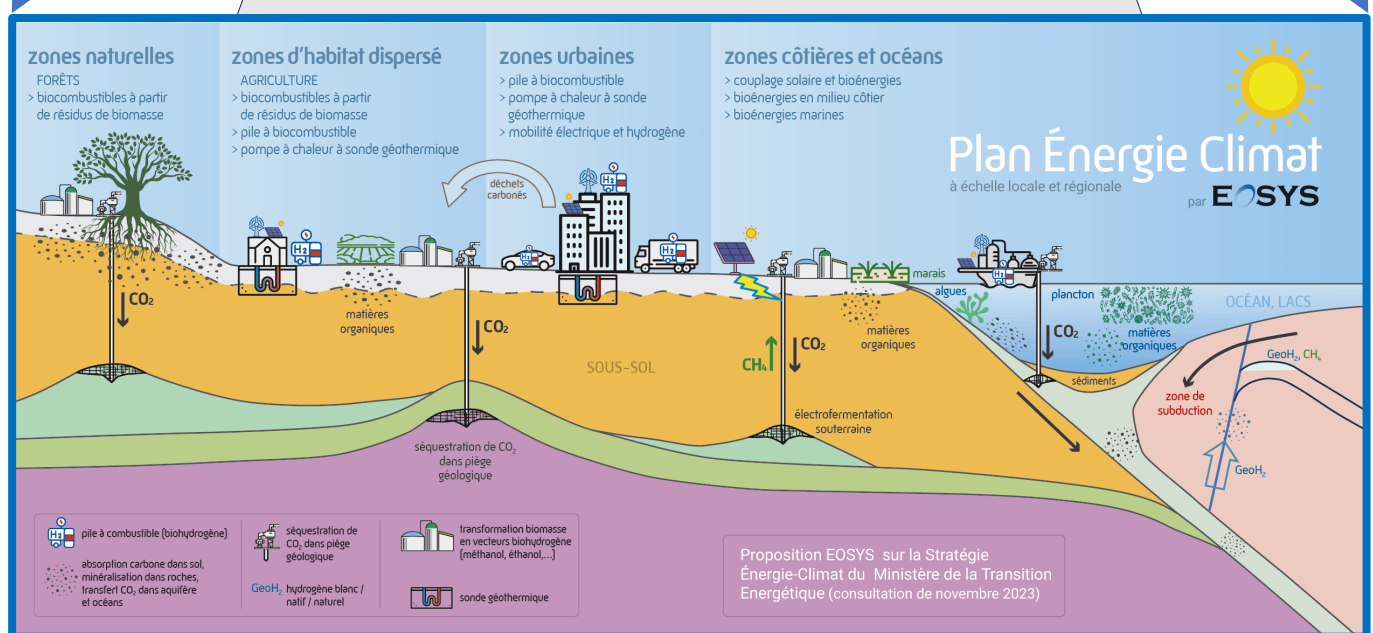
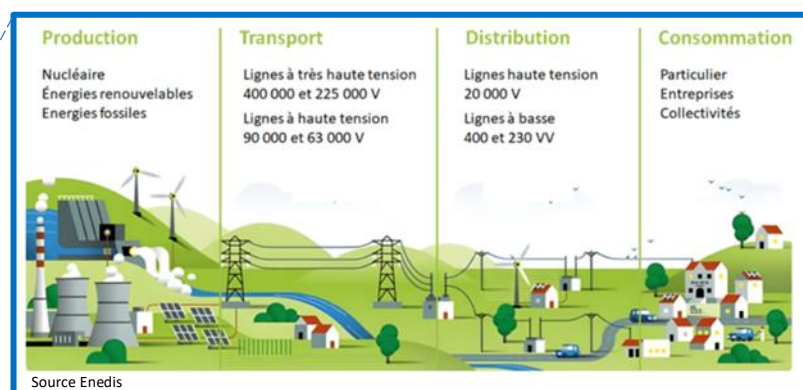


Stratégie française pour l'énergie et le climat

Avis et proposition de l'association ACP Energies et de la société EOSYS

Décembre 2023





Note à l'attention de Madame le Ministre de la Transition Energétique

L'[association ACP Energies](#) regroupe une centaine de sociétés et de professionnels des énergies renouvelables et extractives. Elle organise depuis 2 ans des réunions et forums sur les thèmes de la transition énergétique du secteur des hydrocarbures, de la production de géohydrogène et de la gestion du cycle géologique du carbone.

La société [EOSYS](#), membre de ACP Energies, est spécialisée dans les bio-géo-énergies, le métabolisme territorial et le cycle global du carbone .

Nous répondons ici à l'appel à avis du public émanant du Ministère de la Transition Energétique concernant le document de présentation de la stratégie française pour l'énergie et le climat (SFEC).

La ministre de la Transition énergétique, Madame Agnès Pannier-Runacher, a lancé une consultation publique dans le cadre des travaux sur la stratégie française énergie-climat qui servira de base à la prochaine programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) laquelle définira la politique énergétique de la France pour les dix prochaines années (2024-2035). Organisée du 22 novembre au 22 décembre 2023, cette consultation doit permettre à chacun de s'exprimer sur les grandes orientations de cette stratégie de planification énergétique, sur laquelle 7 groupes de travail lancés par la ministre ont travaillé ces derniers mois.

Le [document présenté](#)¹ valorise l'importance et la qualité technique et de concertation du travail qui a été fait par RTE et le Conseil de Planification Ecologique du Ministère de la Transition Energétique sur ce sujet depuis octobre 2021.

La solution préconisée pour réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre est d'imposer une sobriété énergétique aux utilisateurs, de rendre les machines consommatrices d'énergie plus efficaces, d'électrifier les usages de sorte que la consommation d'énergie finale*² soit diminuée de près de moitié et de faire appel à une production énergétique primaire* qui soit décarbonée.

Ceci amène en toute logique à privilégier les énergies renouvelables (ENR) électriques, appuyées par un fort développement du nucléaire, ce qui a pour conséquence bénéfique une très forte diminution du besoin en énergies fossiles et la réduction de la dépendance énergétique du pays vis-à-vis de l'étranger. Les réseaux électriques haute et basse tension doivent être fortement développés ainsi que tous moyens de stockage de l'énergie électrique : piles, hydrogène en cavités, systèmes de pompage réversibles, etc. Cette stratégie initiée par RTE légitime la place de cette institution pour animer et

¹ <https://www.ecologie.gouv.fr/consultation-publique-sur-strategie-francaise-energie-climat>

² Le signe * renvoie aux termes qui sont explicités dans le Glossaire en annexe 2



réguler la transition du système énergétique. Les bioénergies* (carbonées par définition)³ jouent dans ce paysage un rôle mal défini de variable d'ajustement.

Nous souhaitons proposer une vision enrichie des scénarios RTE.

Notre perception est que le problème qu'il nous faut régler aujourd'hui en urgence est d'arrêter d'accroître le taux de carbone présent dans l'atmosphère et d'organiser nos activités économiques de façon à le faire décroître sans attendre. Cela devrait être fait tout en maintenant un niveau de vie correct des citoyens dans les pays développés et en permettant à ceux qui le sont moins d'atteindre des niveaux de vie qui rejoignent ceux des pays développés. La priorité n'est pas seulement de cesser les émissions de gaz à effet de serre dues aux usages des énergies carbonées, mais aussi de limiter ces émissions par le changement de nature d'affectation des sols. Et plus encore de mettre en place des politiques de développement des territoires qui contribuent à ce qu'une absorption nette du carbone atmosphérique* ait lieu.

Ce qu'il faut décarboner au plus vite c'est donc l'atmosphère. La façon la plus efficace et économique de le faire est de développer la capture photosynthétique du carbone sur les continents et dans les océans : favoriser la croissance naturelle des forêts et des algues ou du plancton est un moyen rapide d'y arriver. En collecter une partie à des fins bioénergétiques sous forme de biocombustibles* est un moyen simple et efficace de rentabiliser ces opérations. Il est à noter que quelle que soit la quantité collectée en surface, une quantité du même ordre de grandeur de carbone d'origine photosynthétique reste piégée dans le sol ou le fond des océans sur des périodes longues et qu'une fraction de celle-ci rentre par ce biais dans les longs cycles géologiques* qui autorisent cette séquestration du carbone* (voir annexe 2). Ces biocombustibles peuvent et doivent être produits à partir d'une biomasse à cycle court, si possible saisonnier.

En résumé, favoriser le développement de la biomasse marine et continentale permet de capturer d'importantes quantités de carbone atmosphérique, de le stocker dans la végétation, sols et fonds marins et de favoriser les cycles de séquestration géologique naturels du carbone.

Un scénario possible pour cesser les émissions de carbone fossile et commencer à absorber le carbone atmosphérique serait le développement de l'usage de biocombustibles en substitution de combustibles fossiles⁴. Nous ne considérons pas ce scénario comme prioritaire mais si nous l'évoquons, c'est simplement pour montrer qu'il existe des possibilités de décarboner l'atmosphère sans nécessairement avoir à augmenter significativement l'usage des énergies électriques.

Nous suivons la SFEC quand est préconisée dans la mesure du possible et du raisonnable l'électrification des usages de l'énergie : mobilité électrique, pompes à chaleur, matériel domestique électrique, électrification de la production industrielle et manufacturière, numérisation des machines et des procédés, etc. Nous la suivons également quand sont préconisées des mesures d'efficacité et de sobriété énergétiques.

³ Référencées improprement dans le rapport SFEC dans la classe des énergies renouvelables décarbonées, ce qui parfois induit quelques confusions.

⁴ La production nette de biomasse photosynthétique est actuellement estimée à 110 Gt C/an et la combustion des énergies fossiles libère 10 GtC/an. On estime qu'il faudrait 20 à 30 Gt C /an de biomasse pour produire la même quantité d'énergie que celle libérée par les combustibles fossiles. Le retour à l'état naturel et l'entretien des forêts, une gestion appropriée des friches agricoles et des zones côtières pourraient permettre la fixation de 40 GtC/an supplémentaires. Un prélèvement de l'ordre de la moitié de ce supplément de production annuel de biomasse permettrait de s'affranchir des énergies fossiles.



Cependant, au vu de l'objectif extrêmement ambitieux proposé par RTE qui est de réduire la consommation énergétique finale de 1600 Twh en 2021 à 900 Twh en 2050, nous considérons qu'une approche complémentaire devrait être mise en œuvre afin que contribuent à cette réduction en priorité les chaînes énergétiques qui approvisionneront les utilisateurs finaux avant que ces derniers ne soient contraints. Ceci permettrait d'alléger significativement les besoins en infrastructures de production primaire* d'énergie et de transport électrique du pays tout en renforçant la résilience énergétique au niveau territorial et en retirant du carbone atmosphérique. Cette approche est basée sur une observation du fonctionnement des systèmes biologiques, qui ont créé et régénèrent chaque jour la biosphère depuis plus de 3 milliards d'années. Les fondements de cette approche bio-inspirée sont succinctement résumés en Annexe 1.

Nous préconisons qu'une partie des surplus de la biomasse* agricole ou forestière (entretien des forêts et zones de friche pour accélérer leur croissance ou y minimiser les risques incendies), que les déchets organiques domestiques ou industriels et que des cultures terrestres ou marines à rotation rapide soient dédiés à la production de méthane (25% de teneur en hydrogène) ou de liquides organiques à haute teneur d'hydrogène (alcools par exemple avec 13% de teneur en hydrogène). Ces gaz et liquides seraient distribués aux utilisateurs finaux en adaptant l'infrastructure pétrolière et gazière existante. Des piles à combustible*, utilisant l'hydrogène de ces bioliquides ou biogaz, seraient implantées localement afin de fournir les utilisateurs en électricité et/ou chaleur. Ces technologies fonctionnent déjà sur des gammes de puissance allant du watt (appareils de mesures ou d'éclairage) à plusieurs centaines de kW (fourniture statique d'électricité, mobilité)⁵ et c'est un sujet en pleine évolution technologique qui devrait faire partie des priorités de R&D dans notre pays.

On constituerait ainsi des chaînes énergétiques dont le taux de conversion d'énergie primaire en énergie finale électrique et/ou chaleur pourrait être proche de 1 pour 1, ce qui est avantageux si on part du constat que le taux de conversion d'énergie primaire en énergie finale électrique est actuellement de l'ordre de 3 pour 1 (statistiques nationales) et que RTE espère le faire passer à moins de 2,3 pour 1 - chiffre qui est maintenant réglementairement imposé par anticipation dans la conception des bâtiments - en associant massivement des parcs industriels solaires et éoliens au réseau de centrales nucléaires dans le cadre des PPE en cours et à venir.

On aurait ainsi un moyen simple, direct et sûr de réaliser la réduction énergétique souhaitée, sans avoir à mettre une pression exagérée sur les consommateurs pour qu'ils s'engagent dans une démarche de sobriété et de réinvestissement forcés dans de nouveaux équipements électriques avant que leurs équipements thermiques actuels ne soient arrivés en fin de vie. Il serait en effet plus économique pour eux et pour l'Etat de les convertir dans un premier temps au fonctionnement aux biocombustibles jusqu'à leur fin de vie naturelle, puis de remplacer en temps voulu les moteurs à combustion par des piles à combustible ou des moteurs électriques.

Un avantage des piles à biocombustible est par ailleurs de permettre une capture facile et peu coûteuse du CO₂. Il pourrait être collecté pour être ensuite réutilisé (e-carburants, applications agricoles, alimentaires ou industrielles) ou injecté dans le sous-sol, soit pour y rester pendant des périodes géologiques, soit pour être consommé dans des biogéoréacteurs souterrains par des microbes⁶ qui généreraient un biométhane prêt à être réutilisé en surface. Cette infrastructure viendrait en continuité de celle que les producteurs d'énergies fossiles sont maintenant conduits à

⁵ Exemples : <https://sigens.de/en/methanol-fuel-cell/> , <https://powercellgroup.com/maritime-methanol-to-fuel-cell-power-chain/>

⁶ L'activité des microbes pourrait être stimulée par des flux d'hydrogène naturel émanant spontanément des profondeurs ou des flux d'électrons générés par de systèmes ENR électriques (photovoltaïques) en surface.



mettre en place pour la capture et la séquestration du carbone* en compensation du carbone fossile qu'ils extraient et qui est rejeté in fine par les utilisateurs dans l'atmosphère.

L'utilisation de biocombustibles carbonés serait ainsi un moyen d'accélérer le retrait du carbone atmosphérique, ce que des scénarios tout électriques ne permettent pas.

Cette rapide transition ne pourra avoir lieu sans un effort de formation important de l'ensemble des professions de l'énergie et c'est ce qui est proposé en Annexe 3.

Voici donc quelques pistes sur lesquelles il pourrait être intéressant de développer des pilotes au plus vite, de faciliter les investissements de R&D et pour lesquelles RTE pourrait bâtir des scénarios de simulation supplémentaires.

Nous nous tenons à disposition de RTE et du Ministère de la Transition énergétique pour les explorer.

Patrick Portolano

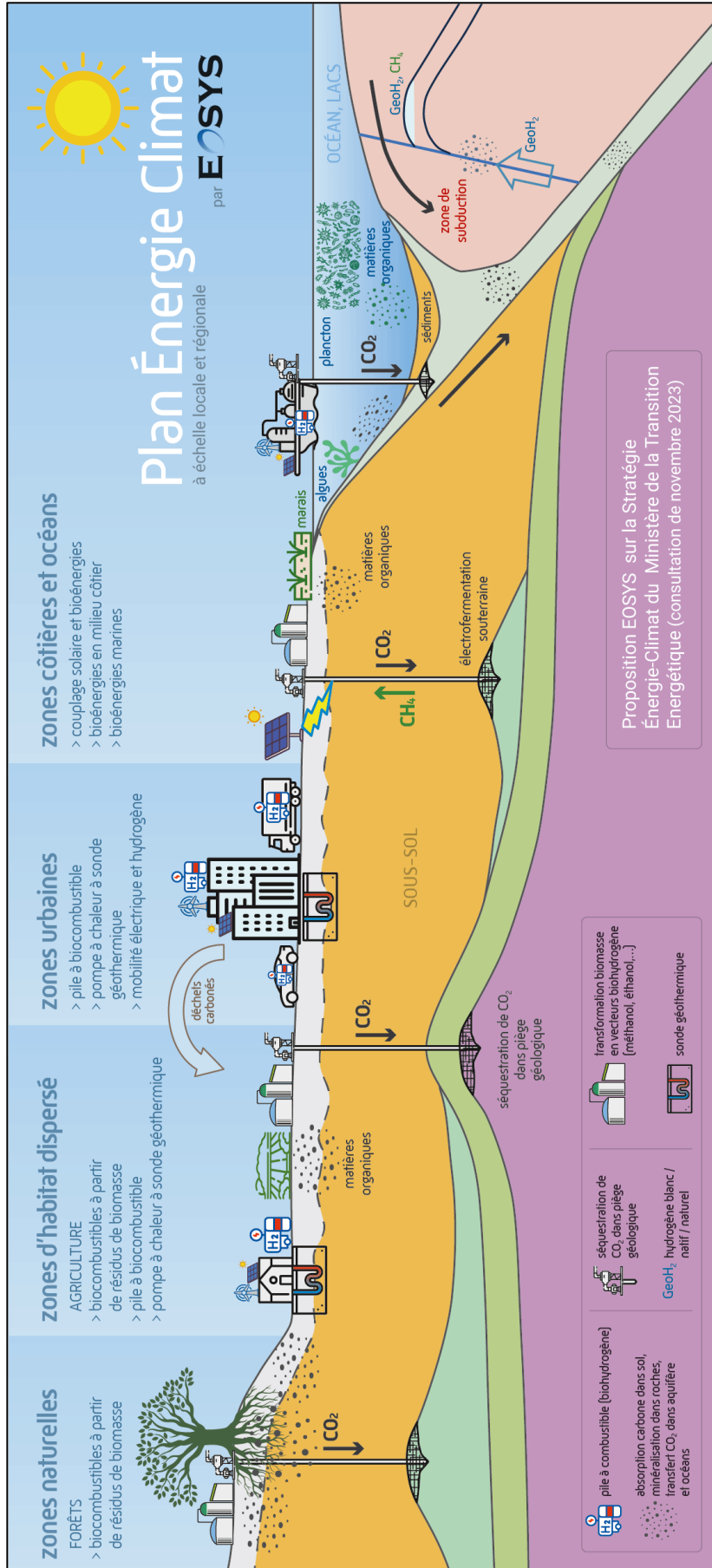
Jean-Louis Gaillard et Louis Heuzé

Directeur fondateur de EOSYS

Vice-président et Président de l'association ACP Energies

patrick@eosys.fr

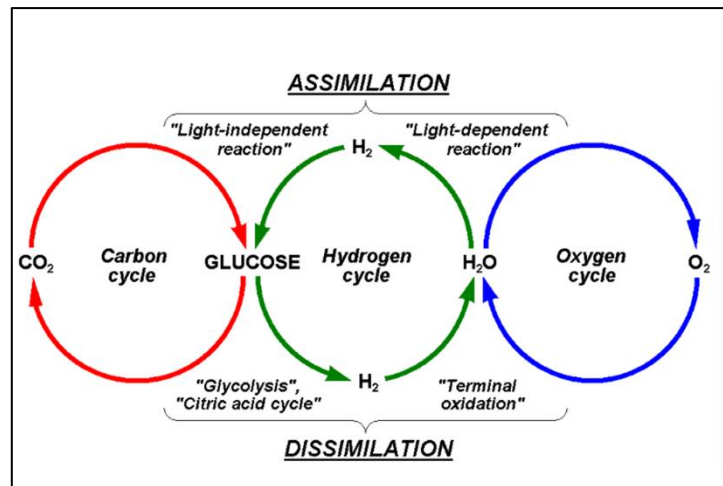
j-louis.gaillard@acp-france.org et louis.heuze@gmail.com



ANNEXE 1

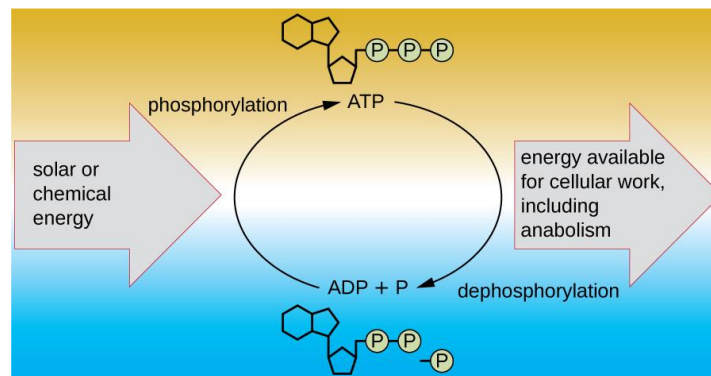
Chaines énergétiques dans les biosystèmes

Il suffit d'ouvrir un livre de cours de biologie récent pour s'apercevoir que les microorganismes que sont les microbes ou les cellules constitutives des organismes vivants pluricellulaires gèrent de façon très intriquée des flux de matière organique et d'énergie par le biais d'un emboîtement de cycles métaboliques dont la période varie de la milliseconde à plusieurs mois, voire années.



Source : Wikipedia

Ces cycles participent aux grands cycles biogéochimiques planétaires, par lesquels les microorganismes ont établi et régulent la composition de la biosphère (océans, sols et formations géologiques de surface et atmosphère) depuis plus 3 milliards d'années.

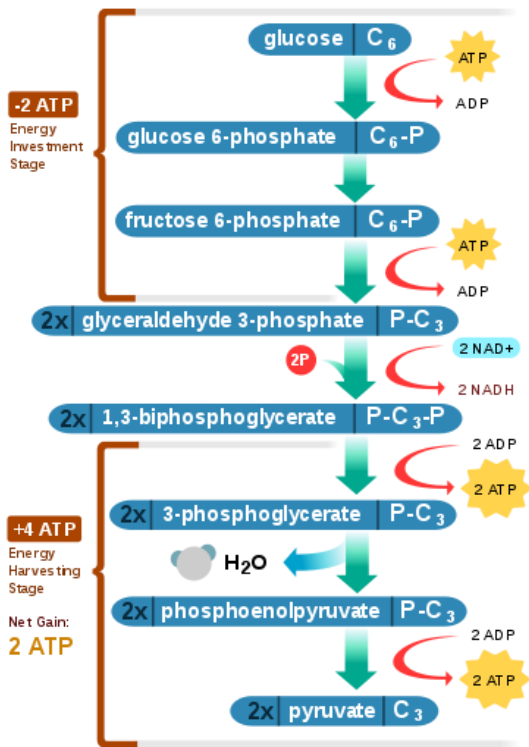


Source : Wikimedia

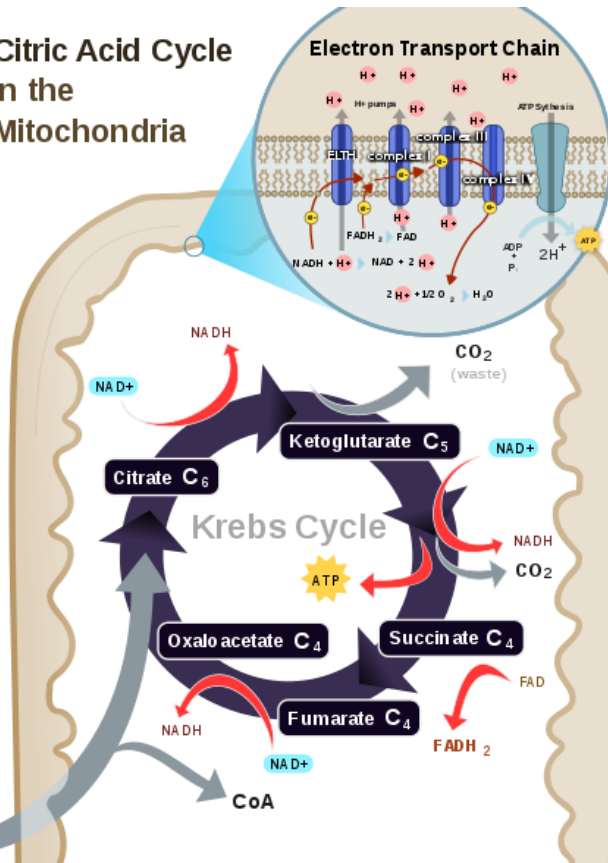
Les cycles métaboliques – tels la respiration ou la photosynthèse – se caractérisent tous par l'alternance d'une phase de libération d'énergie (dite exergonique) suivie d'une phase d'accumulation d'énergie (dite endergonique). La fourniture d'énergie nécessaire à la phase endergonique se fait par le biais des « **piles organiques** » que sont les molécules d'ATP⁷, omniprésentes dans tous les cycles des organismes vivants.

⁷ L'ATP est une molécule (nucléotide) contenant 3 atomes de phosphore, relativement instable et capable de fournir de grandes quantités d'énergie aux réactions auxquelles elle participe, en se transformant en ADP, sa variante avec 1 atome de phosphore en moins.

Glycolysis in the Cytoplasm



Citric Acid Cycle in the Mitochondria

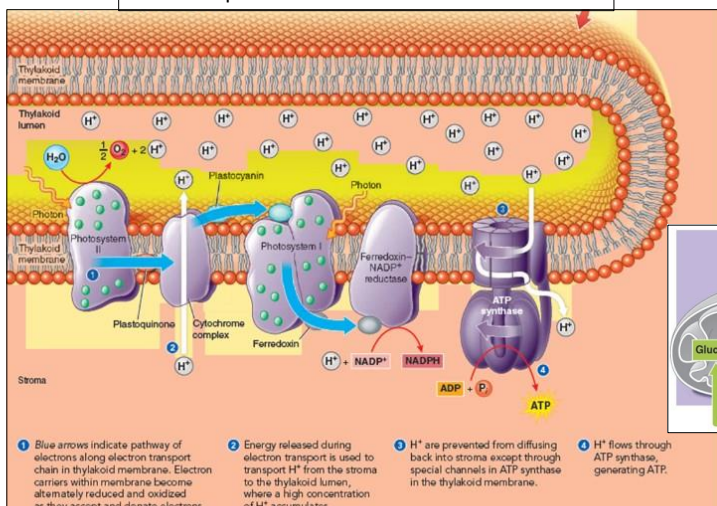


Source : Wikipedia

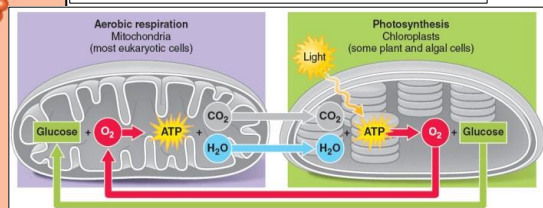
La recharge des molécules ADP en molécules ATP se fait dans des organites spécifiques situées au sein des cellules (mitochondries ou chloroplastes dans le cas des cellules les plus évoluées à noyau dites eucaryotes) ou dans l'espace intermembranaire même des cellules (cas des cellules les plus primitives sans noyau dites procaryotes). Ces membranes comportent des structures conductrices d'électrons et

Biosystèmes : une inspiration pour les chaînes énergétiques du futur ?

Gradient protons et circulation électrons induits par une membrane cellulaire



Charge de molécules ATP dans les mitochondries et décharge dans les chloroplastes



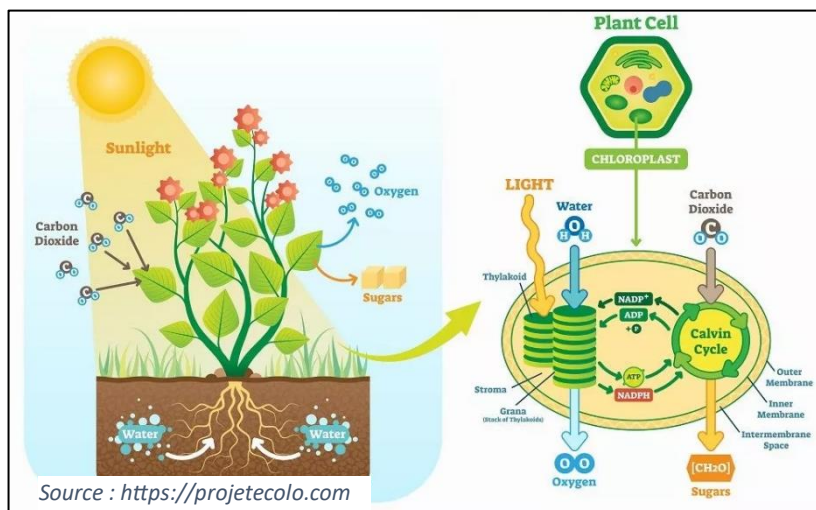
constituent des barrières pour les protons qui s'y accumulent du côté interne, créant un potentiel électrostatique dénommé force « proton-motrice ». Ils ne peuvent la traverser occasionnellement que grâce à l'intervention groupes de molécules spécifiques, par exemple ceux dénommés « pompes à proton ». Protons et électrons viennent généralement de la dissociation d'atomes d'hydrogène omniprésent dans les molécules d'eau dans laquelle baigne la vie cellulaire ou issus de la matière organique qui constitue la matériel cellulaire ou microbien.

Un énergéticien imaginatif peut voir ainsi dans chaque système vivant la distribution d'une multitude de « nano » « piles à combustible » * (nano PAC) s'alimentant d'hydrogène. Ces nano PAC cellulaires fonctionnant dans des conditions de température et de pression ambiantes, rechargent les piles ADP/ATP dont il était question plus haut. L'hydrogène qu'elles utilisent est extrait de molécules d'eau ou de molécules organiques de structure relativement simple, issues par le biais de cycles métaboliques divers, de la dégradation ou de la dépolymérisation des molécules plus complexes (graisses, sucres, cellulose, lignine) qui stockent l'énergie sur le temps long tout en constituant le matériel qui arme l'architecture cellulaire.

Le fonctionnement de la matière vivante et des écosystèmes est donc différent de celui des systèmes anthropiques actuels, basés sur la domestication et la régulation de réactions chimiques ou nucléaires puissantes, sources de grande déperdition de chaleur et dont bénéficie finalement peu le système thermo-industriel. Ces réactions, généralement à haute température, dépassant celles des conditions d'existence du vivant, sont confinées dans des turbines, des foyers ouverts ou fermés, des moteurs à explosion ou au sein de réacteurs nucléaires. Il n'existe pas dans les milieux naturels de réseau de transmission énergétique fixe à haut flux énergétique qui transforme une énergie primaire* en une énergie finale*. Les réseaux biologiques les plus complexes, tels les neurones des animaux, les racines des plantes ou le mycélium des champignons servent plutôt à la transmission d'informations et à des échanges de substances nutritives.

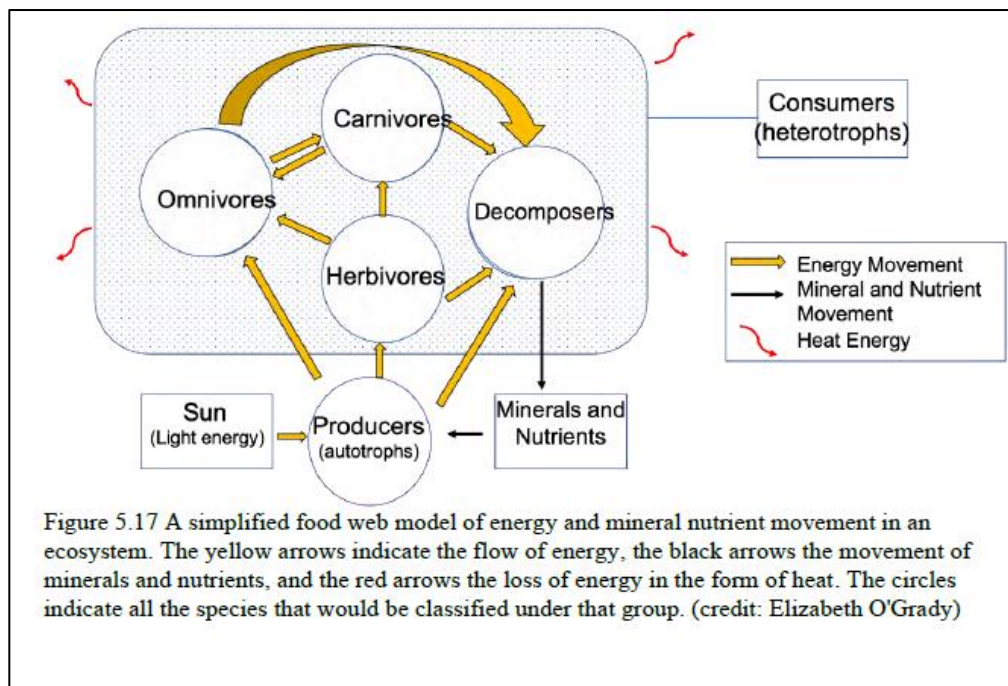
Revenons maintenant sur le mode d'alimentation en hydrogène des nano PAC cellulaires.

La vie, y compris terrestre, se développe dans un milieu aqueux séparé de l'extérieur par des



membranes à perméabilité sélective. Or l'hydrogène est extrêmement peu soluble dans l'eau (solubilité de l'ordre de 50 parts par milliard en poids). Une façon dont il peut en être extrait est par la photolyse de l'eau qui advient quand des photons dans certaines bandes spécifiques du spectre solaire rencontrent des molécules d'eau. Ceci donne lieu à la création de biomasse par photosynthèse, création de matière vivante à partir de matière minérale, processus qualifié d'autotrophe (phototrophe).

Il existe cependant des moyens énergétiquement plus avantageux pour les microbes de se fournir en hydrogène. Le plus simple est de manger d'autres microbes : l'hydrogène principalement lié au carbone est alors 5 à 7 fois moins coûteux énergétiquement à obtenir à partir de ce qui est ingéré. Qui plus est, un certain nombre d'autres molécules utiles sont obtenues à bon compte. C'est ce qui s'appelle l'hétérotrophie, utilisation de matière organique morte ou vivante pour créer une nouvelle matière vivante. L'hétérotrophie existe également au niveau des êtres pluricellulaires, colonies organisées de microbes.



Il existe également la possibilité d'exploiter la libération d'hydrogène qui se produit spontanément lors de la décomposition de matière organique ou aux interfaces de certains minéraux en contact avec de l'eau. Ces conditions se trouvent en l'absence d'oxygène dans les fonds marins, au sein des couches géologiques, en particulier volcaniques (notamment les fumeurs blancs qui dégagent de l'hydrogène dans les dorsales océaniques) et dans les sols. C'est une autre forme d'autotrophie (chimiotrophie), peut-être celle qui est à l'origine de l'apparition de la vie.

En conclusion, nous nous devons d'insister sur le **rôle clé et multifonctionnel du carbone dans les systèmes vivants** : les composés carbonés en constituent l'**architecture interne et externe**. Dès lors qu'il se retrouve sous forme de CO_2^8 , il devient la **source de carbone vivant** des systèmes autotrophes, base de tous les écosystèmes. Entre ces deux situations, **le carbone est le vecteur qui amène l'hydrogène aux nanopiles à combustible** où sont rechargées les batteries qui animent chaque microbe ou cellule.

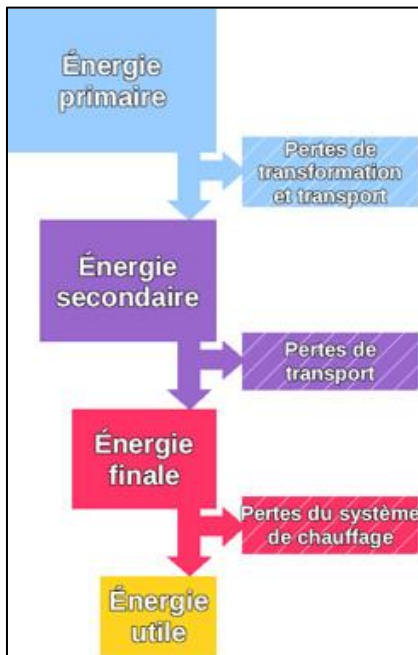
Grâce à ce mode de fonctionnement énergétique très fin au niveau cellulaire et grâce à un milieu ambiant aqueux qui permet la récupération et la distribution de la chaleur dégagée par les réactions cellulaires, le taux de conversion entre l'énergie primaire disponible sous forme chimique et l'énergie utile au fonctionnement des microorganismes est proche de 1. Les chaînes énergétiques sont internalisées dans les systèmes vivants ou localisées à leur proximité immédiate.

⁸ CO_2 : dioxyde de carbone

ANNEXE 2

Glossaire et compléments

Energie primaire, finale, utile (source CEREMA)



Afin de comptabiliser l'énergie produite et consommée, on distingue différents stades :

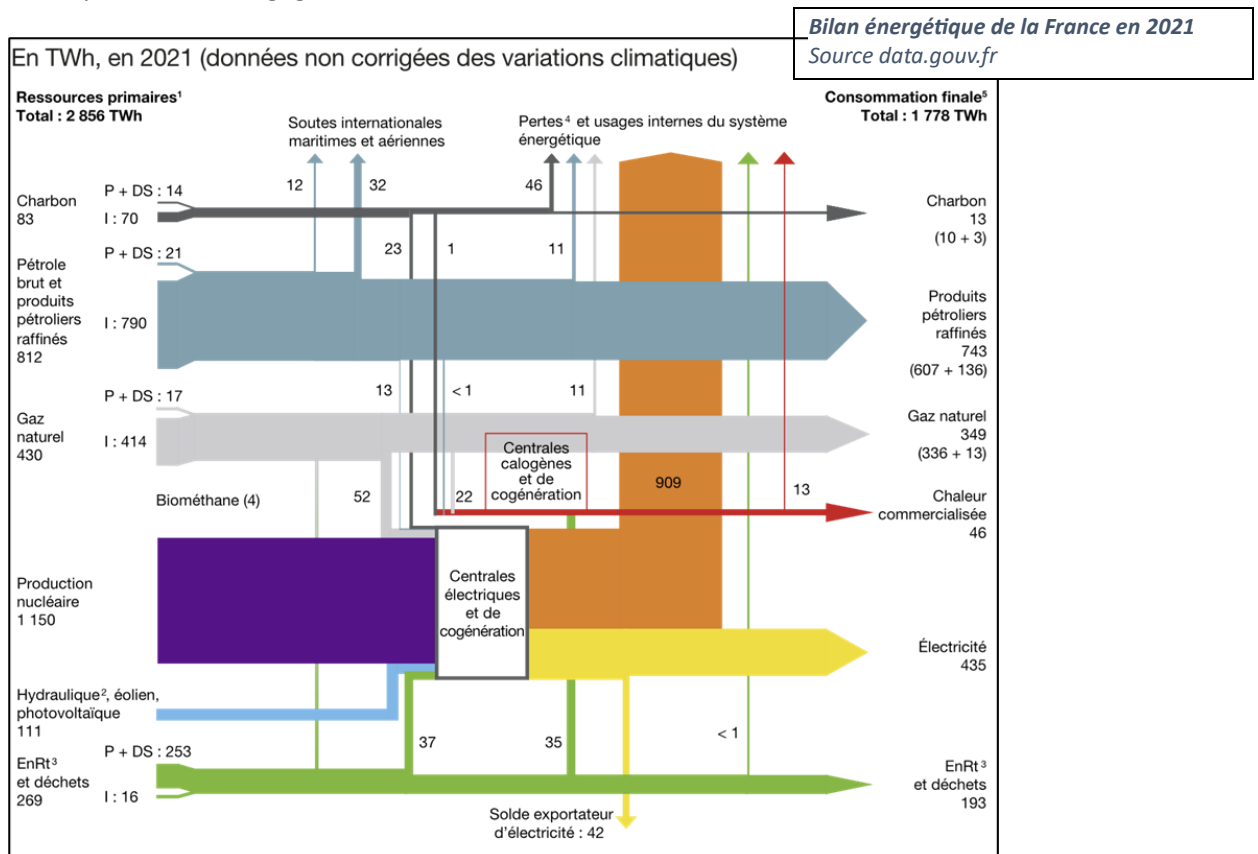
Énergie primaire : énergie brute, n'ayant subi aucune conversion. Exemple de source : pétrole non raffiné

Énergie secondaire : énergie primaire transformée avant son transport à l'utilisateur final. Exemple de source : produits pétroliers raffinés

Énergie finale : énergie livrée à l'utilisateur final, avant sa consommation. On considère que dans le cas des énergies thermiques renouvelables, l'énergie finale est égale à l'énergie primaire. Exemple de source : fioul livré en entrée de chaudière

Énergie utile : énergie finale pondérée par le rendement du système de chauffage. C'est l'énergie restituée à la sortie du système, celle dont bénéficie effectivement l'utilisateur.

Pour certaines sources d'énergie, l'énergie finale est équivalente à l'énergie primaire. C'est le cas de l'énergie solaire, du bois-énergie utilisé dans le résidentiel-tertiaire, le gaz naturel si l'on considère les pertes de transport comme négligeables et les réseaux de chaleur/froid.

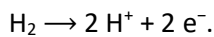


Coefficient d'énergie primaire (CEP)

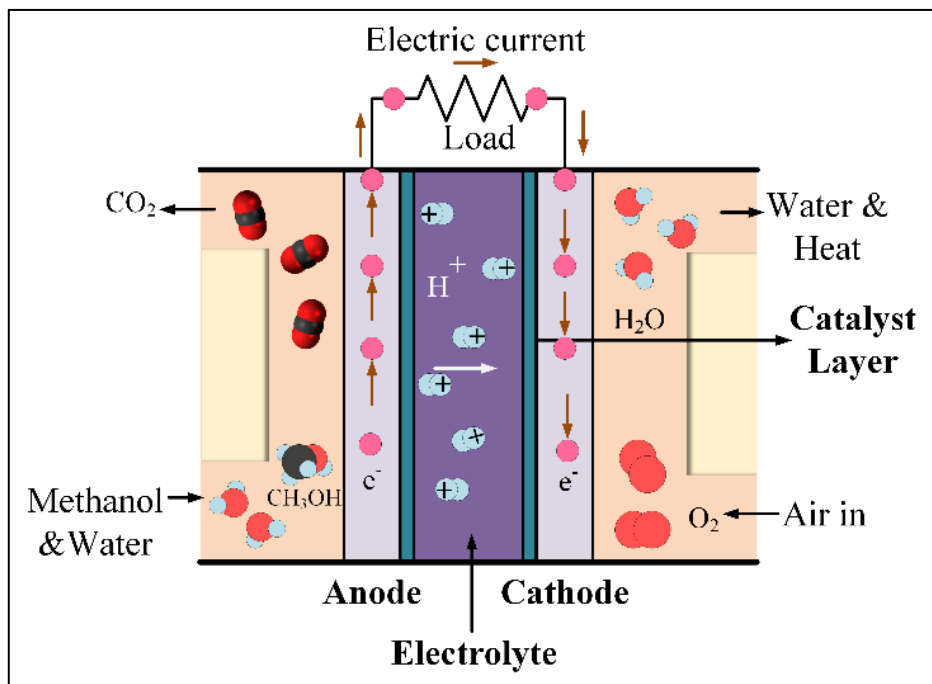
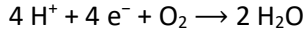
Il s'agit du rapport entre l'énergie primaire, potentiellement contenue dans les différentes sources d'énergie, et l'énergie finale, consommée et facturée à l'utilisateur. Ce coefficient permet de connaître la quantité d'énergie totale nécessaire pour obtenir 1 kWh d'énergie finale. Il sert donc à prendre en compte les pertes liées à la transformation et à l'acheminement de l'énergie. Le CEP est aussi utilisé lors de l'établissement des réglementations thermiques, afin de fixer des objectifs d'économies d'énergie au niveau national. L'objectif est notamment d'améliorer le bilan énergétique des bâtiments neufs.

Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) (source Wikipedia)

Une PEMFC transforme l'énergie chimique libérée durant la réaction électrochimique du dihydrogène (H_2) et du dioxygène (O_2) en énergie électrique, processus « opposé » à la réaction thermochimique de ces deux corps produisant de l'énergie thermique. Un jet d'hydrogène est dirigé vers le côté anode de l'assemblage membrane-électrode. Il est à cet instant divisé catalytiquement en protons et électrons. Cette réaction d'oxydation dans la demi-cellule est décrite par :



Dans le même temps, un flux de dioxygène est dirigé du côté cathode de l'assemblage membrane-électrode. Les molécules de dioxygène réagissent avec les protons (qui ont traversés la membrane électrolyte polymère) et avec les électrons (arrivant par le circuit électrique externe) afin de former des molécules d'eau. Cette réaction de réduction dans la demi-cellule électrolytique s'écrit :



Source : S. Petrovic et al - DOI 10.1109

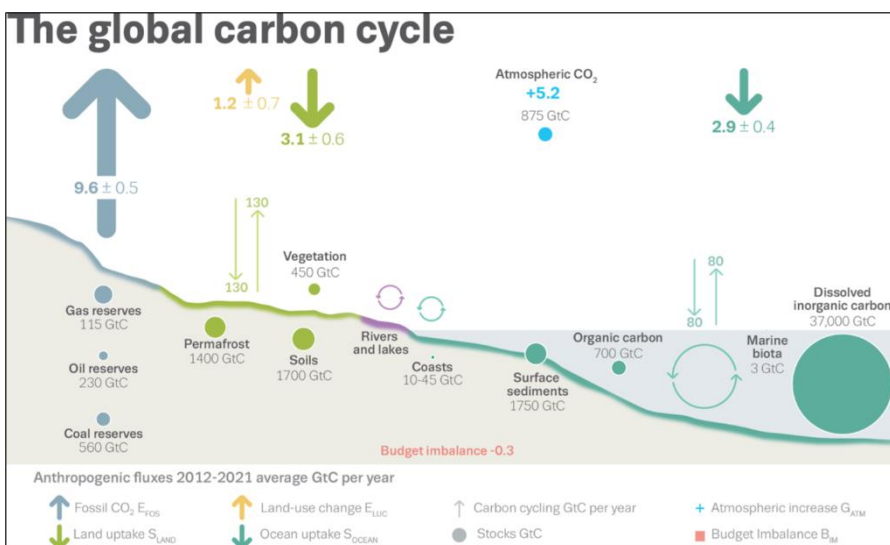
Biomasse, bioénergies, biocombustibles, matière organique

La **biomasse** est le terme qui désigne la masse totale d'organismes vivants, qu'il s'agisse de plantes, d'animaux, de champignons ou de microbes. Les Terriens en tirent notamment toute leur nourriture et une grande partie des ressources qui leur sont quotidiennement nécessaires. Les **combustibles fossiles** tels que le pétrole, le gaz naturel ou le charbon sont aussi pour l'essentiel issus de la biomasse.

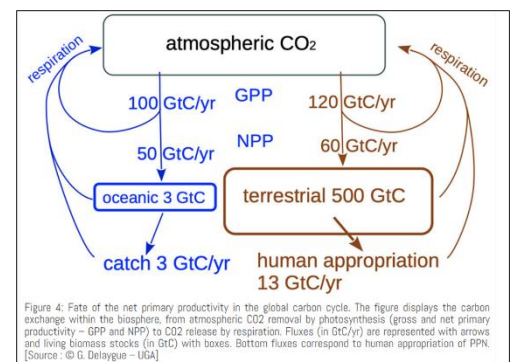
La biomasse dite **primaire** se constitue par des organismes producteurs primaires également appelés **autotrophes**. Ils créent la **matière organique** qui les constitue grâce à des réactions physicochimiques combinant du carbone sous forme minérale (CO₂ notamment) et de l'eau ainsi que d'autres éléments mineurs. La **photosynthèse** qui crée toutes les **cellules végétales** en est la forme la plus connue : elle consiste en une photolyse de l'eau par la lumière solaire accompagnée de réduction du CO₂ atmosphérique. La biomasse primaire peut aussi être créée par **chimiosynthèse**, notamment en milieu souterrain dans des conditions anoxiques (pas d'oxygène). Par exemple, des microbes (archées) utilisent une des voies de la **méthanogenèse** pour constituer des composés organiques cellulaires en réduisant le CO₂ par de l'hydrogène issu de réactions de réduction chimique ou résultant de la radiolyse de l'eau par la radioactivité naturelle.

Si on connaît à peu près le taux de production photosynthétique primaire net (de l'ordre de 40 GtC¹⁰/an dans les océans et 65 GtC/an sur les continents), on ignore le taux annuel de production de biomasse chimiosynthétique primaire net.

La **biomasse secondaire** correspond à la production de matière vivante par les producteurs secondaires également appelés **hétérotrophes**, et qui regroupent les consommateurs en herbivores, carnivores, détritivores et décomposeurs. Biomasse primaire et secondaire peuvent être également source de bioénergies par les voies de la **fermentation** qui est une dégradation de la matière organique par des microbes tirant leur énergie de l'oxygène qu'elle contient, augmentant ainsi le taux en hydrogène de la matière organique résiduelle. On ignore le taux annuel de biomasse produite par fermentation.



Source GIEC



¹⁰ GtC : gigatonne de carbone

Bioénergie

La bioénergie (ou les bioénergies) est une énergie produite à partir de ressources organiques comme le bois, les cultures agricoles, et les déchets organiques. Elle est obtenue à partir de matière organique récemment produite, qu'on appelle biomasse, par opposition aux combustibles fossiles qui sont de la biomasse fossilisée. Selon la matière d'origine, on parlera de biomasse forestière, de biocarburants, de biogaz ou de biocombustibles.

Tant au niveau mondial qu'à celui de la plupart des pays, surtout peu industrialisés, la biomasse reste de très loin la première source d'énergie renouvelable dans la consommation des sources primaires d'énergie.

Carbone atmosphérique

Il s'agit de l'ensemble des composés carbonés présents dans l'atmosphère : principalement le dioxyde de carbone (CO₂) à 420 ppmv¹¹(soit 0.042%), puis le méthane (CH₄) à 1.9 ppmv. D'autres composés tels que le monoxyde de carbone (CO) ou le sulfure de diméthyle (CH₃)₂S sont également présents à quelques fractions de ppmv et ont une durée de vie très courte. Les chlorofluorocarbures (CFC) à des teneurs de l'ordre du ppbv sont également présents.

Puits carbone, CCS, CDR

Les puits naturels

Il s'agit principalement des écosystèmes qui, comme les forêts, les marais côtiers, le bocage, le phytoplancton, captent naturellement le CO₂ par photosynthèse et le stockent dans le bois, les sols, les sédiments. Ce sont des **puits biologiques**. Du CO₂ se dissout aussi dans les océans ou est absorbé par les roches qui s'altèrent à la surface des continents. Il s'agit dans ce dernier cas de **puits géologiques**, tout comme le sont les couches géologiques qui contiennent des hydrocarbures ou du charbon. Le passage naturel des puits biologique de carbone dans des puits géologiques de carbone se fait à un rythme que l'on ne connaît pas mais que l'on estime de l'ordre de 0.2 à 0.5 gigatonne de carbone par an, c'est-à-dire de 16 à 40 fois plus lentement que le déstockage de carbone géologique dans l'atmosphère qui se fait au rythme de 10 Gt/an. Ce carbone s'accumule ainsi dans la biosphère et les Terriens n'ont d'autre choix que de le gérer eux-mêmes, soit en favorisant l'adaptation des cycles naturels à ces nouvelles conditions, soit par des méthodes industrielles. Et cela pour des dizaines voire centaines d'années après que les émissions nettes de carbone fossile auront cessé.

Les puits industriels

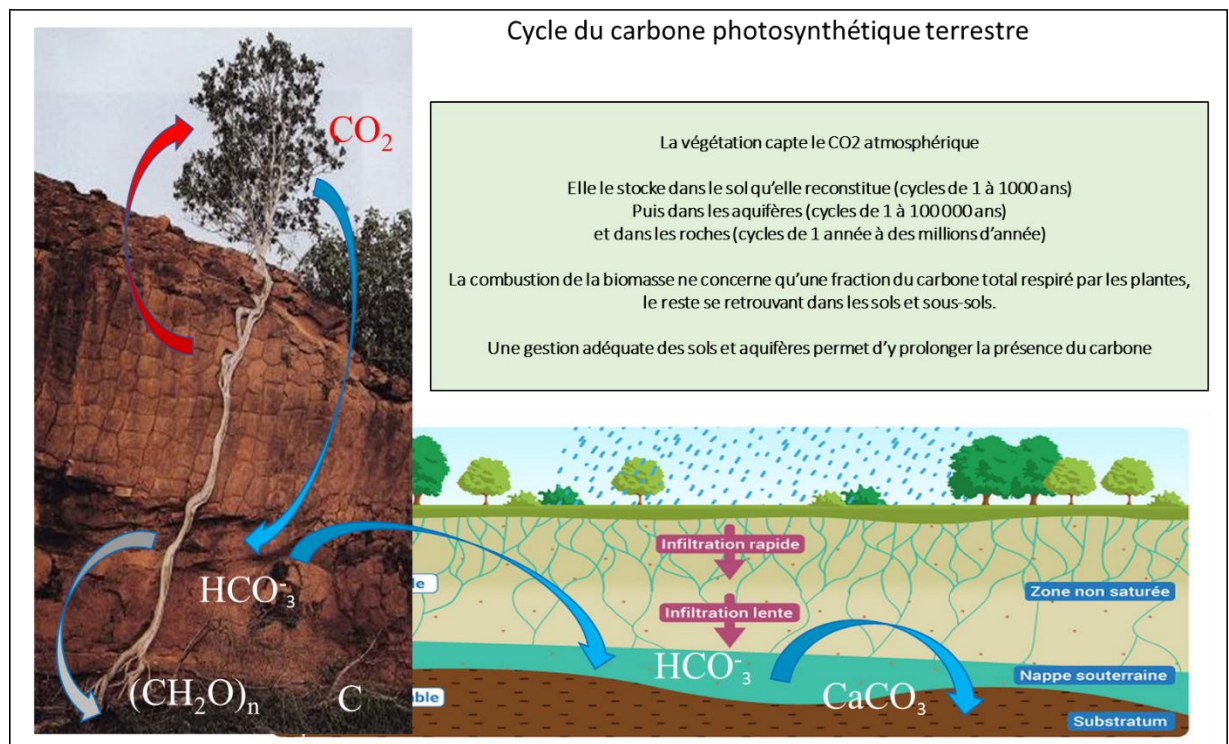
Le **CDR** (« Carbon Dioxide Removal » ou Retrait du dioxyde de carbone atmosphérique) **naturel** consiste à développer ces puits naturels, que ce soit par des voies biologiques ou minérales.

Un exemple de **CDR industriel** est le « **Direct Air Capture** » (**DAC**) qui consiste à capter le CO₂ dans l'air ambiant à des teneurs de 0.04%. Il n'est pas mature, et très énergivore. D'autres développements industriels, encore moins matures, concernent la capture et minéralisation du carbone sous terre ou sa dissolution ou précipitation dans les océans.

¹¹ ppmv : partie par million (en volume) et ppbv partie par milliard (en volume)

La **capture-séquestration géologique du CO₂** (CCS pour « Carbon Capture and Sequestration » en anglais) se fait à partir de points source émetteurs d'effluents contenant du CO₂. Leur concentration initiale en CO₂ détermine pour une large part le coût de l'opération CCS. Elle varie de quelques pourcents (par exemple pour la capture post-combustion dans les centrales de génération électrique au charbon) à plus de 90% (par exemple dans certains processus de capture précombustion ou dans des effluents d'unités de production de biocarburants). Cela consiste à concentrer le CO₂ par des processus industriels sortant des effluents à 100% de CO₂ puis à l'injecter dans des réservoirs géologiques étanches, à plus de 1 000 m de profondeur après l'avoir éventuellement transporté sur des distances plus ou moins longues au moyen de gazoducs, de navires et/ou de camion-citerne.

Si on l'applique à une centrale biomasse ou à une usine de bioéthanol, on parle de bioénergie avec CCS (**BECCS**), l'avantage étant que l'on a à traiter au départ des flux à plus de 40% de CO₂.



Source EOSYS

ANNEXE 3

Commentaires de [Pro Educ Consultants \(PEC\)](#) ¹²

Sur la « Stratégie française pour l'énergie et le climat ».

Alain NICOLAS, Bernard GROS, Issa-Diop NDOYE.

Comme le signale le texte, la transition énergétique comporte un phénomène schumpetérien de « destruction – créatrice » d'emplois, avec un solde positif des emplois créés sur les emplois détruits (+ 150 000 emplois d'ici 2030), ceci combiné à une modification des compétences et qualifications requises, plus ou moins forte selon les secteurs. Cette situation requiert que l'on développe un accompagnement et des formations adaptés à cette transition, tant en formation initiale qu'en formation continue, pour créer de nouvelles trajectoires professionnelles.

D'autant plus que nous avons déjà un contexte de marché du travail caractérisé par des pénuries sur certaines qualifications (soudage, chaudronnerie et construction métallique, électronique et automatisme...), ainsi qu'une faible attractivité des emplois techniques alors que les secteurs cités en ont fortement besoin.

Attractivité des emplois :

Cette situation impose d'une part une amélioration des systèmes d'orientation dans la formation initiale par une présentation positive des qualifications techniques à tous niveaux, et d'autre part le développement des formations alternées. Pour la population active affectée, l'attractivité repose sur le déploiement de dispositifs de reconversion en appui sur la formation continue et sur leur financement, ceci combiné à une amélioration des conditions d'emploi et l'ouverture de perspectives d'évolution professionnelle dans les secteurs et entreprises concernées.

L'attractivité est aussi freinée par une dimension socioculturelle imprégnant les décisions de choix professionnels (perception des métiers techniques au sein de l'enseignement secondaire, division du travail par sexe et rôles sociaux).

Transition et compétences

Le processus de transition impose à la population active, mais aussi à la population globale, des adaptations récurrentes aux évolutions technologiques et contextuelles. Cette adaptabilité repose sur l'acquisition d'un éventail de compétences combinable avec une diversité d'emplois. Ainsi, en complément des compétences métier, une formation pour acquérir des compétences techniques transverses (c'est-à-dire exploitables dans différentes qualifications techniques) mais aussi des « soft skills », est déterminante sur une temporalité longue de l'adaptabilité et de la mobilité des actifs.

Des dispositifs flexibles :

L'ingénierie des dispositifs doit combiner :

¹² Membre de ACP Energies , www.pro-educ-consultants.com



- une offre de formation exprimée en compétences ciblées (référentiel de compétences), où chaque parcours est organisé en blocs de compétences, en garantissant une formation complète pour ceux qui en ont besoin, mais aussi flexible pour les publics en reconversion (parcours personnalisés).
- chaque formation doit présenter outre le référentiel de compétences ciblées et le référentiel de formation, un référentiel de certification précisant une diversité de modalités d'évaluation (évaluations classiques, mises en situation professionnelles, acquis de l'expérience) et les critères de validation.
- la mobilisation des dispositifs de validation des acquis de l'expérience pour proposer des solutions plus personnalisées.
- le développement des formations par alternance (acquérir une culture d'entreprise et construire une perspective d'emploi), tant en formation initiale qu'en formation continue, ainsi que la mobilisation du CPF dans une perspective de reconversion.

L'acceptabilité sociale :

Pour amplifier l'acceptabilité sociale de la transition, une culture de la transition énergétique et écologique sur des bases scientifiques, doit être intégrée dans la formation initiale. Les différentes solutions et expériences doivent être évaluées et présentées au grand public pour lever les objections qui freinent la transition.

La nécessaire souplesse :

Relever les défis de la transition énergétique suppose un effort considérable, venant des politiques publiques et des entreprises, en faveur de l'éducation et de la formation, sans quoi les solutions techniques, même parfaitement maîtrisées, risquent d'être inopérantes, par manque de moyens humains en quantité, en qualité et en motivation (problème de l'attractivité de l'industrie).

Cet effort doit tenir compte d'un aspect essentiel : la transition énergétique est en développement, le contenu est incertain et en évolution.

Il convient donc de ne pas figer les référentiels, mais de garder de la souplesse, en créant des modules-ressources de formations adaptables, briques de base de parcours diversifiés, et en tenant compte des diversités des points de départ et des besoins, pour définir des parcours de formation individualisés, à l'image de la Validation des Acquis de l'Expérience (VAE).

Il ne faut pas de formations « clefs en mains », mais du « sur mesure ».

La priorité nous semble être la formation des formateurs.