de développer de nouveaux modèles logistiques et commerciaux afin d'intégrer des éléments de l'économie circulaire.

Cette tendance constitue une opportunité majeure pour les entreprises suisses car elle comprend l'ensemble du cycle de vie des produits. La population suisse est sensibilisée à cette thématique. Il pourrait s'avérer désavantageux que la chimie des plastiques ne constitue plus un axe majeur de recherche fondamentale ni en Suisse ni à l'international, malgré l'existence d'un marché très porteur. Les entreprises suisses souhaitant bénéficier de ces nouveaux développements devraient rechercher activement le dialogue avec les nombreux établissements de recherche suisses et mettre à profit les soutiens disponibles pour des études de faisabilité, afin d'acquérir un savoir-faire spécialisé pour le développement de produits et les opportunités de commercialisation.



Fabrication photonique

Andreas Conzelmann (TRUMPF Schweiz AG)

Le terme «traitement de surface» couvre une multitude de procédés qui modifient les propriétés d'un matériau ou structurent une surface. Le traitement de surface utilise généralement des lasers de puissance de sortie moyenne, qui 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). Le traitement des surfaces joue un rôle dans la quasi-totalité des secteurs, parmi eux la construction automobile, les batteries, l'électronique, la communication, la technologie aérospatiale, la technique médicale, l'industrie alimentaire, la technologie de sécurité, l'horlogerie et la bijouterie, l'électronique grand public ou la technologie de défense.

État des lieux

Les mégatendances que sont la numérisation, la globalisation, l'individualisation et la sécurité mènent à des exigences toujours croissantes 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. De nouvelles tendances comme la connectivité, la mobilité et la néo-écologie rendront toujours plus importants la structuration de surface de métaux, de semi-conducteurs et de polymères, l'enlèvement de couches et les procédés liés à la fabrication d'affichages et d'écrans ou à l'électromobilité. Ces derniers domaines en particulier font émerger de nouvelles applications nécessitant des sources de rayonnement laser plus performantes.

La recherche suisse reste leader en comparaison internationale dans le domaine de la fabrication photonique. Cela tient d'une part à l'excellence de la recherche fondamentale menée par l'ETH Zurich et l'EPFL. D'autre part, les hautes écoles spécialisées s'établissent de manière croissante dans des domaines de recherche et de développement appliqués proches de l'industrie comme p.ex. le traitement de matériaux par laser, le traitement d'images ou l'opto-électronique. Le groupe spécialisé *Photonics* de *Swissmem* et *Swissphotonics* opèrent par ailleurs comme plaques tournantes et tisseurs de liens entre les domaines de l'éducation, de la recherche et de l'industrie. Ces trois dernières années, de nouveaux groupes de recherche se sont créés en Suisse autour des établissements de l'enseignement supérieur et des entreprises industrielles. Ils étudient des thèmes comme la bio-nanophotonique ou la photonique à micro-ondes. Le paysage suisse de l'éducation et de la formation s'est lui aussi développé: dans le domaine de la photonique, plusieurs nouveaux cursus bachelor ont été établis et un nouveau programme master est proposé depuis l'automne 2020.

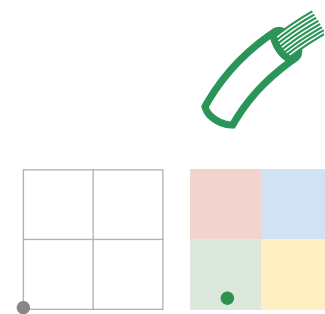
Perspectives d'avenir

La photonique, et en particulier le traitement de surface au laser, s'établit toujours plus comme une technologie habilitante («enabling technology») pour des domaines aussi divers que les systèmes autonomes, l'approvisionnement en énergie, la numérisation, l'intelligence artificielle, la technique médicale, la technologie quantique, la robotique ou les villes intelligentes.

L'industrie suisse pourrait surtout mettre à profit ses compétences et son expérience dans les domaines de la technique médicale et de la robotique. En Suisse, le marché d'ensemble de la photonique s'élevait à environ CHF 4,4 milliards en 2019, dont plus de la moitié relevaient du segment de la fabrication photonique. Dans les années à venir, la croissance annuelle devrait s'élever à 6%. Afin de pouvoir bénéficier de cette croissance, les entreprises suisses devraient continuer à investir dans la recherche et le développement et intensifier leurs activités de commercialisation.

Isolateurs électriques conducteurs thermiques

Urs Burckhardt et Steffen Kelch (Sika Technology AG)



Il est techniquement difficile de fabriquer des isolateurs électriques possédant de très bonnes caractéristiques de conductivité thermique. En effet, dans le cas de nombreux matériaux, p.ex. les métaux ou le graphite, les bons conducteurs thermiques sont aussi des conducteurs électriques. Les matériaux conducteurs thermiques (dits «matériaux d’interface thermique» ou «thermal interface materials, TIM») sont des éléments essentiels pour le développement de nouvelles batteries pour la mobilité électrique ou encore la technologie informatique et la technique médicale. Les matériaux d’interface thermique sont utilisés comme adhésifs liants ou comme résine de remplissage liquide.

État des lieux

Pour optimiser la conductivité thermique d’isolateurs électriques, des substrats à très faible conductivité thermique sont combinés à des particules solides adaptées. L’utilisation de matériaux de remplissage anorganiques aux surfaces conçues sur mesure permet d’améliorer de manière significative l’interaction entre polymère et matériau de remplissage thermoconducteur. On développe par ailleurs des milieux d’échange de chaleur liquides ou des matériaux permettant d’utiliser des transitions de phase thermiquement induites pour évacuer de l’énergie. L’objectif est de développer des matériaux fonctionnels électro-isolants disposant d’une conductivité thermique qui dépasse celle de plastiques conventionnels d’un facteur compris de 15 à 30.

La Suisse est un site attrayant et performant pour l’industrie de la sous-traitance automobile. Dans ce domaine, les matériaux pour la fabrication de modules de batterie et la construction de véhicules (électriques) constituent un segment de marché à forte croissance. La miniaturisation toujours plus poussée et l’augmentation des densités énergétiques qui en découle dans les composants électroniques introduit de nouvelles exigences pour les matériaux thermoconducteurs: ils doivent remplir des interstices aussi minimes que possible. Les défis technologiques consistent en particulier à trouver des systèmes faciles à intégrer et garantissant une bonne conductivité thermique et une fiabilité à long terme sous forme de colles adhésives, de matériaux de remplissage, de rubans adhésifs ou de tampons. Le domaine de la mobilité électrique a besoin de matériaux d’interface thermique qui soient facilement démontables et recyclables après usage.

Perspectives d’avenir

Les innovations touchant aux matériaux d’interface thermique ont le potentiel de générer une forte création de valeur dans des champs d’application à grand volume. D’ici 2025, il est possible que le marché global atteigne plusieurs milliards de francs suisses. Il est cependant plutôt improbable que l’industrie suisse rattrape dans un avenir proche les pays à la pointe dans ce domaine si prometteur, à moins que la recherche et le développement n’y soient priorisés et soutenus. Pour s’imposer dans ce marché global et exigeant, il s’agit de trouver des solutions commercialisables pouvant être mises en œuvre à un horizon de cinq ans. Autre défi spécifique à la Suisse: en raison de sa taille et de sa faible importance, le pays ne figure pas parmi les leaders en matière d’industrie électronique et automobile. Il ne dispose par ailleurs pas des ressources nécessaires pour jouer un rôle déterminant dans le domaine des matériaux d’interface thermique.

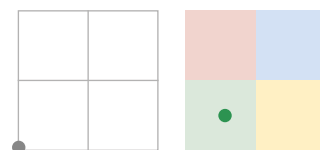
Même si les technologies clé pour la production et le stockage d’énergie sont moins captivantes pour l’opinion publique que les domaines de l’informatique et de la santé, elles demeurent centrales. Il est important que l’industrie suisse ne perde pas de vue ces technologies qui seront déterminantes pour l’avenir. Pour être efficaces, la politique industrielle et la politique de recherche doivent assurer l’implication de la communauté scientifique et de l’industrie suisses dans des coopérations internationales.



Sciences de la vie

Bio-impression 3D

Michael Raghunath (ZHAW)



Dans le domaine de l'ingénierie tissulaire, la fabrication additive de tissus et d'organes, dite bio-impression 3D («bioadditive manufacturing») s'est établie comme une technologie prometteuse. Elle se distingue de la simple impression de biomatériaux car son processus de fabrication implique des cellules vivantes. Les cellules sont soit pulvérisées de manière ciblée sur des structures imprimées, soit incorporées à un biomatériau dit «bio-encre» et déposées suivant un agencement spatial précis. La bio-impression 3D permet de composer et de construire des tissus vivants couche par couche de manière théoriquement illimitée et d'atteindre une complexité plus élevée qu'avec les procédés de l'ingénierie tissulaire standard. Il devrait ainsi devenir possible de parvenir à une activité physiologique toujours plus complète de tissus humains en culture cellulaire. C'est une possibilité importante pour l'industrie pharmaceutique car le développement de médicaments et de cosmétiques est très coûteux et peu efficient. Les tissus produits de manière standardisée peuvent améliorer les processus d'essai et réduire les expérimentations animales. En médecine régénérative, la bio-impression 3D permet d'imprimer des structures vasculaires dans l'implant, chose impossible avec les procédés d'ingénierie tissulaire conventionnelle.

État des lieux

L'extrusion de matériau et de cellules d'une seringue est au cœur des bio-imprimantes 3D et en constitue un défi technologique majeur. La recherche se penche donc principalement sur la conception de têtes d'impression et sur les hydrogels imprimables. La technique kenzan brevetée de l'imprimante *Regenova* de *Cyfuse Biomedical K.K.* propose une alternative: des sphères cellulaires sont piquées sur des aiguilles verticales et placées si serrées qu'elles fusionnent et forment des structures même sans échafaudage. La fabrication de vaisseaux sanguins intégrés demeure un défi. En 2016, la *NASA* a lancé un concours visant la production in vitro de 1 cm³ de tissu alimenté 30 jours durant par des structures semblables à des vaisseaux sanguins. À ce jour, aucune solution satisfaisante n'a pu être trouvée.

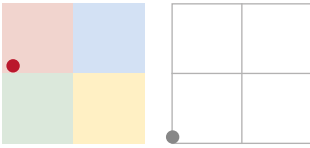
La Suisse est fortement positionnée dans tous les secteurs pouvant tirer profit de la bio-impression 3D, notamment l'industrie cosmétique et pharmaceutique ainsi que la médecine régénérative. Le pays compte de nombreux sous-traitants potentiels qui proposent des composants matériels (buses d'impression, électronique, bras robotisés, valves) et des logiciels de contrôle pour processus automatisés. La Suisse joue aussi un rôle leader pour d'autres composants nécessaires à la culture cellulaire. La Suisse pourra se maintenir à l'international grâce à l'intégration de la technologie dans des processus industriels et médicaux existants et à la mise en réseau des partenaires industriels concernés.

Perspectives d'avenir

Tandis que les champs d'application de la bio-impression 3D

resteront les mêmes, de nouveaux procédés d'impression et d'assemblage de cellules s'ajouteront aux techniques existantes, parmi eux la production contrôlée de sphéroïdes, leur contrôle optique, leur repositionnement ciblé et le placement ciblé dans les sphéroïdes. Certains pays ont établi des stratégies nationales fortes: en Corée du Sud, la bio-impression est encouragée pour renforcer la médecine régénérative et l'industrie pharmaceutique locale. De premières entreprises de bio-impression se sont développées en Chine. Aux États-Unis, l'initiative *BioFabUSA* a été lancée en 2016: elle est financée à raison de USD 150 millions chacun par le Département de la défense et par l'industrie et a pour objectif déclaré d'encourager des projets dans le domaine de la fabrication bio-additive en intégrant la bio-impression 3D.

Alors même que la Suisse dispose avec *REGENHU* d'un leader mondial de la bio-impression 3D, elle ne possède actuellement pas de stratégie nationale comparable visant un leadership technologique dans ce domaine. La bio-impression 3D ne joue aucun rôle dans le Réseau thématique national suisse «Additive Manufacturing». Trop peu d'attention est actuellement accordée à cette technologie tant au niveau de la recherche qu'au niveau industriel. Afin de maintenir la compétitivité à l'international, il faut mettre en place à l'échelle nationale des programmes et des initiatives pour une recherche fondamentale axée sur l'application. Étant donné que la manipulation de sphéroïdes propose une alternative au moulage par injection et à la pulvérisation, il est significatif que plusieurs entreprises suisses comme *InSphero SA*, *Kugelmeiers AG* et *SUN bioscience SA* proposent des systèmes de plateaux de culture cellulaire pour la production de sphères cellulaires.



Sources alternatives de protéines

Erich Windhab (ETH Zurich)

Ces dernières années, les activités de recherche et de développement portant sur de nouvelles sources de protéines et leur transformation technologique ont été fortement stimulées par les prédictions d'un approvisionnement en protéines insuffisant de la population mondiale grandissante et par le questionnement croissant de la durabilité écologique d'aliments d'origine animale dans les pays industrialisés.

État des lieux

Ces dernières années, deux axes principaux ont émergé. L'un porte sur les protéines d'algues et d'insectes, jusqu'à présent peu significatives en tant qu'aliments. L'autre (re) découvre certaines plantes comme sources de protéines pour remplacer les protéines animales issues des œufs, de la viande et des produits laitiers. Il manquait jusqu'à présent une étude d'impact environnemental pour la production de protéines d'insectes. Entre-temps, des entreprises comme *Protix* aux Pays-Bas ont atteint une échelle de production industrielle, permettant d'établir des bilans écologiques probants. Les premières analyses indiquent que les protéines d'insectes sont déjà compétitives pour la production d'aliments pour animaux. Des gains d'efficacité supplémentaires sont prévisibles si l'on utilise des déchets de biomasse jusqu'à présent non valorisés pour nourrir les insectes. Les analyses de cycle de vie réalisées indiquent par ailleurs une meilleure viabilité écologique si les déchets organiques sont convertis en biomasse d'insectes au lieu d'être compostés ou soumis à une décomposition anaérobie.

Les algues sont une source de protéines prometteuse, dont la matière sèche présente une teneur en protéines allant jusqu'à 70% et qui contiennent des acides aminés essentiels ainsi que des quantités importantes de micronutriments. L'algue bleue *arthrospira* (également connue sous le nom de spiruline) et l'algue verte *chlorella vulgaris* sont considérées comme de véritables «superaliments» présentant des profils d'acides aminés plus avantageux que les protéines végétales typiques. De nettes améliorations technologiques sont cependant encore nécessaires pour la transformation et surtout l'extraction rentable de ces précieuses protéines d'algues. Des entreprises en Suisse ont néanmoins procédé à des mises en œuvre prometteuses. De la biomasse d'algues issue de *chlorella* a ainsi déjà été intégrée avec succès à des substituts de viande riches en protéines et en fibres.

Perspectives d'avenir

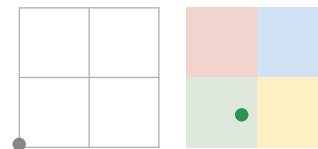
Selon les prévisions actuelles, d'ici 2024 le marché européen des protéines végétales devrait atteindre un volume global de CHF 2,8 milliards avec un taux de croissance annuel supérieur à 7%. Le «flexitarisme», pratique alimentaire principalement végétane ou végétarienne, ainsi que les avantages en termes de coûts, de durabilité et d'impact environnemental sont les moteurs de cette croissance. En ce qui concerne les protéines végétales «nouvellement» découvertes issues de céréales, de légumineuses, de graines, de noix et d'oléagineux, outre les protéines de soja jusqu'ici dominantes ce sont surtout les protéines de fèves et de pois qui gagnent en importance en raison de leur teneur élevée en protéines et de leurs profils d'acides aminés adaptés. Pour leur utilisation, il faut maîtriser les processus technologiques d'élimination des composants à valeur nutritive insuffisante et d'extraction efficace des protéines. Des gains d'efficacité sont nécessaires même s'il existe déjà des isolats ou des concentrés de protéines adaptés et optimisés en pratique pour la transformation en substitut de viande, en fromage ou en boisson au lait végétal.

La production de substituts de viande à base de protéines végétales promet des avantages synergiques d'un point de vue écologique, économique et social. L'effervescence perceptible en Suisse depuis 2018 parmi les groupes de recherche, les startups et les entreprises de toute taille doit être encouragée et consolidée au moyen de développements technologiques auxiliaires. Il s'agit aussi de développer des business cases suisses. Les opportunités sont prometteuses.



Biocatalyse et biosynthèse

Rebecca Buller (ZHAW)



La biocatalyse et la biosynthèse désignent l'utilisation d'enzymes (catalyseurs naturels) ou de microorganismes pour la fabrication écologiquement durable de produits en complément à la synthèse chimique classique: au moyen de l'évolution dirigée, les biocatalyseurs biodégradables peuvent être conçus sur mesure pour de nombreux domaines d'application qui constituent un défi pour la chimie traditionnelle. La biocatalyse ou la biosynthèse sont déjà utilisées dans de nombreuses industries, ainsi en chimie fine, pour la production d'arômes et de parfums ou dans la fabrication de substances actives. La biocatalyse et la biosynthèse sont porteuses d'espoir pour la mise à profit de matières premières renouvelables et permettent d'augmenter l'indépendance par rapport aux énergies fossiles.

État des lieux

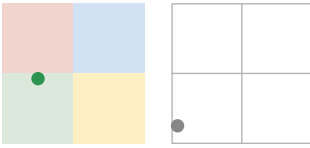
Ces dernières années, d'importants progrès ont été réalisés: en 2018, le prix Nobel de chimie a été décerné à Frances Arnold pour l'évolution dirigée d'enzymes. L'exploitation industrielle de nouvelles familles d'enzymes a été mise à profit pour la fabrication de produits pharmaceutiques et des processus industriels novateurs impliquant des enchaînements d'enzymes ont été développés pour fabriquer des produits complexes. Les prescriptions réglementaires concernant p.ex. l'utilisation d'enzymes comme agents auxiliaires dans la transformation alimentaire ainsi que les restrictions du libre accès aux données bioinformatiques peuvent entraver l'exploitation industrielle de la biocatalyse et de la biosynthèse. De nombreuses opportunités de développements durables qui reposent sur ces données peuvent ainsi demeurer inexploitées.

De grandes entreprises suisses comme *Nestlé* et *Novartis* augmentent leurs capacités dans les domaines de la biocatalyse, de la biosynthèse et de la conception d'enzymes afin de produire des produits à forte valeur ajoutée. Les PME exploitent encore peu les possibilités de la biocatalyse et de la biosynthèse. Afin de résoudre le problème de la disponibilité limitée de personnel spécialisé, la Suisse développe actuellement de nouveaux cursus de formation et programmes de formation continue.

Perspectives d'avenir

Des procédés améliorés de développement dirigé d'enzymes et l'utilisation renforcée de l'intelligence artificielle permettent de rendre industriellement exploitables des classes d'enzymes supplémentaires et de réduire le délai de commercialisation de composés produits par biocatalyse. Parmi les autres moteurs de ce processus figurent la miniaturisation et l'automatisation. Les nouveaux processus biocatalytiques ouvrent la porte à des innovations en matière de substances actives. La biocatalyse et la biosynthèse peuvent changer la donne dans la production durable de produits chimiques à base de matières premières non dérivées du pétrole tout comme dans la dégradation des déchets plastiques.

La crise du coronavirus a clairement montré que la Suisse n'était pas autonome en ce qui concerne la production de médicaments essentiels. Les substances actives et les produits de base correspondants doivent notamment provenir d'Asie. La Suisse devrait pouvoir produire elle-même au moins de petites quantités de médicaments indispensables pour les soins d'urgence. La biocatalyse et la biosynthèse pourraient aussi jouer un rôle dans ce contexte. Le succès de ces activités dépend fortement de la qualité du dialogue entre partenaires industriels et scientifiques. La Suisse pourrait ainsi encourager financièrement des projets de réseau afin de faciliter les échanges nécessaires. Les entreprises souhaitant intégrer la biocatalyse et la biosynthèse à leurs activités ont intérêt à développer leurs compétences et leur savoir-faire au moyen de collaborations, de formation continue de leur personnel et d'exigences spécifiques concernant le profil de qualifications de nouvelles recrues.



Culture de masse de cellules souches

Regine Eibl (ZHAW)

Les cellules souches humaines sont des cellules du corps humain capables de produire des copies d'elles-mêmes et de générer différents types de cellules ou tissus par différenciation. Il est aujourd'hui généralement admis qu'elles présentent un potentiel énorme pour l'étude et la thérapie de maladies graves, p.ex. les maladies neurologiques, orthopédiques, oculaires, sanguines, cardiaques et cancéreuses pour lesquelles des cellules souches peuvent être utilisées pour remplacer ou réparer des cellules ou des tissus endommagés. Les thérapies utilisent aussi bien des cellules propres à l'organisme que des cellules étrangères. Outre les cellules souches pluripotentes, on utilise surtout des cellules souches du sang et des cellules souches mésenchymateuses issues de la moelle osseuse et des tissus adipeux. Les cellules souches pluripotentes peuvent être différenciées en n'importe quel type de cellules de l'organisme et comprennent les cellules souches embryonnaires naturellement pluripotentes ainsi que n'importe quelles autres cellules du corps reprogrammées en laboratoire en cellules souches pluripotentes. En revanche, les cellules souches du sang et les cellules souches mésenchymateuses sont multipotentes: leur différenciation est limitée à un certain nombre de types de cellules.

État des lieux

Indépendamment du type de cellule, on assiste dans le monde entier à un besoin croissant de cellules souches humaines. Afin d'y subvenir, les cellules souches doivent être produites dans la quantité et la qualité requises en préservant leurs caractéristiques spécifiques. Ces cultures de masse s'effectuent en règle générale dans des boîtes de plastique stériles, appelées usines cellulaires ou «cell factories». Les cellules souches s'y développent par 37 °C sur jusqu'à 40 niveaux superposés d'une surface totale pouvant aller jusqu'à un mètre carré. Mais leur manipulation est difficile et la surveillance de leur processus de développement n'est possible que dans une mesure limitée. La production de grands nombres de cellules passe par la multiplication des boîtes de culture, méthode coûteuse et fastidieuse. En Suisse, la multiplication de cellules souches à des fins thérapeutiques s'effectue dans les hôpitaux au moyen d'usines cellulaires; il existe peu d'installations de production à grande échelle.

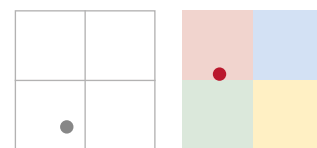
Perspectives d'avenir

Il existe une forme alternative de production dans des bioréacteurs automatisés à usage unique, dans lesquels les cellules sont cultivées en suspension avec ou sans matériaux de support (microporteurs), c'est-à-dire dans un liquide contenant des corps solides finement dispersés. Des groupes de travail suisses ont déjà cultivé des cellules souches dans des bioréacteurs à usage unique à l'échelle de production industrielle. La recherche scientifique et industrielle en Suisse permet d'autres avancées importantes avec le développement de milieux de culture et de microporteurs chimiquement définis adaptés aux différents types de cellules souches. Des optimisations sont encore possibles pour les bioréacteurs à usage unique de petit volume et la technologie de capteurs associée. Il faudrait aussi examiner dans ce contexte la possibilité de fabriquer par impression 3D des récipients à usage unique adaptés à différentes cellules.

En 2025, suivant les prévisions de l'institut d'étude de marché *Analytical Research Cognizance*, le marché global des thérapies cellulaires devrait atteindre USD 828.7 millions. Les spécialistes suisses sont très bien positionné·e·s pour faire valoir leurs compétences et leur expérience dans la culture de masse de cellules souches au sein de projets de recherche nationaux et internationaux et pour soutenir les producteurs de médicaments de thérapie cellulaire comme p.ex. *Lonza* ou les hôpitaux.

Technologies médicales portables

Walter Karlen (ETH Zurich) et Jens Krauss (CSEM)



Les accessoires médicaux portables («medical wearables») sont des appareils portés par les patient·e·s qui permettent de relever des données de santé. Les données sont transmises à des appareils connectés (ordinateurs ou smartphones) ou envoyées à des prestataires de services par Internet. Ces dispositifs permettent ainsi une surveillance continue de l'état de santé et l'accès à des prestations médicales personnalisées. Les technologies médicales portables réunissent une combinaison de capteurs, d'actionneurs, de processeurs et d'interfaces intégrés afin de collecter, traiter et partager les données.

État des lieux

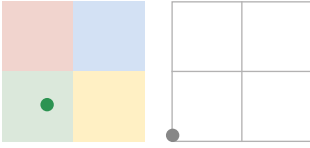
Les technologies médicales portables sont commercialisées depuis les années 1990. Parmi les premiers exemples se trouvent des alarmes d'assistance pour personnes âgées et des appareils pour mesurer la saturation d'oxygène dans le sang (oxymètres de pouls). Ces dernières années, les technologies portables ont conquis le marché de la fitness. Ces produits grand public incluent de plus en plus souvent des fonctions médicales. À l'inverse, la portabilité des appareils médicaux augmente elle aussi. Les technologies médicales portables sont utilisées dans la promotion et la prévention de la santé, mais aussi en télémédecine, pour la réhabilitation et pour les soins à domicile. En 2019, plus de 30 millions d'unités ont été vendues dans le monde, représentant un marché d'un volume d'environ CHF 10 milliards. L'un des moteurs principaux de la propagation des technologies médicales portables est la télésurveillance médicale de patient·e·s. Elles assistent les professionnel·le·s de la santé dans le suivi des maladies et autonomisent les patient·e·s en leur permettant d'observer les paramètres pertinents et d'agir de manière indépendante.

Le développement de technologies médicales portables implique la collaboration de spécialistes de différentes disciplines. Les défis se situent en particulier dans l'amélioration de l'intégrité et de la protection des données, dans l'acceptation des utilisateur·rice·s et l'adhérence thérapeutique, dans la conformité médicale et dans l'intégration sans faille dans les processus cliniques. La Suisse est bien positionnée pour jouer un rôle de premier plan dans le domaine des technologies médicales portables, dans lequel des centaines de nouvelles startups ont été créées dans le pays au cours de la dernière décennie.

Perspectives d'avenir

La diffusion des technologies médicales portables devrait fortement augmenter. Les domaines d'application futurs incluent l'observation et l'intervention médicales, en particulier pour les affections chroniques, permettant de mieux évaluer et adapter les traitements aux cas individuels. La diffusion des technologies médicales portables permettra une prévention de la santé numérisée et personnalisée. La pandémie du Covid-19 indique clairement l'existence d'un besoin de technologies médicales portables afin d'éviter les maladies, de suivre les patient·e·s à risque ou pour observer leurs paramètres de santé et de promouvoir la modification des comportements. Il en résulte des défis majeurs d'ordre réglementaire: à qui appartiennent les données ainsi collectées, comment intégrer les technologies portables dans la prévention de santé actuelle et quel accès aux données accorder aux assurances maladie.

Les innovations développées en Suisse influenceront sur le marché des technologies médicales portables. Les fabricants suisses d'accessoires médicaux portables peuvent encore améliorer leur situation de départ favorable en collaborant à l'international avec des assurances maladie, des entreprises informatiques et pharmaceutiques, et des constructeurs de smartphones. Il est par ailleurs essentiel de continuer à investir dans la recherche et le développement en matière de technologie des capteurs biomédicaux, d'informatique (médicale), de microtechnologie et d'analyse de données. Les technologies médicales portables ne s'imposeront que si les réglementations sont adaptées pour garantir que les données puissent être partagées de manière transparente et sûre.



Robots médicaux

Bradley Nelson (ETH Zurich)

La robotique médicale associe étroitement les clinicien·ne·s humain·e·s et la technologie informatique afin d'améliorer les interventions chirurgicales et autres. Cette transformation des soins médicaux met au service des objectifs thérapeutiques entre autres l'intégration de l'intelligence artificielle dans les activités diagnostiques, le suivi détaillé et l'amélioration des résultats cliniques ainsi que des appareils médicaux plus intelligents. L'article du *Technology Outlook 2019* soulignait les réussites commerciales les plus remarquables dans ce domaine et les répercussions pour le système de santé suisse, quantifiait les activités de recherche en Suisse ainsi que l'impact économique potentiel pour l'industrie suisse des équipements médicaux, et identifiait d'éventuels enjeux réglementaires.

État des lieux

Depuis 2019, plusieurs développements internationaux majeurs sont venus renforcer les conclusions du *Technology Outlook 2019*. Début 2019, *Medtronic* a racheté pour USD 1,7 milliard *Mazor Robotics*, entreprise israélienne spécialisée dans la chirurgie de la colonne vertébrale assistée par robot. La technologie centrale proposée par *Mazor* concerne les systèmes de guidage robotisés pour planifier et exécuter avec précision la pose d'implants. En février 2019, *Johnson & Johnson* a acquis pour USD 3,4 milliards *Auris Health*, développeur américain de dispositifs diagnostiques et d'appareils chirurgicaux robotisés axés principalement sur le cancer des poumons. Le produit phare d'*Auris* est la plateforme *Monarch*, qui permet des télé-endoscopies au moyen de petites caméras et d'outils qui entrent dans le corps par les orifices naturels. Plus tard en 2019, *Siemens* a racheté pour USD 1,1 milliard l'entreprise américaine *Corindus Vascular Robotics*, conceptrice d'une plateforme robotique mini-invasive pour les interventions coronariennes, périphériques et neurovasculaires. Leur produit phare est le *CorPath GRX* pour la télécommande de cathéters vasculaires. Ces deux dernières années, *Stereotaxis*, concepteur américain de technologie robotique à commande magnétique pour chirurgie cardiaque, a réuni des financements supplémentaires de USD 40 millions. L'entreprise a récemment annoncé son nouveau système *Genesis* pour la télécommande de cathéters à pointe magnétique et fluoroscopie intégrée. *Robocath*, autre fabricant de cathéters coronaires commandés par robot et concurrent français de *Corindus*, a annoncé avoir finalisé un tour de financement de EUR 40 millions en août 2020.

L'Asie, et en particulier la Chine, a continué à investir massivement dans la robotique médicale; d'autres acquisitions et investissements majeurs auront certainement lieu dans les années à venir. En Suisse, de petites entreprises ont pu progresser dans le développement technologique. *CAScination*, par exemple, continue à améliorer la technologie d'ablation de tumeurs grâce à un meilleur positionnement de l'aiguille et une réduction de la durée des interventions et de l'exposition aux radiations. Les recherches de l'*ETH Zurich* en matière d'interventions chirurgicales à commande magnétique ont donné naissance aux premiers systèmes de navigation magnétiques portables facilement intégrables dans les salles d'opération. Malgré ces avancées, le niveau des investissements en Suisse est inférieur à celui observé dans d'autres pays à travers le monde. Les incertitudes liées à la nouvelle réglementation européenne relative aux dispositifs médicaux ont très probablement freiné l'enthousiasme des investisseurs. La perspective à long terme que doivent accepter les investisseurs dans ce domaine, typiquement cinq à dix ans avant que ne soient générés des revenus significatifs, est une autre raison de cet intérêt réduit pour la robotique médicale de la part des investisseurs suisses. →

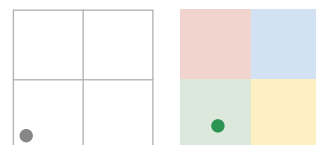
Perspectives d'avenir

Il est évident que la robotique médicale continuera à impacter les systèmes de santé à travers le monde dans les décennies à venir. La technologie promet une augmentation des compétences chirurgicales couplée à des besoins de formation réduits et à un environnement plus sûr et plus ergonomique pour les chirurgien·ne·s. L'intérêt renouvelé pour la télémédecine généré par la crise du Covid-19 et la pertinence de la chirurgie assistée par robot dans ce domaine renforcent encore les arguments en faveur de la robotique médicale par rapport à 2019.

Afin de profiter de l'évolution globale en robotique médicale, les investisseurs suisses doivent jouer un rôle agressif dans le financement de startups dans ce domaine. La Suisse dispose des compétences nécessaires concernant aussi bien les plateformes de robotique médicale que les instruments chirurgicaux utilisés par ces plateformes pour des interventions diverses. Il est aussi essentiel que les organismes de soutien financier comme le *FNS* et *Innosuisse* prennent la pleine mesure de l'importance de ce domaine et reconnaissent la vision à long terme qu'il nécessite. Les instances réglementaires comme *Swissmedic* doivent par ailleurs faciliter la progression vers des essais cliniques en mettant en place des directives claires et réalistes.

Microbiote et microbiome

Tomas de Wouters (PharmaBiome)



Le microbiome humain est l'ensemble des microorganismes vivant dans le corps humain. Ces dernières années, il est apparu clairement que ceux-ci constituent un facteur de santé essentiel et peuvent être liés à de nombreuses maladies chroniques, parmi elles des inflammations chroniques, des troubles métaboliques, des maladies immunologiques et même des maladies nerveuses. La composition et le fonctionnement du microbiome attirent donc une attention croissante et il en résulte de nouvelles approches thérapeutiques très prometteuses.

État des lieux

L'étude du microbiome et les thérapies qui en résultent n'en sont qu'à leurs débuts. De nombreuses activités de recherche se concentrent sur la composition et les activités des microbiomes de personnes malades comparés à ceux de personnes en bonne santé. On constate cependant un glissement de l'objet de recherche vers l'établissement de liens causaux entre différentes caractéristiques du microbiome et des états physiologiques spécifiques. Ces dernières années, de nombreuses entreprises de biotech se sont créées pour commercialiser diverses applications. La plupart de ces startups ont des liens étroits avec les milieux universitaires. Leurs activités se concentrent sur l'analyse et la mise en exploitation des résultats à des fins thérapeutiques. Outre le développement de nouveaux médicaments, cette industrie émergente se concentre aussi sur la

manière d'utiliser le microbiome comme agent thérapeutique. De premières applications expérimentales sont actuellement en cours aux États-Unis sous la direction de l'*Agence américaine des aliments et des médicaments (FDA)*, visant à utiliser le microbiome dans son ensemble pour la thérapie d'infections récurrentes à clostridioides difficile. Les premiers efforts de recherche globaux ont été rassemblés sous l'égide du projet *MetaHIT* en Europe et coordonnés aux États-Unis par le *Human Microbiome Project*. →

Le défi principal concerne la compréhension de grandes populations présentant un degré de complexité élevé. On suppose que, tout comme le système immunitaire humain, le microbiome est fortement dépendant du contexte. L'étude continue du sujet est donc centrale pour un développement pérenne de l'état des connaissances. Un autre défi relève de la transférabilité à l'humain des liens de causalité actuellement étudiés dans des expérimentations animales.

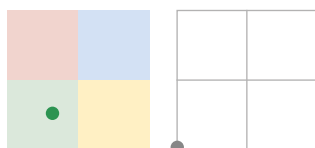
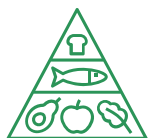
La Suisse est très active dans la recherche sur le microbiome, avec des compétences en microbiologie et en gnotobiologie (l'étude d'animaux aux microbiomes spécifiques). Deux secteurs jouent traditionnellement un rôle clé dans l'étude du microbiome, à savoir les industries alimentaire et pharmaceutique.

Perspectives d'avenir

Les premiers produits axés sur le microbiome seront commercialisés en 2022. On peut s'attendre par la suite à une augmentation du nombre de programmes cliniques et de

nouveaux candidats dans les pipelines de développement. Dans les cinq ans à venir, on verra aussi apparaître sur le marché des produits «lifestyle» bénéfiques pour la santé. La meilleure compréhension de la composition des microorganismes augmente aussi la qualité de décision en matière d'interventions thérapeutiques et nutritionnelles, qui devraient contribuer au développement du marché des probiotiques et des compléments alimentaires.

À l'avenir, les thérapies axées sur le microbiome devraient constituer une part importante des traitements médicaux. Après des investissements conséquents dans les phases précoces du développement de thérapies, ces dernières font maintenant l'objet de vérifications rigoureuses par l'industrie. Les efforts scientifiques influenceront également fortement sur la rapidité de développement des années à venir. Il faut favoriser les échanges entre différents domaines d'expertise scientifique, en s'appuyant sur les connaissances en matière de développement clinique et le savoir-faire concernant les processus de production industriels.



Alimentation personnalisée

Erich Windhab (ETH Zurich)

L'alimentation personnalisée a pour objectif de répondre aux besoins individuels des consommateurs·rices en termes d'acceptation, de santé et de préférences. Les préférences sont surtout liées à des impressions culinaires-sensorielles et l'acceptation est déterminée principalement par des facteurs socio-politiques. Quant aux enjeux de santé liés à l'alimentation, soit ils sont perçus directement par les consommateurs·rices en raison d'allergies, d'écarts par rapport au poids idéal, de maladies ou d'intolérances, soit ils sont diagnostiqués par des spécialistes de la nutrition et de la santé.

État des lieux

Du point de vue de la nutrition et de la médecine, tous·tes les consommateurs·rices sont des «cas uniques» en ce qui concerne leur patrimoine génétique et son expression, leur microflore bactérienne (microbiome) et leur axe intestin-cerveau. Comme il apparaît que l'alimentation influence sur ces trois facteurs à la fois, la production d'aliments personnalisés au niveau de l'individu est de l'ordre de l'im-

possible en termes de faisabilité et de rentabilité. Mais cela signifie aussi qu'une alimentation ciblée permet de «régler» l'expression génétique, le microbiome et la connexion de l'intestin au cerveau de manière à augmenter le bien-être. Ces dernières années, les efforts de recherche ont mené dans un premier temps à des «aliments personnalisés» pour différents grands groupes cibles se distinguant fortement en termes d'âge, de profil d'activi-

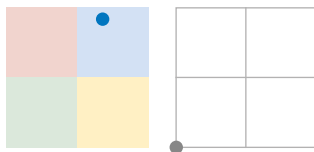
té, d'habitudes alimentaires, de sexe, d'état de santé, de style de vie, d'intolérances et de sensibilité aux enjeux de durabilité. Malgré le manque de concepts convaincants, l'ambition d'une «alimentation personnalisée» n'a donc pas été entièrement abandonnée mais elle est passée au second plan.

Une étude de l'*ETH Zurich* publiée en 2019 livre des conclusions précieuses pour la Suisse concernant des paramètres clé de durabilité et leurs interactions pour des habitudes alimentaires spécifiques à certains groupes. L'étude détermine comme option la plus durable une alimentation saine suivant les recommandations de la *Société suisse de nutrition (SSN)*: par rapport à l'alimentation moyenne suisse actuelle, cela mènerait à une nette réduction de l'empreinte écologique (-36%), des dépenses des consommateurs-rices (-33%) et des effets nocifs pour la santé (-2,7%). En revanche, une alimentation basée sur la viande entraînerait une augmentation nette des aspects précités de 23%, 20% et plus de 4%. La réduction de la consommation de viande au moyen de substituts de viande à base de plantes aurait un impact bénéfique sur la santé, avec des répercussions positives sur les coûts du système de santé. L'une des tendances des comportements alimentaires suisses concerne l'intérêt croissant pour le «flexitarisme», déclenchant des réactions de la part d'entreprises alimentaires établies et la création de startups. Depuis 2018, les ventes de viande ont baissé d'environ 3% en Suisse. Outre les substituts de viande à base de plantes, les efforts de recherche et de développement portent aussi sur les produits à base végétale d'autres catégories alimentaires d'origine animale (p.ex. lait, fromage) à forte valeur nutritive et meilleure durabilité. Grâce à ses conditions cadre industrielles, technologiques et scientifiques, la Suisse conserve ici une position de pointe.

Perspectives d'avenir

L'«alimentation personnalisée» ne se concentre actuellement pas sur des individus mais sur des groupes cibles clairement définis tels les personnes âgées, les jeunes enfants, les personnes souffrant de sous-nutrition ou de sur-nutrition, les nourrissons et les femmes enceintes, mais aussi les personnes souffrant d'allergies, de maladies et d'intolérances. Dans un contexte de hausse rapide des coûts de santé, il semble indiqué d'optimiser l'alimentation de ces groupes cibles. Tant en Suisse qu'à l'international, une attention insuffisante est encore accordée à l'alimentation fonctionnelle sur mesure pour la prévention de maladies.

Outre les groupes cibles cités plus haut, il faut tenir compte des «groupes alimentaires» à tendance en hausse comme les flexitarien-ne-s. Par leur profil particulier de préférences et d'acceptation, ils-elles dirigent l'attention sur des questions de santé, de durabilité et de bien-être animal. Ils-elles font donc aussi figure d'interlocuteurs-rices dans le cadre de développements visant la prévention de maladies liées à l'alimentation et l'amélioration du bilan écologique du système alimentaire suisse. Dans les années à venir, la part des flexitarien-ne-s devrait continuer à augmenter en Suisse. Les produits à base de protéines végétales formeront le point de départ de nouveaux aliments convaincants d'un point de vue culinaire, sensoriel et nutritionnel, et pouvant être adaptés sur mesure à des groupes cibles spécifiques. Pour les secteurs agricole et alimentaire ainsi que l'industrie sous-traitante des machines en Suisse, il s'agit de se saisir de cette tendance et des opportunités qui en découlent.



Diagnostic point-of-care

Daniel Gygax (FHNW)

La diagnostique point-of-care (diagnostique POC) est une branche de la diagnostique in vitro et a pour objectif de rapprocher celle-ci du lieu de la demande. Les tests sont réalisés par les patient·e·s eux·elles-mêmes ou par des spécialistes dans les pharmacies, chez le médecin traitant ou d'organismes de soins à domicile. L'application la plus connue est la surveillance de la glycémie chez les personnes souffrant de diabète.

État des lieux

Ces dernières années, la diagnostique point-of-care s'est établie dans les hôpitaux et les tests POC ont été plus largement intégrés dans des plateformes de santé numériques mobiles. Cette approche raccourcit les délais entre test, diagnostic et thérapie. Les tests POC facilitent la surveillance de maladies et de leur évolution. Leur intégration dans des services de santé mobiles (mHealth, télémédecine) nécessite la coopération de plusieurs acteurs et n'avance donc qu'à petits pas. Les différents sous-processus (du diagnostic de maladies à la surveillance de leur évolution) ne sont pas encore coordonnés et il subsiste des questions d'ordre technique et légal.

Avec la pandémie de Sars-CoV-2, la diagnostique point-of-care fait l'objet d'un intérêt accru. L'utilité des tests rapides pour la détection du virus au moyen d'un test antigène est controversée en raison de la sensibilité plus faible par rapport au test PCR et de la possibilité d'une gestion sûre par des non-spécialistes. Des analyses permettent de détecter dans le sang des personnes ayant surmonté la Covid-19 des anticorps contre des protéines provenant de l'enveloppe virale. Ce test de diagnostique POC est très avantageux car il peut être réalisé de manière décentralisée et relié à des appareils de mesure connectés. Dans la phase d'assouplissement des mesures sanitaires, le test de détection d'anticorps aura un rôle important à jouer car les personnes doivent pouvoir être catégorisées comme saines, infectées ou immunisées. Le test de diagnostique POC mobile et connecté peut être déployé dans ce contexte avec grande efficacité. Ses données doivent être suffisamment précises et faciles à manier et elles doivent être transmises par smartphone à un organisme centralisé. La pratique de réalisation d'un test devient ainsi une nouvelle technique culturelle, qu'il s'agit d'apprendre et d'enseigner.

Comme d'autres pays, dans la crise du coronavirus la Suisse s'est retrouvée livrée à ses propres moyens. Elle cherche aujourd'hui à réorganiser certains processus. Le principe de la plateforme de santé numérique est applicable à d'autres problématiques sanitaires futures. Il est apparu clairement que la Suisse devait réduire sa dépendance vis-à-vis de chaînes logistiques et de chaînes de valeur globales afin de pouvoir assurer l'approvisionnement de sa population en moyens diagnostiques et en médicaments.

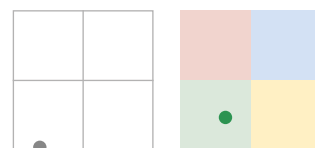
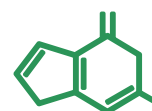
Perspectives d'avenir

Aujourd'hui déjà, le smartphone est plus qu'un simple téléphone; à l'avenir, combiné à des tests POC, il jouera aussi un rôle important en matière de santé. Le défi dans les années à venir consistera à établir des systèmes de test POC décentralisés et connectés pour des champs d'application divers comme p.ex. le suivi des taux sanguins de médicaments tels les antibiotiques, les anti-épileptiques, les anti-inflammatoires ou les immunosuppresseurs.

Depuis longtemps, la diagnostique point-of-care constitue pour l'industrie suisse un domaine d'activité soumis à une réglementation stricte et à un certain plafonnement des coûts. Les plateformes de santé numériques tiennent compte des besoins individuels, régionaux et nationaux, et sont donc difficilement applicables à d'autres domaines ou d'autres échelles. De nouveaux modèles commerciaux sont nécessaires afin de réussir dans la diagnostique point-of-care et les entreprises doivent développer leurs compétences clé par des collaborations, une croissance interne ou le rachat de sociétés.

Biologie synthétique

Sven Panke (ETH Zurich)



La biologie synthétique recouvre les activités devant permettre d'appliquer les systèmes biologiques aux défis de notre époque suivant les méthodes des sciences d'ingénierie classiques comme l'ingénierie électrique ou mécanique. Les exigences envers les modèles conçus sont semblables en termes de fiabilité, de rapidité de développement et de complexité. La biologie synthétique possède donc une portée profonde pour tous les aspects de l'industrie chimique et des biosciences et présente de nombreux points de contact avec les domaines de la diagnostique, de l'énergie et des matériaux.

État des lieux

Ces deux dernières années, la biologie synthétique a pour suivi son avancée fulgurante en particulier dans les domaines de la synthèse chimique, des circuits génétiques et des nouveaux matériaux. La construction de microorganismes avec les méthodes de la biologie synthétique pour la synthèse de produits chimiques à petite ou grande échelle industrielle s'établit toujours plus dans les lignées de produits et donne accès à de nouvelles substances. Le calcul et l'utilisation de circuits génétiques dans des lignées cellulaires et des modèles animaux sont devenus possibles pour de nouveaux tableaux cliniques. Entre-temps, ces circuits sont réceptifs à des commandes externes comme la lumière et l'électricité. La modification radicale de cellules afin de synthétiser des protéines avec de nouveaux composants ou des polymères programmables inédits se poursuit également à un rythme inchangé.

La situation de la Suisse est toujours aussi bonne. Elle dispose d'infrastructures exceptionnelles et d'un excellent réseau académique qui, avec celui du Royaume-Uni, se situe probablement au premier plan européen. La synthèse chimique commerciale de grandes molécules d'ADN est l'une des technologies centrales de la biologie synthétique. Malgré le bon positionnement de la Suisse, le développement de cette technologie clé se poursuit toujours principalement à l'étranger; étant donné les conditions excellentes dont bénéficie le pays en matière de synthèse organique et de microtechnologie, il s'agit là d'une opportunité inexploitée et d'un point faible stratégique.

Perspectives d'avenir

Comme si souvent dans l'histoire de la biotechnologie, le secteur pharmaceutique fait partie des premiers utilisateurs: la biologie synthétique ne déroge pas à cette règle. Les acteurs suisses de la biologie synthétique mettent ainsi à la disposition de ce secteur beaucoup de connaissances et de capacités d'ingénierie. Des recoupements avec des technologies comme CRISPR/Cas9 assurent une dynamique supplémentaire. À l'avenir, les applications et la diagnostique pharmaceutiques devraient donc jouer un rôle important dans la pénétration plus poussée de l'industrie par la biologie synthétique. Les grands groupes pharmaceutiques multinationaux de Suisse bénéficient pour cela d'un positionnement exceptionnel et de nombreuses autres entreprises sont aussi très bien placées. Cependant, le transfert de connaissances entre la recherche scientifique et l'industrie pourrait être plus intense en particulier dans les domaines de la synthèse chimique et des matériaux. La collaboration intense entre acteurs industriels et scientifiques constitue une grande opportunité pour les secteurs industriels évoqués et pourrait faire l'objet d'un encouragement par *Innosuisse*.



Technologie et société

Souveraineté des données

André Golliez (Zetamind AG, Swiss Data Alliance)



La souveraineté des données désigne le droit et la capacité des individus ou des organisations (entreprises, administrations, organismes de représentation politique etc.) à pouvoir contrôler et utiliser de manière autodéterminée les données qu'ils-elles ont eux-mêmes générées ou collectées, ou qui les concernent.

État des lieux

Jusqu'à maintenant, l'aménagement juridique du principe de la souveraineté des données a été abordé principalement sous l'aspect défensif de la protection contre une utilisation abusive des données. C'est en particulier le cas pour les données à caractère personnel dans le cadre de la législation sur la protection des données ou pour les données techniques et spécialisées des entreprises privées dans le cadre du droit de la concurrence et de la propriété intellectuelle. À l'avenir, avec la perspective offensive de pouvoir mieux utiliser les données existantes tout en satisfaisant aux exigences des individus et des organisations propriétaires des données, le principe de la souveraineté des données revêtra une importance centrale. Au cours des quinze dernières années, trois axes principaux ont émergé à cet effet dans de nombreux pays: l'utilisation ouverte et libre du plus grand nombre possible de données à caractère non personnel par tous-tes les acteurs-rices («open data»), l'utilisation de données à caractère personnel par les personnes concernées («my data») et le partage de données sensibles entre entreprises et administrations dans le respect de conditions strictes («shared data»).

En Suisse, ces trois piliers d'une économie fondée sur les données autodéterminée, fonctionnelle et prospère ne sont encore que peu développés. Il manque une législation contraignante en matière d'open data, en particulier dans le domaine de l'administration (open government data). La législation relative aux données à caractère personnel concerne toujours principalement la protection des données, mais sa nouvelle version révisée comprend aussi le droit à la portabilité des données. Quant au partage de données sensibles à caractère non personnel entre entreprises et administrations, il lui manque tant un cadre légal que les infrastructures nécessaires en termes organisationnels et techniques.

Perspectives d'avenir

Dans les années à venir, il s'agira de déterminer qui dispose et qui peut profiter des données générées en Suisse ou produites par des ressortissant-e-s suisses. Étant donné la concentration exclusive croissante des données sur un nombre restreint de plateformes globales, la souveraineté des données de la Suisse est gravement menacée. Afin qu'en Suisse tou-te-s les citoyen-ne-s, organismes de représentation politique, entreprises, administrations et autres institutions et organisations puissent à l'avenir utiliser leurs données de manière optimisée et autodéterminée, des mesures juridiques, organisationnelles, techniques et éducatives s'imposent à tous les niveaux.

Dans les années à venir, la possibilité d'une gestion souveraine de ses propres données nécessitera pour la Suisse une politique des données complète et détaillée impliquant la société civile, l'économie et la science, afin de mettre en place ensemble un espace de données digne de confiance (Swiss data space).



Confiance numérique

Christian Laux (Laux Lawyers AG)

La confiance numérique désigne la confiance dans les produits et les services numériques. Du point de vue des utilisateurs-rices, la notion de confiance peut être comprise comme l'expectative que le prestataire continuera à s'acquitter de ses obligations à l'avenir. La confiance numérique peut aussi être décrite comme l'inclination des utilisateurs-rices à utiliser un produit ou un service numérique parce qu'ils-elles partent du principe que celui-ci leur sera plus bénéfique que nuisible. La confiance – et cela vaut aussi pour la confiance numérique – n'est donc pas une chose dont un prestataire ou un fournisseur dispose, mais plutôt une chose qui lui est accordée.

État des lieux

La pratique montre qu'aujourd'hui la confiance numérique est influencée par différents facteurs. Un rôle central revient à l'expérience des utilisateurs-rices («user experience»), au confort d'utilisation («convenience»), à la transparence et à l'intégrité. La transparence signifie que les utilisateurs-rices peuvent voir comment et dans quels contextes plus larges les données sont utilisées. Un prestataire est considéré comme intègre lorsqu'il protège de manière proactive les valeurs et les données des utilisateurs-rices. La réputation d'un prestataire et sa fiabilité contribuent également à l'évaluation de sa crédibilité et de la confiance qui peut lui être accordée. Les fournisseurs de produits et de services numériques obtiennent de leurs utilisateurs-rices une confiance numérique de courte durée. Cette confiance peut se consolider sur le long terme s'il s'avère que le fournisseur et ses offres numériques répondent aux critères nommés plus haut.

La confiance numérique peut être évaluée au moyen de sondages ou mesurée en analysant certaines données. Lorsqu'une personne opte pour l'utilisation d'un produit, elle confirme sa confiance numérique dans une entreprise. Parmi les principaux indicateurs figurent le taux de rebond, l'expérience de marque ou la réponse positive à la question: «Faites-vous confiance à cette entreprise?». La Suisse occupe le milieu de terrain en ce qui concerne la prise en compte de critères de confiance numérique dans la conception de technologies: elle n'est ni à la pointe, ni à la traîne. L'application de ces principes de conception n'en est qu'à ses débuts.

Perspectives d'avenir

Malgré certaines déclarations allant dans ce sens, il n'existe actuellement pas d'indication que la mise en œuvre des principes de la confiance numérique fasse obstacle au développement de modèles commerciaux rentables. Au contraire: avec des architectures d'information et des modèles commerciaux prévoyants, il est possible d'intégrer les principes de la confiance numérique en profondeur et en amont. Il faudra en tenir davantage compte à l'avenir lors de la planification des solutions et des infrastructures informatiques. On évite ainsi les redondances de coûts et la transformation de la confiance numérique en facteur de coûts. Il est difficile d'implémenter les principes de la confiance numérique a posteriori, en particulier pour les solutions logicielles et cloud à grande échelle, ce qui peut constituer des défis majeurs pour les prestataires de services numériques.

Dans un avenir proche, il s'agira d'ancrer les principes de la confiance numérique de manière à ce qu'ils relèvent de l'évidence. Au niveau politique, le défi est de mettre en place des espaces de données coordonnés, comme p.ex. le Swiss data space. Ces espaces de données permettront de partager les données suivant des règles claires, avec pour résultat des bénéfices pour l'économie et la société, et la possibilité de développer de nouveaux projets basés sur la valorisation de données. Ces espaces de données doivent être construits de manière cohérente, de façon à ce qu'ils aient des attributs générateurs de confiance. Sinon, ils ne seront pas acceptés.



Tendances technologiques

Introduction	88
Le monde numérique	89
Systèmes autonomes	89
Systèmes cyberphysiques	90
Cybersécurité	91
Industrie 4.0	92
Intelligence artificielle	93
Technologies quantiques	94
Énergie et environnement	96
Agriculture numérique	96
Approvisionnement énergétique	97
Économie circulaire	98
Villes intelligentes	100
Procédés de fabrication et matériaux	102
Matériaux du futur	102
Sciences de la vie	104
Biotechnologie	104
Médecine de précision	105



Introduction

Le chapitre précédent présente brièvement les différentes technologies, groupées par domaine de recherche. Mais les applications pratiques et les produits commerciaux impliquent généralement plusieurs technologies: pour la première fois, un chapitre est donc consacré à l'interaction des technologies dans le contexte de 13 tendances technologiques fortement médiatisées et présentes dans le débat public. Il s'agit de thématiques d'envergure telles l'économie circulaire, l'intelligence artificielle ou les villes intelligentes, qui peuvent être abordées sous des angles variables en termes de largeur et de profondeur. Le *Technology Outlook* explique ces termes et sonde leur potentiel pour l'économie et la société suisses. Nous avons délibérément choisi de ne pas inclure de tendances sociétales et démographiques.

Les articles suivants expliquent lesquelles des technologies présentées au chapitre précédent interagissent en lien avec les différentes tendances technologiques. Chaque article est accompagné des pictogrammes des technologies qui entretiennent une relation de réciprocité avec la tendance technologique abordée: soit une technologie agit en tant que moteur pour le développement d'une tendance, soit la technologie bénéficie de la progression de cette tendance. Afin de faciliter la lecture, vous pouvez vous référer à la vue d'ensemble des pictogrammes positionnée dans le rabat latéral en fin de publication. Ainsi les applications 5G, la blockchain, l'Internet des objets, les concepts de mobilité et 18 autres technologies sont moteurs ou bénéficiaires de la progression des systèmes autonomes. L'analyse de big data, le jumeau numérique, la biocatalyse et biosynthèse, la biologie synthétique et 15 autres technologies entretiennent des liens de réciprocité étroits avec la tendance technologique de la biotechnologie.

Quelles conclusions livre l'analyse de l'interaction entre technologies individuelles au sein des tendances technologiques? En prenant pour point de départ les tendances technologiques, on voit surtout transparaître leur grande complexité. Pour réussir, une entreprise active par exemple dans le domaine de la biotechnologie ne doit pas seulement maîtriser des technologies des sciences de la vie comme la biocatalyse et la biosynthèse ou la biologie synthétique. Afin de maintenir sa compétitivité, des applications issues de l'optimisation des processus comme les machines connectées et le jumeau numérique peuvent également constituer un atout décisif. L'entreprise peut éventuellement avoir intérêt à investir dans l'analyse et l'exploration des données, et à étudier l'utilisation de l'apprentissage automatique. Des technologies issues du domaine de recherche des procédés de fabrication doivent le cas échéant également être intégrées aux activités de l'entreprise. Une entreprise traitant principalement de l'intelligence artificielle doit quant à elle aussi garder à l'esprit des applications issues des sciences de la vie comme les technologies médicales portables, le microbiote et le microbiome, et l'alimentation personnalisée. Les technologies des domaines de recherche «énergie et environnement» et «procédés de fabrication et matériaux» sont tout aussi importantes: on peut penser par exemple aux concepts de mobilité et à la fabrication additive, qui bénéficient des avancées en intelligence artificielle tout en agissant comme moteurs de cette tendance technologique.

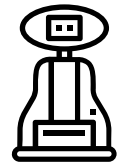


Scannez le code QR pour consulter notre site web, qui propose des informations supplémentaires concernant les différentes tendances technologiques non incluses dans la version papier faute de place.

Systèmes autonomes

Des machines intelligentes au service de l'humanité

Roland Siegwart (ETH Zurich)



Les systèmes autonomes sont des machines et des processus capables au moins partiellement de prendre de manière indépendante des décisions adaptées à la situation. Ces décisions se fondent sur des mesures continues par capteurs et sur des algorithmes d'intelligence artificielle. On qualifie de systèmes «automatiques» des systèmes comme les robots de ligne de production ou les machines-outils qui prennent des décisions de manière indépendante dans un espace décisionnel clairement définissable. Par contraste, les systèmes «autonomes», par exemple les véhicules autonomes, les drones ou les robots de livraison, évoluent dans un environnement dont l'espace décisionnel est ouvert et dans lequel peuvent se produire des situations surprenantes et non prévisibles auxquelles ils doivent réagir de manière fiable. Une piste prometteuse mais souvent surestimée repose sur les systèmes apprenants. Cependant, réagir de façon adaptée à des situations inattendues, chose qui semble souvent simple pour l'être humain, constitue encore un défi pour les systèmes autonomes.

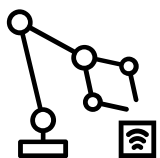
État des lieux

Ces dernières années, la recherche dans le domaine des systèmes autonomes a fortement progressé. La plupart de ces machines sont néanmoins encore à plusieurs années voire décennies d'une mise en œuvre industrielle. En revanche, des engins de nettoyage ou des robots transporteurs autonomes sont déjà en service et font l'objet d'une demande croissante. Les systèmes autonomes sont d'une grande complexité et leur développement nécessite des investissements élevés. Malgré les promesses de l'intelligence artificielle, il est important de se concentrer sur ce qui est faisable, comme par exemple les robots agricoles ou transporteurs, plutôt que de se perdre dans des visions de robots humanoïdes. Les systèmes autonomes combinent actionneurs, mécanique de précision et systèmes intelligents de réglage et de capteurs afin d'exécuter de manière indépendante des opérations complexes.

Perspectives d'avenir

Dans les années à venir, l'utilisation de systèmes autonomes simples comme les robots d'inspection, de nettoyage ou de transport augmentera fortement. Des systèmes plus complexes comme les véhicules autonomes, les drones d'intérieur ou les robots agricoles seront utilisés de manière croissante dans des environnements plus structurés. En raison de leur complexité, les systèmes autonomes ne s'établiront que lentement dans notre environnement quotidien: à moyen terme, il faut s'attendre à une évolution plutôt qu'à une révolution. À long terme, les systèmes autonomes comme les véhicules autonomes ou les robots agricoles modifieront cependant en profondeur différents domaines.

Grâce à des compétences élevées dans tous les domaines pertinents pour les systèmes autonomes, la Suisse présente une capacité quasiment inégalée à développer de telles machines complexes et à les commercialiser avec succès à l'international. Il s'agit de continuer à développer le leadership des établissements de l'enseignement supérieur et de mettre en œuvre ces technologies de manière rentable dans des entreprises capables de vite faire évoluer l'échelle de leur activité.



Systèmes cyberphysiques

Le monde réel et le monde virtuel en interaction dynamique

Bernhard Braunecker (Société Suisse de Physique) et **Guido Piai** (OST)



Les systèmes cyberphysiques, initialement introduits dans le contexte de l'industrie 4.0, décrivent des processus informatiques par lesquels des entités physiques (processus, machines, personnes, objets, etc.) font l'objet d'une réplique numérique et interagissent avec cette réplique en temps réel. Les systèmes cyberphysiques sont applicables dans quasiment tous les domaines de la société, ainsi par exemple le secteur financier, le système de santé, l'industrie et la production, ou encore l'agriculture. On peut citer parmi les exemples concrets: les horaires en ligne des CFF, le suivi de colis de La Poste, l'application SwissCovid de la Confédération, les réseaux sociaux (Facebook, LinkedIn, etc.) et certains procédés de production de pointe. On peut s'attendre à une élaboration continue de nouvelles solutions, de nouveaux modèles commerciaux et de nouveaux services. La mise en œuvre et l'application de systèmes cyberphysiques sont tributaires d'infrastructures Internet haut débit et résilientes couvrant l'ensemble du territoire, de capacités de calcul et de stockage centralisées et décentralisées, ainsi que d'appareils et de capteurs mobiles.

État des lieux

Historiquement, les États-Unis sont en tête dans ce domaine. Mais ces dix dernières années, la Chine a nettement progressé. Viennent ensuite l'Europe et d'autres pays comme l'Inde. La Suisse doit trouver son propre chemin, adapté aux compétences et aux forces industrielles du pays. Si de nombreuses applications existent depuis longtemps déjà, il s'agit cependant d'identifier et de se saisir à temps des possibilités liées à l'expansion du débit, de la puissance de calcul et de la capacité de stockage. La numérisation systématique de l'éducation, de l'industrie et de la société nécessaire à cet effet doit être réalisée au moyen de mesures spécifiques.

En tant que pays innovant, la Suisse est active en matière de transformation numérique et il s'y crée différentes startups performantes. Malgré tout, les PME de petite et de moyenne taille n'exploitent pas assez le potentiel existant, souvent pour des raisons de coûts. Il faut améliorer l'articulation entre technologie et gestion au moyen de nouveaux modèles commerciaux.

La Suisse dispose des compétences spécialisées requises: l'informatique, les méthodes algorithmiques et la gestion font partie des enseignements dispensés dans les établissements de l'enseignement supérieur du pays. Mais la collaboration entre ingénieur·e·s, physicien·ne·s industriel·le·s,

mathématicien·ne·s industriel·le·s et gestionnaires est insuffisante dans les cas d'application concrets. Les universités, les hautes écoles spécialisées, mais aussi les académies telles la SATW sont appelées à agir.

Perspectives d'avenir

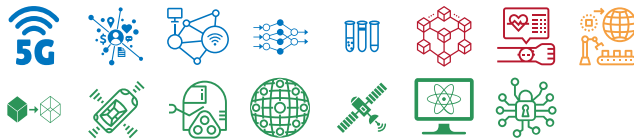
Les systèmes cyberphysiques réunissent et associent différentes technologies, en particulier les technologies de mise en réseau et de communication. L'essor des possibilités technologiques rend ces systèmes toujours plus performants. Il en résulte pour les PME de nouveaux modèles commerciaux et des processus de production hautement efficaces, pouvant ensuite être optimisés et ajustés en continu aux nouvelles conditions de marché.

Si elle parvient à rassembler les compétences clé dont elle dispose, la Suisse peut s'assurer une position solide à l'international avec des solutions techniques destinées à des systèmes cyberphysiques innovants. Des opportunités considérables s'offrent en particulier à l'industrie suisse, active mondialement dans le développement de machines et de systèmes de précision.

Cybersécurité

Des mesures techniques, organisationnelles et sociales pour sécuriser les données

Hans-Peter Käser (BWL), Bernhard Tellenbach (ZHAW) et Nicole Wettstein (SATW)



Le terme «cybersécurité» désigne les composants matériels et logiciels qui protègent les appareils informatiques de tout accès non autorisé, mais il couvre également les mesures non techniques comme la législation et l'éducation des utilisateurs·rices. Les cyberattaques peuvent viser à accéder à des données sensibles d'organisations ou d'utilisateurs·rices, à procéder à du chantage ou à supprimer des données. Veiller à une cybersécurité adaptée à la confidentialité des données relève de la responsabilité des constructeurs de matériel et des producteurs de logiciels, des gestionnaires d'infrastructure, des fournisseurs de services numériques et des utilisateurs·rices. La cybersécurité est le fondement d'une numérisation étendue et sûre, et elle est essentielle à de nombreux développements technologiques.

État des lieux

Les milieux politiques ont intégré l'importance de la cybersécurité. Tout comme la Suisse, de nombreux pays ont établi une stratégie nationale dans ce domaine. En raison de la dimension globale des risques et des menaces et de la similarité des défis, ces stratégies présentent de nombreux points communs. Grâce à de nouvelles technologies, il est devenu plus difficile de mener à bien une cyberattaque, mais les incidents de sécurité restent néanmoins nombreux et parfois sévères. Ces incidents s'expliquent souvent par le manquement à des principes de sécurité de base; outre l'encouragement de nouvelles solutions de sécurité, une importance croissante revient donc à la réglementation et à la certification des services, des produits et des processus des technologies de l'information et de la communication. Pour beaucoup de produits reliés à Internet et destinés à un usage privé, l'aspect de la cybersécurité n'est pas pris en compte en raison du manque de prescriptions légales, de questions de coûts ou d'enjeux de rapidité de lancement du produit.

Grâce à sa neutralité, à sa sécurité juridique et à sa stabilité politique, la Suisse dispose des conditions idéales pour un écosystème porteur et efficace en matière de cybersécurité. Elle a déjà obtenu des résultats dans de nombreux domaines et elle est bien positionnée en comparaison internationale. Avec le *Centre national pour la cybersécurité (NCSC)*, la *Stratégie nationale de protection de la Suisse contre les cyberrisques (SNPC)* et le *Cyber-Defence Campus*

(CYD), la Suisse dispose de structures pour faire face de manière active aux cyberproblématiques. Par ailleurs, les établissements de l'enseignement supérieur et les entreprises mènent des formations et des recherches dans ces domaines. Dans le cadre de la formation militaire, il est désormais possible d'obtenir un diplôme de spécialiste en cybersécurité reconnu au niveau fédéral. Afin de répondre aux besoins croissants en matière de solutions technologiques innovantes, différents programmes d'encouragement de l'innovation sont axés sur les startups dans le domaine de la cybersécurité.

Perspectives d'avenir

Au niveau technique, une automatisation croissante est souhaitable. L'intelligence artificielle doit par exemple aider à identifier les failles et les vulnérabilités des systèmes, et à sécuriser les points d'accès. À l'avenir, il sera également important de partager les informations concernant les menaces existantes. Des efforts sont en cours à l'international pour établir des plateformes améliorées d'échange d'informations au moyen de la technologie blockchain. Au niveau politique, dans un avenir proche les questions de réglementation et de standardisation deviendront centrales. Dans l'UE, le *Cybersecurity Act* introduit des normes et des règles contraignantes et vérifiables pour les services essentiels, qui définissent pour les entreprises et le secteur public des mesures visant à sécuriser leurs réseaux logistiques et leurs processus. →

En Suisse, on discute d'une obligation de déclarer les cyberincidents, qui existe déjà au niveau de l'UE pour certains incidents. Avec la numérisation croissante, le thème de la cybersouveraineté et la question de la préférence à accorder aux solutions nationales pour les systèmes critiques deviennent plus pressants. Il est essentiel que la Suisse développe plus fortement des capacités et des compétences propres: un écosystème suisse en matière de cybersécurité

est indispensable au succès futur de la place économique suisse. Les PME suisses et la population ont par ailleurs besoin de solutions facilement applicables. Comme la cybersécurité est aussi fortement liée à des facteurs humains, il est essentiel d'en améliorer la compréhension dans le monde du travail, en politique et dans la vie privée. Au-delà de l'innovation technologique, il faut aussi sensibiliser, former et transmettre des connaissances neutres et objectives.

Industrie 4.0



Développer et mettre en œuvre des innovations grâce à la mise en réseau et à la numérisation

Patricia Deflorin (FH Graubünden) et Philipp Schmid (CSEM)



L'industrie 4.0 met à profit des systèmes intelligents en réseaux numériques pour la production industrielle, couvrant l'ensemble des fonctions des achats à la logistique. L'industrie 4.0 repose sur de nombreuses technologies innovantes comme la réalité augmentée, l'analyse, le stockage et la transmission des données, les jumeaux numériques, la robotique collaborative et les capteurs.

État des lieux

Deux domaines d'application se dessinent plus particulièrement: l'usine intelligente et les services basés sur l'exploitation de données. Dans l'usine intelligente, l'industrie 4.0 comprend trois niveaux d'automatisation des processus: la surveillance de l'état d'une machine ou d'un processus, l'optimisation du processus sur la base de données au moyen d'une maintenance préventive conditionnelle, et l'auto-organisation du système basé sur un auto-diagnostic et des décisions autonomes. Les services basés sur l'exploitation de données comme par exemple la maintenance préventive résultent de la mise en réseau croissante des machines et de la collecte et de l'analyse continues de leurs données. Cela permet non seulement d'indiquer l'état des machines mais aussi d'en déduire des mesures de maintenance préventive conditionnelle. Les principaux défis ne se situent actuellement pas au niveau de la technologie mais de l'accès à des

données de quantité et de qualité suffisantes. Ces aspects sont déterminants pour mettre à profit l'intelligence artificielle.

Il faut souligner les succès de mise en œuvre réalisés dans l'industrie automobile, dont profitent aussi d'autres secteurs. En Suisse, la perspective de contrôles de qualité en temps réel et de traçabilité complète pour chaque unité produite est un moteur important pour la mise en œuvre d'approches de l'industrie 4.0. L'industrie suisse est bien positionnée pour participer aux développements de l'industrie 4.0 en tant qu'utilisatrice efficiente. →

Perspectives d'avenir

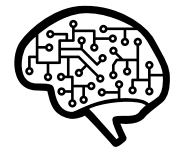
L'industrie 4.0 s'imposera dans l'ensemble de la production industrielle et aura un impact économique majeur. La disponibilité de puissance de calcul peu coûteuse, les avancées de l'intelligence artificielle et l'exploitation accrue des données permettront de nombreuses autres applications tant en matière d'usine intelligente que de nouveaux services.

Comme la Suisse ne compte pas de fournisseur global de solutions logicielles pour l'automatisation industrielle, la mise en réseau et la collaboration locales sont essentielles. En particulier, les PME suisses sont tributaires de solutions élaborées par des partenaires de développement issus de la recherche appliquée. L'industrie 4.0 présente pour le pays à hauts salaires qu'est la Suisse une grande opportunité qu'il s'agit de saisir afin de rester concurrentiel à l'international.

Intelligence artificielle

L'intelligence par l'expérience

Alessandro Curioni et Patrick Ruch (IBM Research – Zurich)



L'intelligence artificielle (IA) permet aux ordinateurs et aux machines d'imiter les processus du cerveau humain dans les domaines de la perception, de l'apprentissage, de la conception de solutions et de la prise de décision. Une distinction est souvent faite entre l'IA faible, qui se concentre sur la résolution de problèmes d'application spécifiques, et l'IA forte, qui peut accomplir différentes tâches avec des capacités intellectuelles semblables à celles des humains.

État des lieux

Ces dix dernières années, l'IA a connu plusieurs innovations majeures – reconnaissance d'images, jeux de stratégie complexes et réponse à des questions en langage naturel. La plupart de ces avancées reposent sur une forme spécifique d'apprentissage automatique dénommée apprentissage profond («deep learning»). Il existe aujourd'hui de nombreuses applications technologiquement abouties: reconnaissance faciale, gestuelle et vocale, moteurs de recommandation personnalisés, découverte de médicaments et analyse d'imagerie médicale.

La Suisse fait figure de pionnière dans la recherche en IA et dans ses applications pratiques. Elle doit mettre en place des politiques d'information transparente des parties prenantes concernant les avantages et les risques de l'IA, et établir un cadre réglementaire qui garantisse une

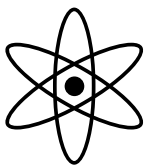
IA sûre, digne de confiance et éthique. Par ailleurs, la formation des salarié·e·s aux connaissances et aux compétences nécessaires au développement et au déploiement de technologies d'IA est décisive pour que les entreprises suisses adoptent l'IA avec succès.

Perspectives d'avenir

Au fil du temps, il est probable que l'IA se généralisera dans notre quotidien et façonnera une normalité dans l'accès aux actualités, l'utilisation de services personnalisés et l'interaction avec des systèmes intelligents à domicile, au travail ou sur les réseaux sociaux. Il est donc difficile d'imaginer qu'un secteur quel qu'il soit puisse ne pas être impacté d'une manière ou d'une autre par l'IA. Les entreprises qui adoptent les technologies de l'IA avec succès en bénéficieront à deux niveaux: premièrement par l'amélioration de l'efficacité de leurs processus internes grâce à

une automatisation assistée par IA, et deuxièmement par l'intégration de l'IA dans leurs produits et services pour mieux répondre aux besoins de leur clientèle et de leurs partenaires. Le profil de qualification des salarié-e-s doit évoluer et l'industrie doit s'adapter. En termes sociétaux, la prolifération de services axés sur les besoins des consommateurs-rices faisant appel à l'IA et à l'utilisation de données personnelles amplifiera les demandes de transparence en matière d'IA.

Les acteurs politiques et économiques suisses ne peuvent pas se permettre d'ignorer l'IA. L'IA est disruptive en ce qui concerne l'automatisation de processus commerciaux, l'interaction personne-machine et l'exploitation de big data. Les entreprises devront utiliser l'IA afin de demeurer compétitives. D'autre part, l'IA présente des défis particuliers qu'il s'agit de prendre en compte. Les parties prenantes politiques doivent adopter une approche proactive et faire preuve de leadership, car le champ de l'IA se développe rapidement et il faut aborder de front les appréhensions et les inquiétudes sociétales en matière d'éthique, de protection des données et de transparence.



Technologies quantiques

La danse des quanta passe à la grande scène

Bernhard Braunecker (Société Suisse de Physique), **Andreas Fuhrer** et **Thilo Stöferle** (IBM Research – Zurich, Société Suisse de Physique)



Le terme «technologie quantique» couvre l'ensemble des technologies fondées sur des effets quantiques comme p.ex. les niveaux d'énergie atomiques quantifiés, l'effet tunnel, la superposition ou l'intrication quantiques. Dans le contexte de la deuxième révolution quantique, on n'y inclut cependant souvent que les technologies qui font usage du contrôle ciblé de certains systèmes quantiques pour rendre possibles des méthodes ou des composants radicalement nouveaux. Ceci comprend par exemple l'informatique, la communication, la cryptographie, les capteurs et la simulation quantiques, dont les stades de développement sont très disparates.

État des lieux

La cryptographie quantique est déjà présente sur le marché avec des produits, un rôle de pionnier mondial revenant à l'entreprise suisse *ID Quantique*. Des capteurs quantiques sont intégrés dans des capteurs magnétiques commerciaux, et l'industrie automobile et la technologie médicale travaillent également à de futurs produits. La prochaine génération d'horloges atomiques, dites horloges optiques, offre une précision considérablement accrue. Le traitement de données au moyen d'ordinateurs

quantiques attire une attention toute particulière: il a le potentiel de modifier en profondeur notre société numérisée, surtout pour ce qui est des problématiques nécessitant d'importantes puissances de calcul. Les ordinateurs quantiques sont actuellement encore instables mais ils font d'ores et déjà l'objet d'une utilisation commerciale afin de vérifier l'utilité de nouveaux algorithmes quantiques. De manière générale, leur sensibilité inhérente aux perturbations extérieures de tout type, qu'elles soient électriques, magnétiques ou mécaniques, constitue un

défi majeur et explique entre autres la complexité de cette technologie. La Suisse est très bien positionnée à l'international en ce qui concerne la recherche portant sur les technologies quantiques. Mais il s'agit de continuer à promouvoir cette compétence au moyen de programmes de recherche à long terme, et de développer et consolider les passerelles vers l'industrie. C'est seulement à cette condition que les entreprises suisses pourront concrétiser leur potentiel commercial dans ces domaines.

Perspectives d'avenir

Le domaine de la technologie quantique a connu un immense essor ces dernières années, avec des investissements publics et privés considérables. Cela a permis des avancées spectaculaires et on peut s'attendre à ce que cette tendance se renforce encore dans les cinq années à venir. Un nombre croissant de solutions vont parvenir à maturité commerciale, avec en tête la communication quantique, la technologie des capteurs quantiques et l'informatique quantique. Le contrôle de ces systèmes pose cependant des exigences extrêmes en termes de précision et de stabilité des systèmes de contrôle mécaniques, électriques et optiques. Il en résulte de nombreuses opportunités pour les PME suisses de fournir des composants de pointe pour la fabrication ou l'exploitation des technologies quantiques. Les conditions cadre jouent un rôle central pour maintenir à long terme la compétitivité internationale, ainsi entre autres la formation d'ingénieur·e·s quantiques, le soutien des startups et des PME, et le lancement d'initiatives stratégiques d'envergure dans ce domaine en mutation rapide.



Agriculture numérique

Des technologies numériques pour une agriculture performante et durable

Thomas Anken (Agroscope)



Les processus de production agricoles relèvent d'interdépendances complexes entre le sol, le climat, les plantes, les animaux et les humains. Il est possible de piloter ces processus en assurant des apports d'engrais aussi adaptés que possible, en maîtrisant la poussée des mauvaises herbes par des moyens mécaniques et des produits phytosanitaires, et en nourrissant les animaux de manière ciblée. Ce faisant, il s'agit de préserver les ressources naturelles, de veiller à la santé des animaux, d'éviter les intrants inutiles et de réaliser des rendements optimaux. Le terme «agriculture numérique» désigne l'ensemble des technologies numériques mises au service des processus de production agricoles.

État des lieux

Les avancées en technologie des capteurs permettent de recueillir des données relatives à l'environnement, aux plantes, aux animaux et aux machines, et de toujours mieux comprendre et quantifier les processus en jeu. Sur cette base, il devient possible d'optimiser la production afin d'éviter les coûts inutiles ainsi que les répercussions négatives sur l'environnement, les animaux et l'être humain. Les efforts de développement portent sur certains types de capteurs, mesurant par exemple l'humidité du sol à des fins d'irrigation, mais aussi sur de nouveaux procédés de production.

Certaines technologies sont déjà largement répandues en Suisse, comme les robots de traite (dont plus de 800 unités sont en service), les distributeurs automatiques d'aliments concentrés pour vaches laitières ou les systèmes de guidage automatique par satellite pour tracteurs. Les agriculteurs-rices utilisent également différentes applications sur smartphone. Mais tous ces exemples ne doivent pas masquer le fait qu'il demeure en Suisse un grand potentiel inexploité des technologies numériques dans le domaine agricole. Cela s'explique certainement en partie par la taille restreinte des exploitations, qui peuvent donc être gérées de manière relativement simple sans faire appel aux technologies numériques. Mais il reste aussi des difficultés d'ordre technique à résoudre pour pouvoir saisir de manière adéquate l'état des plantes, des sols et des animaux, et exploiter ces données de manière profitable à l'exploitation.

Perspectives d'avenir

Le déploiement sur le terrain de véhicules sans conducteur-riche est imminent. Ces véhicules reconnaissent automatiquement les mauvaises herbes et adoptent des traitements spécifiques adaptés à chaque plante individuelle. Au moyen de drones et d'images satellites, il est possible de reconnaître l'état nutritionnel des plantes et de leur apporter un engrais adapté et précisément ciblé, ainsi que de guider les tracteurs au centimètre près. Pour toutes ces applications, des capteurs collectent des données qui sont traitées et servent ensuite de base de décision pour piloter la production, apportant ainsi un complément à la grande expérience et aux connaissances de terrain des agriculteurs-rices. De nombreuses applications sont en cours de développement sans faire encore l'objet d'une utilisation pratique.

Étant donné le caractère limité des ressources et la croissance de la population mondiale, il est crucial de continuer à développer les connaissances et à améliorer les techniques et les technologies. C'est la seule manière de produire les aliments nécessaires de manière durable et efficiente. →

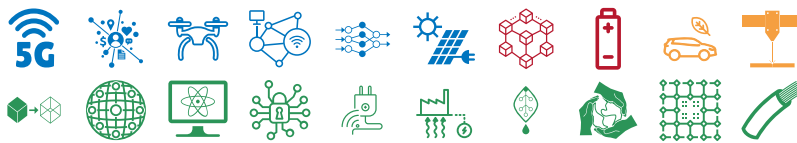
Tout comme dans le cas de l'industrie automobile, la Suisse ne joue pas un rôle important dans le marché de la technologie agricole. Mais les entreprises suisses produisent de nombreux composants pour l'agriculture numérique, en particulier des capteurs pour machines, des caméras 3D pour les robots de traite, des capteurs de température et autres pour

les stations météorologiques etc. Différentes startups élaborent par ailleurs des idées innovantes pour automatiser les systèmes d'irrigation, localiser automatiquement les moutons dans les alpages ou construire l'un des premiers robots de désherbage. Un nombre important de petits et de grands potentiels s'ouvrent ainsi aux entreprises suisses.

Approvisionnement énergétique

Durable, fiable, sûr, abordable

Christian Schaffner (ETH Zurich)



L'approvisionnement énergétique comprend l'électricité, les combustibles et les carburants ainsi que la chaleur. Son objectif est d'assurer à tout moment une couverture sûre, fiable, abordable et durable des besoins en énergie.

État des lieux

L'approvisionnement en énergie se transforme en particulier face à la pression de réduire les émissions nocives pour le climat: l'enjeu consiste à délaissier les énergies primaires fossiles (comme le gaz naturel et le pétrole) au profit de sources renouvelables (en particulier le photovoltaïque et l'éolien). Ceci est technologiquement plus facile à réaliser dans certains domaines, par exemple l'approvisionnement en électricité, les transports individuels privés et l'approvisionnement thermique des bâtiments. Dans d'autres domaines, cette transition est plus difficile. C'est notamment le cas du trafic aérien et du transport de marchandises. Les technologies de stockage d'électricité, en particulier le stockage par batterie, sont de plus en plus répandues. Dans le domaine de la mobilité, on explore l'utilisation de carburants de synthèse et de l'hydrogène. Dans le secteur des bâtiments, les pompes à chaleur remplacent de manière croissante les chauffages basés sur des vecteurs énergétiques fossiles. Au niveau local, on observe de plus en plus la mise à l'essai et, en partie, la mise en œuvre réussie d'un pilotage intelligent des réseaux et des systèmes.

La Suisse présente une activité de recherche intense dans le domaine de l'énergie. Ces recherches portent sur les technologies de stockage, les carburants de synthèse et les systèmes de réseau intelligents. La recherche fondamentale compte également des chercheurs-ses de pointe au niveau international. Au cours des dernières décennies, les technologies de l'énergie se sont fortement développées dans le domaine des bâtiments, avec pour résultat une importante baisse de l'intensité carbone, qui devrait se poursuivre. En revanche, la mobilité est à la traîne. Les émissions de gaz à effet de serre ne baissent ni en termes absolus ni en termes relatifs par rapport à la distance parcourue. Le marché suisse de l'approvisionnement en électricité, fermé à la concurrence, freine les solutions innovantes décentralisées (au niveau des réseaux de distribution) par rapport à d'autres pays. La décarbonation constitue le défi principal de l'approvisionnement énergétique en Suisse: il s'agit de réduire les émissions de CO₂ tout en maintenant une sécurité de l'approvisionnement élevée à des coûts abordables. Ce défi est majeur en particulier pour la mobilité. L'électrification accrue des do-

maines de la chaleur et de la mobilité entraînera une hausse des besoins en électricité à laquelle il faudra répondre. Une plus grande souplesse est nécessaire dans l'approvisionnement électrique, nécessitant des technologies novatrices et des systèmes intelligents.

Perspectives d'avenir

Tant dans le domaine de la mobilité que dans celui des bâtiments, l'abandon des combustibles fossiles ne peut être réalisé dans un avenir proche que par un durcissement des réglementations. Dans le domaine de l'énergie, les innovations à valeur ajoutée climatique connaîtront plus de succès

que les autres. Selon les scénarios actuels, les prix de l'énergie n'augmenteront que légèrement. L'objectif d'une Suisse climatiquement neutre d'ici 2050 est ambitieux mais urgent et indispensable. Dans le secteur de l'électricité, beaucoup dépend de l'ouverture complète ou non du marché suisse. Une telle libéralisation pourrait donner accès au marché à de nombreux nouveaux acteurs et favoriser des innovations importantes. Les relations avec l'UE jouent également un rôle clé: pour garantir une sécurité d'approvisionnement élevée à des prix relativement abordables, il faut que les échanges avec nos pays voisins puissent continuer à s'effectuer de manière souple et efficiente.



Économie circulaire

Des circuits fermés pour les matériaux et les produits

Xaver Edelmann (World Resources Forum)



L'économie circulaire suit une logique de réduction de la consommation des ressources naturelles. Elle a pour principe d'utiliser les ressources de manière efficiente en maintenant aussi longtemps que possible leur qualité d'origine. Il faut pour cela fermer les circuits de matériaux et de produits, et maintenir ceux-ci en circulation plus longtemps. Comparé au système économique linéaire actuel, cela permet de diminuer la consommation de matières premières primaires. Les produits durent plus longtemps et l'activité humaine génère moins de déchets, permettant de réduire la charge environnementale et d'augmenter la création de valeur.

État des lieux

La Commission européenne prend régulièrement des mesures pour renforcer les approches relevant de l'économie circulaire et augmenter la durabilité écologique du système économique. En 2015, elle a ainsi adopté un paquet allant dans ce sens. La directive sur l'écoconception joue un rôle clé dans l'établissement d'une économie circulaire. Elle constitue la base légale des exigences minimales applicables aux appareils ménagers, stipulant la consommation énergétique maximale et exigeant que les appareils soient réparables.

En 2016, les secteurs relevant de l'économie circulaire employaient dans l'UE plus de quatre millions de personnes. Ces cinq dernières années, le marché mondial de l'économie circulaire et de l'efficacité des matériaux et des ressources a enregistré une hausse de plus de 10%, une croissance supérieure à celle du marché global. Dans le débat public, les programmes d'encouragement et de soutien pour les approches économiques durables sont aussi regroupés sous le terme de «green new deal» ou de «pacte vert». →

En tant que pays pauvre en matières premières, la Suisse a mis en place des éléments d'une économie circulaire dès le milieu des années 1980. Le pays est ainsi parvenu à fermer du moins partiellement certains circuits. En 2018, sur les 17,5 millions de tonnes de déchets de chantier comme le béton, le gravier, le sable, l'asphalte et les matériaux de maçonnerie, presque 12 millions de tonnes ont été réutilisées. Plus de 5 millions de tonnes, en particulier des déchets de chantier non triés, échappent encore à la revalorisation matérielle. En ce qui concerne les déchets ménagers, un peu plus de la moitié fait l'objet d'une collecte séparée et d'un recyclage. Le taux de recyclage élevé en Suisse fait cependant face à des quantités de déchets considérables. Quasiment aucun autre pays ne génère autant de déchets ménagers par habitant.

Perspectives d'avenir

L'économie circulaire implique une nouvelle gestion des ressources. Il s'agit de découpler la croissance économique de la consommation de ressources, cette dernière devant être réduite de manière radicale. La productivité des ressources doit donc être massivement augmentée, produisant plus avec moins de ressources. Des approches économiques alternatives sont nécessaires pour atteindre cet objectif. Seul un changement de comportement des consommateurs-rices permettra de progresser vers une véritable économie circulaire.

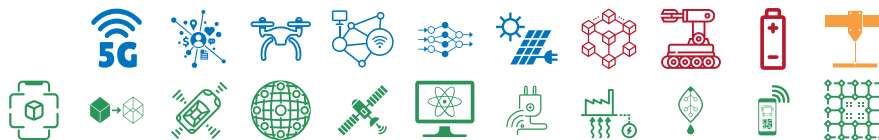
Les aspects sociaux et économiques de l'économie circulaire sont encore trop peu étudiés, il faut donc poursuivre les efforts de recherche. La réduction de la consommation de matières premières est incontournable pour ne pas dépasser les limites planétaires et pour respecter les engagements de l'Accord de Paris sur le climat. La Suisse doit s'engager en faveur d'un bouclage véritable des circuits de matières premières afin de ne pas s'arrêter à un simple «green washing». C'est la seule manière de réduire les impacts environnementaux de notre société de consommation et de gaspillage.



Villes intelligentes

Augmenter la qualité de vie et optimiser l'efficacité des ressources

Vicente Carabias (ZHAW) et Andrew Paice (HSLU)



Le concept de «ville intelligente» (ou «smart city») recouvre différents efforts visant à augmenter la qualité de vie et l'efficacité des ressources dans les villes et les espaces urbains au moyen d'innovations sociales et technologiques. Ces vingt dernières années, la définition et les objectifs de la ville intelligente ont fortement évolué. Aujourd'hui, les efforts se concentrent surtout sur les améliorations que peuvent apporter les transformations numériques des espaces et des modes de vie urbains pour les citoyen·ne·s, l'environnement, les entreprises et l'administration.

État des lieux

Les villes intelligentes utilisent aussi différentes technologies basées sur les réseaux de communication et sur la disponibilité en temps réel de données provenant de l'espace public, couplées au traitement de grands volumes de données. Il faut aujourd'hui pour cela relier des sources de données d'origines distinctes publiques et privées. L'espoir est de pouvoir ainsi rendre les infrastructures intelligentes plus efficaces et plus transparentes. L'objectif est de favoriser la durabilité écologique et l'optimisation des ressources, afin d'augmenter la qualité de vie. On peut citer à titre d'exemples concrets une meilleure gestion du trafic, la possibilité de coordination entre départements de l'administration publique etc. Les défis que présente le développement d'applications «smart city» relèvent de la complexité de ces systèmes ainsi que de l'impératif de protection et de propriété des données. Le succès de projets «smart city» repose sur une collaboration informée entre le public, le gouvernement et l'économie.

Il existe à l'international de nombreuses initiatives de villes intelligentes, allant de projets pilotes et de projets phares à des processus de transformation urbaine. Étant donné la multiplicité des objectifs possibles, aucune ville n'a cependant réalisé le plein potentiel de ces approches. Dans les classements internationaux qui incluent les villes suisses, celles-ci figurent dans le peloton de tête.

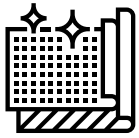
De plus en plus de villes suisses ont une stratégie «smart city», inspirant souvent des régions voisines à définir leur propre stratégie «smart city» ou du moins numérique. Parmi les 84 villes ayant participé au *Swiss Smart City Survey 2020*, environ 43% ont une approche active au thème de la ville intelligente. Toutes les grandes villes participantes (plus de 100'000 habitant·e·s) sont en train de se transformer en ville intelligente. En revanche, seul moins d'un tiers des villes et des communes de plus petite taille (moins de 20'000 habitant·e·s) traitent activement du sujet. L'intérêt pour le thème de la ville intelligente augmente aussi dans les villes de petite et de moyenne taille, malgré leurs ressources personnelles et financières souvent limitées. →

Des approches fréquentes incluent des applications d'e-gouvernement ou l'atteinte d'objectifs d'efficience ou de durabilité. Les axes de développement principaux d'une ville intelligente se situent dans les domaines «environnement» (46,4%), «living» (43,7%) et «people» (42,3%). Dans tous les cas, il s'agit de faire de la ville un lieu de vie et de travail attrayant pour ses habitant·e·s et pour les acteurs économiques.

Perspectives d'avenir

Le défi principal est de définir ce que signifie le terme «ville intelligente» pour la population, l'économie locale et l'administration municipale concernées. Sur cette base, il devient possible de déterminer comment ces avantages peuvent être réalisés dans le respect de l'acceptation de toutes les parties impliquées.

L'État et l'économie sont intéressés par les applications «smart city» et la thématique fait donc l'objet d'une élaboration active en Suisse. Mais le chemin est encore long. À moyen terme, on peut s'attendre à différents projets pilotes et mises à l'essai car de nombreuses villes et régions sont en quête de solutions répondant à leurs besoins particuliers. La ville intelligente sera le résultat d'un processus partenarial plutôt que d'une implémentation par le haut.



Matériaux du futur

Des matériaux pour façonner l'avenir

Pierangelo Gröning (Empa)



Le terme «matériaux du futur» désigne une quantité indéterminée de matériaux présentant des propriétés physiques nouvelles ou nettement améliorées. Les objectifs principaux visés lors du développement de nouveaux matériaux incluent l'applicabilité multifonctionnelle, une production et une transformation économes en ressources ainsi que le bouclage de cycles de matériaux.

État des lieux

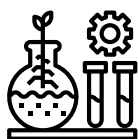
Les principaux moteurs du développement de nouveaux matériaux sont les défis actuels d'ordre écologique, économique et social, parmi eux le changement climatique, l'économie circulaire et la numérisation. Les nouveaux matériaux jouent un rôle clé dans la décarbonation de l'industrie et de la société. Le stockage d'énergie électrique ou la fabrication de carburants de synthèse et d'absorbants de CO₂ reposent ainsi aussi sur de nouveaux matériaux. La mise en place d'une économie circulaire ne peut se faire que si des secteurs comme l'industrie du bâtiment ou de l'emballage misent plus fortement sur des matériaux recyclables. Les matériaux quantiques comme le graphène ou les matériaux topologiques, qui présentent des propriétés différentes en surface et en volume, rendent possible le développement de composants électroniques novateurs basés sur des effets de mécanique quantique pour le traitement de l'information. Cela permet de réduire de manière spectaculaire les besoins en énergie du traitement de l'information. Parmi les applications possibles figurent des capteurs ultra-sensibles, des puces neuromorphiques pour l'intelligence artificielle ou des ordinateurs quantiques ultra-rapides. Cela est important en particulier parce que l'architecture informatique actuelle touchera bientôt à ses limites matérielles-physiques et que la numérisation croissante exige des ordinateurs toujours plus performants.

La recherche sur les matériaux dans les établissements de l'enseignement supérieur et les instituts de recherche en Suisse est très variée et se situe à la pointe internationale. La collaboration entre recherche publique et industrie est solidement établie depuis des décennies et fortement axée sur la pratique et l'application.

Perspectives d'avenir

Le carbone est un composant de base prometteur des matériaux du futur et acquerra une importance stratégique. En tant que matériau composite, le carbone présente des propriétés mécaniques exceptionnelles; en tant que nanostructure, il est porteur d'espoir pour l'électronique post-silicium; en tant que biomatériau, il est par ailleurs biodégradable. Le carbone réunit ainsi un grand nombre des exigences applicables à un matériau du futur. La fabrication de produits et la synthèse de matériaux font l'objet d'une intégration croissante, jusqu'au cas extrême où les deux processus se fondent littéralement, comme p.ex. dans l'impression métal 3D. Cela augmente de manière massive la complexité des processus de fabrication car outre le respect des tolérances de fabrication il s'agit d'assurer la qualité du matériau en cours de fabrication des produits. C'est pourquoi les connaissances et les compétences en matière de matériaux et de processus sont de plus en plus importantes en ingénierie industrielle contemporaine. Le développement de nouveaux matériaux est souvent aussi lié à de nouvelles technologies de transformation et de processus. →

En raison de ce degré de complexité élevé, seul un nombre très restreint d'entreprises seront capables de développer les capacités nécessaires. Les établissements de l'enseignement supérieur et les instituts de recherche suisses disposent des compétences requises. Les innovations et les réussites commerciales seront le résultat de collaborations partenariales entre l'industrie et la recherche publique. Des partenariats public-privé comme le réseau suisse des *Advanced Manufacturing Technology Transfer Centers* opèrent des installations de production pilotes en accès libre. Avec le soutien de partenaires de l'enseignement supérieur, les entreprises ont ainsi la possibilité de se familiariser avec de nouveaux matériaux et leurs technologies de transformation. Tant l'industrie que la recherche bénéficient de l'expérience ainsi acquise. Le transfert de technologie du laboratoire de recherche vers l'industrie est facilité et fluidifié. De telles initiatives permettent aussi de minimiser les risques financiers encourus par les entreprises.



Biotechnologie

Des processus naturels et des organismes vivants au service de l'être humain

Hans-Peter Meyer (ExpertInova SA)



La chimie et la physique étaient les sciences naturelles des 19^{ème} et 20^{ème} siècles, la biologie est celle du 21^{ème} siècle. En tant qu'application pratique de la biologie, la biotechnologie utilise des processus naturels et des organismes vivants à des fins industrielles. La biotechnologie bénéficie énormément des avancées en génie génétique, qui permettent désormais des modifications et des recombinaisons ciblées du matériel génétique. La première utilisation industrielle du génie génétique remonte à plus de quarante ans. Il permet la production de molécules telles l'insuline, qu'un microorganisme ne saurait pas produire. Grâce au génie génétique, la biotechnologie est devenue un marché global pesant des milliards et un outil indispensable des activités de production et de la protection de l'environnement.

État des lieux

La Suisse figure dans le peloton de tête mondial pour ce qui est de la production biotechnologique industrielle de produits biothérapeutiques, c'est-à-dire de grandes molécules comme les anticorps monoclonaux. En 2017, les poids lourds mondiaux *Biogen*, *CSL Behring* et *Lonza* ont annoncé quasiment en même temps des investissements importants dans la production de telles molécules en Suisse. Malheureusement, en Suisse la chimie a longtemps considéré la biotechnologie comme une concurrente; cette dernière a donc encore un retard important à rattraper en ce qui concerne son application pour la production de chimie fine, de produits naturels et de structures chimiques complexes. Autre particularité de la Suisse: un moratoire sur le génie génétique y est en vigueur depuis 2005. Il interdit l'utilisation de plantes génétiquement modifiées et a été prolongé de quatre ans en 2017.

Perspectives d'avenir

À l'avenir, deux tendances et leur application combinée exerceront une influence décisive sur la biotechnologie: la biologie synthétique et la numérisation. En tant que domaine d'application du génie génétique, la biologie synthétique permet la construction de nouveaux systèmes biologiques de synthèse, optimisés pour la production industrielle. Elle révolutionnera la production de molécules organiques et apportera une réponse aux questions de durabilité écologique. Depuis longtemps, la technique des processus biologiques est tributaire d'applications informatiques, que ce soit pour le traitement massif de données complexes et typiquement bruitées ou pour le pilotage automatisé de processus impliquant des organismes vivants. La numérisation hissera la technique des processus biologiques à un niveau supérieur en termes de flexibilité, de qualité et de rapidité. La Suisse n'échappera pas à une réévaluation sobre et lucide du moratoire sur le génie génétique, car il bloque actuellement de nombreuses chaînes de valeur biotechnologiques potentiellement intéressantes et surtout écologiquement durables.

Médecine de précision

Une médecine personnalisée, au moment et à l'endroit voulu

Mark Rubin et Timo Staub (Université de Berne)



La médecine de précision constitue un paradigme nouveau dans les soins médicaux. Elle part du constat que chaque être humain est unique. Contrairement à la médecine classique, elle tient compte des caractéristiques individuelles des patient·e·s dans l'établissement des traitements. Les thérapies ne dépendent ainsi pas seulement du tableau clinique mais aussi de la prédisposition génétique, de facteurs environnementaux et du mode de vie. Elles font appel à des outils de pointe comme des analyses du génome individuel.

État des lieux

La médecine de précision s'est déjà en partie établie dans le traitement des cancers et en pharmacologie. Dans les traitements médicaux de précision, le choix et le dosage des médicaments sont déterminés entre autres par la disposition génétique. Aujourd'hui déjà, de grands laboratoires pharmaceutiques s'engagent fortement dans le domaine de la médecine de précision, produisant des thérapies médicales de précision et proposant aussi des solutions diagnostiques correspondantes. Des entreprises de plus petite taille et des startups sont également actives dans ce domaine. La médecine de précision repose sur l'analyse de données génomiques, ce qui entraîne des défis de taille en matière de protection des données personnelles, et donc des mécanismes de contrôle fortement dispendieux. Tout en maîtrisant les dépenses de santé, toutes les couches de la population devraient pouvoir bénéficier de la médecine de précision. Une possibilité pour résoudre ce problème serait de mettre en place une médecine stratifiée, utilisant différentes solutions standardisées selon la situation individuelle.

Perspectives d'avenir

La médecine de précision rend possibles des thérapies impensables il y a encore quelques années. Aujourd'hui déjà, de telles approches ont trouvé leur place dans le répertoire médical et thérapeutique standard. Dans les années à venir, la médecine de précision continuera à gagner en importance.

















Les succès thérapeutiques dus à la médecine de précision contribuent à l'allongement de la durée de vie. Il faut débattre collectivement de la manière dont gérer le fait que les individus vivent plus vieux et restent plus longtemps en bonne santé.

La médecine de précision se développe à l'interface entre médecine, informatique, science des données, et biologie moléculaire. Les moteurs technologiques de ce développement sont l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle, les pipelines génomiques ainsi que les développements et les applications dans le domaine de la biologie moléculaire. La médecine de précision est un marché en expansion, dans lequel s'engagent des grandes entreprises comme des startups. Le gouvernement fédéral suisse encourage la médecine de précision au moyen de programmes comme le *Swiss Personalized Health Network (SPHN)*. La recherche et les thérapies bénéficieraient d'un cadre réglementaire mieux coordonné au niveau national. En l'état actuel, la législation (en particulier la loi relative à la recherche sur l'être humain LRH) prévoit des mécanismes d'autorisation cantonaux, auxquels s'ajoutent les différentes réglementations dans les hôpitaux participant. Cela a pour conséquence un alourdissement administratif des processus, qui rend l'échange de données souvent inutilement difficile entre cantons.











La génomique, la protéomique ou la métabolomique individuelles ont une grande influence sur la santé des individus. À l'avenir, elles seront donc convoquées non seulement pour les traitements médicaux mais aussi dans la prévention des maladies et la préservation de la santé, par exemple sous forme de médicaments spécialisés ou de règles de conduite en cas de risque augmenté de cancer ou d'Alzheimer. Afin de pouvoir exploiter pleinement les avantages de la médecine de précision, il faut disposer d'une «copie numérique» du·de la patient·e contenant toutes les données de santé. Au niveau sociétal, cela soulève des questions de protection et de sécurité des données.

Ouvrir pour découvrir la légende des pictogrammes et des explications supplémentaires. →








Le monde numérique

-  Applications 5G **31**
-  Analyse de big data **32**
-  Réalité augmentée **33**
-  Blockchain **34**
-  Machines connectées **36**
-  Jumeau numérique **37**
-  Drones **38**
-  Véhicules hautement automatisés **39**
-  Internet des objets **40**
-  Robotique collaborative **41**
-  Apprentissage automatique **42**
-  Robots mobiles **43**
-  Nouvelle architecture Internet SCION **44**
-  Télécommunications optiques spatiales **45**
-  Informatique quantique **46**
-  Cryptographie quantique **47**











Énergie et environnement

-  Propulsions alternatives pour véhicules **51**
-  Systèmes énergétiques décentralisés **52**
-  Géothermie **53**
-  Photosynthèse artificielle **54**
-  Concepts de mobilité **55**
-  Production alimentaire durable **56**
-  Photovoltaïque **57**
-  Recyclage de terres rares **58**
-  Réseaux intelligents **59**
-  Stockage futur de l'énergie **60**



Procédés de fabrication et matériaux

-  Fabrication additive – développement de matériaux **63**
-  Fabrication additive – procédés **64**
-  Matériaux antimicrobiens **65**
-  Bioplastiques **66**
-  Fibres fonctionnelles **67**
-  Fabrication photonique **68**
-  Isolateurs électriques conducteurs thermiques **69**

Sciences de la vie

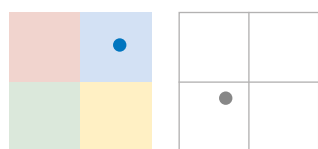
-  Bio-impression 3D **71**
-  Sources alternatives de protéines **72**
-  Biocatalyse et biosynthèse **73**
-  Culture de masse de cellules souches **74**
-  Technologies médicales portables **75**
-  Robots médicaux **76**
-  Microbiote et microbiome **77**
-  Alimentation personnalisée **78**
-  Diagnostique point-of-care **80**
-  Biologie synthétique **81**

Technologie et société

-  Souveraineté des données **83**
-  Confiance numérique **84**

Les technologies nouvellement recensées dans le *Technology Outlook 2021* apparaissent sur fond gris.

Graphiques du chapitre «Technologies et domaines d'application»



Le graphique de gauche montre l'importance de la technologie pour la Suisse et correspond au graphique 5 des pages 14 et 15.

Le graphique de droite montre la fréquence relative de posts sur les réseaux sociaux par analogie avec le graphique 3 de la page 10 (axe horizontal: Suisse; axe vertical: autres pays européens).

satw it's all about
technology



Académie suisse des sciences techniques SATW
St. Annagasse 18 | 8001 Zurich | 044 226 50 11 | info@satw.ch | www.satw.ch

