

# Des cleantech aux climate tech : vers une énergie net-zéro carbone

*Benjamin Tincq est co-fondateur et président de Good Tech Lab<sup>1</sup>, qui réalise des études avec des cleantech et des climate tech pour des grands groupes et différentes organisations, et lancera prochainement une nouvelle structure visant à accompagner des projets entrepreneuriaux à bases scientifiques et technologiques autour des réponses aux urgences climatiques.*

## 1 L'enjeu pour répondre au défi climatique avec des énergies nouvelles

Les récents événements météorologiques extrêmes montrent que la crise climatique et la crise environnementale qui lui est associée commencent à arriver. On prévoit qu'elles pourraient en termes d'impact humain être équivalentes à une Covid par an pendant quelques décennies. Des études alarmantes prévoient même que les décès

liés uniquement à l'élévation des températures pourraient être équivalents à ceux de toutes les maladies infectieuses aujourd'hui connues d'ici la fin du siècle.

Nous devons arriver à la neutralité carbone le plus rapidement possible, idéalement dès la moitié du siècle. Cela implique que nous devons passer d'environ 50 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> émises par an à une émission proche de zéro d'ici 2050. La **Figure 1** résume la situation.

1. [www.goodtechlab.io/fr/accueil](http://www.goodtechlab.io/fr/accueil)

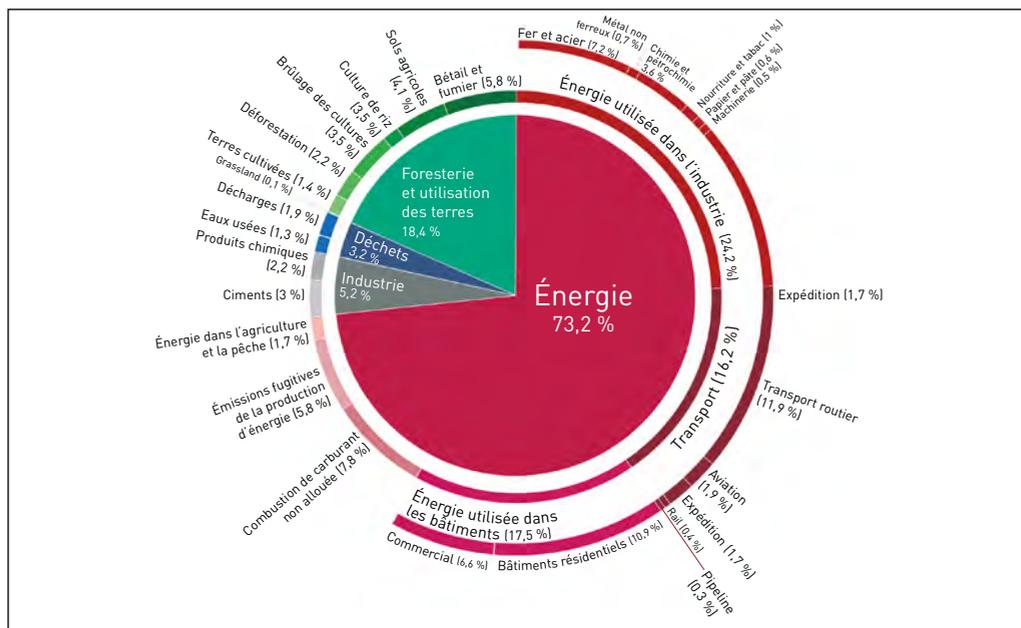


Figure 1

Les sources d'émissions de CO<sub>2</sub> et autres gaz à effet de serre par secteurs.

Source : Climate Watch, the World Resources Institute (2020).

Les trois quarts des émissions dépendent des méthodes d'extraction, de transformation et d'utilisation de l'énergie dans ses différentes applications : le transport, le chauffage et la production de l'électricité, de la lumière, du mouvement... On connaît les secteurs auxquels sont associées les différentes émissions et où se situent les problèmes à résoudre pour l'énergie et ses usages à travers les enjeux industriels de transport, de décarbonations de l'habitat et des bâtiments, etc.

Trois leviers sont généralement évoqués pour trouver des réponses à apporter face à cette urgence climatique et énergétique. L'un consiste à penser que les solutions viendront de l'innovation technologique, l'autre dit qu'elles

seront issues de la sobriété et des changements de comportement à l'échelle individuelle et collective qui permettront de réduire nos émissions. Enfin, un troisième discours consiste à dire qu'il faudra du courage politique associé à des mesures ambitieuses, contraignantes, et à des réglementations.

Il semble que nous soyons arrivés à un stade d'urgence qui ne permette pas de choisir l'une ou l'autre de ces solutions et qu'il faille utiliser ces trois leviers à la fois et ne pas les voir comme opposés, mais au contraire comme très complémentaires. Face à l'urgence climatique, on entend souvent que nous disposons de toutes les technologies nécessaires pour décarboner et qu'il suffit de les déployer : énergies

renouvelables, pompes à chaleur, etc. Ce n'est en fait pas aussi simple. Nous disposons effectivement d'une partie des solutions mais les données brutes actuelles (*Figure 2*), issues de l'Agence internationale de l'énergie, montrent que les trois quarts des réductions d'émissions qui seront nécessaires d'ici 2050 pour atteindre la neutralité carbone seront issues de technologies qui sont encore aujourd'hui à un stade très peu mature ou à l'état de prototypes qui n'ont pas encore pénétré leur marché à très large échelle. L'innovation technologique est donc nécessaire.

## 2 Les cleantech pour décarboner l'énergie

### 2.1. Les nouvelles sources de l'innovation

Il y a quelques décennies, l'innovation était attendue des grands laboratoires de R&D liés à l'entreprise : on se souvient peut-être de la grande époque de Bell Labs, qui a été le laboratoire ayant produit les premières cellules photovoltaïques, les premiers transistors, les premiers lasers, et qui était le modèle de l'innovation portée par ces grands « laboratoires d'entreprise ». Plus récemment, l'innovation technologique est devenue beaucoup plus dispersée. Elle vient en partie des grands groupes, en partie des universités et des grands établissements de recherche. Mais elle est également de plus en plus issue des startups, et notamment d'une catégorie de startups qui ont une composante technologique et scientifique très forte

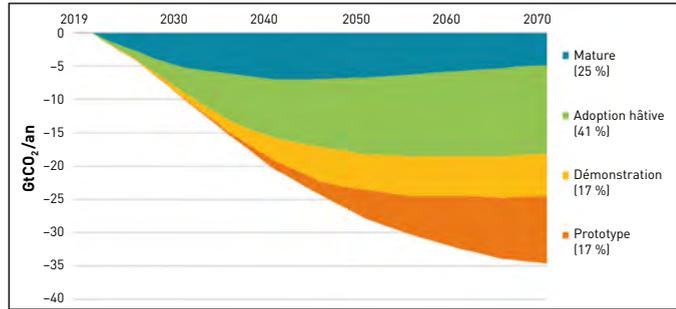


Figure 2

Réductions attendues des émissions de CO<sub>2</sub> selon le stade d'évolution des différentes technologies utilisées.

Source : d'après IEA, 2020.

Quelques exemples de startups devenues très grandes et aujourd'hui leaders sur leur marché, ou en train de le devenir, sont reportées sur la *Figure 3*.

Nous sommes au début d'une nouvelle décennie de startups de haute technologie, celle des « climate tech », et on voit déjà apparaître une vague entrepreneuriale puissante qui pourra apporter une partie des réponses aux enjeux technologiques, énergétiques et climatiques auxquels nous devrons faire face.



Figure 3

Les acteurs de l'innovation scientifique et technologique d'hier et d'aujourd'hui.

Trois facteurs principaux favorisent cette nouvelle vague entrepreneuriale :

- de plus en plus de nouvelles technologies arrivent à maturation pour être déployées par ces acteurs et seront bientôt en cours de commercialisation ;

- de plus en plus de capitaux sont prêts à suivre ces projets entrepreneuriaux, des « capitaux risqués » notamment. En 2020, environ 16 milliards de capital-risque ont été investis dans les technologies dites « climate tech », et des taux de croissance annuelle de 83 % des montants investis ont été observés sur les dernières années ;

- enfin, et sans doute le plus intéressant, est l'émergence de cette nouvelle vague de talents entrepreneuriaux avec

des scientifiques, des ingénieurs et des commerciaux qui ont aujourd'hui envie de se lancer corps et âme dans la lutte face à l'urgence climatique. Ils ont envie de créer leur prochain projet entrepreneurial, de rejoindre des startups ou d'investir dans des projets qui vont répondre à cette urgence. Beaucoup d'entrepreneurs, d'investisseurs et autres qui étaient dans l'univers startups relativement classique font ce changement de carrière.

On peut décomposer le défi de l'énergie zéro carbone en plusieurs domaines : l'efficacité énergétique, la décarbonation de l'électricité et l'électrification là où c'est possible, la gestion des secteurs difficiles à décarboner ou difficiles à électrifier, la capture et l'extraction atmosphérique du carbone là où c'est complémentaire et nécessaire, et puis finalement la question des matériaux qui vont servir cette transition énergétique.

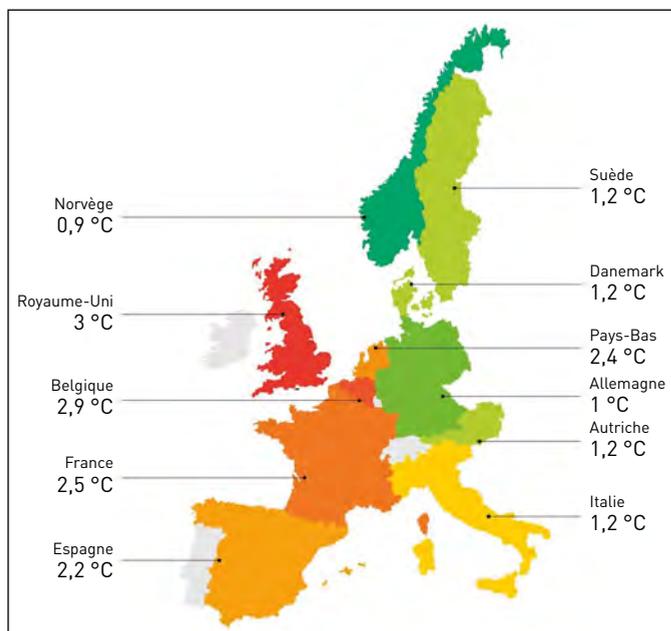


Figure 4

L'efficacité énergétique en Europe : pertes de température dans l'habitat des particuliers après cinq heures.

## 2.2. L'efficacité énergétique

L'efficacité énergétique est un sujet bien connu et il est important de rappeler qu'elle intervient partout : dans les transports, le bâtiment, l'industrie. Dans le bâtiment, on pense notamment à la rénovation énergétique et à l'isolation thermique. La **Figure 4** montre les écarts qui existent, ne serait-ce qu'en Europe, sur le degré d'isolation thermique dans l'habitat des particuliers. Il y a donc des progrès colossaux à faire. On trouve dans ce domaine des innovations intéressantes portant sur de nouvelles technologies de construction, de préfabrication

pour simplifier l'isolation par l'extérieur, de thermostats connectés...

Dans l'industrie, il existe des technologies dont on entend peu parler mais qui sont intéressantes, tel l'exemple de Via Séparation. C'est une entreprise qui développe de nouvelles technologies de membranes à base de graphènes plus résistantes à des conditions opératoires très complexes pour filtrer de l'eau, mais également à des solvants ou des produits qui détériorent les membranes classiques ; elles peuvent aussi être utilisées à des températures plus importantes. Ces membranes permettent de remplacer des processus de séparation thermique par un processus de séparation mécanique, et réduisent ainsi la facture énergétique de processus industriels complexes.

### 2.3. La décarbonation de l'électricité

La **Figure 5** représente la carte européenne de l'électricité « bas carbone » : en France, nous avons la chance d'avoir une électricité qui est en très grande partie très bas carbone, notamment grâce au nucléaire et un peu également grâce à l'hydroélectricité.

Il est important de rappeler que l'électricité nucléaire joue dans ce domaine un rôle fondamental, même si elle est décriée, puisqu'elle permet de fournir une électricité non intermittente très bas carbone, y compris là où les ressources géothermiques et hydroélectriques ne sont pas en abondance. Nous disposons en France de toutes les

grandes technologies de réacteurs : les EPR<sup>2</sup> – même si les prochaines générations de très grande taille prennent parfois du retard –, et il est intéressant de voir qu'il y a également une nouvelle vague de développement technologique avec de nouveaux réacteurs plus compacts (NRC) qui sont moins chers à déployer et à fabriquer. Dans ce domaine des NRC, de nouveaux acteurs arrivent sur

2. EPR (« *Evolutionary power reactor* ») : réacteur fonctionnant avec de l'eau pressurisée et utilisé en Europe.

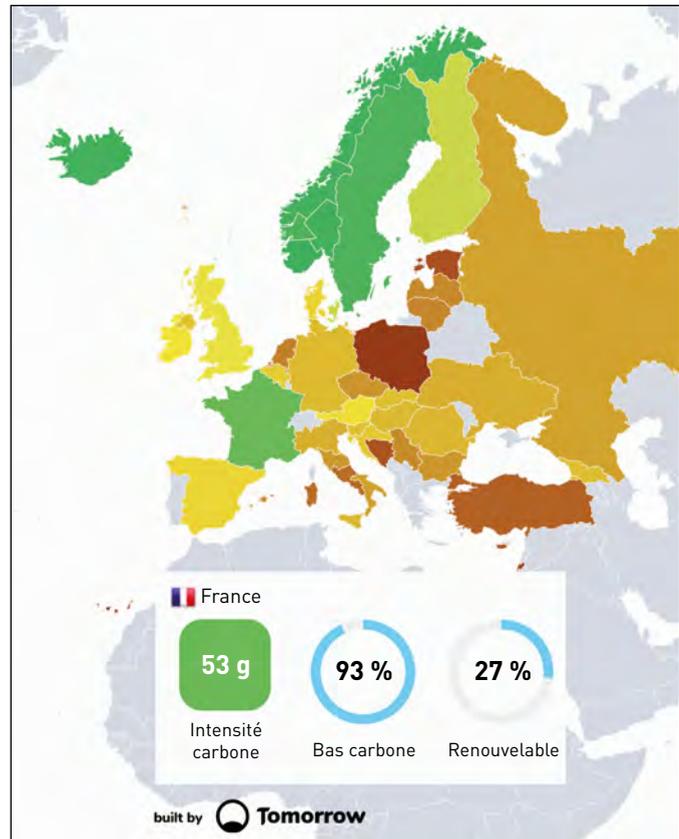


Figure 5

Carte européenne de l'électricité bas carbone.

ce marché tel SEABORG, une entreprise danoise qui développe des réacteurs compacts à base de sels fondus (qui sont à peu près de la taille d'un container) et qui peuvent être utilisés sur des bateaux ainsi que sur des barges dans les zones portuaires. Ils se développent notamment en Asie du Sud-Est.

Les énergies renouvelables intermittentes que sont le solaire et l'éolien ont énormément d'avantages, à savoir que les coûts ont diminué drastiquement et qu'elles sont extrêmement rapides à déployer. Mais au-delà d'un certain niveau de pénétration de ces énergies renouvelables électriques, un stockage énergétique de longue durée est nécessaire pour lequel les batteries au lithium ne sont pas encore compétitives (Figure 6).

Plusieurs technologies non matures, en cours de développement, sont candidates aujourd'hui pour réaliser du stockage énergétique longue durée :

– le stockage mécanique, qui consiste à reproduire un stockage sous forme de gravité, à

la manière du pompage turbinage<sup>3</sup>, mais avec d'autres éléments comme des blocs de béton ou autres ;

– le stockage thermique, par exemple dans des matériaux à changement de phase ou avec des pompes à chaleur réversibles ;

– le stockage électrochimique, dans lequel les batteries à flux ont un regain d'intérêt extrêmement fort avec quelques acteurs notables telle la startup Formenergy, qui a levé plus d'une centaine de millions d'euros, notamment de *break through energy venture*<sup>4</sup>, un fond alimenté par Bill Gates ;

– le stockage chimique, avec notamment le *power to X*<sup>5</sup>, ou le *power to gas* (gaz), en s'appuyant sur l'hydrogène ou sur d'autres procédés.

3. Pompage turbinage : technique de stockage d'énergie où de l'eau est remontée d'un bassin à un autre pour ensuite être accumulé dans ce dernier.

4. *Break through energy venture* : avancée énergétique à risque.

5. *Power to X* : transformation de l'électricité en un autre vecteur énergétique.

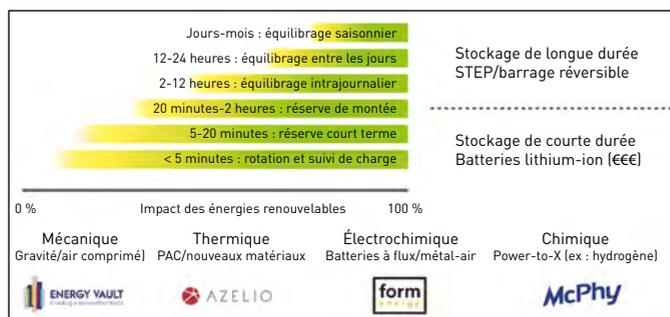


Figure 6

Les technologies pour réaliser le stockage des énergies renouvelables intermittentes. Exemples de startups dans les différentes technologies.

Source : d'après Rocky Mountain Institute.

## 2.4. La décarbonation des secteurs énergétiques non électrifiés

La décarbonation de l'électricité est la partie relativement simple, mais elle ne représente que 20 % de l'énergie utilisée. La difficulté sera de décarboner les 80 % restants (Figure 7). On peut distinguer trois grands domaines selon les usages :

- les usages dans lesquels on a besoin d'une forte densité énergétique, mais où la fourniture de l'énergie est très décentralisée : par exemple les véhicules électriques légers et le chauffage résidentiel. Sur ce type d'usage, l'électrification semble être a priori la solution la plus adaptée : les batteries, les pompes à chaleur, etc. ;
- les usages pour lesquels on a besoin de beaucoup de

puissance et d'une très forte densité énergétique : comme la chaleur industrielle, les véhicules lourds et les transports de longues distances, les secteurs de l'acier et du ciment, pour lesquels on a besoin d'une importante source de chaleur ;

- les usages où les fossiles fournissent aujourd'hui à la fois de la chaleur et des réactifs/matières premières.

Les carburants fossiles sont aujourd'hui la principale source d'énergie dans tous ces domaines. La solution sera peut-être dans certains cas de l'électrification, peut-être dans beaucoup de cas de l'hydrogène ou d'autres carburants de synthèse, ou peut-être de la capture de carbone au point d'émission dans les usines ou les centrales.

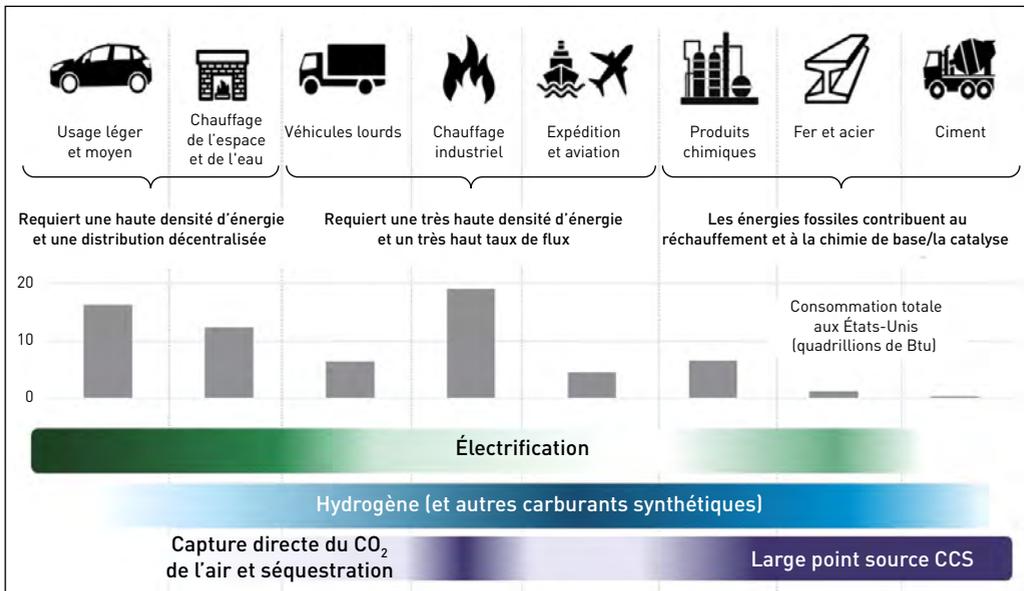


Figure 7

Les domaines et secteurs énergétiques hors électricité représentent 80 % de l'énergie à décarboner.

Le secteur de l'acier est un exemple qui illustre cette diversité de solutions. Des startups comme Boston Metal développent des procédés électrolytiques<sup>6</sup> de production d'acier. Des pays comme la Suède investissent des milliards dans la production d'acier avec réduction directe du minerai de fer par l'hydrogène. D'autre part, ArcelorMittal<sup>7</sup> investit dans la capture de carbone sur certains de ses sites sidérurgiques.

6. Procédé électrolytique (ou électrolyse) : procédé qui permet une conversion d'énergie électrique en énergie chimique.

7. ArcelorMittal : groupe international spécialisé dans la sidérurgie, c'est-à-dire l'industrie de la fonte, du fer ou encore de l'acier.  
<sup>13</sup>Craquage du méthane : méthode qui permet de produire de l'hydrogène à très haute température.

L'hydrogène comme vecteur d'énergie décarbonée est le thème du chapitre de X. Vigor dans cet ouvrage. Pourtant, l'hydrogène aujourd'hui est encore produit pour plus de 95 % par le reformage du gaz naturel, donc est encore une énergie très carbonée. Il faut donc penser à l'évolution de la production d'hydrogène dit « vert » pour le moyen et le long terme. L'électrolyse est pour cela la technologie prometteuse qui est aujourd'hui la plus avancée. Mais il est intéressant de montrer qu'il existe une très grande diversité d'autres chemins possibles pour produire de l'hydrogène bas carbone, comme le montre la **Figure 8**, qui présente aussi les voies biologiques et les procédés thermochimiques pas carbone, ou ce qu'on appelle les carburants solaires.

Citons comme exemples quelques entreprises comme Monolith Materials (qui travaille sur une technologie issue de l'École des Mines de Paris), ou Spark Cleantech (qui est une filiale de l'École Centrale), qui s'attaquent déjà au développement de ces procédés de production moins connus en utilisant des billes microbiennes ou en craquant<sup>13</sup> du méthane pour produire de l'hydrogène et du noir de carbone.

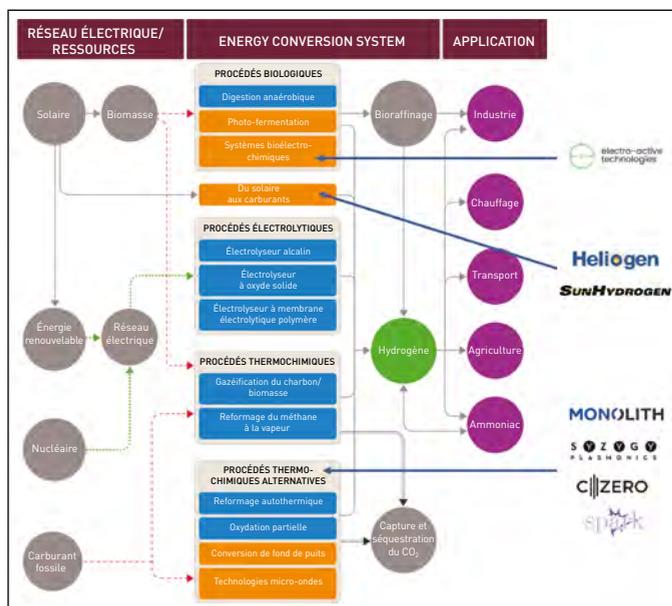


Figure 8

L'hydrogène bas carbone : options de production et applications.

## 2.6. Les matériaux de la transition énergétique

On parle peu des métaux fondamentaux pour cette transition énergétique, dont l'approvisionnement sera un facteur critique (**Figure 9**).

On sait aujourd'hui que la demande en cuivre, en nickel,

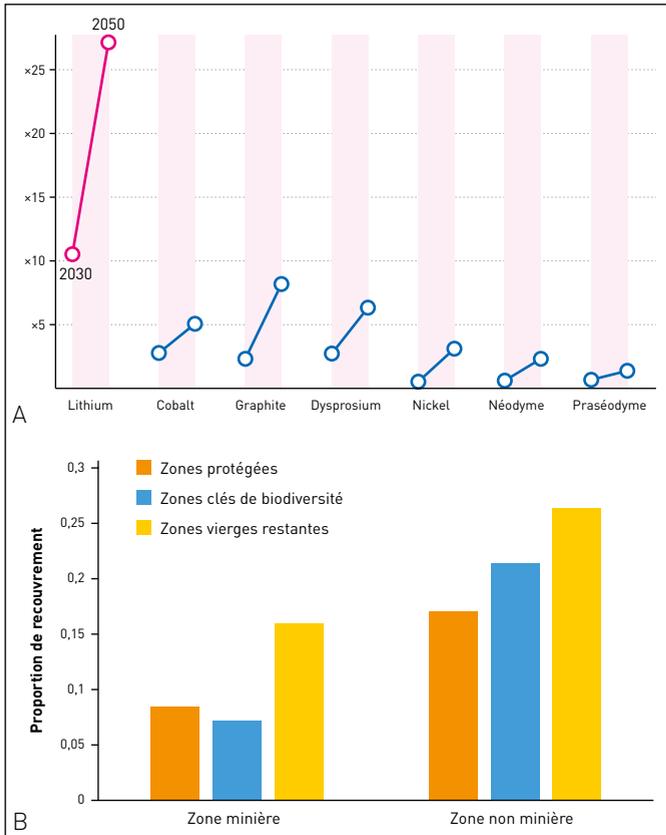


Figure 9

A) Les matériaux critiques de la transition énergétique : l'Union européenne sonne l'alarme sur une pénurie critique de matières premières ; B) Recouvrement entre l'extraction minière et la conservation de la biodiversité : la production d'énergie renouvelable aggravera les menaces minières vis-à-vis de la biodiversité.

Source : A) Commission européenne.

en lithium, en cobalt, en manganèse et en terres rares va exploser du fait du développement des énergies renouvelables et de la croissance du marché des batteries et des véhicules électriques.

Il faut donc savoir faire face à une possible pénurie de ces métaux et d'autre part les produire de la façon la plus durable possible, notamment éviter de détruire des pans

entières de biodiversité du fait des exploitations minières qui vont y être associées.

D'un premier point de vue stratégique, on peut décider de réserver les énergies renouvelables, en tout cas les énergies qui sont très consommatrices en métaux, là où c'est vraiment utile et utiliser ailleurs plutôt de la géothermie, qui est aussi en train d'évoluer, ou du nucléaire.

Il faut aussi améliorer l'exploitation minière pour la rendre efficace et durable. De nouveaux acteurs tentent de répondre à ces enjeux par exemple en utilisant l'intelligence artificielle et des données géologiques de manière à identifier de nouveaux gisements. C'est le cas de KoBold Metals<sup>8</sup> pour les gisements de cobalt. Le cobalt est un métal extrêmement problématique sur le plan environnemental, mais surtout sur le plan des droits de l'homme et des conditions de travail épouvantables dans lesquelles travaillent les mineurs au Congo. KoBold Metals utilise l'intelligence artificielle pour identifier de nouveaux gisements de cobalt pouvant être exploités de façon plus durable. Un autre exemple est celui de la Société Lilac, qui utilise de nouveaux procédés d'extraction des métaux d'une manière moins extensive en surface et également plus performante et plus rapide. C'est un procédé d'extraction du lithium par échange d'ion qui n'a pas besoin des grands bassins d'évaporation, lesquels prennent énormément de place et monopolisent les terres.

L'intelligence artificielle, aujourd'hui utilisée pour les biomatériaux et dans les biotechnologies, est un secteur en plein développement pour accélérer la R&D sur les matériaux du futur.

Des acteurs comme Zymergen s'intéressent à des applications

8. KoBoldMetals : entreprise d'exploration manière qui utilise la science informatique pour améliorer l'éthique autour des matériaux critiques.

industrielles et mettent une plateforme à disposition des chercheurs en biomatériaux pour automatiser une partie du travail de design et d'expérimentation, qui s'appuie sur une base de données génomiques importante. Ce type d'approche est très intéressant pour découvrir les nouveaux biomatériaux du futur : des composés électroniques flexibles et souples ont été identifiés par Zymergen par ce moyen.

Il faudrait pouvoir étendre ce type d'approche à l'ensemble de la chimie et de la science des matériaux. Quelques acteurs se positionnent sur cette chaîne, mais les applications ne sont pas encore matures. Elles consistent encore essentiellement à prédire les propriétés, les applications de composés et de molécules qui sont déjà connues que l'on a déjà dans la base. Le Graal serait de prédire dans le futur de nouveaux composés à partir de propriétés que l'on souhaiterait atteindre.

## 2.7. Coût de la décarbonation

Toutes les solutions de décarbonation de l'énergie ont un coût parfois très important. Pour certains secteurs industriels, soit les méthodes de décarbonation n'existent pas, soit le coût en serait trop important, comme on le voit sur ces données de la *Figure 10*, qui viennent de Goldman Sachs<sup>9</sup>. Le coût augmente beaucoup avec la quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> à éliminer : au-delà

9. Goldman Sachs : groupe international qui investit dans la banque, la sécurité et autres secteurs.

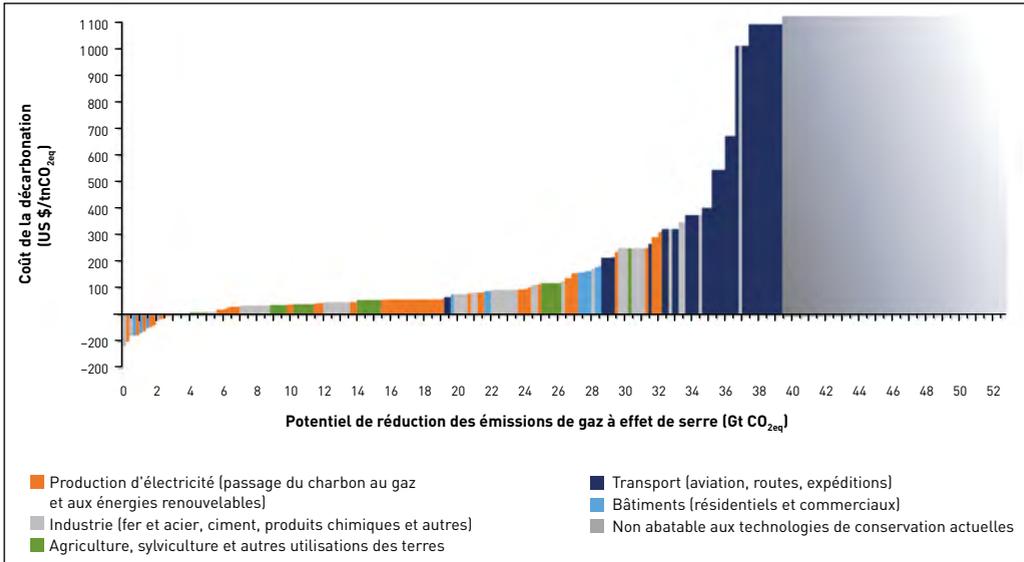


Figure 10

Le coût de la décarbonation selon les secteurs énergétiques concernés et selon la quantité de  $\text{CO}_2$  à éliminer.  
Source : d'après Goldman Sachs Investment Research.

des trente premiers milliards de tonnes, on arrive sur des coûts très importants qui vont être amenés à diminuer, mais difficilement en dessous de 100 € la tonne, et cela, dans tous les scénarios de transition énergétique.

Au-delà du temps, des moyens financiers, de l'innovation, cela ne suffira pas, nous aurons aussi besoin de ce que l'on appelle des émissions négatives ou du « *carbon removal* » (suppression du carbone), qui n'est pas l'élimination du carbone au point d'émission, à la sortie d'une cheminée d'usine ou autre, mais la capture du carbone atmosphérique pour ensuite soit le stocker soit le réutiliser dans des produits de longue durée tels que des matériaux de construction. Il faudrait

éliminer entre 5 à 20 milliards de tonnes par an d'ici le milieu du siècle pour être capable de tenir les objectifs de l'Accord de Paris, et potentiellement plus si l'on veut tenir le 1,5 degré.

Une « *metareview* »<sup>10</sup> de toutes les technologies possibles a été réalisée en 2018 par le Mercator Institute. Il existe deux voies pour créer des émissions négatives :

- la voie qui utilise la photosynthèse, avec les restaurations d'écosystèmes naturels comme les sols agricoles, les technologies à base d'algues et la biologie de synthèse ;

10. « *Metareview* » : méthode d'analyse qui permet d'obtenir des résultats plus précis par l'augmentation du nombre de cas étudiés afin d'obtenir une conclusion plus globale.

– les procédés purement chimiques et physico-chimiques à base de capture directe de CO<sub>2</sub>, ou l'utilisation de certaines roches alcalines qui vont réagir avec le CO<sub>2</sub> pour former des carbonates, qui vont être ainsi stockés sur le long terme.

### 3 Enjeux et perspectives des climate tech

L'urgence climatique est un enjeu qui préoccupe énormément de monde, notamment dans les sphères entrepreneuriales, et on parle beaucoup de climate tech depuis 2018. Un engouement très important s'était déjà développé dès les années 2000 pour : les énergies renouvelables des prochaines générations, comme par exemple les photovoltaïques à couches minces,

les biocarburants, les algues et certains types de véhicules électriques ou autres. Mais à part Tesla et quelques autres acteurs, beaucoup ont échoué et beaucoup de capitaux risqués ont perdu énormément d'argent sur ces technologies (Figure 11), et pendant dix ans, les cleantech sont devenues le secteur maudit dans lequel plus personne ne voulait investir.

L'engouement est en train de revenir car tous les acteurs de la société y sont favorables :

- la société civile, avec les talents de demain, les jeunes et moins jeunes générations, qui sont vraiment motivées pour faire partie de la solution et pour travailler dans des entreprises qui font partie de la solution, voire créer ces nouvelles entreprises ;
- les États, dont les gouvernements fixent des objectifs

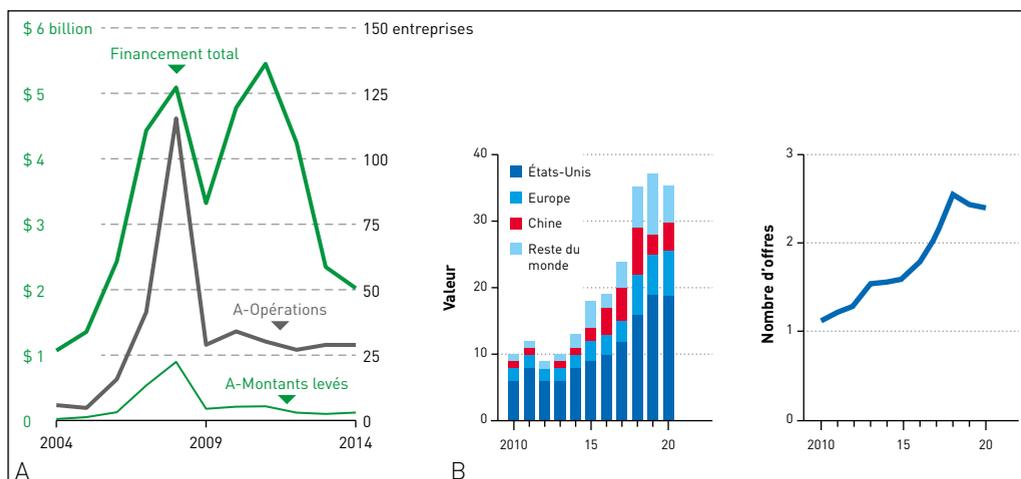


Figure 11

L'évolution des cleantech. A) 2000 : les entreprises de capital-risque ont dépensé plus de 25 milliards de dollars dans les cleantech et ont perdu plus de la moitié de leur argent ; B) 2020 : les fonds capitalistes-risque pour le climat sont de retour.

de neutralité carbone qui n'étaient pas imaginables il y a une quinzaine d'années, y compris dans des pays comme la Chine. On sait que les États-Unis viennent de revenir dans l'Accord de Paris, donc plus de la moitié du PIB mondial est aujourd'hui alignée sur une neutralité carbone vers 2050-2060 ;

– au-delà des investisseurs, les grands groupes, sous la pression de la société civile, de leurs salariés, de leurs investisseurs se fixent également des objectifs de neutralité carbone extrêmement ambitieux. On estime que 1 500 entreprises qui totalisent environ 11 000 milliards de chiffre d'affaires annuel sont alignées sur une trajectoire de neutralité carbone.

Les objectifs sont clairs, mais il faut être vigilant sur les actes. Quand on discute avec les industriels, on s'aperçoit que beaucoup savent comment les premiers 30 ou 40 % du travail vont être réalisés mais pas la suite, ils auront donc besoin d'innovation, de s'associer avec des partenaires et des startups, pour atteindre leurs objectifs.

### Les étapes difficiles à passer pour les cleantech et les climate tech

Les défis pour ces startups des cleantech et des climate tech seront de passer, ce que l'on appelle communément dans le jargon du milieu, les « vallées de la mort » (Figure 12). Ce sont les phases pendant lesquelles il y a le moins de capitaux disponibles pour passer à l'étape de croissance suivante. Il y en a plusieurs :

– celle du démarrage du projet, où généralement le risque technologique est encore très important : au moment du développement de la technologie issue du laboratoire de recherche ou du développement de différentes technologies pour qu'elles atteignent le niveau mature de « *Technologie Readiness Level* » (TRL<sup>11</sup>). Beaucoup d'investisseurs privés n'ont pas l'habitude de traiter avec ces risques technologiques et ces risques marchés ;

– celle où la technologie est prouvée, mais il faut mettre au point un démonstrateur à l'échelle une, et construire les premières unités. À ce niveau, il faut trouver des investissements très importants en CAPEX<sup>12</sup>, qui ne sont pas habitués au capital-risque ;

11. « *Technologie Readiness Level* » : indice qui permet de déterminer le niveau de maturité d'une technologie.

12. CAPEX : Capital expenditure : coûts et dépenses liés à un investissement qui au cours du temps entraîne des bénéfices.

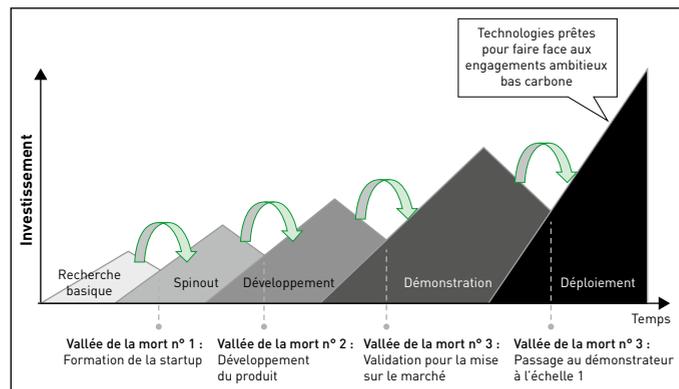


Figure 12

Les phases difficiles à passer pour les cleantech et les climate tech.

Source : d'après Rocky Mountain Institute, 2020.

– puis le déploiement à très grande échelle qui demande d’investir dans des projets à CAPEX très lourds pour un déploiement à l’échelle industrielle et internationale.

Les sources de capitaux associées à ces différentes phases sont différentes. C’est une multitude de types de capitaux et d’instruments de financement qui interviennent aux différents moments de la vie du projet. Une infographie réalisée par le Rocky Mountain Institute en 2019 constitue une source intéressante de données pour la recherche de ce type de capitaux pour les programmes de la transition énergétique et les technologies qui y sont associées.

Toutes ces nouvelles technologies émergentes coûtent finalement très cher au démarrage et on ne sait pas si elles vont atteindre un niveau de coût suffisamment bas pour être viables à grande échelle. L’exemple du solaire illustre le fait qu’il faut parier sur des dynamiques de projet d’assez long terme, mais qui s’accélèrent sur la fin. La première cellule photovoltaïque a été démontrée à l’échelle expérimentale par Bell Labs dans les années 1950. Un assez grand nombre de financements publics sont intervenus aux différentes étapes du projet pour finalement financer à perte le développement de la technologie. Mais ensuite, des financements privés venant des grands groupes qui voulaient s’alimenter pour des crédits d’énergies renouvelables ou des crédits carbone sont arrivés. Sur les quarante dernières années, le taux de retour, ou « *learning rate* » (taux d’apprentissage),

qui est le pourcentage de réduction des coûts quand on double la capacité installée, a été d’environ 25 à 30 % entre 1976 et aujourd’hui, et sur les dix dernières années, les coûts du solaire ont été divisés par presque dix.

Ce type de courbes d’apprentissage et de réduction des coûts avec ces économies d’échelle observé dans le solaire, est aussi observé dans les batteries au lithium, dans le séquençage ADN, dans les transistors, dans les disques durs, c’est-à-dire dans tous les secteurs sur lesquels les volumes augmentent très rapidement. Il faut simplement de bonnes initiatives, des financements publics, privés ou autres, qui vont finalement acheter à perte et financer au départ de manière à faire réduire progressivement les coûts.

La *Figure 13* est extraite d’un article de 2020 et identifie les caractéristiques communes à différentes technologies énergétiques selon la complexité de leur design et leur besoin d’adaptation, le niveau de complexité de la technologie, la complication en termes d’ingénierie : avec pour exemples pour le type 1 (en jaune) les panneaux solaires assez standard du point de vue ingénierie, et à l’autre extrémité les centrales nucléaires pour le type 3 (en rouge).

Sur le tableau, les projets sont classés en colonne selon qu’ils vont être customisés, c’est-à-dire être adaptés à chaque client, ou au contraire extrêmement standardisés et pouvant être produits à grande échelle.

On voit sur le graphique de droite de la *Figure 13* que

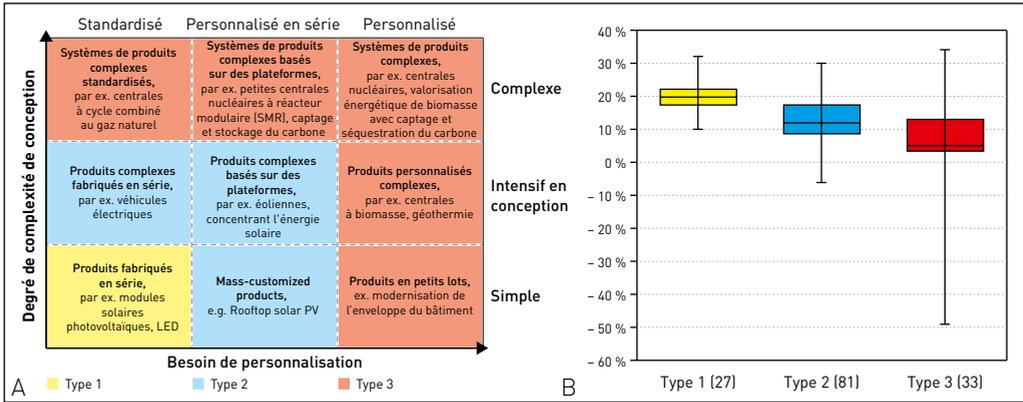


Figure 13

A) Caractéristiques de différentes technologies énergétiques selon la complexité de leur conception et de leur besoin de personnalisation ; B) Pourcentage de réduction des coûts quand on double la capacité.

plus le projet est standardisé et simple (solaire en jaune) et plus les coûts diminuent de plus en plus rapidement, alors que plus le projet est complexe et adapté au besoin du client (en rouge), plus la réduction de coûts se fait

forcément de manière lente (centrale nucléaire). Il faut en tenir compte pour optimiser le développement de certaines de ces technologies de manière à pouvoir favoriser ces économies d'échelle et ces courbes d'apprentissage sur la durée.

## La diversité des climate tech et des cleantech

La diversité dans cet écosystème des climate tech et des cleantech est un enjeu fondamental. Il y a divers types de diversité tels la parité homme/femme, la couleur de la peau, l'origine sociale, mais au-delà d'un argument moral, la diversité est fondamentale pour la créativité. La diversité est nécessaire pour trouver les nouvelles options énergétiques et climatiques, les nouvelles technologies et les nouvelles façons d'attaquer la décarbonation.

Pourtant, aujourd'hui, on doit remarquer dans les startups climate tech, de même que dans l'ensemble des startups de manière générale,

qu'il y a encore une part très faible de diversité au sens général, et que ce sont principalement des hommes blancs qui portent ce type d'entreprise, et qu'il y a besoin de plus de femmes, de personnes de couleurs pour venir porter ce type de projets.

De plus, beaucoup des exemples donnés sont des exemples d'Amérique du Nord, alors qu'il n'y a que quelques entreprises françaises ou européennes (*Figure 14*).

Pourtant en France, en particulier et plus généralement en Europe, nous disposons de tous les éléments nécessaires pour créer les champions de cette nouvelle industrie des climate tech et des cleantech. Nous avons les talents scientifiques, techniques, commerciaux, un écosystème industriel, des champions industriels qui peuvent être les clients, des investisseurs pour ces projets. Nous avons des acteurs de rangs académiques internationaux, et de plus en plus de capitaux qui vont vers ce projet, mais nous avons un problème sur la transformation de ces projets *via* des champions industriels pour passer à grande échelle.

Nous avons besoin de champions industriels pour accompagner les futurs fondateurs de startups climatetech et jouer un rôle qui sera absolument décisif dans la décarbonation, les émissions négatives et l'adaptation face au changement climatique.

Figure 14

Répartition géographique des climate tech. L'Europe a de grands talents, la recherche et l'industrie, mais manque un moteur commercial pour créer des champions des climate tech.

TALENT Docteurs, ingénieurs, entrepreneurs	ÉCOSYSTÈME Universités, laboratoires de recherche, entreprises industrielles	CAPITAL Investissements et fonds publics pour les deeptech & cleantech		PRINCIPAUX CLIMATE TECH Nombre d'entreprise climatiques privées > 500 millions de dollars
 ●●●	RECHERCHE ●●● INDUSTRIE ●●●	PRIVÉ ●●● PUBLIC ●●●	●	Fossé à combler
 ●●●	RECHERCHE ●●● INDUSTRIE ●●●	PRIVÉ ●●● PUBLIC ●●●	●●●	
 ●●●	RECHERCHE ●●● INDUSTRIE ●●●	PRIVÉ ●●● PUBLIC ●●●	●	