

Fiche d'information

Le pétrole en tant que matière première non énergétique

Thème central	Industrie chimique et pharmaceutique en Suisse
Auteur	Dr. Jonas Hostettler (professeur de chimie, Parents pour le climat)
Lectorat	Marcel Hänggi (collaborateur scientifique, Association suisse pour la protection du climat)
Traduction	Michèle Kaennel Dobbertin, Muri (AG)
Date	Février 2021

1. Situation initiale (situation actuelle, non respectueuse du climat)

L'industrie chimique et pharmaceutique fabrique des principes actifs pour les plantes, les humains et les animaux. Elle produit également des colorants et des adjuvants, p. ex. des solvants. Tous ces produits sont constitués de molécules organiques. Étant donné que ces molécules organiques contiennent une forte proportion d'atomes de carbone, leur décomposition libère du CO₂. Le carbone présent dans les produits chimiques est majoritairement d'origine fossile (pétrole, gaz naturel et, dans une mesure négligeable, charbon). La fabrication de ces produits chimiques nécessite de grandes quantités d'adjuvants (solvants, catalyseurs, agents d'extraction, etc.), qui contiennent à leur tour du carbone fossile. De plus, les processus nécessitent de grandes quantités d'énergie, le plus souvent sous forme de gaz naturel et d'électricité, ce qui augmente encore les émissions de CO₂. On peut donc distinguer les trois sources de CO₂ suivantes dans l'industrie chimique et pharmaceutique :

- Dégradation des produits (élimination en fin de cycle, dégradation naturelle, etc.)
- Élimination des sous-produits et des adjuvants par incinération
- Besoins énergétiques pour les processus chimiques.

À l'heure actuelle, l'industrie chimique et pharmaceutique importe environ 1,1 million de tonnes de produits chimiques organiques par an [1]. Ceux-ci sont en grande partie fabriqués à partir de pétrole brut fossile et de gaz naturel, et pour environ 10 % de matières premières renouvelables telles que les graisses et huiles végétales et animales, le sucre, l'amidon, etc. [2]. Ces 1,1 million de tonnes de produits chimiques organiques importés sont raffinés en Suisse pour obtenir environ 0,35 millions de tonnes de produits pharmaceutiques, phytosanitaires, etc. [1]. La dégradation et l'élimination de ces produits chimiques génèrent environ 1,6 million de tonnes de CO₂ [5]. La chaleur utilisée par l'industrie chimique et pharmaceutique provient principalement du gaz naturel et, dans une moindre mesure, du mazout, provoquant des

émissions chiffrées à 0,7 million de tonnes de CO₂ par an [3,4]. À cela s'ajoutent d'autres émissions de gaz à effet de serre ; en particulier le puissant oxyde nitreux (ou gaz hilarant) N₂O est libéré en grandes quantités lors de certains processus.

2. Solutions concrètes : messages clés

• *Le carbone dans les produits chimiques*

La plupart des produits chimiques contiennent beaucoup de carbone ; lorsqu'ils sont éliminés, utilisés ou décomposés, celui-ci se transforme en CO₂, qui est libéré dans l'atmosphère. Pour le carbone contenu dans les produits chimiques et les produits, trois approches sont en principe envisageables :

- Production à partir de biomasse
- Extraction du CO₂ à partir de sources ponctuelles ou de l'air : captage et utilisation du carbone (CCU) ou captage et utilisation directe du carbone dans l'air (*direct air carbon capture and utilization*, DACCU)
- Extraction à partir de sources fossiles avec séparation et stockage d'une quantité équivalente de CO₂ de l'atmosphère avec des technologies à émissions négatives (NET), p. ex. le captage direct de carbone et stockage (*direct air carbon capture and storage*, DACCS) ou l'altération accélérée.

1. *Production à partir de biomasse ou de matières premières renouvelables*

Environ 10 % des matières premières proviennent déjà de sources biogéniques [2]. Cela signifie qu'ils ont été créés à partir du vivant (biomasse) et non par des procédés de synthèse chimique. La biomasse est constituée de molécules complexes avec des composés très précisément définis.

La similitude de ces substances naturelles avec les produits à fabriquer permet de se passer de processus compliqués lors de l'élaboration de produits biogéniques. Deux approches sont possibles pour utiliser davantage de biomasse à la place du pétrole dans l'industrie. Soit la biomasse est d'abord quasiment transformée en substances de base similaires au pétrole, puis traitée à l'aide de processus établis au cours des dernières décennies. Cette opération entraîne toutefois une perte d'énergie et de matériaux relativement importante. L'alternative serait de créer des processus entièrement nouveaux, dans lesquels un maximum de propriétés structurales clairement définies des molécules de la biomasse peuvent être préservées et donc utilisées. Cela nécessite certes de longues recherches et le développement de nouveaux catalyseurs, biotechnologies et processus, mais le gain est une consommation réduite de matériaux et d'énergie. L'industrie chimique avait cependant mis au point ses procédés en utilisant les matières premières les moins chères disponibles – d'abord le goudron de houille, puis le pétrole et le gaz naturel. Si les matières premières végétales avaient été moins chères à cette époque, les procédés auraient tout aussi naturellement été adaptés à celles-ci.

Les problèmes fondamentaux inhérents à la substitution des sources fossiles par des sources biogéniques (biocarburants à base de plantes sucrières ou oléagineuses, bioplastiques) se poseraient également en cas d'utilisation accrue de la biomasse comme matière première pour l'industrie chimique : concurrence avec la production alimentaire, pression sur les forêts, consommation élevée d'eau, de pesticides, d'herbicides, d'engrais, d'énergie et de surfaces [6]. La meilleure façon d'éviter cela est d'utiliser le bois et les déchets de la production alimentaire comme matières premières pour les produits chimiques.

2. *Production à partir de CO₂*

L'approche (DA)CCU [7] nécessite du CO₂ non fossile (!) provenant de sources dites ponctuelles, comme les effluents gazeux des centrales thermiques à bois, ou directement de l'air. En présence d'hydrogène, selon les conditions de réaction et les catalyseurs choisis, le CO₂ réagit pour former des hydrocarbures pétroliers, du méthane (composant principal du gaz naturel) ou des alcools [8]. Tous ces produits peuvent être utilisés relativement facilement dans les procédés de fabrication connus. Au lieu de faire réagir le CO₂ avec de l'hydrogène, l'approche de Synhelion pourrait également être une option à l'avenir : ici, le CO₂ est amené à réagir avec de l'eau et des catalyseurs sous une lumière solaire concentrée, ce qui produit des composés similaires au pétrole [8].

Par l'utilisation de CO₂ provenant de sources ponctuelles fossiles aurait pour conséquence que le CO₂ continuerait à

s'accumuler dans l'atmosphère. Ainsi, lorsque le CO₂ est utilisé pour la fabrication de produits chimiques, le CO₂ piégé est relâché dans l'atmosphère après une période relativement courte. En effet, la plupart des produits chimiques fabriqués sont soit éliminés et brûlés après utilisation, soit dégradés par des êtres vivants sous forme de CO₂. C'est pourquoi le CCU ne convient pas pour neutraliser le CO₂ provenant de sources fossiles. Par conséquent, si le CO₂ utilisé pour le CCU provenait de sources ponctuelles fossiles (centrale à charbon, cimenterie, etc.), la concentration de CO₂ dans l'atmosphère continuerait d'augmenter – simplement en passant par l'étape de produits chimiques.

Alors que le captage du CO₂ des effluents gazeux ou de l'air est déjà relativement énergivore, la fourniture de l'hydrogène nécessaire consomme environ dix fois plus d'énergie [9,10]. Or, le procédé Synhelion fonctionne sans hydrogène. La grande quantité d'énergie nécessaire à la réduction du CO₂ est obtenue directement à partir de la lumière du soleil. La surface nécessaire est toutefois du même ordre de grandeur que lorsque l'hydrogène est produit par photovoltaïque et électrolyse [9]. On estime toutefois que, malgré la forte demande en énergie, les hydrocarbures synthétiques pourront être produits à des prix très avantageux (environ 1 dollar américain par kg) d'ici 2050 [11].

3. Sources fossiles et technologies à émissions négatives (NET) telles que DACCS

L'utilisation de carbone provenant de sources fossiles reste possible dans un monde à zéro net si l'on s'assure que la quantité de CO₂ libérée lors de la décomposition des produits chimiques est prélevée dans l'atmosphère. À cette fin, les installations qui prélèvent le CO₂ de l'air et le stockent devraient être construites sur des emplacements dotés d'énergies renouvelables peu coûteuses et d'installations permanentes de stockage [12,13]. À l'échelle mondiale, les capacités de telles installations sont supérieures aux besoins réels en la matière [12]. L'énergie requise pour le DACCS ne représentent qu'une fraction de l'énergie nécessaire pour synthétiser des produits chimiques similaires au pétrole à partir du CO₂ [9,10]. Il serait donc possible de maintenir les procédés établis dans l'industrie chimique et l'industrie pétrochimique. Pour cela, il faudrait certes continuer à extraire et à exploiter des composants du pétrole, mais uniquement sur les sites les mieux adaptés et pour une petite fraction de l'extraction actuelle.

Au lieu du DACCS, on peut également envisager d'autres technologies à émissions négatives (NET) pour l'extraction de CO₂ de l'atmosphère [12,14], p. ex. la bioénergie avec captage et stockage de dioxyde de carbone (BECCS ou bio-CCS, en anglais *bioenergy with carbon capture and storage*, BECCS), l'altération accélérée ou la production de biochar (charbon végétal).

• Approvisionnement énergétique

La transition vers un approvisionnement énergétique neutre en carbone est abordée dans la fiche d'information sur l'énergie. L'électricité peut être produite sans problème avec une empreinte carbone neutre, tandis que le gaz naturel, qui est très important pour la chaleur industrielle, peut être remplacé par de l'hydrogène vert ou du chauffage électrique et, dans une moindre mesure, par du biogaz ou du gaz de synthèse (power to gas). Cela permet déjà de réduire les émissions de l'industrie chimique et pharmaceutique d'environ 0,7 million de tonnes de CO₂.

3. Exemples déjà mis en œuvre

Biomasse

Outre les matériaux déjà utilisés traditionnellement depuis longtemps, tels que les huiles végétales, les graisses animales, le sucre, l'amidon, la cellulose, le caoutchouc, etc., la fabrication de matières plastiques à base de matières premières renouvelables (sucre, amidon, bois) est à l'étude.

CCU (Captage et utilisation du carbone)

- Synhelion [8]
- Installation pilote du Karlsruhe Institute of Technology (KIT) [15]
- Installation pilote de l'Institut IET pour la technologie de l'énergie de l'École technique de Rapperswil [16]

La production d'hydrocarbures à partir de CO₂ n'a lieu pour l'instant qu'à l'échelle pilote en raison des coûts élevés, et les méthodes sont en cours d'optimisation. Le CCU consomme énormément d'énergie, et cela restera le cas à l'avenir.

DACCU (captage et utilisation directe du carbone dans l'air)

- Usine pilote d'ingénierie du carbone à Squamish, Colombie-Britannique, Canada [17]

En principe, les mêmes remarques s'appliquent que pour le CCU.

DACC (captage direct du carbone dans l'air)

- Climeworks en Islande et Hinwil (canton de Zurich) [18]
- Ingénierie du carbone en Colombie-Britannique, Canada [19]
- Global Thermostat à Huntsville, Alabama (USA) [20]

Bien que l'élimination du CO₂ de l'atmosphère ne nécessite qu'une fraction de l'énergie nécessaire au CCU, ce procédé est technologiquement coûteux et n'est donc actuellement réalisé qu'à l'échelle pilote. Il n'existe actuellement aucun marché pour éliminer le CO₂ de l'atmosphère, car l'introduction de CO₂ dans l'atmosphère entraîne des coûts monétaires pratiquement nuls.

Séquestration du CO₂

- Carbfix, Islande [21]
- Sleipner, Norvège [22]
- États-Unis, Canada : récupération assistée du pétrole (RAP), en anglais *enhanced oil recovery* ou EOR [23]

Le stockage de CO₂ dans des aquifères salins est testé à plus grande échelle dans le gisement de gaz naturel de Sleipner, où environ 1 million de tonnes de CO₂ sont stockées chaque année depuis plus de 20 ans [22]. Le CO₂ provient du gaz naturel qui y est extrait. Aux États-Unis et au Canada, le stockage du CO₂ est utilisé pour le RAP – ce qui n'est bien sûr pas dans l'intérêt de la protection du climat [23]. Carbfix injecte du CO₂ dissous dans de l'eau dans des roches basaltiques, où il se minéralise en peu de temps, c'est-à-dire qu'il réagit pour former des carbonates solides [21].

4. Mesures nécessaires

L'**approvisionnement énergétique** de l'industrie chimique et pharmaceutique doit être **entièrement renouvelable** (électricité, chauffage urbain, hydrogène, éventuellement conversion d'électricité en gaz, en anglais *power to gas*, P2G ou PtG). Si l'alinéa 3 de l'Initiative pour les glaciers est mis en œuvre, la mise sur le marché de combustibles fossiles est exclue.

Dans l'intérêt de la sécurité d'approvisionnement, la Suisse pourrait **octroyer des subventions** pour encourager la **production d'hydrogène vert** sur des sites appropriés. Ce faisant, elle encourage la mise à l'échelle de cette future technologie clé (notamment le développement d'électrolyseurs efficaces ou éventuellement la production d'hydrogène à partir de biomasse de déchets).

Le **carbone contenu dans les produits** de l'industrie chimique et pharmaceutique doit soit provenir de la biomasse ou du CO₂ prélevé dans les effluents gazeux ou l'air, soit continuer à être d'origine fossile, si des quantités équivalentes de carbone sous forme de CO₂ sont extraites de l'atmosphère par des technologies à émissions négatives (**NET**) telles que **DACCS**, **BECCS**, **biochar** ou **l'altération accélérée** [14].

Si la valorisation de la biomasse doit être évitée en raison des problèmes évoqués ci-dessus au chapitre « Solutions concrètes », les autres approches nécessitent des impulsions adaptées.

Le captage du CO₂ de l'air sera un secteur industriel extrêmement important à l'avenir, car il permet d'une part de compenser les émissions résiduelles de CO₂, et d'autre part d'obtenir des émissions nettes négatives à partir de 2050 [12], ce qui est indispensable pour respecter les objectifs climatiques selon le GIEC. C'est pourquoi la tâche la plus urgente est de promouvoir immédiatement la technologie d'extraction du CO₂ de l'atmosphère afin de pouvoir l'utiliser à grande échelle à un coût abordable. Que le CO₂ capturé soit stocké en toute sécurité dans une deuxième étape (*storage*) ou qu'il soit utilisé

avec de l'hydrogène vert pour produire de nouvelles matières premières neutres en CO₂ (*utilization*) pour l'industrie chimique et pharmaceutique est une question secondaire.

- **Trajectoire de réduction à zéro de l'industrie chimique et pharmaceutique**

Outre les aides publiques directes aux technologies à émissions négatives, telles que les subventions à la recherche, les aides à l'investissement, l'achat d'émissions négatives, il est possible de convenir avec l'industrie chimique et pharmaceutique d'une **trajectoire de réduction à zéro d'ici 2050**. L'élément central d'un tel accord est l'augmentation annuelle du pourcentage de carbone utilisé, qui doit être climatiquement neutre. La contrainte imposée à l'industrie est ainsi relativement uniforme dans le temps. La quantité annuelle de matières premières neutres en CO₂ à acquérir augmente certes, mais les progrès technologiques les rendront également de plus en plus abordables. Si – comme on peut le supposer – une grande partie de la neutralisation passe par le stockage du CO₂ dans des sites appropriés, il faut s'assurer que le stockage se fasse sur la base des connaissances scientifiques les plus fiables.

- **Importations neutres en carbone**

Une variante peut-être plus efficace consisterait à ce que les produits importés soient en principe neutres en carbone d'ici 2050. Cette mesure concernerait aussi les produits chimiques importés pour l'industrie pharmaceutique et chimique. Il ne serait alors pas nécessaire de prévoir une trajectoire de réduction spécifique pour ce seul secteur industriel, mais une trajectoire de réduction unique pour tous les produits importés.

L'industrie chimique et pharmaceutique peut facilement supporter les **coûts** de ces mesures. La neutralisation complète des émissions de CO₂ de tous les produits chimiques organiques à base de carbone fossile (1,1 million de tonnes [1]) coûte moins de 500 millions de francs suisses avec le DACCS. (Hypothèses : 1 kg de matière première organique réagit pour produire 1,4 kg de CO₂, coût du DACCS estimé à 300 francs suisses/tonne de CO₂) [24]. Ceci correspond à un chiffre d'affaires total de 45,8 milliards de francs [25]. Le coût des produits augmenterait donc d'environ 1 %. Une telle hausse est économiquement supportable sans problème, car elle passe inaperçue dans le bruit d'autres fluctuations (cours de l'euro, prix des matières premières, etc.).

1. Réduction potentielle des émissions

Environ 2 300 000 tonnes d'émissions de CO₂ par an.

5. Calendrier jusqu'en 2050

La trajectoire de réduction peut être abordée avec effet immédiat. L'industrie chimique et pharmaceutique réduit ses émissions chaque année d'un montant à déterminer afin d'atteindre un niveau net de zéro d'ici 2050. Les technologies à émissions négatives déjà disponibles aujourd'hui permettent de neutraliser dès maintenant les émissions de CO₂.

La trajectoire de réduction peut être linéaire ou devenir plus ambitieuse vers 2050. L'essentiel est que cette solution soit mise en œuvre le plus rapidement possible et ne soit pas encore remise à plus tard.

6. Résumé

L'industrie chimique et pharmaceutique est responsable d'environ 2,3 millions de tonnes d'émissions de CO₂ par an. Sur ce total, 0,7 million de tonnes sont imputables à l'utilisation de combustibles fossiles pour la production d'énergie thermique (en particulier le gaz naturel), et 1,6 million de tonnes proviennent du carbone présent dans les produits et les déchets. Les fournisseurs d'énergie fossile peuvent être remplacés par l'utilisation accrue d'électricité renouvelable, d'hydrogène vert, de biogaz et de gaz synthétique (power to gas).

Le carbone consommé par l'industrie chimique et pharmaceutique et celui contenu dans les produits chimiques est aujourd'hui à 90 % d'origine fossile (pétrole brut, gaz naturel et charbon). Lorsque ces produits chimiques sont utilisés

(dégradés) ou éliminés, le carbone qu'ils contiennent réagit pour former du CO₂, qui est libéré dans l'atmosphère. Il faudra donc à l'avenir trouver des approches pour rendre ce carbone neutre pour le climat. Ces approches sont au nombre de trois :

1. **Biomasse** : les produits chimiques sont fabriqués à partir de matières premières renouvelables. Les plantes lient le carbone qui se trouvait auparavant dans l'atmosphère sous forme de CO₂ et le stockent. Si des parties de plantes sont utilisées comme matières premières pour fabriquer des produits chimiques, la décomposition de ces derniers ne libère dans l'atmosphère qu'une quantité de CO₂ proportionnelle à celle préalablement absorbée par les plantes. En principe, les mêmes considérations s'appliquent que pour la production de carburants/matières plastiques, etc. à partir de matières premières renouvelables [6].
2. **CCU** : les produits chimiques sont fabriqués à partir du CO₂. Le CO₂ prélevé dans l'atmosphère peut être transformé en matières premières pour l'industrie chimique, ce qui nécessite une grande quantité d'énergie.
3. **NET (DACCS, etc.)** : les produits chimiques continueront à être produits à partir de matières premières d'origine fossile. Parallèlement, le carbone contenu dans les produits chimiques est compensé en termes réels, la quantité correspondante de CO₂ étant extraite de l'air par des technologies à émissions négatives (NET) et réabsorbée en toute sécurité.

La transition vers une production de produits chimiques sans impact sur le climat est étonnamment peu coûteuse et peut être abordée immédiatement. On peut supposer que cet objectif peut être atteint plus efficacement avec une combinaison des approches disponibles.

7. Recoupements avec d'autres thèmes

Technologies à émissions négatives : ces technologies doivent de toute façon être développées et déployées à grande échelle pour éliminer le surplus de CO₂ de l'atmosphère à partir de 2050 et ainsi rester sous la barre des 2 degrés d'augmentation. Fondamentalement, les NET permettent à l'industrie chimique d'utiliser du carbone fossile.

Empreinte carbone des biens importés : les produits chimiques importés peuvent en principe être traités de la même manière que les autres biens. Ils doivent devenir neutres en carbone, tant en termes de production (émissions lors de la fabrication) que de teneur en carbone des produits eux-mêmes (émissions lors de l'élimination ou l'utilisation).

Matières premières renouvelables pour remplacer les produits fabriqués jusqu'à présent à partir du pétrole : tout comme les matières plastiques et les carburants, les produits chimiques peuvent en principe être fabriqués à partir de matières premières végétales.

Remarque importante :

Tous les produits de l'industrie chimique et pharmaceutique se dégradent à plus ou moins long terme, et le carbone qu'ils contiennent réagit pour former du CO₂. C'est pourquoi le carbone contenu dans les produits de l'industrie doit être considéré comme du CO₂ qui sera libéré. Les produits chimiques et pharmaceutiques ne doivent donc pas être considérés comme des puits de CO₂. Les produits fabriqués à partir de CO₂ extrait d'effluents gazeux ou de l'atmosphère sont au mieux neutres en carbone, mais jamais négatifs.

8. Sources

- [1] Office fédéral de la douane et de la sécurité des frontières (OFDF): numéro de tarif 29 «Produits chimiques organiques» année 2020, <https://www.gate.ezv.admin.ch/swissimpex/public/bereiche/waren/query.xhtml> (consulté le 18 février 2021).

- [2] Verband der chemischen Industrie VCI, Deutschland (2017): 2.7 Mio. t von 20.8 Mio. t der Rohstoffe für den stofflichen Einsatz sind nachwachsend, <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/top-thema/daten-fakten-rohstoffbasis-chemieindustrie.pdf>.
- [3] Office fédéral de l'énergie OFEN: Energieverbrauch in der Industrie und im Dienstleistungssektor Resultate 2017 (seulement en allemand), p. 36, https://www.bfe.admin.ch/bfe/en/home/supply/statistics-and-geodata/energy-statistics/sector-statistics/_jcr_content/par/tabs/items/tab/tabpar/externalcontent.external.exturl.pdf/aHR0cHM6Ly9wdWJkY15iZmUuYWRTaW4uY2gvZGVhcHVibGlicjYX/Rpb24vZG93bmxvYVQvOTQ0Mi5wZGY=.pdf.
- [4] Office fédéral de l'environnement OFEV: Facteurs d'émission de CO2 selon l'inventaire suisse des gaz à effet de serre, https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/klima/fachinfo-daten/CO2_Emissionsfaktoren_THG_Inventar.pdf.download.pdf/Faktenblatt_CO2-Emissionsfaktoren_01-2022_FR.pdf.
- [5] Hypothèses : la teneur en carbone des produits chimiques est similaire à celle des produits chimiques de base très fréquemment utilisés, le méthanol et l'acide acétique – la dégradation / la combustion de 1 kg de méthanol ou d'acide acétique libère environ 1,4 kg de CO₂.
- [6] Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland: Bioökonomie – wirklich nachhaltig oder nur eine Scheinlösung?, <https://www.bund.net/ressourcen-technik/biooekonomie/> (consulté le 18 février 2021).
- [7] Deutsche Akademie der Technikwissenschaften acatech: CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie, <https://www.acatech.de/projekt/ccu-und-ccs-bausteine-fuer-den-klimaschutz-in-der-industrie/>
- [8] Synhelion, <https://synhelion.com/> (consulté le 18 février 2021).
- [9] Jonas Hostettler: Netto Null – also Null Flugverkehr?, <https://elternfuersklima.ch/flugverkehr/> (consulté le 18 février 2021).
- [10] Gabrielli, P.; Gazzani, M.; Mazzotti, M.: The Role of Capture and Utilization, Capture and Storage, and Biomass to Enable a Net-ZeroCO₂ Emissions Chemical Industry. Ind. Eng. Chem. Res. 2020, 59, 7033–7045, <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.iecr.9b06579> (consulté le 18 février 2021).
- [11] Hydrogen: A Renewable Energy Perspective, International Renewable Energy Agency IRENA https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf
- [12] IPCC (2018): Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. Kapitel 2.3.2.2, 2.4.2.3 und 4.3.7.5, <https://www.ipcc.ch/sr15/> (consulté le 18 février 2021).
- [13] Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Sigfússon, B., Marieni, C. et al. (2020): Carbon dioxide storage through mineral carbonation. Nat Rev Earth Environ 1, 90–102, <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0011-8> (consulté le 18 février 2021).
- [14] Grève du Climat Suisse, Climate Action Plan Chapter 7: Negative Emissions, <https://climatestrike.ch/fr/posts/cap-7-negative-emissions> (consulté le 18 février 2021).
- [15] Karlsruher Institut für Technologie (2017): Power-to-Liquid: Kraftstoff aus Solarstrom und dem CO₂ der Luft, <https://www.kit.edu/kit/22381.php> (consulté le 18 février 2021).
- [16] Institut für Energietechnik Ostschweizer Fachhochschule: Pilot and Demonstration Plant Power-to-Methane, <https://www.iet.hsr.ch/index.php?id=13510&L=4> (Stand: 18. Februar 2021)
- [17] Carbon Engineering: Air to Fuels, <https://carbonengineering.com/air-to-fuels/> (consulté le 18 février 2021).

- [18] Climeworks: Direct air capture, <https://climeworks.com/co2-removal> (consulté le 18 février 2021).
- [19] Carbon Engineering: Direct Air Capture + Storage, <https://carbonengineering.com/direct-air-capture-and-storage/> (consulté le 18 février 2021).
- [20] Global Thermostat, <https://globalthermostat.com/> (consulté le 18 février 2021).
- [21] Carbfix, <https://www.carbfix.com/> (consulté le 18 février 2021).
- [22] Anne-Kari Furre, Ola Eiken, Håvard Alnes, Jonas Nesland Vevatne, Anders Fredrik Kiær (2017): 20 Years of Monitoring CO₂-injection at Sleipner, Energy Procedia, Volume 114, 3916-3926, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1523> (consulté le 18 février 2021).
- [23] Carbon Brief (2014): Around the world in 22 carbon capture projects, <https://www.carbonbrief.org/around-the-world-in-22-carbon-capture-projects> (consulté le 18 février 2021).
- [24] Sabine Fuss et al (2018): Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects, Environ. Res. Lett. 13 063002, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f> (consulté le 18 février 2021).
- [25] Association des Industries Chimie Pharma Life Sciences «Science Industries Switzerland»: rapport annuel 2019 (seulement en allemand), https://www.scienceindustries.ch/file/26131/science_jahresbericht_2019_DS_final_compressed.pdf (consulté le 18 février 2021).