French Energy and Climate Strategy

Opinion and Proposal from ACP Énergies and EOSYS

December 2023 — Paris, 8 January 2024, Revision No. 2

English-language edition of the complete 2023–2024 submission, presented together with full-size facsimiles of the original illustrated document. All estimates, interpretations, links, illustrations and citations are historical source material, not updated assessments. The original pages are reproduced after the translated text to preserve every figure, graphic annotation and attribution.

Memorandum to the Minister for Energy Transition

ACP Énergies is an association bringing together approximately one hundred companies and professionals involved in renewable and extractive energy. For the past two years, it has organised meetings and forums on the energy transition in the hydrocarbon sector, geological hydrogen production and management of the geological carbon cycle.

EOSYS, a member of ACP Énergies, specialises in bio-geological energy systems, territorial metabolism and the global carbon cycle.

We are responding to the Ministry for Energy Transition's call for public comments on the presentation document for the French Energy and Climate Strategy (SFEC).

The Minister for Energy Transition, Agnès Pannier-Runacher, launched a public consultation as part of the work on the French Energy and Climate Strategy, which was to provide the basis for the next Multiannual Energy Programme (PPE), defining France's energy policy for 2024–2035. Held from 22 November to 22 December 2023, the consultation enabled everyone to express views on the strategic directions developed over recent months by seven working groups established by the Minister.

The consultation document highlights the extent, technical quality and collaborative nature of the work undertaken since October 2021 by RTE (France's electricity transmission system operator) and the Ministry's Ecological Planning Council.

The proposed solution for drastically reducing greenhouse-gas emissions is to encourage energy sufficiency among users, improve the efficiency of energy-consuming equipment, electrify uses so that final energy consumption is reduced by nearly half, and rely on decarbonised primary energy production.

This logically favours renewable electricity, supported by a major expansion of nuclear power. Its beneficial consequence is a very substantial reduction in fossil energy requirements and in France's dependence on imports. High- and low-voltage grids must be considerably expanded, together with every means of storing electricity, including batteries, hydrogen stored in caverns, and pumped-storage systems. This strategy initiated by RTE reinforces the role of that institution in coordinating and regulating the transition of the energy system. Within this framework, bioenergy—carbon-based by definition—plays a poorly defined role as an adjustment variable.

We wish to propose a broader vision of the RTE scenarios.

In our view, the problem that must urgently be solved is to stop increasing the amount of carbon in the atmosphere and to organise economic activity so that it begins to decline without delay. This should be achieved while maintaining a decent standard of living in developed countries and enabling less-developed countries to approach comparable living standards. The priority is not only to stop greenhouse-gas emissions associated with the use of carbon-based energy, but also to limit emissions caused by land-use change and, above all, to establish territorial development policies that generate net uptake of atmospheric carbon.

It is therefore the atmosphere that must be decarbonised as quickly as possible. In our view, the most effective and economical way to do so is to enhance photosynthetic carbon capture on land and in the oceans. Encouraging the natural

growth of forests, algae and plankton is a rapid way to achieve this. Harvesting part of that growth for bioenergy, in the form of biofuels, offers a straightforward way of making such operations economically viable. The authors argue that, irrespective of the quantity harvested at the surface, a comparable order of magnitude of photosynthetically derived carbon remains trapped for long periods in soils or on the ocean floor, with a fraction entering slow geological carbon cycles (see Annex 2). Biofuels can and should be produced from short-cycle biomass, ideally replenished seasonally.

In summary, encouraging the development of marine and terrestrial biomass makes it possible to capture significant quantities of atmospheric carbon, store it in vegetation, soils and marine sediments, and promote natural pathways of geological carbon sequestration.

One possible scenario for ending fossil-carbon emissions and beginning to absorb atmospheric carbon would involve expanding the use of biofuels as substitutes for fossil fuels. We do not present this as our priority scenario; rather, we discuss it to demonstrate that pathways for decarbonising the atmosphere exist without necessarily requiring a large additional increase in electricity use. The original document estimates global net photosynthetic biomass production at 110 GtC per year and fossil fuel combustion at approximately 10 GtC per year; it puts the biomass needed to replace fossil energy at approximately 20–30 GtC per year. It further proposes that forest restoration and management, abandoned agricultural land and coastal-zone management might secure an additional 40 GtC per year, half of which could be harvested. These numerical estimates constitute the scenario assumptions presented by the authors in the December 2023 submission.

We agree with the SFEC where it advocates electrification whenever practicable and reasonable: electric mobility, heat pumps, electric domestic equipment, electrification of manufacturing and industrial production, and the digitalisation of machinery and processes. We also support measures promoting energy efficiency and sufficiency.

Nevertheless, given RTE's extremely ambitious objective of reducing final energy consumption from 1,600 TWh in 2021 to 900 TWh in 2050, we believe a complementary approach is required: energy supply chains should contribute first to this reduction, before additional constraints are placed on end-users. This would substantially limit the need for new primary energy-production and electricity-transmission infrastructure, while enhancing territorial energy resilience and removing atmospheric carbon. The approach is inspired by biological systems, which have created and continually regenerate the biosphere, and is outlined in Annex 1.

We propose allocating part of surplus agricultural and forest biomass (including biomass from forest and abandoned-land management designed to accelerate growth or reduce fire risk), household and industrial organic waste, and fast-rotation terrestrial or marine crops to the production of methane (25% hydrogen by mass) or hydrogen-rich organic liquids, such as alcohols (approximately 13% hydrogen by mass). These gases and liquids could be distributed to end-users by adapting existing oil and gas infrastructure. Fuel cells using hydrogen carried by these bioliquids or biogases would be deployed locally to supply electricity and/or heat.

Such technologies already operate across power ranges from watts (for measurement or lighting devices) to several hundred kilowatts (stationary power generation and mobility). They are evolving rapidly and should be a national R&D priority. Examples cited in the original include Siqens methanol fuel cells and PowerCell's maritime methanol-to-fuel-cell power chain.

This could create energy supply chains in which the conversion ratio of primary energy to final electricity and/or useful heat approaches one-to-one. The authors contrast this with an approximately three-to-one ratio for today's primary-to-final electricity supply and RTE's aspiration to reduce this to below 2.3-to-one, with more industrial-scale solar and wind generation combined with nuclear plants.

Such an approach would offer a direct means of achieving the desired energy reduction without putting excessive pressure on consumers to adopt energy sufficiency or replace existing heating and other thermal equipment before the end of its service life. In an initial phase, it would be more economical for consumers and the state to adapt these appliances to biofuels; when replacement becomes necessary, combustion engines could be replaced by fuel cells or electric motors.

Another advantage of biofuel-powered fuel cells is the possibility of relatively straightforward, low-cost CO_2 capture. The carbon dioxide could be recovered and reused—for e-fuels or agricultural, food and industrial applications—or injected

underground, either for geological storage or for microbial consumption in subterranean biogeoreactors producing biomethane for reuse at the surface. Microbial activity might be stimulated by naturally occurring hydrogen from depth or by electron flows supplied by surface photovoltaic systems. Such infrastructure would complement the carbon capture and sequestration that fossil energy producers are increasingly being called upon to deploy to offset the fossil carbon extracted and eventually released to the atmosphere by users.

Using carbon-based biofuels could thus help accelerate the removal of atmospheric carbon in ways that purely electric scenarios cannot directly provide.

This rapid transition would require a major training effort across the energy professions, addressed in Annex 3.

These are areas in which pilot projects could usefully be developed without delay, investment in research and development encouraged, and additional simulation scenarios prepared by RTE.

We remain available to RTE and the Ministry for Energy Transition to explore them.

Patrick Portolano — Founder and Director, EOSYS — patrick@eosys.fr

Jean-Louis Gaillard and Louis Heuzé — Vice-President and President, ACP Énergies — j-louis.gaillard@acp-france.org; louis.heuze@gmail.com

---

Annex 1 — Energy Chains in Biological Systems

A glance at a recent biology textbook shows that microorganisms and the cells making up multicellular organisms manage closely interconnected flows of organic matter and energy through nested metabolic cycles, whose periods range from milliseconds to months or even years.

These cycles contribute to the major planetary biogeochemical cycles through which microorganisms established and have regulated the composition of the biosphere—oceans, soils, surface geological formations and atmosphere—for over three billion years.

Metabolic cycles, including respiration and photosynthesis, are characterised by the alternation between an energy-releasing (exergonic) phase and an energy-accumulating (endergonic) phase. Energy for the endergonic phase is supplied through the organic “batteries” represented by ATP molecules, which are ubiquitous in living organisms. ATP is a nucleotide containing three phosphorus atoms; it can release energy to reactions by converting to ADP, which contains one fewer phosphorus atom.

The recharging of ADP to ATP takes place in specialised cellular organelles—mitochondria or chloroplasts in eukaryotes—or across cellular membranes in prokaryotes. These membranes contain electron-conducting structures and act as barriers to protons. Proton accumulation produces an electrochemical potential, known as the proton-motive force. Protons can cross the membrane through specialised molecular structures, including proton pumps. Protons and electrons generally originate from hydrogen within water or organic molecules making up cellular and microbial matter.

An imaginative energy engineer may see in each living system a network of countless nanoscale “fuel cells” that use hydrogen. Operating at ambient temperatures and pressures, these biological energy-conversion mechanisms regenerate the ADP/ATP carriers mentioned above. Hydrogen is supplied by water or relatively simple organic compounds obtained through metabolic pathways involving the breakdown or depolymerisation of more complex molecules—fats, sugars, cellulose and lignin—which both store energy and provide cellular structures.

The functioning of living matter and ecosystems differs in this respect from today's human-made energy systems, which control powerful chemical or nuclear reactions and lose substantial quantities of heat. Such high-temperature reactions, usually beyond the conditions compatible with life, are confined within turbines, furnaces, combustion engines or nuclear reactors. Natural systems do not possess an equivalent fixed, high-flux energy transmission grid converting primary energy into final energy. Complex biological networks, including animal neurons, plant roots and fungal mycelia, primarily convey information and exchange nutrients.

Let us return to how these cellular energy-conversion processes obtain hydrogen.

Life, including terrestrial life, operates in aqueous environments separated from their surroundings by selectively permeable membranes. Molecular hydrogen is only sparingly soluble in water (the original gives an order of magnitude of 50 parts per billion by weight). Hydrogen can be obtained through water photolysis when photons of certain solar wavelengths interact with water molecules. Photosynthesis then generates biomass from mineral matter, an autotrophic or phototrophic process.

Other pathways allow microbes to obtain hydrogen-containing compounds at lower energetic cost. Consuming other microbes or organic matter makes hydrogen bound to carbon available; the original paper suggests an energy cost five to seven times lower than obtaining it from water, along with access to other useful molecules. This process is called heterotrophy: using dead or living organic matter to build new living matter. Heterotrophy also occurs in multicellular organisms, which can be understood as organised biological communities.

Hydrogen can also be released naturally by decomposing organic matter or at interfaces between water and certain minerals. Under oxygen-free conditions, these processes occur in marine sediments, geological strata—particularly volcanic settings including hydrogen-emitting hydrothermal systems at ocean ridges—and soils. This provides another form of autotrophy, chemotrophy, potentially relevant to the origins of life.

We therefore emphasise the key and multifunctional role of carbon in living systems. Carbon compounds form their internal and external structures. In the form of CO_2, carbon is available as a feedstock for autotrophic systems at the base of ecosystems. Between these two roles, carbon-bearing compounds carry hydrogen to the cellular processes that regenerate the biochemical energy carriers sustaining microbial and cellular activity.

The authors argue that, because of finely tuned cellular energy conversion and the aqueous environment that redistributes metabolic heat, the ratio of usable energy to incoming chemical energy can approach unity in some biological processes. Biological energy chains are internal to living systems or located close to where energy is required.

Annex 2 — Glossary and Additional Explanations

Primary, secondary, final and useful energy (source: CEREMA)

Primary energy: Raw energy before conversion, for example unrefined crude oil.

Secondary energy: Energy obtained by converting primary energy before it is transported to the final user, for example refined petroleum products.

Final energy: Energy supplied to the final user before its use, for example fuel oil delivered to a boiler. In certain accounting conventions, final energy from renewable thermal sources is treated as equal to primary energy.

Useful energy: Final energy adjusted by the efficiency of the end-use system; the energy actually made available to the user, for instance heat supplied by a heating system.

For some energy sources, primary and final energy are treated as equivalent. The original examples include solar energy, residential and service-sector wood energy, natural gas where transport losses are neglected, and heating or cooling networks. The source document reproduces a French energy balance for 2021 (data.gouv.fr).

Primary Energy Factor (PEF)

The Primary Energy Factor is the ratio between the primary energy potentially contained in energy resources and the final energy consumed and billed to the user. It estimates how much total energy is needed to provide one kilowatt-hour of final energy, including transformation and transmission losses. It is also used in building thermal regulations and the definition of national energy-saving objectives.

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

A PEMFC converts the chemical energy released by the electrochemical reaction between hydrogen (H_2) and oxygen (O_2) into electrical energy, as opposed to their thermochemical reaction that produces heat. Hydrogen is fed to the anode, where a catalyst separates it into protons and electrons:

$H_2 \rightarrow 2\,H^+ + 2\,e^-$

Oxygen is fed to the cathode. It reacts with protons crossing the polymer electrolyte membrane and with electrons arriving through the external electrical circuit to form water:

$4\,H^+ + 4\,e^- + O_2 \rightarrow 2\,H_2O$

The original document cites Wikipedia and a diagram credited to S. Petrovic et al.

Biomass, Bioenergy, Biofuels and Organic Matter

Biomass denotes the total mass of living organisms, including plants, animals, fungi and microbes. Humans derive food and many materials from biomass. Fossil fuels such as oil, natural gas and coal also originate predominantly from ancient biomass.

Primary biomass is created by primary producers, or autotrophs, which synthesise organic matter from inorganic carbon (notably CO_2), water and other nutrients. Photosynthesis is the best-known pathway, involving sunlight-driven water splitting and atmospheric CO_2 reduction. Primary biomass can also be produced through chemosynthesis, including underground in oxygen-free environments. For example, methanogenic archaea can assimilate carbon using CO_2 reduction and hydrogen produced by chemical reactions or by natural radiolysis of water.

The authors cite approximately 40 GtC per year of marine and 65 GtC per year of terrestrial net photosynthetic production. They point out that the annual global net production of chemosynthetic biomass remains poorly quantified.

Secondary biomass arises from secondary producers, or heterotrophs: herbivores, carnivores, detritivores and decomposers. Both primary and secondary biomass can supply bioenergy, including through fermentation and other microbial decomposition pathways. The source describes fermentation as transforming organic matter and modifying the composition of the residual material; its annual global production is not quantified.

Bioenergy is energy derived from recently produced organic resources such as wood, crops and organic waste, unlike fossil fuels produced from fossilised biomass. Depending on the source or product, it includes forest biomass energy, liquid biofuels, biogas and solid or gaseous biofuels. The original document observes that biomass has been a major renewable primary-energy source globally, particularly in less industrialised countries.

Atmospheric Carbon

Atmospheric carbon encompasses carbon-containing compounds in the atmosphere, principally carbon dioxide (CO_2), cited at approximately 420 ppm by volume in the 2023 text, and methane (CH_4), cited at approximately 1.9 ppm. Other compounds mentioned include carbon monoxide, dimethyl sulfide and chlorofluorocarbons, at lower concentrations. These values are historical values from the source document, not current observations.

Carbon Sinks, CCS and CDR

Natural sinks

Natural carbon sinks include ecosystems such as forests, coastal marshes, hedgerows and phytoplankton, which capture CO_2 through photosynthesis and store carbon in wood, soil and sediments. CO_2 also dissolves in oceans or is consumed in the weathering of surface rocks. The latter are geological processes, as are geological strata containing hydrocarbons or coal.

The original document estimates the natural transfer of carbon from biological to geological sinks at approximately 0.2–0.5 GtC per year, compared with fossil carbon mobilisation of about 10 GtC per year—a difference of approximately 16 to 40 times. The resulting carbon accumulation in the active Earth system must be managed through natural-process enhancement or industrial methods, potentially for decades or centuries after net fossil carbon emissions cease.

Carbon dioxide removal (CDR) and industrial sinks

CDR involves removing atmospheric CO_2 and storing it in natural or engineered sinks, through biological or mineral pathways. Direct air capture (DAC) separates CO_2 from ambient air, where the source document cites a concentration of about 0.04%. At the time of writing, the authors considered this technology immature and energy-intensive. They also discuss emerging underground mineralisation and oceanic dissolution or precipitation techniques.

Carbon capture and storage (CCS)

Geological CO_2 capture and storage begins with point-source effluents containing CO_2. The initial concentration determines much of the capture cost. The authors describe streams ranging from a few percent CO_2—for example, certain post-combustion coal power-plant exhausts—to more than 90% in some pre-combustion or biofuel-production processes. Capture concentrates CO_2 in an industrial process and it is then injected into suitable sealed geological formations, generally at depths exceeding 1,000 metres in the scenario described, after transport by pipeline, ship or tanker truck where required.

When applied to a biomass power plant or bioethanol plant, this is termed bioenergy with carbon capture and storage (BECCS). The original document observes that some such processes yield effluents containing over 40% CO_2, potentially easing capture.

The accompanying EOSYS illustration depicts the terrestrial photosynthetic carbon cycle, including uptake by plants, storage in soil and geological formations, and movement of bicarbonate through soil and aquifers.

Annex 3 — Comments from Pro Educ Consultants (PEC)

Contribution by Alain Nicolas, Bernard Gros and Issa-Diop Ndoye

Regarding the French Energy and Climate Strategy

As noted in the strategy text, the energy transition involves a Schumpeterian process of creative destruction of employment, with a projected positive balance of jobs created over those displaced—approximately 150,000 additional jobs by 2030 in the scenario cited. This will be accompanied by changes in the skills and qualifications required, varying in intensity by sector. Appropriate support and training are therefore necessary, in both initial and continuing education, to create new professional pathways.

This is all the more important in a labour market already characterised by shortages in some occupations—welding, boiler-making and metal fabrication, electronics, and automation—and by the limited attractiveness of technical careers, precisely when the sectors concerned urgently need them.

Attractiveness of employment

The situation calls for better career guidance in initial education, presenting technical qualifications positively at all levels, and wider provision of work-based and alternating training programmes. For affected workers, attractiveness depends on retraining through lifelong learning and on financing arrangements, combined with improved working conditions and opportunities for progression in the sectors and companies concerned.

Attractiveness is also limited by sociocultural factors influencing career choices, including the perception of technical occupations in secondary schools and the gendered division of labour and social roles.

Transition and skills

The transition requires workers, and society at large, to adapt repeatedly to technological and contextual changes. Adaptability depends on acquiring a range of skills that can be combined across different jobs. In addition to occupation-specific expertise, the acquisition of transferable technical skills and soft skills is therefore essential to long-term workforce adaptability and mobility.

Flexible training arrangements

Training programmes should combine a competency-based offer, in which pathways are organised into skill modules, with guarantees of comprehensive training for those who need it and flexibility for people changing careers through personalised pathways.

Each programme should specify the competencies sought, the training content and certification criteria. Assessment should use varied methods, including standard assessments, practical work situations and recognition of prior experience, with explicit validation criteria.

Recognition of prior learning should be mobilised to provide more personalised solutions. Work-study training should be expanded to develop familiarity with business and professional prospects, both in initial and continuing education, alongside the use of France's Personal Training Account (CPF) for career transitions.

Social acceptability

To increase society's acceptance of the transition, scientifically grounded knowledge of energy and ecological transitions should be incorporated into initial education. Solutions and practical experience should be evaluated and presented to the public to address objections that hinder change.

The need for flexibility

Meeting the challenges of the energy transition requires considerable effort from public authorities and businesses in education and training. Otherwise, even technically proven solutions may fail through a shortage of people with the required skills, numbers and motivation—especially where industrial professions suffer from low attractiveness.

The energy transition remains under development, and its content is uncertain and evolving. Skills frameworks should not be frozen. Instead, training resources should be adaptable modules that serve as building blocks for diversified pathways, accommodating different starting points and individual needs, including the French system for recognising prior experience (VAE).

Training must be tailored rather than one-size-fits-all. **Training the trainers should be the priority.**

Notes, Sources and Full-Illustration Register

The following source notes retain the numbering and intent of notes 1–12 in the original French document. References and external links are reproduced for historical completeness.

1. Public consultation on the French Energy and Climate Strategy: https://www.ecologie.gouv.fr/consultation-publique-sur-strategie-francaise-energie-climat

2. The asterisk (*) in the original refers to terms explained in the glossary in Annex 2.

3. In the authors' view, bioenergy is improperly listed as “decarbonised renewable energy” in the SFEC report, a classification that can cause confusion.

4. The 2023 authors estimate current global net photosynthetic biomass production at 110 GtC/year, and fossil-fuel combustion releases at 10 GtC/year. They estimate that between 20 and 30 GtC/year of biomass could produce an equivalent amount of energy to fossil fuels, and suggest that natural forest regeneration, appropriate management of agricultural fallow land and coastal zones might fix an additional 40 GtC/year. They hypothesise that harvesting about half that additional annual biomass production could replace fossil energy.

5. Examples of relevant fuel-cell systems: https://siqens.de/en/methanol-fuel-cell/ and https://powercellgroup.com/maritime-methanol-to-fuel-cell-power-chain/

6. Microbial activity might be stimulated by natural hydrogen flows rising from depth or by electron flows generated by surface renewable-electricity systems, particularly photovoltaic installations.

7. ATP (adenosine triphosphate) is a relatively unstable nucleotide containing three phosphorus atoms. It can supply energy to reactions by converting into ADP, a related molecule with one fewer phosphorus atom.

8. CO_2 means carbon dioxide.

9. Sources to the biological-energy diagrams are provided alongside the original images: Wikipedia, Wikimedia and projetecolo.com.

10. GtC = gigatonne of carbon.

11. ppmv = parts per million by volume; ppbv = parts per billion by volume.

12. Pro Educ Consultants (PEC), a member of ACP Énergies; www.pro-educ-consultants.com.

Illustrated source document — page-by-page figure register

Original page 1: ACP Énergies and EOSYS logos; Enedis energy production–transmission–distribution–consumption illustration; EOSYS local and regional Energy and Climate Plan illustration.

Original page 6: Territorial Energy and Climate Plan concept, with natural areas, dispersed settlements, urban areas and coastal/ocean areas, and carbon flows through natural and engineered sequestration pathways; EOSYS original figure.

Original page 7: Assimilation and dissimilation cycles, including carbon, hydrogen and oxygen cycles (Wikipedia); ATP/ADP cellular energy cycle (Wikimedia).

Original page 8: Glycolysis and the citric acid cycle; cellular electron transport chain (Wikipedia); proton gradients across cell membranes and ATP charging/discharging in organelles.

Original page 9: Photosynthesis in a plant cell and its chloroplasts (source shown on original page: projetecolo.com).

Original page 10: Simplified ecosystem food web showing energy and mineral nutrient flows and thermal energy losses.

Original page 11: Stages of primary, secondary, final and useful energy (CEREMA); France's 2021 energy balance (data.gouv.fr).

Original page 12: Illustration of a proton exchange membrane fuel cell, credited in the original to S. Petrovic et al.

Original page 13: IPCC global carbon-cycle diagrams: oceanic and terrestrial carbon stocks and fluxes and human appropriation of primary production.

Original page 15: EOSYS illustration of the terrestrial photosynthetic carbon cycle and its relation to soil, groundwater and long-term mineral carbon storage.

The original 17-page French publication follows in full, preserving the original layout, figures, graphical legends, logos, footnotes and page references. For diagrams with embedded French labels, the figure register above provides an English reading guide without altering the source image.

Full reference: ACP Énergies and EOSYS (December 2023; second revision, Paris, 8 January 2024), *Stratégie française pour l’énergie et le climat: Avis et proposition de l’association ACP Énergies et de la société EOSYS*, 17 pages. The original carries the notice: “Do not reproduce without authorisation from EOSYS.”

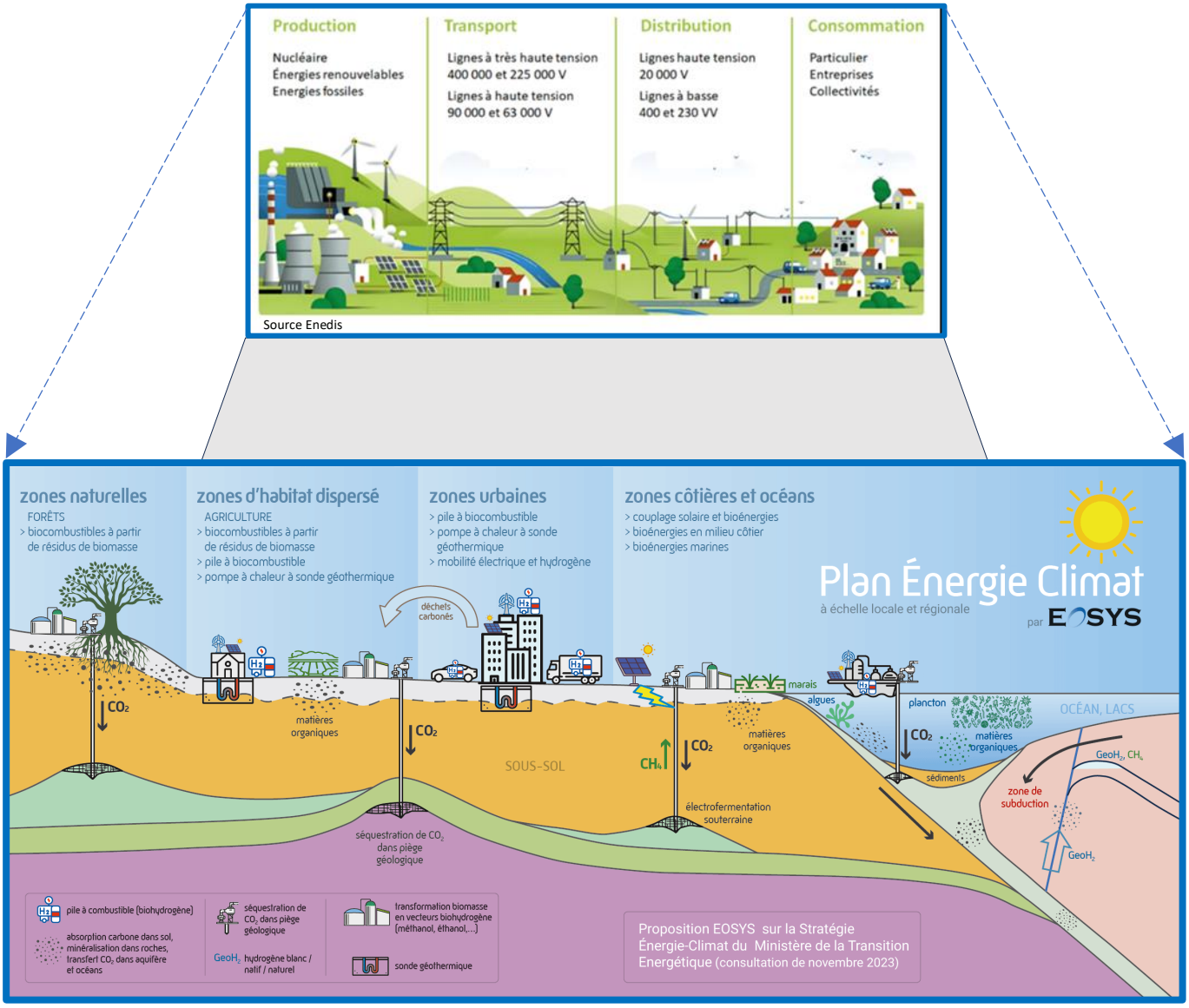
Original Illustrated Publication — French Facsimile

The following 17 pages reproduce the source document in full and preserve all figures, their French graphical labels, bibliographic sources, logos and footnotes. Use the preceding English text as the reading edition.

Stratégie française pour l'énergie et le climat

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

Décembre 2023



Paris, 8 janvier 2024 – mise à jour n°2

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'accroitre le taux de carbone présent dans l'atmosphère et d'organiser nos activités économiques de façon à le faire décroitre 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 fossiles[4]. 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 à30 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 regénèrent 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 sur 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 CO_2. 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 microbes[6] 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://siqens.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

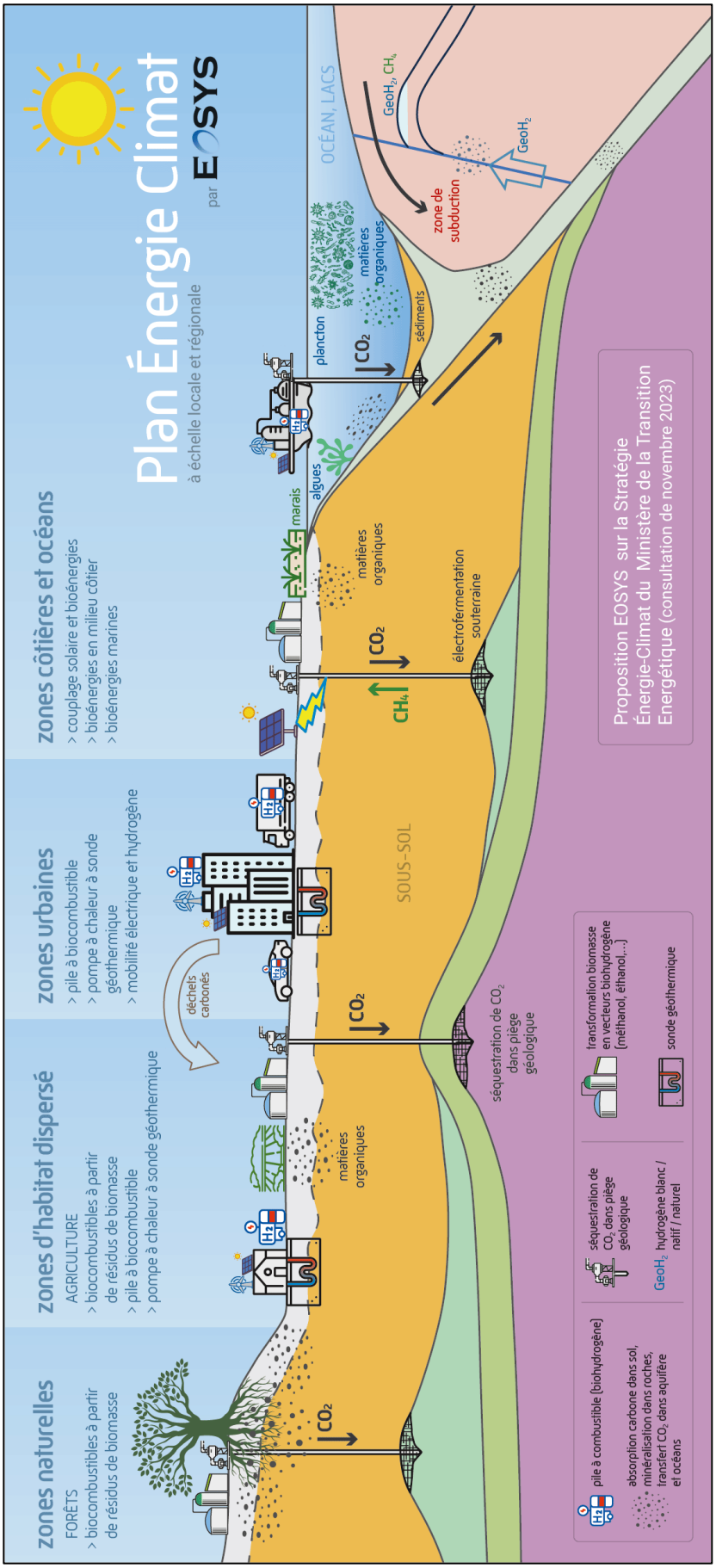
Directeur fondateur de EOSYS

patrick@eosys.fr

Jean-Louis Gaillard et Louis Heuzé

Vice-président et Président de l'association ACP Energies

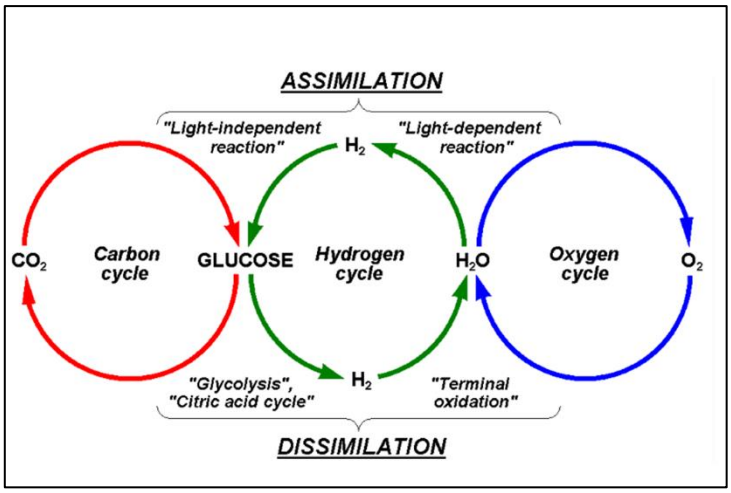
j-louis.gaillard@acp-france.org et louis.heuze@gmail.com


Plan Énergie Climat
à échelle locale et régionale
par EOSYS
zones naturelles
FORÊTS
> biocombustibles à partir de résidus de biomasse
zones d'habitat dispersé
AGRICULTURE
> biocombustibles à partir de résidus de biomasse
> pile à biocombustible
> pompe à chaleur à sonde géothermique
zones urbaines
> pile à biocombustible
> pompe à chaleur à sonde géothermique
> mobilité électrique et hydrogène
zones côtières et océans
> couplage solaire et bioénergies
> bioénergies en milieu côtier
> bioénergies marines
OCÉAN, LACS
SOUS-SOL
CO2
CH4
GeoH2, CH4
GeoH2
zone de subduction
plancton
matières organiques
sédiments
algues
marais
déchets carbonés
électrofermentation souterraine
séquestration de CO2 dans piège géologique
transformation biomasse en vecteurs biohydrogène (méthanol, éthanol,...)
sonde géothermique
pile à combustible (biohydrogène)
absorption carbone dans sol, minéralisation dans roches, transfert CO2 dans aquifère et océans
séquestration de CO2 dans piège géologique
GeoH2 hydrogène blanc / natif / naturel
Proposition EOSYS sur la Stratégie Énergie-Climat du Ministère de la Transition Energétique (consultation de novembre 2023)

ANNEXE 1

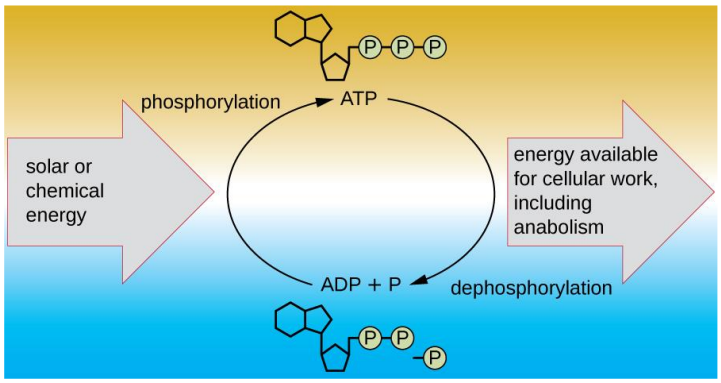
Chaines énergétiques dans les biosystèmes

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 emboitement de cycles métaboliques dont la période varie de la milliseconde à plusieurs mois, voire années.



Source : Wikipedia

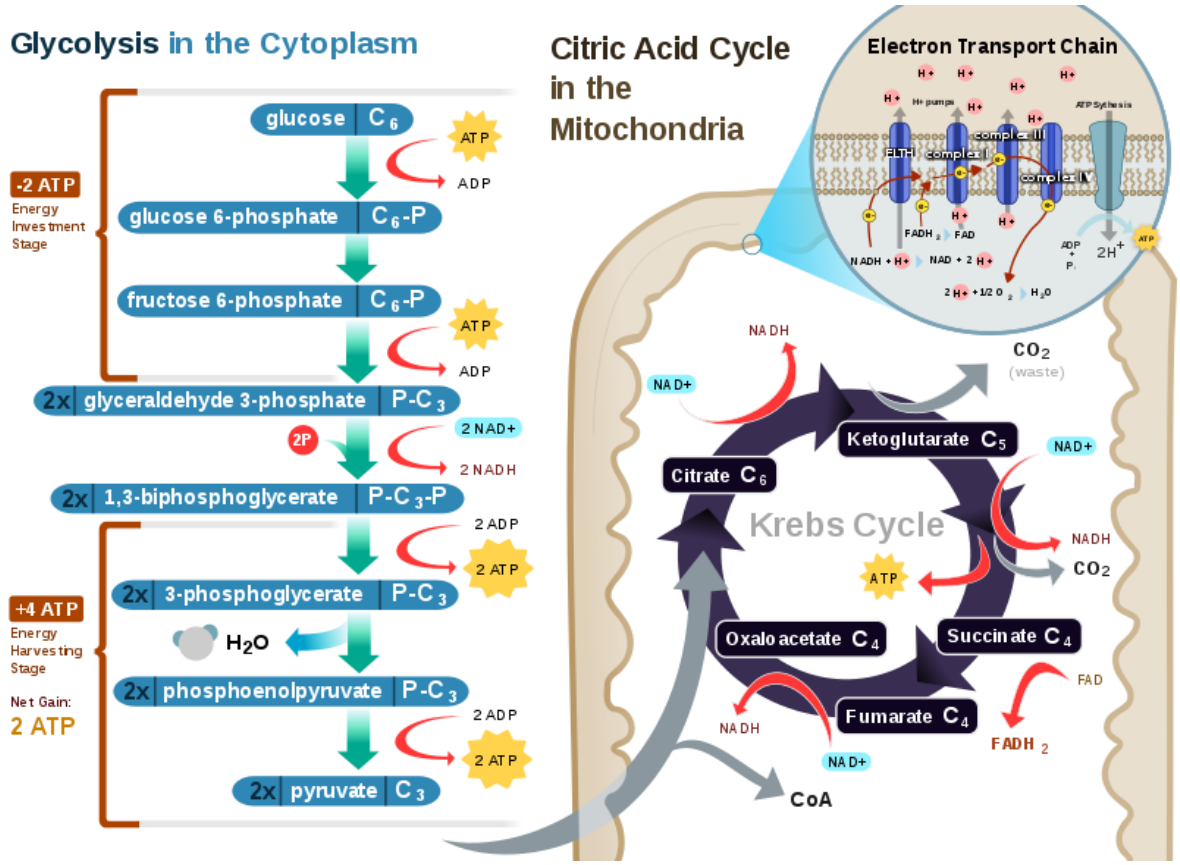
Ces cycles participent aux grands cycles biogéochimiques planétaires, par lesquels les microorganismes ont établi et régulent la composition de la biosphère (océans, sols et formations géologiques de surface et atmosphère) depuis plus 3 milliards d'années.



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'ATP[7], 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.

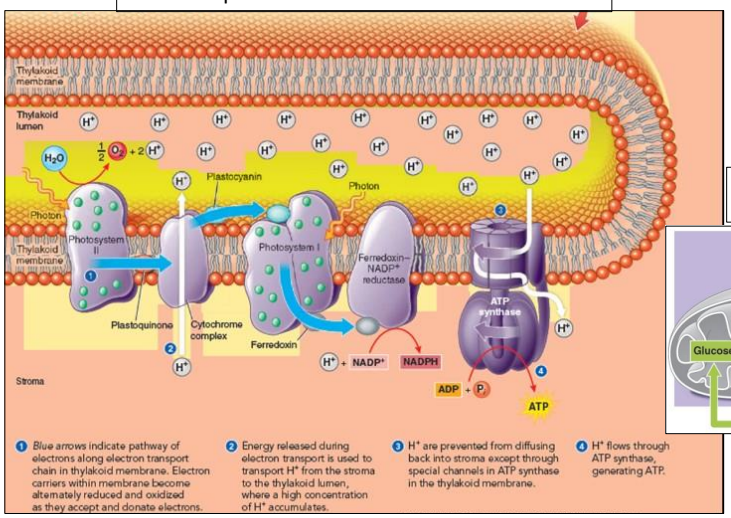


Source : Wikipedia

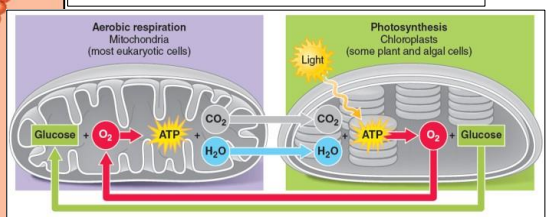
La recharge des molécules ADP en molécules ATP se fait dans des organites spécifiques situées au sein des cellules (mitochondries ou chloroplastes dans le cas des cellules les plus évoluées à noyau dites eucaryotes) ou dans l'espace intermembranaire même des cellules (cas des cellules les plus primitives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

Biosystèmes : une inspiration pour les chaines 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



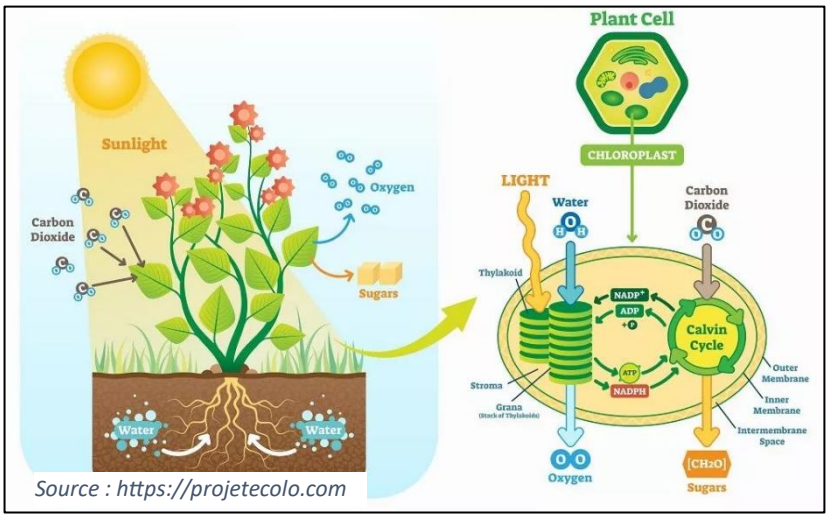
constituent des barrières pour les protons qui s'y accumulent du coté interne, créant un potentiel électrostatique dénommé force « proton-motrice ». Ils ne peuvent la traverser occasionnellement que grâce à l'intervention groupes de molécules spécifiques, par exemple ceux dénommés « pompes à proton ». 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



Source : https://projetecolo.com

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 couteux 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.

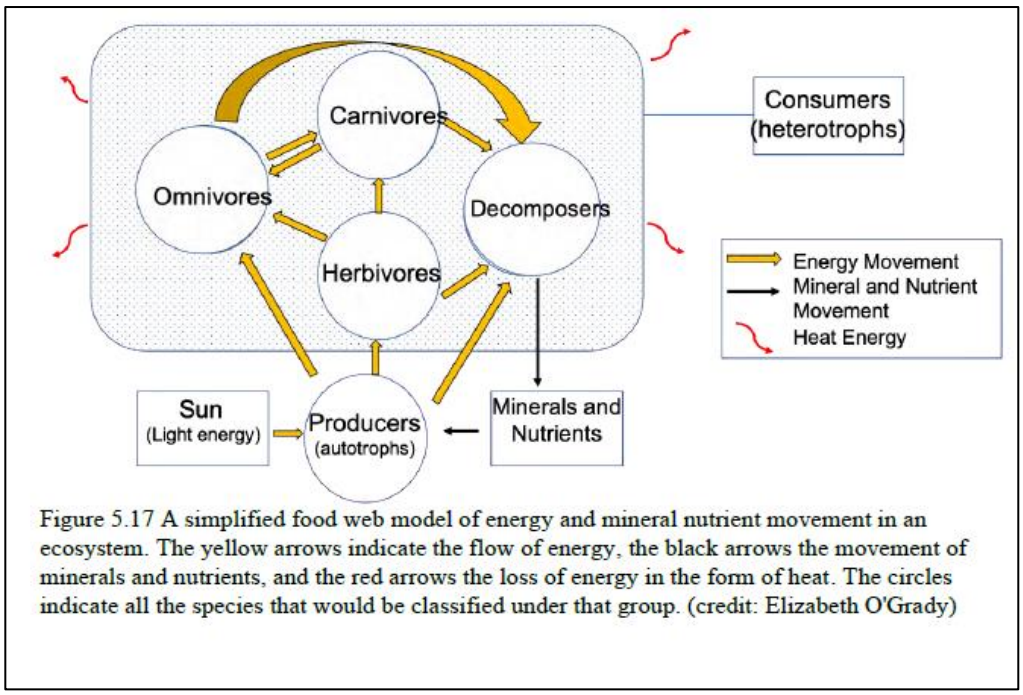


Figure 5.17 A simplified food web model of energy and mineral nutrient movement in an ecosystem. The yellow arrows indicate the flow of energy, the black arrows the movement of minerals and nutrients, and the red arrows the loss of energy in the form of heat. The circles indicate all the species that would be classified under that group. (credit: Elizabeth O'Grady)

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.

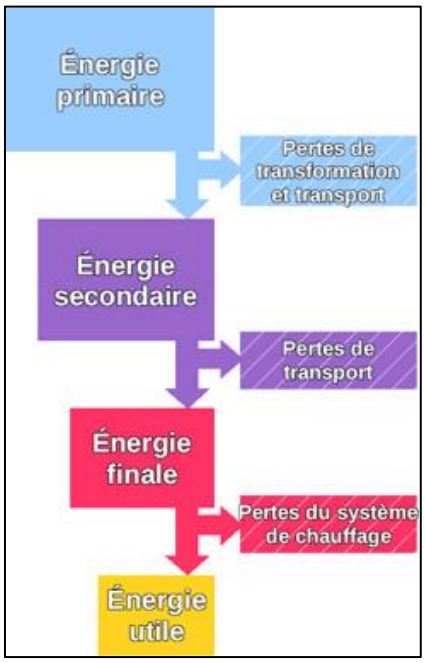
Grâce à ce mode de fonctionnement énergétique très fin au niveau cellulaire et grâce à un milieu ambiant aqueux qui permet la récupération et la distribution de la chaleur dégagée par les réactions cellulaires, le taux de conversion entre l'énergie primaire disponible sous forme chimique et l'énergie 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

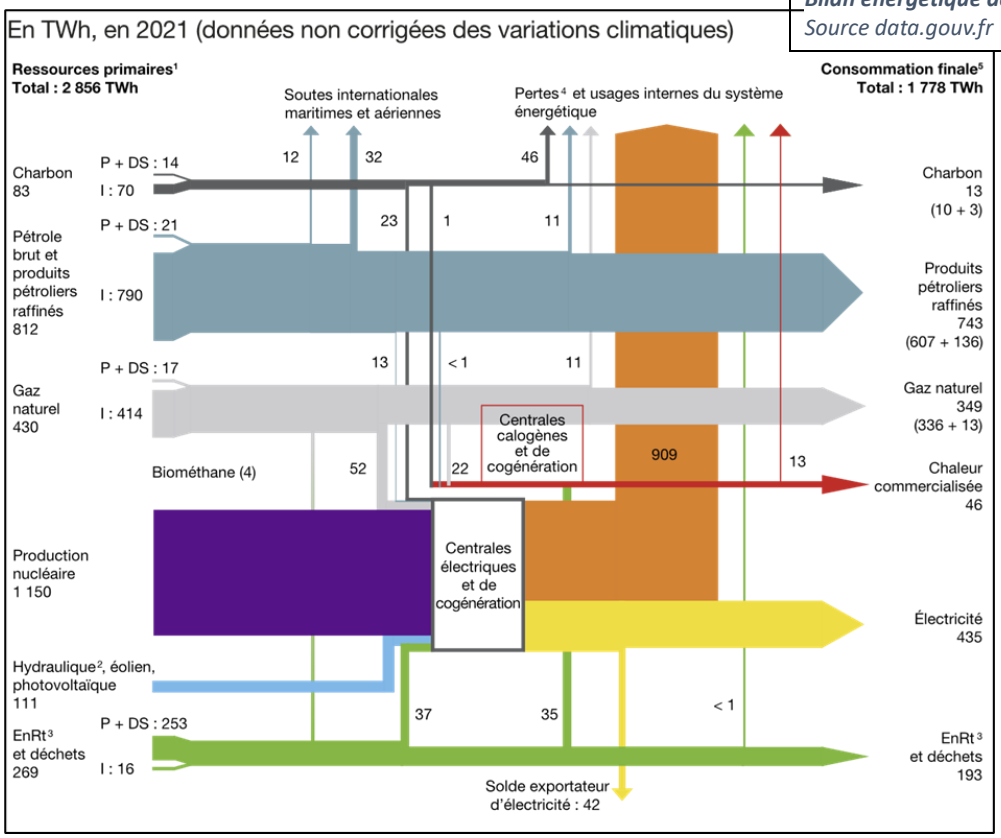
Énergie secondaire : énergie primaire transformée avant son transport à l'utilisateur final. Exemple de source : produits pétroliers raffinés

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.

Bilan énergétique de la France en 2021
Source data.gouv.fr



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.

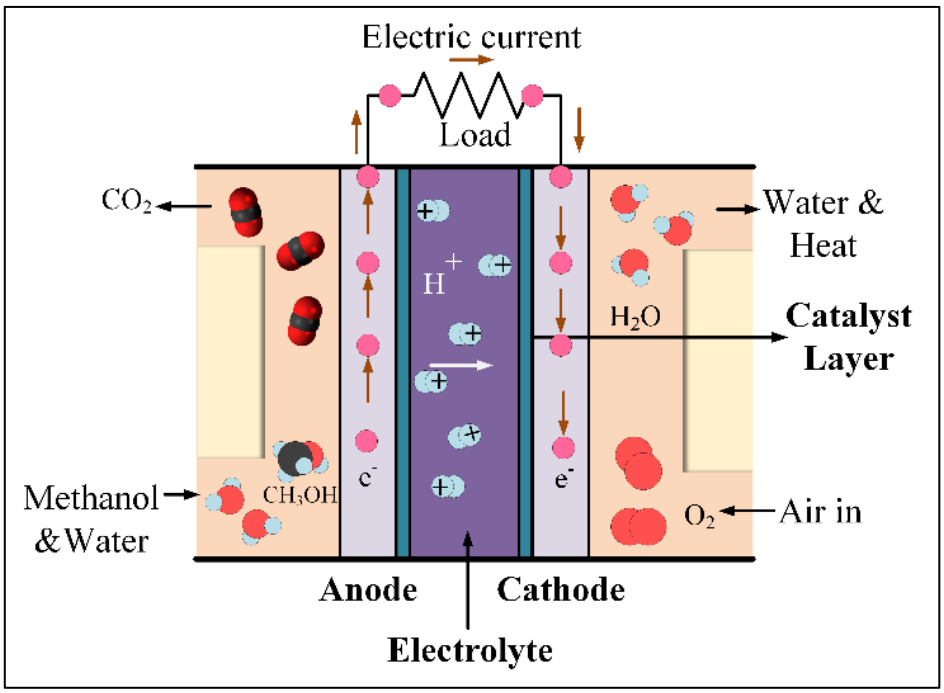
Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) (source Wikipedia)

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 :

$H_2 \longrightarrow 2\ H^+ + 2\ e^-$.

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 :

$4\ H^+ + 4\ e^- + O_2 \longrightarrow 2\ H_2O$



Source : S. Petrovic et al - DOI 10.1109

.

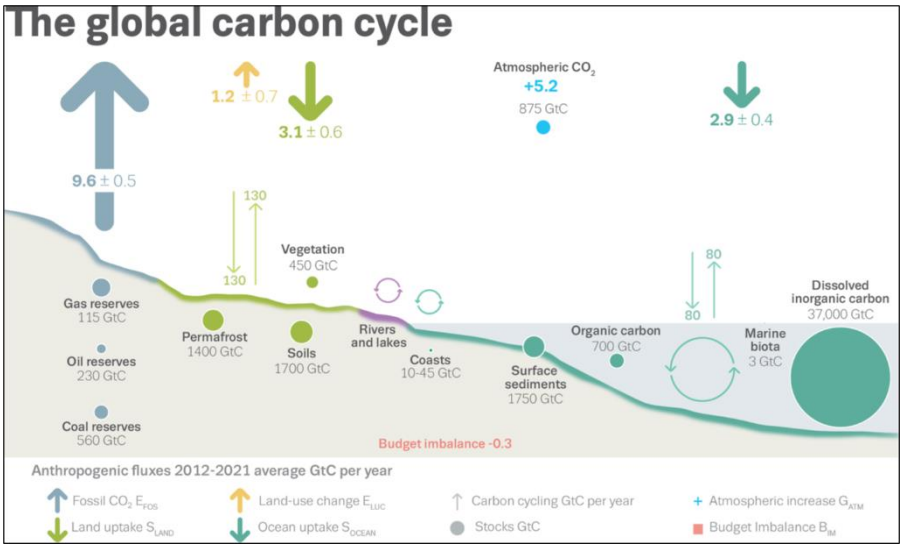
Biomasse, bioénergies, biocombustibles, matière organique

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 (CO_2 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 CO_2 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 CO_2 par de l'hydrogène issu de réactions de réduction chimique ou résultant de la radiolyse de l'eau par la radioactivité naturelle.

Si on connait à peu près le taux de production photosynthétique primaire net (de l'ordre de 40 GtC[10]/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

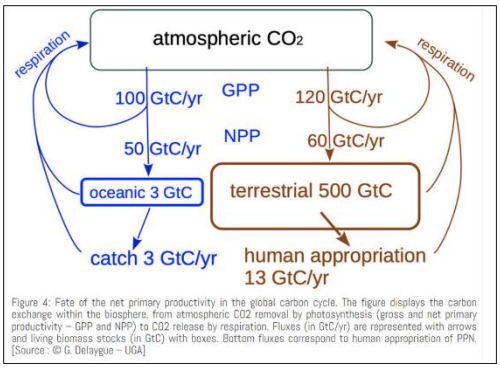


Figure 4: Fate of the net primary productivity in the global carbon cycle. The figure displays the carbon exchange within the biosphere, from atmospheric CO2 removal by photosynthesis (gross and net primary productivity – GPP and NPP) to CO2 release by respiration. Fluxes (in GtC/yr) are represented with arrows and living biomass stocks (in GtC) with boxes. Bottom fluxes correspond to human appropriation of PPN. [Source : © G. Delaygue – UGA]

[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 (CO_2) à 420 ppmv[11](soit 0.042%), puis le méthane (CH_4) à 1.9 ppmv. D'autres composés tels que le monoxyde de carbone (CO) ou le sulfure de diméthyle $(CH_3)_2S$ 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 CO_2 par photosynthèse et le stockent dans le bois, les sols, les sédiments. Ce sont des **puits biologiques**. Du CO_2 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 connait 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

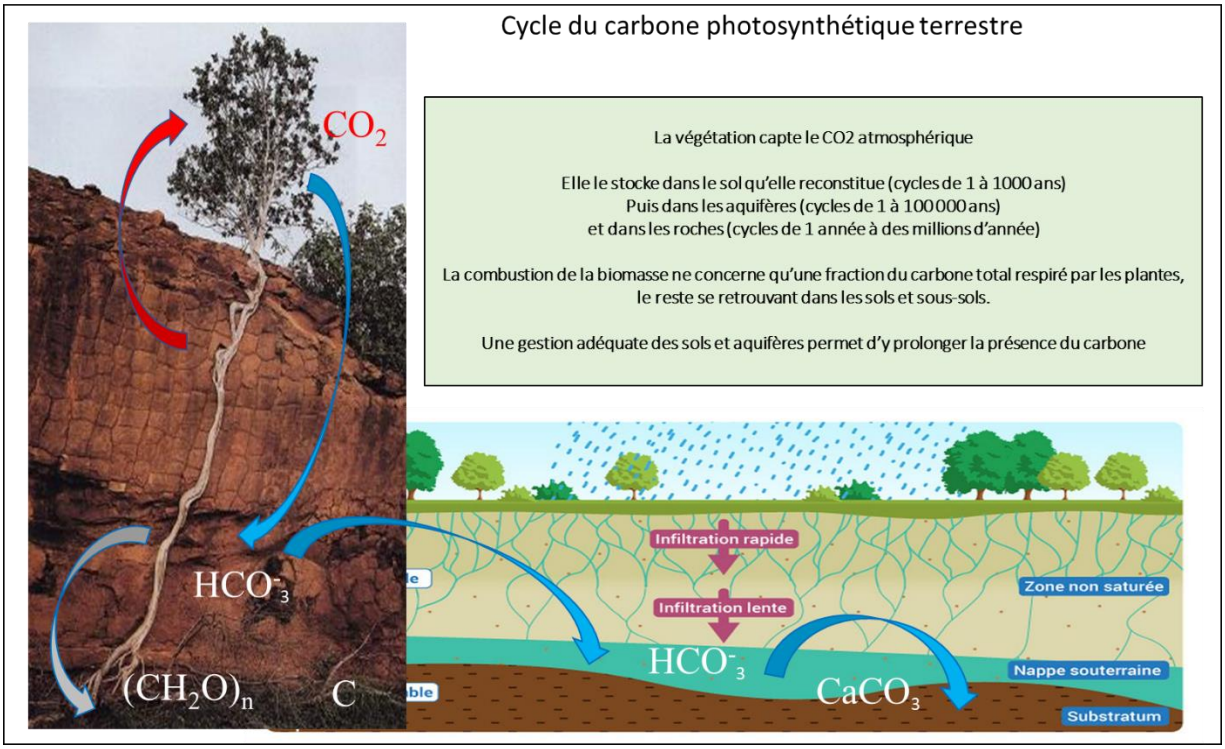
Le **CDR** (« Carbon Dioxide Removal » ou Retrait du dioxide de carbone atmosphérique) **naturel** consiste à développer ces puits naturels, que ce soit par des voies biologiques ou minérales.

Un exemple de **CDR industriel** est le « **Direct Air Capture » (DAC)** qui consiste à capter le CO_2 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 CO_2** (**CCS** pour « Carbon Capture and Sequestration » en anglais) se fait à partir de points source émetteurs d'effluents contenant du CO_2. Leur concentration initiale en CO_2 détermine pour une large part le cout 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 CO_2 par des processus industriels sortant des effluents à 100% de CO_2 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 CO_2.



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.