



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

**Chaire Développement durable - Environnement, Energie et
Société**

Pr Jean Marie Tarascon, titulaire 2010-2011

**TRANSCRIPTION DES
INTERVENTIONS**

Colloque du 6 et 7 juin 2011

*“L’énergie : enjeux socio-économiques
et défis technologiques”*

La chaire reçoit le soutien de TOTAL.

Les comptes rendus du colloque ont été élaborés avec le concours de Junior Consulting-Sciences-Po.



SOMMAIRE

INTRODUCTION

I- Financements et enjeux de la recherche sur les énergies aux USA.....	4
II - Batteries: the Key Enablers to a Carbon-free Economy.....	7
III- Semi-conducteurs nanostructurés pour la production d'énergie solaire.....	9
IV – Photovoltaïque au XXIe siècle : réalisation et défis.....	11
V - Economie et Politique dans le contexte énergétique.....	13
VI – Matériaux pour l'énergie nucléaire : un regard sur le futur.....	16
VII – Biomasse et bio-raffinerie : que pouvons vraiment en attendre ?.....	20
VIII- Stockage du CO2, énergies fossiles et hydrogène : quelles connections ?.....	23
IX - Politique et sécurité énergétique dans le contexte des nouvelles énergies	25
X – Photosynthèse artificielle : des concepts de base aux développements récents.....	29
XI – Technologie pile à combustible : quels seront les gagnants ?.....	33
XII – Véhicules Electriques : l'impact de la batterie sur leur usage.....	36
XIII - 25 de développement durable: Quel Bilan ?.....	39
XIV – La réincarnation des matériaux.....	41
XV - Après les années « tout pétrole ».....	44
Table ronde récapitulative : Quelles réponses face aux défis énergétiques ?.....	47

CONCLUSIONS

INTRODUCTION

Pr. Jean-Marie Tarascon

Merci aux participants et intervenants extérieurs de venir passer deux journées avec nous sur l'énergie. Je m'en vais donner quelques éléments sur l'énergie, sujet tellement important au cœur de nos préoccupations journalières. Nous allons parler dans ce colloque des enjeux socio-économiques de l'énergie. Bientôt, le kW pourrait être la prochaine unité monétaire. Qu'en est-il réellement aujourd'hui ? Ce colloque va tenter d'y répondre et de créer des interactions intéressantes.

Laissez-moi vous donner quelques éléments sur ces problématiques. Tout d'abord le cycle énergétique. L'humain utilisait pendant longtemps la biomasse comme source d'énergie, le CO₂ étant absorbé par les plantes par photosynthèse. Dès le XIII^e siècle, on a commencé à utiliser l'énergie en grandes quantités. Les réserves découvertes ne suivent désormais plus la consommation, et un pic d'énergies fossiles est prévu d'ici 10 ou 15 ans. Il y a également le problème de pollution. En augmentant le CO₂ dans l'atmosphère, on provoque des changements climatiques et c'est le scénario que nous sommes en train de vivre.

Quels sont les challenges se présentant à nous ? Le monde aujourd'hui vit 40% au-dessus de ses moyens. Un changement de paradigme est nécessaire, il va falloir utiliser le présent pour améliorer le futur et non l'inverse.

Le deuxième message est à propos des transports. C'est un challenge mais aussi d'énormes opportunités : les énergies renouvelables participeront à une nouvelle économie verte et durable. La difficulté est de convertir et de stocker l'énergie renouvelable à grande échelle et de façon rentable. Gérer et contrôler l'énergie est le plus grand problème scientifique et technologique de notre planète des 50 années à venir.

Il nécessite une approche mondiale englobant tous les pays et toutes les générations. Il faut alerter les jeunes sur ce formidable challenge que représente la production d'énergie.

Faisons-donc en sorte que ce meeting soit riche en informations et en interactions.

Dr. Jennifer Peron Association CHADOC

CHADOC (Chercheurs associés et doctorants du Collège de France) est une association de professeurs et doctorants. Ce colloque transdisciplinaire confrontera des définitions très différentes de l'énergie données par des chercheurs variés. L'énergie est un concept récent. Il reste de la place à l'imagination pour la produire, la stocker, et l'inscrire dans nos modes de vie. Les modes de communication nouveaux facilitent aujourd'hui la collaboration des acteurs. C'est donc un thème transdisciplinaire et transgénérationnel.

Les nouvelles générations sont sensibilisées très tôt sur nos impacts sur l'environnement. Il y a une prise de conscience et une envie de mieux comprendre et maîtriser ces phénomènes tout en conservant la qualité de vie et en préservant la planète. Les nouvelles formations qui apparaissent sur l'énergie et le développement durable en témoignent, ainsi que la croissance du marché de l'emploi dans ce secteur.

Ce colloque transdisciplinaire, regroupant économistes, philosophes, chimistes et physiciens donne de la légitimité à notre association CHADOC. Nous remercions M. Tarascon pour l'organiser et les intervenants pour leur participation.

I- Financements et enjeux de la recherche sur les énergies aux USA

Dr. Harriet Kung comes from the US Department of Energy (DOE) and has served as the Associate Director of Science for Basic Energy Sciences since June 9, 2008 with an annual budget of more than \$1.2 billion. Dr. Kung received her Ph.D. in Materials Science and Engineering with a minor in Applied and Engineering Physics from Cornell University. She will tell us about financing and research issues in the US.

It is a pleasure and an honor to be here today.

I particularly like the title of the conference: it is true that these issues are intertwined with socio-economical issues and national policies.

My first slide presents the energy patterns of usage in the United States. My presentation will mainly focus on US centric data but this mirrors many of the developing countries.

The American example of the past four centuries shows an evolution in energy usage with wood taken over by coal and natural gas. Fossil energies are centric, with renewable reserves lately taking a more important role.

There are a number of key inventions to notice; the Watt steam engine in 1782 and the implementation of the railway system. This was later replaced by diesel engines that transformed transport usage and increased reliance on waterways for commodities and people.

The 1870 incandescent lamp and the 1935 electrification of rural America. The 1870 four-stroke combustion engine and the interstate highway system of 1956 that changed the whole infrastructure. These inventions and infrastructure investments are the core of the energy usage pattern that we see today, largely based on 19th century discoveries and 20th century investments.

In order to understand the challenges and opportunities, let us analyze how we use energies and where they come from. In the United States, one fourth of the energy is imported from outside. We can identify many different sources: solar, nuclear, hydro, wind, geothermal, natural gas, coal are used for electricity production. The biomass and petroleum goes for transportation.

The US consumption is largely fossil based, and carries a key, yet alarming message: more than 50 percent of the energy is wasted. The comparison with the 1950s is also alarming: the population was half of what it is today and the “wasted” was almost equal to the “used”. Moreover, the country was self-sufficient with almost no petroleum imports. We were more efficient before: today the waste comes from electricity, even in generating it, and petroleum.

Energy efficiency is crucial: out of 100 units of energy going to a household, only 2 units are actually used in an incandescent bulb after the production and transportation process. 98 percent of the energy is lost with 19th century inventions still dominating our modern world. We cannot look at energy without looking at policy and infrastructure: the Energy Independence and Security Act of 2007 require energy efficient lightbulbs. Science, technological and socio-economical policies are all intertwined into a complex energy system.

World energy: how much do we need?

In the next two or three decades the consumption will double, and triple by 2100 (IPCC). Those are unsustainable projections. It is not surprising to see that non-OECD countries will be the main drivers in energy consumption and environmental impact.

How many years of fossil fuels can we count on?

The best literature comes from BP, with a crucial interest in knowing what the resources are. The Reserves versus Production ratio, along with current consumption allows 50 years for oil, slightly better for gas, and goes to the end of the century for coal. The resources are not infinite.

Level of consumption: dislocation between fossil fuel supply and demand

The United States alone consume 20 million barrels a day. The past decade saw an increase in unconventional natural gas production, a difficult deep energy, very hard to get. Controversies appeared in the extraction mode: the chemical injections in the ground or water are very aggressive for the environment and poses the question of economic benefits versus nature.

Renewable energies

In terms of electricity coming from nuclear energy, the world will not change a lot, except China. France leads in nuclear energy supply with 80 percent (around 20 percent for the US, like the United Kingdom).

The US nuclear industry: more talks than actions. It is characterized by very high costs and license reviews are needed to build a plant (no permit was issued since 1979).

The country has to make sure that the existing reactors will be able to sustain operations in the next decades and to ensure their safety.

There is a lot of buzz about solar, biomass or thermal. But they still represent very small figures: solar-photovoltaic only represents one percent of total supply. The costs and life span will determine how fast the new resources will be adopted by the market. But in the US the demand is not where the production is (the production is in the center, the demand is on both coasts). You have to transmit to where the people are, to have very good transmission lines. But renewable resources are intermittent, available in complex locations and storage is another problem.

Energy and environment

There is a heavy reliance on fossil fuels. However, climate change is interwoven in modern press and popular culture. The past decade has been of tremendous progress in understanding fossil-fuels impact in the earth and greenhouse effect. Although many are trying to model the energy balance of the world as a whole, you don't see how solar energy is absorbed (70% to 75%). This energy warms up the planet and reflects upward infrared radiation. This is the source of climate change: how energy can be transmitted upward. Today, we are closing the atmospheric window that allows the planet to breath. Moreover, not only we are losing polar regions but the rate of ice melting is accelerating. Satellites Tom and Jerry are observing how fast ice is melting at a micro level in Greenland and Antarctica, circling Earth 16 times a day. This is a very direct and unambiguous evidence of CO2 impact.

What can we do?

As scientists we look for inspirations. The twentieth century was a century of science: science transformed our ways of life. We must think of ways on how science could contribute to a global challenge, not only a US challenge.

The US Department of Energy (DOE): how do we tackle the issue?

Most of our budget goes to security and defense programs, but my department runs a \$1.6 billion budget. We try to link research to apply research. Our current secretary Dr. Steven Chu is the only first cabinet level that has a Nobel price (Physics 97).

He is passionate about addressing energy challenges. He even appeared in Rolling Stone Magazine, taking the message to the society and general public to alarm, but also to show opportunities and socio-economical competitiveness.

Strategic planning processes

It started out by conducting a workshop, setting priorities from basic research view: where we go and how we address the challenges. Our conclusion is that current efforts will be too little and too late. We must understand the magnitude and the urgency and the types of collaboration across the globe that would be needed to address the issues.

Our key conclusions are: we need a transformation and transition from how we use energy today as a commodity. In the future, we need to treat energy as a functionality: we have limited resources; we have to renew them and understand how to convert energies in useful work. We need high tech materials created by chemistry.

There are exciting opportunities. We created the Energy Frontier Research Centers formed by "interdisciplinary dream teams" researching on energy innovations with increased funding. Energy storage will be key to address the challenges we are facing. We try to connect basic research to applied research: new ways of funding research, looking for the world to collaborate. We are supporting energy innovation hubs, researching on chemical fuel obtained from sunlight, or battery stocking.

Energy diagram

We have to engage in fuel switching, better transmission of energy, improve energy efficiency and decrease the wastes. To tackle the challenges, we need to expand renewables. Fossil-fuels will be with us for a couple of decades only. There are some opportunities: how do we use organic resources, how do we improve efficiency in electricity.



Encourage all of us to take the “Be the leaf” challenge. Mother nature has taken billions of years to evolve. We need to do better than the leaf model for a sustainable future. I hope this forum to be exciting in order to understand and limit boundaries.

Questions

1. Being old I remember 1975: there was the first oil crash and big planning in the US for making new cars with new items. But nothing happened. The kind of map I have seen now were the same by the time: I wonder at which point are we doing something new, are we on the same track?

“Excellent point! We hope that we will learn from our lessons. After oil crisis, people have soon forgotten the urgency and the limitations. That is why the secretary is taking the message to the public: we have limited time. People support is key: it has to be done with new models and ways. We have a better chance. In the 1970s we could not have achieved the electrification of vehicles we have today. The same is true for nanotechnologies or biofuels, we have to go across disciplinary boundaries. I am the ultimate optimist and I hope we have learned our lessons.”

2. First, thank you for your very stimulating presentation. I agree: we know the urgency of the problem and I know the US is doing a big effort, but I am not sure we are all doing the same. To tackle the problem we need to change our habits on investment: the 20th century was a biological one, we had improvements on health, we invested a lot in these disciplines. But we are not making enough efforts on chemistry and physics. We need to move our investment.

“It is a real problem. The President has made a commitment to double science budgets, but there is a financial pressure. The problem will not go away until we really increase investment, addressing cross discipline and cross countries boundaries. Next generation will have to join. There is no unique generation. It is a great challenge and we have lost much time to make progress.”

II - Batteries: the Key Enablers to a Carbon-free Economy

Pr. Donald Sadoway is Professor of Materials Chemistry, Department of Materials Science & Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

The energy storage landscape

I started battery research at MIT in the 90's. At the time it seemed old-fashioned but I believe it is a key enabler in going forward. I would like to start by dismissing several misconceptions about battery science, misconceptions about batteries.

First of all, it is not true that not much has changed. There has been radical innovation in the field during the last couple of years. Electrical energy storage has passed from lead acid to lithium ion, from 35 Wh/kg to 12'000 Wh/kg. Secondly, there is no Moore's Law on batteries, the transistor count does not double every 2 years. It is also true that all microelectronics are silicon-based. Finally, all new batteries are based on entirely new chemistries. Each new battery now includes radical innovation and new material.

There is no « best battery ». There are as many different approaches to battery conception as there are applications for batteries. For instance, one shouldn't have to pay for attributes he doesn't need. The cell phone, for example, needs to be « idiot-proof », as the battery needs to be manipulated easily and operates close to the face. A car, on the other hand, could not use the same kind of battery. It needs first and foremost to be crash-worthy and the battery needs to cope perfectly with movement. In all cases, safety is a premium as everyone will blame the producer, especially in the US.

Service temperature is another example of the diversity of batteries. Some batteries like the cell-phone's ones cannot reach high temperatures for obvious human contact safety reasons. Stationary batteries, on the other hand, offer more freedom in the choice of chemistry but demand a very low price point. The price point is determined by the severity of service conditions. A laptop computer, for instance, has a very high price-point at \$2,000 - \$3,000 / kWh. Automobile traction would be around \$250 / kWh and stationary batteries can only reach about \$100 / kWh. In the end, it has all to do with economics. An innovation needs to be market-supported otherwise it will never be viable.

The problem is that the market never gets the right price in the case of energy because fossil fuels are still so cheap. To compete with cheap fossil fuels, we need technology to take energy from the sun even when it's not shining. We can't compromise with our constant need for energy: even if an energy source is free, it is worth nothing if it's unreliable and/or discontinuous.

Storage is the key enabler

Next, I will insist on storage: it is really the key enabler. The main obstruction to the deployment of renewables is intermittency. If we have no source of storage, then our energy is only partly green because we would need to use gas during the gaps in supply. Storage is also crucial for load levelling, load following, frequency regulation and off-peak capture : the need today is for a colossal battery. For grid-level storage, it is a battle between battery versus combustion and we really need to learn how to think differently. Another example on bad storage is today's Li-ion batteries which fail badly. This is an example when the whole is less than the sum of its parts: again the need is for a colossal battery and not a sum of smaller ones.

Finally, it's crucial to confine chemistry to earth-abundant elements. We have to be very careful about assumptions on the price of innovation: if we build lots of a technology and then platinum price goes up, it is not scalable. As the popular saying goes « to make it dirt-cheap, make it out of dirt ».

Innovation and energy storage

To know how to build a colossal and cheap battery, you need to ask yourself the right question. Look at the economy of scale in modern electro metallurgy, for instance aluminium smelter. You know the battery does not enjoy high current. In that case, let's start with a procedure that enjoys high current and try to make it into a battery. Why not adopt an electro-metallurgical approach for stationary storage applications? This pushes us to think beyond lithium for automotive traction.

Most compounds consist of a metal and a non-metal. The liquid-metal battery (reversible ambipolar electrolysis) can be made with molten magnesium, electrolyte and molten antimony. The necessity here is to make a huge battery; there is no use once again in making tons of small ones and putting them together. This battery has the other advantage to operate at an elevated temperature but the exterior remains cold.

Attributes of all-liquid battery

All-liquid construction for batteries eliminates any reliance on solid-state diffusion and it provides a long service life. Furthermore, liquid-liquid interfaces are kinetically the fastest in all of electrochemistry and they have a low activation over-voltage. Finally, an all-liquid configuration is self-assembling and expected to be scalable at low cost. Cost scalability is probably the most important attribute of the innovation. This is precisely why lithium-ion batteries have no role in our marketplace.

Another very cheap energy source is pumped hydro-power. The problem is nobody wants dams built anymore on the grounds of aesthetics. Technology and innovation have to be adapted to the society and economy in which we live in to become marketable and make a change. Some technologies have socio-economical implications that prevent them from being built. The all-liquid battery is, I believe, one of those innovations. The capital cost of the liquid metal battery would have to be less than \$500 / kWh which is lower than the NaS batteries, Pb-acid batteries, flow batteries, Li-ion batteries and flywheels.

Opportunities for basic science

Basic science still has a lot to do in this field. With a spotty database, we still lack widespread commercial use. The theory is also not ready to predict the properties of liquid metals and alloys: these properties must be measured. Also, EMF data in molten salts require verification with candidate metal couples we need to trust...but verify.

The laboratory-scale test cell is a 20 Ahr cell. The 30 cm by 17 cm cell is designed to be eventually self-heating. The liquid components are in a steel container, in addition there are heaters, a cooling line, a spacer, and added insulation around the cell. The total input is 934.6W. The output in the cooling lines is 719W and in the convective it is 146.5W for a total output of 865.5W.

In summary

We have proven that liquid metal battery works. More than 200 cells were tested as well as much chemistry of alloys and salts. The capacity fade is less than 0.3% per cycle in 1 Ah cells. The material costs less than \$80/kWh. Furthermore, there is an accelerating scale-up to a self-heating cell.

The Liquid Metal Battery Corporation plans to commercialize liquid metal battery technology invented at MIT for grid-scale energy storage. Today, the people's motivation is to want to drive a car without the need for oil. This would bring reduced dependence on imported petroleum, stabilizing fuel cost and national security while reducing greenhouse gas emissions and improving air quality.

All we're missing is a heavy-duty battery at a low cost and capable of driving for a long-enough range. Our aim is to go to the 250 mile range on a battery. Volta is the Italian professor who gave birth to electrochemistry. In our wildest dream, if we could stabilise chromium and break the one-electron barrier, we could reach the 700 mile driving range. We can do this, but we would need to invent solid polymer batteries.

The supervalent battery would likely replace Li-ion technology which still remains far too costly. The system costs are unlikely to drop below \$500/kWh though and we need to start searching for redox couples based upon ions of valence superior to 1, for instance Mg^{2+} , Al^{3+} , or Fe^{3+} , derived from earth abundant elements and available domestically.

Today, we have a commitment to finish the job. The stake is too high to miss an opportunity like this one. Our MIT Liquid Metal Battery Team is made up of students from around the world. Our biggest sponsors are TOTAL and ARPA-E, the Advanced Research Project Agency of the US government, sponsoring us in proportion to their important budget.

We need to remember that one size does not fit all, there are different application calls for different power sources. We also need to know big changes are under way: materials scientists are invigorating the field and computational materials science is accelerating the rate of discovery if we make the investment. The investment has to be made shortly.

I would like to end with a quote from President John F. Kennedy at Rice University on September 12, 1962 : « *We choose to go to the moon in this decade and do the other things, not because they are easy, but because they are hard, because that goal will serve to organize and measure the best of our energies and skills, because that challenge is one that we are willing to accept, one we are unwilling to postpone, and one we intend to win, and the others, too.* »



Questions:

1. What would be the energy efficiency of liquid metal battery?

“About 65 to 70%. There is a loss of 15% to keep the battery at temperature.”

2. En matière de véhicules, on peut récupérer énormément d'énergie au freinage. Qu'en pensez-vous?

“The liquid battery is made for stationary storage, not transportation, because liquid could be mixed. But in the future, perhaps solid molecules could be added to make it like a paste. Right now, we are focused on stationary though. For cars, a capacitor could take the quick charge provoked by braking. We could use the battery for gentler driving because it doesn't stand current very well.”

3. There are many different storage options to research today. Do you think we can make money off your technology in the short-term ?

“It's too early to pick winners and losers. I encourage all forms of experimentation, including chemical storage. I fully disclose my bias regarding battery technology. I'm not sure we can make money in the short-term... but if we don't produce technology that's not competitive with carbon fuel and not depending on subsidies, it's pointless. We need to play with these rules.”

III- Semi-conducteurs nanostructurés pour la production d'énergie solaire

***Peidong Yang** works on materials chemistry and inorganic chemistry at University of California, Berkeley. He is ranked number 1 over the top 100 materials scientists of the decade. Today, he is going to present his work on nano-structured semiconductors for solar-energy production.*

Thank you very much for inviting me today. I would like to discuss the artificial photosynthesis technology and put the process in a historical perspective. In 2008, the total worldwide power consumption was 15 terawatts, with 80 to 90 percent derived from the combustion of fossil fuels, provoking global warming and CO2 emissions. Currently, a very low percentage of renewable energy is part of the worldwide energy portfolio. Available renewable energy sources include biomass, wind, hydroelectric, geothermal and solar, solar representing over 50 percent of the total available power.

Renewable energies: how can we use solar energy?

The total solar energy that hits the earth is 165 000 terawatts, more than 10 times our annual consumption. This energy is renewable and sustainable. It has been a long-time goal to harness solar power: in 1931, Thomas Edison already said: “I'd put my money on the sun and solar energy. What a source of power! I hope we don't have to wait until oil and coal run out before we tackle that”.

The first idea was the solar panel, coming from silicon technology. However, in order to penetrate the market, there are lots of issues to solve in terms of efficiency, costs and storage as well as distribution issues and provision at night. Another new and interesting way to think about solar energy is the conversion of sunlight into liquid, harvesting solar energy to make it into fuel. However, this brings the issue of electric distribution, conversion of solar energy into chemical one, for day and night use and application to cars or jets.

The carbon cycle of the Earth proves the need today to find a carbon neutral solution for energy. Starting with CO2 and water, we try to reverse the cycle in order to create combustibles (like Hydrogen, Methanol, Ethanol or Gasoline) using artificial photosynthesis.

Unfortunately, uphill reactions are harder. The question is how to drive solar energy into chemical usable form, converting CO2 and water into methanol.

We need to know how to drive these reactions so we can use and store an energy form. This is the mission for the JCAP hub (Joint Center for Artificial Photosynthesis) with a 10 year-goal: to convert sunlight into high efficiency and low cost energy, using earth-abundant elements that, with no wires, robustly produce fuel from the sun, 10 times more efficiently than current crops. In order to include this in the market, we have to make this process indeed much shorter and ten times more efficient than in happens in nature.

The question of artificial photosynthesis (APS) is not new. It goes back to Melvin Calvin, chemistry Nobel Prize in 1961. Calvin said "It is time to build an actual artificial photosynthetic system, to learn what works and what doesn't work, and thereby set the stage for making it work better. » Even President Obama congratulated current efforts in the field in January 2011: "...they're developing a way to turn sunlight and water into fuel for our cars..."

What happened in the past three decades, since we discovered the technology?

Why haven't we found anything yet? We have huge developments to make in the field of nano-science. It's time to tackle the challenges and to understand why it is so difficult. The first and crucial step is light harvesting, to generate charges to be extracted by the solar panel. It requires the invention of new photoactive materials that accomplish the combined tasks of light harvesting, charge separation, and compartmentalized chemical transformations. To store it as a chemical form, you need to drive chemical reactions in two different steps.

To harvest, you start with a semi-conductor, generating electrons. You need to drive uphill reactions with chemicals to get combustible, with one part H₂, one part O₂. However, what do we need to drive the reactions? During the half reactions, energy will be wasted. Therefore there necessarily has to be the correct conductive band edge and valence band edge. The conduction band edge has to be above the water oxidation potential and will generate H₂. The valence band edge has to be below the water oxidation potential and will generate O₂.

By using UV light you can drive the water spreading, but only the UV part will be able to drive the reaction, the rest will be wasted. Furthermore, the efficiency will be low.

Because of fabrication processes, some devices work very well but are very expensive as there is a light absorption issue. Also, many semi-conductors are not stable. The alloy semi-conductor, on the other hand, can utilize a large amount of light in the UV region.

How can we make it better: learning from nature

The process is double with a two photon system. We can borrow from nature, building a semi conductive device generating electrons. Here is an example of a N-type semiconductor in a liquid environment. Here is another example of Solar water splitting with a single bandgap light absorber. In the late seventies, a professor proposed photochemical diodes. Photochemical diodes have a dual band gap concept combining two semiconductors in order to capture visible light. With a 2-photon system, the intensity can go up very high.

The photocathode is used for instance in the Silicon Nanowire Array, which is very black so it attracts the sun well. The Si wire array as a photocathode has a very high energy conversion efficiency. Typically people have been studying the oxyde. However, the output is very limited compared to silicon for example. In the case of photocurrent from the anode materials, if you examine all the collection of semiconductors, you can see it has a problem with instability and quick oxidation.

That's why new semi-conductors are being developed (Single crystalline InGaN Nanowires for solar water splitting), that are now stable. We can couple them with a silicon shell to provide an even better conductor. It's something we really need to continue to develop.

Large scale production of nanostructure: copying the leaf structure

The idea of an artificial leaf made of nanowire bilayer paper is relatively new. It looks like a sheet of paper, in the true form of a leaf. It is made of 2 layers of semiconductor : cathode and anode. The reason for nanowire is a high surface area and a high chargeable quality. The top part provokes water oxidation and the bottom part reduction. The anode material is 2 inches in size and looks fairly like a potato chip.

Basically, the artificial leaf has the following attributes : large scale solution synthesis/processing, casting and printing, fully integrated photoanodes and photocathodes, and porous network for asymmetric decoration of oxidation/reduction catalysts.

Today, we already have electro microscope images of these materials. When you immerse the 2-inch disc, the efficiency is very high. Yet we are still trying to search for the best anode material.

Solar to fuel conversion: second step

This process requires a catalyst. This is the reason why we want high surface area with high density of catalyst (how fast can we drive these individual reactions). The molecular catalysts are used for water oxydation. To have proper efficiency, they have to have two half-reactions, need good catalysts. How fast they can drive these reactions? We set a benchmark to identify how fast the catalyst can work but we need better catalysts than we now have. The questions are about how to match the solar flux activity. Developing better catalysts will definitely be a huge challenge.

To supply 15 terrawatts from renewable hydrogen, will we have enough water ? Even if the water is not recycled, the CO₂ in the water can be recycled so water is not really a concern. Another question is how to turn structures from nano scales to macro scales. There is in fact the need to turn to larger scales to set up service for society. I feel it is necessary we need to come up with these technologies in the next generation.

Questions:

1. I was a chemist, working on Honda experiments. For splitting water we need more than 1.23 eV. Usually for Titania, the bandgap is 3.1 eV. The most part of this energy is lost by a band curvature at the vicinity of the occide electrolite. Is it possible to decrease curvature? It is what you call catalyser?

« We need to have a more narrow band gap. Pushing the valence band up, use more visible light, waste less. The smaller band-gap does not work because the band curvature does not allow to split water »

IV – Photovoltaïque au XXIe siècle : réalisation et défis

Jean-François Guillemoles, received his master degree (1990) and his PhD (1994) in material science from the university Pierre & Marie Curie (UPMC, Paris) and became permanent staff member of CNRS, with a position in the electrochemistry Lab of ENSCP (Paris). On the research side, Dr Guillemoles co-authored more than 90 peer reviewed papers in international journals and more than 70 proceedings.

My topic is photovoltaics, it's a big topic. We need a lot of energy, we know that. Actually our needs will be increasing. The world is power hungry: it uses about 2 kW per person on average. In France this number reaches 5 kW and in the US 11 kW. According to the AIE in 2008, the world's primary energy consumption is 15 TW.

We need available, safe, secure, clean, affordable energy today. That will define what is sustainable. Solar energy is safe because the fusion is 150 million km away. It's abundant, with 170 000 TW, it's secure because it is independent from geopolitics and it's clean.

There are different converters in solar energy. You can directly make heat and mechanically use it to with boiling water and transform it into electricity. A more direct way to achieve this is photovoltaics. It would be like harnessing fusion! The problem is cost. If we compare it to renewable energies, photovoltaic is one of the most expensive. It's quite far at the moment from the bulk of electricity. Actually, it only represents 0.06% of all electrical production.

However, it is available in large amounts almost everywhere and has a good ratio of energy per square meter compared to other sources. The amount is largely enough for human usage and consumption. Furthermore, lots of progress has been made recently which has led to a drop in prices. It's actually the only source of renewable energy where cost is steadily decreasing. We may actually soon see some crossover with other sources. In Germany, for instance, it's becoming very close to the energy retail price.

At the moment, 1.5 billion people have no electricity access. The global electrification rate is only 75% and drops to 60% in rural areas.

Solar energy is almost available everywhere. We see on a map that Africa concentrates most of it, but no uninhabited regions should stay away.

Achievements of photovoltaics

I am happy to mention that PV was discovered by Edmond Becquerel in 1839. However, it did not lead to any specific application. He worked specifically on the effect of light. But PV application really took off in 1954 and in the 1970s. After successful space applications, the interest for solar energy came back in the context of the oil crisis. The first applications appeared with new materials, electric devices and autonomous systems. We can notice a real increase in conversion efficiency.

Recently, a series of application has emerged: space use but also on buildings, roofs, solar farms like in Nevada or California, planes, boats. People are dreaming about using this energy on a large scale. What is mainly discussed today is improving the solar cells in order to reduce the cost of production. The main type is silicon solar cell that holds 50 percent of the market share at the moment. All the systems have common working principles : photo harvesting, and we need to improve this, absorption, quasi equilibrium and preferential collection at contacts.

Direct conversion: the chemical energy can be used to create chemical fuels or to make electricity. A maximum efficiency of solar cells can be reached by reducing the band gap; lots of loss by non absorbed photons when a large one is at use.

Crystalline silicon

This is the result of a lot of steps. It has a quite high efficiency and it is very stable over the years. However, people try to minimize the amount that is used because it is not a good absorber.

New materials

Although it is always nice to look for earth abundant ones, some are not so abundant. You can play around to find earth abundant ones. If you create defects, they tend to heal quite spontaneously in these systems. Plasma processes, flash evaporation... were not adapted for a long time.

Deployment has been very fast: production has been increasing significantly in the past years. In OECD countries, renewable energies are increasing.

In term of costs scale is very important: scaling up has been a very strong driving. The good news is that what has been achieved twenty years ago in labs is now an industrial reality. Unfortunately, it's still too expensive: very low costs approach relies in organic materials that have good absorption, less mobility but good processing.

But cheap is not cheap enough. It has to deliver enough electricity: efficiency vs surface cost.

What are the challenges?

Photovoltaic solar energy should be more affordable, more efficient, should take into account the life cycle (toxicity etc...) and blend itself well in the grid (storage?) and the city (design?). Solar energy is sustainable, technologically mature and has room to improve and develop further

Questions:

1. You show PV is for the time very expensive. You state the lifetime is over 25 years. Is it true for all PV cells? Where is the lifetime included in the cost?

"80% of the market has tracking data showing this lifetime. Manufacturer has guarantee his system is 20-25 years, than this lifetime must have data supporting it Nothing gets to the market unless it's thoroughly tested".

V - Economie et Politique dans le contexte énergétique

Patrice Geoffron, Professeur à l'Université Paris Dauphine, Directeur du Centre de Géopolitique de l'Energie et des Matières Premières Economie et politique dans le contexte énergétique. Il travaille sur les réseaux intelligents.

L'objectif est d'apporter un regard revendiqué d'économiste sur la transformation de la dynamique des systèmes énergétiques. Le centre de recherche en économie de l'énergie a étendu ses actions à une chaire d'économie du climat, créant ainsi une interface entre transformation énergétique et changement climatique.

Un regard d'économiste permet d'analyser les mécanismes de marché, de prix et d'efficacité pour faire face aux nouveaux défis.

Au niveau européen, nous avons traversé en quelques mois une grande peur liée à l'augmentation des prix du pétrole, de l'électricité et du gaz, ainsi que la question de l'exploration et l'extraction du gaz de schiste. Par ailleurs, Fukushima a eu des conséquences directes sur la transformation de l'espace énergétique allemand.

Le but est de commenter la transition vers les sociétés sans carbone : quelles sont les significations pour un économiste ? Différents écueils parent cette révolution, nécessaire, plus avancée sur les plans technologiques qu'économiques.

Amorcer la transition vers des sociétés « sobres » en carbone

J'avais 10 ans au moment du premier choc pétrolier et j'avais été frappé par les débats et l'utilisation d'embargos. Nous parlions alors de la fin du pétrole et des énergies fossiles, avec un horizon de trente ans. Aujourd'hui, cet horizon est de quarante ans.

Le même type d'observation est possible pour le gaz, si on ne prend en compte les possibles découvertes et ressources en gaz de schiste qui pourraient doubler les réserves.

Le problème de la finitude des énergies fossiles est posé. Celle-ci est incertaine, il reste trop de réserves. La réflexion a donc dévié vers la meilleure manière de ne pas utiliser les dernières ressources en pétrole.

Le dilemme est entier. Selon les tendances de l'Agence Internationale de l'énergie (AIE) et les perspectives du World energy outlook datant d'avant Fukushima, les deux décennies à venir resteront une ère du pétrole. Les énergies fossiles continueront à croître et vont peser sensiblement plus que les énergies « vertueuses ».

Les technologies propres qui pourraient être une rupture (type batteries), ne seront pas forcément disponibles dans les vingt prochaines années. Mais il est peu probable qu'une telle rupture vienne modifier le mix énergétique dans les deux décennies à venir (court terme). En effet, cela ne modifierait pas forcément les demandes de pays comme la Chine ou l'Inde.

L'arsenal sera ensuite plus vaste et aura gagné sur le plan de l'économie d'échelle : mais comment traverser ces deux décennies, très compliquées ?

Selon l'AIE, les pays de l'OCDE sont ceux qui auront la possibilité de sortir les énergies riches en CO2 de leur mix énergétique. Cependant, cela ne modifiera pas la tendance à long terme. Les efforts collectifs de l'OCDE ne sont pas suffisants pour compenser les grands émergents. Leur demande va encore croître.

L'équation qui nous intéresse part du sommet dans lequel nous sommes (pic pétrolier entre 2007 et 2030) pour opérer un virage. C'est autour de ce « passage de col » que se jouent ces quelques années. En 2030, beaucoup plus de technologies seront disponibles, mais les difficultés sont à affronter maintenant.

Le « *business as usual* » s'est remis à l'œuvre après la crise de 2008-2009. Les émissions de CO2 sont repartiées à la hausse mettant en lumière la relation mécanique délétère qu'elles entretiennent avec la croissance économique. L'objectif économique de notre période n'est pas la décroissance, bien qu'elle produise des effets positifs. Le défi est de parvenir à des modèles économiques permettant d'assurer la croissance mondiale, avec des économies riches en emplois et assurant la croissance des continents les plus démunis. Tout cela semble cependant impossible à concilier avec la volonté de limiter la hausse des températures à deux degrés. Il faut donc faire au mieux.

Les sources d'émissions de CO₂ sont hétérogènes. Les Etats-Unis émettent ainsi deux fois plus que les pays européens. En revanche, la croissance chinoise ne s'accompagne pas d'une explosion des émissions individuelles.

Un des enjeux est donc la limitation, le plafonnement. Le scénario du « *business as usual* » conduit à une hausse de 4 à 6 degrés+5-6° avant la fin du siècle. En revanche, le scénario de la rupture, « scénario vert », inclut des différences. Les gains en efficacité énergétiques sont effectivement un outil aussi puissant que d'autres (type nucléaire). Des espaces de gains considérables sont à trouver, notamment dans l'habitat et l'équipement ménager.

Il existe toutefois un dilemme économique. L'organisation industrielle d'après-guerre nous laisse sur une trajectoire « rouge ». La légitimité des économies émergentes à bâtir leur croissance sur le CO₂ n'est pas inférieure à la nôtre, mais ce scénario mène à une apocalypse pour la fin du siècle. Le financement de cette transition pose une série de problèmes.

Réinventer

Dans les systèmes énergétiques de l'OCDE, nous avons fait de plus en plus appel à des mécanismes de marché. Auparavant, il existait, notamment en Europe, de grands monopoles énergétiques publics très efficaces dans la période d'après-guerre.

Nous avons ensuite procédé à des dérèglementations et encouragé des mécanismes de marché pour « moderniser le secteur ». Ces mécanismes ont des difficultés à s'implanter de façon satisfaisante car les investisseurs doivent prendre en compte le prix des énergies fossiles. Or, nous sommes incapables de prédire cette variable essentielle afin de savoir comment le prix du pétrole, et d'autres énergies, va fluctuer dans les prochaines années (augmentation structurelle durable ?). Les prix sont trop erratiques et entraînent une mauvaise visibilité.

Second problème

On pourrait avoir un prix qui vienne donner de la cohérence à cette cacophonie : le prix du CO₂. En Europe, il existe un grand marché de permission d'émissions de CO₂. La grande industrie se voit dotée de quotas, avec la possibilité d'échanger les quantités non utilisées pour contribuer à la rentabilité des investissements d'efficacité énergétique.

Ces théories de Ronald Coase, prix Nobel d'économie sont intéressantes et fonctionnent d'un point de vue théorique. Empiriquement, nous avons des difficultés à bâtir des marchés envoyant des signaux clairs aux investisseurs.

Le CO₂ étant un problème global, il faudrait un marché global. Pour cela, un consensus est inévitable. Malheureusement, on peut douter de notre capacité collective à trouver ce consensus.

En effet, les émissions de CO₂ issues de l'OCDE représentent les 2/3 des émissions passées, tandis que ces pays ne représentent que 15% de la population mondiale. Il est donc difficile de trouver un point d'équilibre sur la répartition de la charge, les pays émergents étant réticents face au critère historique.

Les mêmes conclusions sont possibles quant au prix du CO₂ (15-30 euros la tonne). Il faut trouver un prix cohérent pour rendre rentables les investissements et favoriser les énergies vertes.

Le monde énergétique est géopolitique. Les événements du « printemps arabe » et les conséquences qu'ils ont eu sur le prix du pétrole en sont les dernières illustrations. Quelques pays concentrent 89% des réserves en pétrole et 81% des réserves de gaz.

Or, ces ressources conventionnelles se trouvent dans des zones « instables », sur des points de transit fragiles tels que les détroits de Malacca ou Ormuz, très exposés aux menaces. Les prix des énergies fossiles sont donc instables.

Finances publiques : lien mécanique

Le rythme naturel du progrès technique ne peut pas se mettre en place car nous sommes sur la contrainte du changement climatique. Ce rythme doit donc être plus rapide.

Il faut concentrer les investissements sur une plus courte période de temps et les contraintes sur les finances publiques s'en trouvent accrues. Or, les agents privés, ou les particuliers n'ont pas la visibilité pour réaliser spontanément ce genre de financements. On fait donc appel à l'État dans ce genre de situations.

La première difficulté est l'augmentation de la dette publique en pourcentage du PIB. Au cours des dernières décennies, elle est de 10 à 15% dans pays de l'OCDE (85% du PIB en France). Le financement ou refinancement de la dette pose problème à cause de la pression qui s'exerce sur l'observation de la qualité de la dette publique. Celle-ci a changé depuis les années 80, encore plus depuis la crise de l'euro.

La crise financière aurait pu être utilisée pour développer la transition. Au contraire, il y a eu un rabotage, une réduction des avantages fiscaux liés aux énergies renouvelables (ex : photovoltaïque). Tel est le lien global entre finances publiques et énergies vertes.

Sortie de la crise

Nous ne sommes pas sortis de la crise. Il faut objectivement comprendre la complexité d'un monde globalisé. Nous ne sommes pas à l'abri de nouvelles crises globales. La météo du monde économique peut être bouleversée très vite sans que l'on ait les outils pour y faire face.

Ainsi, la courbe de consommation mondiale d'électricité a augmenté en dépit de toutes les crises, sauf en 2009. Nous avons également connu un choc de demande de gaz par les industriels. 2009 est un contre-exemple qui s'inscrit dans la conscience des investisseurs.

L'obligation de créer des « smart cities » :

Le défi n'est pas simplement d'implanter des fermes éoliennes mais de modifier la structure des sociétés. Il faut créer des réseaux intelligents, plus intelligents que ceux de l'après-guerre.

Aujourd'hui, les réseaux doivent transporter de l'électricité mais aussi de l'information pour intégrer les énergies régulières (en France 20 centrales atomiques, 60 réacteurs) mais aussi les énergies intermittentes, les véhicules électriques. Ce système ne peut pas fonctionner si on ne transforme pas les réseaux.

En revanche, les prix de l'électricité influent peu sur le comportement. La révolution va devoir intégrer le consommateur en lui donnant un accès clair aux données comme le prix à la pompe.

La révolution va devoir faire circuler de l'information, avec une plus grande flexibilité des prix. Les moyens de production dépendent des types de consommation: pour modifier le comportement des consommateurs il faut intégrer des mécanismes d'incitation (question du prix dynamique)

La question de la réorganisation des collectivités humaines est également centrale. Il existe une mosaïque des grandes métropoles internationales. Or, il faudrait que le PIB augmente en même temps que les transports collectifs (pas le cas du Vietnam par exemple).

Réinventer la politique énergétique

L'objectif est de partager des doutes plutôt que de proposer des solutions. Nous avons besoin d'une boîte à outils. Ce qui me frappe dans l'actualité récente, c'est l'absence de politique énergétique européenne.

En Allemagne, la décision de sortir du nucléaire a été prise sur des bases nationales qui mettent pourtant en œuvre des interdépendances. Le débat existe aussi quant au gaz de schiste en Europe de l'Est.

L'énergie ne doit plus être un outil de souveraineté nationale. La question énergétique doit être une réflexion européenne commune pour aborder collectivement le défi qui se dresse devant nous.

Questions

1. La structure de consommation d'énergie est très dépendante de l'*American way of life*, construit historiquement par les arrivants sur un large territoire à peupler et équiper rapidement. Pour la Chine et l'Inde, c'est différent car les territoires sont très peuplés. L'Asie ne pourra pas longtemps suivre ce modèle (le Japon ne l'a pas suivi). Modèle intensif d'utilisation énergétique. Les considérations historiques doivent entrer en compte.

« Je suis d'accord avec vous. »

2. Monde intéressant : les énergies renouvelables non-polluantes sont équitablement réparties, ce qui n'était pas le cas pour les énergies fossiles. Cela enlève la question de la souveraineté énergétique, l'énergie sera accessible à tous partout. La question du réseau se repose. Pensez-vous que la géopolitique puisse changer grâce à ça ? L'énergie peut-elle devenir un bien commun de l'humanité ?

« Je suis d'accord avec votre vision. Mais je parle des deux prochaines décennies. Votre vision, qui pourra se réaliser dans des petites communautés à l'opposé d'un système très centralisé, arrivera certainement d'ici 2050. Mais à court terme, la croissance économique est encore très liée à l'émission de CO2. On ne peut pas souhaiter la reproduction du système tel qu'il est à l'heure actuelle mais les deux prochaines décennies suivront ce chemin. »

VI – Matériaux pour l'énergie nucléaire : un regard sur le futur

Pr. Yves Bréchet est professeur des universités à Grenoble INP professeur associé McMaster University Canada) et Professeur senior à l'Institut Universitaire de France.

Spécialiste des matériaux: métallurgie physique, thermodynamique, genèse des microstructures, modélisation, transformations de phases, plasticité, micromécanique de la rupture, sélection des matériaux et des procédés, conception optimisée des structures, interface matériau/vivant, bio mimétisme structural...

Pourquoi faire une présentation sur le nucléaire ? Je viens vous parler d'un mal nécessaire, compte tenu de certaines conditions limites si l'on veut aller vers une économie décarbonnée et garder une énergie centralisée. La problématique est celle des matériaux dans les centrales nucléaires.

Pour commencer, je vais vous présenter quelques notions simples sur le nucléaire. Le travail de D. McKay nous présente les plans de faisabilité des paniers énergétiques possibles. On peut voir que le nucléaire apparaît dans trois paniers sur cinq. Penchons-nous sur les constatations suivantes :

- L'énergie a besoin de ressources en matière;
- La ressource la plus abondante est le charbon;
- Le pétrole est en voie d'épuisement;
- L'uranium est essentiellement propre à rien...à part à fournir du combustible nucléaire.

Dans le cycle du combustible actuel, le système français a une force : il ne présente qu'un seul type de réacteur sur lequel on a des retours d'expérience importants. L'uranium enrichi, qui est essentiellement un combustible, passe dans la centrale et en ressort chargé de plutonium qui est ensuite extrait à son tour. Le plutonium extrait peut être partiellement réutilisé et transformé avec de l'uranium appauvri en un autre combustible, le MOX (« Mélange d'Oxydes »). Le MOX est réutilisé et ce dernier combustible devient inutilisable.

Les réacteurs à neutrons rapides permettent d'utiliser le plutonium et de faire du multi recyclage. La question qui se pose est que faire des déchets ? Pour la France, en termes de décisions sur les EPR, il y a une évolution graduelle vers la prochaine génération après la troisième. La 4^e génération impose de nouveaux concepts comme les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium ou au gaz.

La logique derrière cela vient du fait qu'il existe une grande quantité d'uranium appauvri (qui est un déchet) et de plutonium. L'idée va être d'essayer d'utiliser les deux pour en faire une ressource. Le prototype conçu est ASTRID : un prototype industriel de 600 MWe intégrant les innovations suivantes:

- Un cœur performant à sûreté améliorée
- Une résistance renforcée aux accidents graves
- Une conversion d'énergie optimisée
- Une conception du réacteur intégrant opérabilité, ISIR, ...

ASTRID est refroidi au sodium, et son renforcement contre les accidents graves permet par exemple la récupération d'un cœur éventuellement fondu. Non seulement il servira de prototype industriel mais aussi d'outil pour l'analyse des matériaux qu'on utilisera dans le futur du nucléaire.

On dit partout qu'on dématérialise l'économie mais n'oublions pas qu'il faudra toujours des matériaux. Les principaux problèmes dans le nucléaire aujourd'hui viennent du vieillissement, du remplacement et de sécurité du matériel. Demain, nous saurons utiliser les concepts de la génération IV de réacteurs qui poseront néanmoins de nouveaux challenges pour les matériaux. Après-demain, en revanche, comment entreposerons-nous et stockerons-nous les déchets? ITER, prototype de réacteur nucléaire à fusion, pourra-t-il relever ces défis? Tant que l'on ne stockera pas de manière efficace une énergie intermittente et que l'on veut aller vers une énergie décarbonnée, on a encore de beaux challenges devant nous.

Les matériaux dans le nucléaire sont autant un problème de science que d'ingénierie. Il s'agit pourtant d'une technologie « mûre » et non d'une technologie « en devenir ». Il s'agit donc moins de développer de « nouveaux matériaux » que d'optimiser des matériaux « classiques » vis-à-vis d'une durabilité et d'une sécurité accrue. En effet, le domaine de l'énergie nucléaire est très conservateur et pour de bonnes raisons. Le coût de l'échec en fonction de la valeur de la performance est absolument gigantesque. Le choix des matériaux est

donc extrêmement normalisé. Le principal problème est donc celui du vieillissement des matériaux sous irradiation qui est encore trop peu développé.

Le parc nucléaire français (58 centrales) devient ancien. Qu'est-ce que cela veut dire ? Un réacteur nucléaire fonctionne essentiellement comme une cocotte minute avec une source de chaleur et de l'eau. Elle est liée à un circuit primaire qui passe par un générateur de vapeur alimenté par système secondaire qui fait tourner les turbines dans une double enceinte qui protège l'extérieur de l'intérieur. Ainsi, la centrale fonctionne principalement sur le système de la machine à vapeur avec une source de chaleur un peu particulière. Dans une centrale REP, on retrouve donc trois barrières de protection : la gaine du combustible, l'enveloppe du circuit primaire, et l'enceinte de confinement

Les matériaux et composants sont donc principalement ceux d'une chaudière à vapeur, sauf le combustible, la gaine, les neutrons... Le reste des composants est classique du système vapeur. Les aciers ici sont les matériaux rois. Lorsqu'on travaille avec un environnement hautement sous pression, la cuve doit résister à la fois à la pression interne et à la corrosion. Selon le mode de refroidissement, on prendra donc des aciers plus résistants à l'élasticité, des aciers ferritiques et des aciers inoxydables (bi matériaux). En tout, on retrouve les composés suivants: aciers faiblement alliés, aciers inoxydables, alliages base nickel, alliages de zirconium, alliages divers (Ag-In-Cd), céramique (UO₂-PuO₂).

Il y a trois types de composants matériels dans une centrale: les composants consommables, les remplaçables et les vitaux qu'il convient de bien distinguer:

- Les composants « consommables » incluent les gaines de combustible (en zirconium) qui doivent résister à l'irradiation. Il s'agit ici de maximiser la durée de vie pour maximiser l'efficacité d'utilisation du combustible.
- Les composants « remplaçables » incluent surtout les internes de cuve qui permettent de maintenir les barres et cuves, et la boulonnerie. Dangereux s'ils s'abîment, ils deviennent des déchets supplémentaires et leur remplacement implique d'arrêter la centrale. Ici, il faut maximiser leur durée de vie pour optimiser l'utilisation des centrales.
- Les composants « vitaux » sont principalement la cuve. Elle est irremplaçable. On essaie donc la dégrader la moins possible sous irradiation. La durée de vie de la cuve doit être maximisée pour prolonger l'existence même des centrales.

Les sollicitations et « maladies » des matériaux sont de l'ordre de la physique des matériaux sous irradiation. On retrouve des sollicitations mécaniques liées à l'eau sous pression qui entraînent la fatigue des matériaux. Les sollicitations chimiques liées à l'eau entraînent la corrosion. Enfin, l'irradiation et la température entraînent une migration des atomes, des évolutions micro structurales et un vieillissement thermique. On retrouve également des effets couplés de fluage sous irradiation (liés à la température, la contrainte et l'irradiation) qui déforment les matériaux et que l'on comprend encore mal. Enfin, on constate la corrosion sous contrainte de l'irradiation. Là, tout est en jeu : la physique, la mécanique, et la chimie.

Le vieillissement est donc la transformation de la structure avec le temps. Elle mène au durcissement du matériau et le matériau qui durcit devient plus fragile. Si l'on ajoute cet effet aux défauts de fabrication éventuels et à la corrosion, on se rend compte que les composants sont assez fragiles et qu'il existe un véritable risque de rupture. La conception des centrales-vapeur relève de l'ingénierie. Mais l'irradiation qui perturbe l'ordre atomique de la matière, la modification de la chimie et la mobilité supplémentaire des atomes qui en découle relève de la science fondamentale. On modifie le cœur-même du comportement des matériaux. On doit donc changer constamment d'échelle d'espace (de l'électron physique à la structure externe du matériau) et de temps (de la picoseconde au millénaire pour le stockage des déchets).

Beaucoup de chemin scientifique reste à parcourir. Nous devons encore développer des connaissances sur les dégâts dans les différents aspects de la structure et les caractères particuliers de chaque matériau. Les simulations numériques jouent un rôle clé pour évaluer le problème des changements d'échelle. La création de défauts d'irradiation par les différents mécanismes peuvent avoir les conséquences suivantes : réactions nucléaires (formation de gaz pouvant provoquer des bulles...), interaction élastiques, interactions inélastiques (échauffement, fissuration). Les bulles de gaz des réactions nucléaires peuvent provoquer un gonflement des structures ou encore durcissement donc une fragilisation de certains matériaux. L'irradiation perturbe l'ordre

atomique de la matière (défauts de structure), en modifie la chimie (transmutations) et modifie le transport des atomes (transport balistique).

La modification de la diffusion (concentration de défauts ponctuels accrue) entraîne généralement une accélération des phénomènes de diffusion et une apparition de phases ne figurant pas sur les diagrammes d'équilibre. La modification de la microstructure entraîne des dislocations (ou boucles de dislocations), recristallisation, morcellement (oxydes), ségrégations inter-granulaires, et bulles, cavités et précipités. La modification des propriétés d'usage sont le durcissement, l'adoucissement, la perte de ductilité, la fragilisation, le fluage-irradiation, la sensibilisation à la corrosion sous contrainte, le gonflement etc.

Je vais vous parler plus en détail de deux exemples. Commençons par la cuve, composante par excellence qui doit durer. Irremplaçable, elle fait 12 mètres de hauts et ses pièces sont forgées dans un acier ferritique. Le corps de cuve est constitué d'une bride forgée et de 5 viroles forgées, soudées entre elles. Ces viroles sont réalisées à partir de lingots en acier ferritique faiblement allié (AFNOR : 16MND5, Européenne : 16MnNiMo-5). Enfin, elle comporte un fond sphérique percé de 50 traversées pour le passage des sondes. Le couvercle est constitué d'une bride forgée et d'une calotte sphérique percée de 65 orifices équipés de manchons appelés adaptateurs et soudés sur la calotte (manchons en alliage nickel, Pb de CSC). La fixation cuve-couvercle assurée par 58 goujons et l'étanchéité obtenue par deux joints. A basse température, elle devient fragile car l'énergie absorbée est faible. Sous l'effet du bombardement neutronique, on observe au cours du temps une dégradation des propriétés mécaniques de l'acier :

- augmentation de la dureté, de la charge à rupture et de la limite élastique
- diminution de la ténacité (résistance à la fissuration)
- diminution de la résilience (résistance aux chocs) et de la ductilité
- augmentation de la température de transition fragile-ductile

Compte tenu des conditions de vieillissement et des conditions de sécurité, on peut savoir aujourd'hui si au bout de 40 ans elle est encore capable de fonctionner. Pour savoir sur 60 ans, il faut modéliser les défauts et la ténacité du matériau.

Le deuxième exemple traite des internes de cuve, un matériau remplaçable. Le rôle des structures internes inférieures est de porter le poids du cœur, maintenir en alignement les assemblages combustibles, les grappes de commande et l'instrumentation, canaliser l'écoulement du fluide caloporteur, protéger la cuve contre les rayonnements émis par le cœur et conserver toujours une grande rigidité étant donné la précision d'alignement requise.

Les structures internes supérieures doivent positionner les grappes de commande dans l'axe des assemblages combustibles et immobiliser les assemblages combustibles. Partons par exemple d'un boulon fissuré. On essaie bien sûr de l'enlever avant qu'il y ait rupture, or il ne casse pas à l'air comme dans la cuve. Les boucles de défauts d'irradiation ont durci le matériau et l'ont cassé à cet endroit. De plus, la déformation localisée engendre une déformation accrue et concentre la cassure à un endroit. La surveillance du comportement des matériaux est intéressante pour l'ingénieur qui doit relever le défi d'évaluer leur solidité.

Peut-on prolonger la durée de vie des centrales REP à 60 ans et au-delà ? La modélisation multi-échelle permet d'utiliser toutes ces données dont on dispose pour former des prédictions précises. Demain, il faudra pouvoir qualifier la sécurité d'une centrale, et pour cela, savoir ce que veut dire fermer une centrale trop vieille. La centrale peut être mal conçue, mais on parle ici essentiellement du vieillissement de la cuve centrale. Demain, nous aurons au niveau international des exigences accrues pour nos centrales en termes de durabilité, sûreté et fiabilité, économie et non prolifération. Six concepts de réacteurs ont été retenus:

- Gas Cooled Fast Reactor GFR
- Lead Cooled Fast Reactor LFR
- Sodium Cooled Fast Reactor SFR
- Molten Salt Reactor MSR
- Supercritical Water Reactor SCWR
- Very High Temperature Reactor VHTR

Peut-on réellement construire et surtout faire durer ces « réacteurs concepts » ? Les nouvelles difficultés en terme de matériaux sont principalement liées au fluide caloporteur. Par exemple le réacteur à sodium liquide SFR : on peut se demander si c'est une bonne idée d'avoir un échangeur entre du sodium et de

l'eau. Concernant le VHTR, les exigences en terme de température paraissent irréalistes. Le MSR enfin pose la question de ses matériaux en sel fondu.

On demande à ces nouveaux réacteurs d'avoir des taux DPA plus élevés et on ne sait pas comment réagissent les matériaux sous ces pressions. Les réacteurs de génération IV verront en somme une augmentation grande de la température et leurs fluides caloporteurs seront plus difficiles à manipuler que l'eau.

Terminons par quelques considérations complémentaires. Il faut encore se poser de bonnes questions sur la disponibilité et le coût des matériaux, la fabricabilité et technologie d'assemblage ainsi que les conditions d'inspection en service (milieu Na pour SFR) en utilisant des techniques de contrôle non destructives. Ensuite, il faut repenser une approche de sûreté et de certification. La codification pour la conception nucléaire demande un effort spécifique au-delà de recherche et du développement pour établir les règles et les normes de conception mécanique pour le nucléaire. Enfin, demeure la question du démantèlement et de la gestion des déchets.

Pour le projet ITER, on va se heurter à des problèmes gigantesques, et nous avons un vrai défi en termes de déchets. Comme dit Sébastien Balibar « C'est une idée magnifique de mettre le soleil en boîte...à part que nous ne savons pas construire la boîte! » On ne le fera certainement pas avec les matériaux d'aujourd'hui. Il faudra un matériau devant faire face à un plasma à haute température, très réactif, pouvant être soumis à une très forte érosion et dont la structure peut être très fortement irradiée (sans fragilisation, gonflement...) C'est un vrai défi pour le scientifique et pour l'ingénieur.

La stratégie américaine sur les déchets est ne pas faire de retraitement. Pour les Suédois, la solution est également sans retraitement mais en utilisant une protection en cuivre. La stratégie française est découplée. Pour les produits de fission, on se sert de la vitrification et de la protection par des gaines d'aciers inoxydable évitant le contact avec l'eau. Il y a également l'option de barrières d'ingénierie (verres) pour éviter la diffusion des PF. Les actinides sont les plus durs à recycler. D'une part, on essaye de refaire faire un cycle au plutonium. Pour les actinides mineurs, il faut un stockage complet. L'option retenue est celle de la barrière géologique dans une profondeur très importante d'argile, quand ils ressortent, ils sont désactivés.

Pour finir, nous parlerons rapidement de l'incident de Fukushima et de la progression de l'accident. D'abord, environ 50% du cœur est découvert. La température des gaines augmente, sans dégât significatif au cœur. Ensuite, les deux tiers du cœur sont découverts. La température des gaines dépasse les 900 degrés, elles gonflent et finalement il y a rupture. Ceci provoque un relâchement de produits de fission.

En conclusion, il devient vraiment nécessaire de construire des dispositifs fiables et durables, aujourd'hui et demain. Nous serons obligés de passer par des options innovantes pour la gestion du futur. C'est indispensable pour « matérialiser les rêves ». C'est un défi scientifique et technologique sans cesse renouvelé, et à mon sens, la modélisation multi échelle est au cœur du problème

Questions:

1. La rupture est un événement statistique. Comment on calcule la probabilité face au risque ?
« Par la modélisation multi échelle. Nous travaillons évidemment avec un confortable coefficient de sécurité. La question est de savoir si ces fissures sont critiques ou non. »
2. Qu'en est-il des nouveaux matériaux créés après les accidents ?
« On ne crée pas vraiment de nouveaux matériaux, on change l'ingénierie. »
3. Où en est-on sur la chimie des matériaux nucléaires ? Y a t'il des pistes ?
« Il n'y a pas de pistes complètement convaincantes pour l'instant. »
4. Est-il possible qu'exactement les mêmes réacteurs puissent avoir des différences ?
« Des éléments mineurs dans les utilisations industrielles ne sont pas le cas dans l'irradiation. Il faut une chimie extrêmement précise des alliages. En France, toutes les cuves sont pareilles. »
6. Les matériaux composites pourront-ils jouer un rôle dans le futur du nucléaire ? « Ils sont étudiés. C'est intéressant mais l'ingénierie se méfie des matériaux intrinsèquement fragiles. »

VII – Biomasse et bio-raffinerie : que pouvons vraiment en attendre ?

Pr. Daniel Thomas, Professeur à l'Université Technologique de Compiègne, Président du pôle de compétitivité « Industries et Agro-ressources »

Je vais vous parler aujourd'hui des interactions entre la biomasse et la bio-raffinerie. Nous tenterons de déterminer ce qu'il est possible de faire ou non, ainsi que ce qui est probable et moins probable. Pour cela nous nous appuierons sur des prévisions faites pour les 40 années à venir.

Le principe de la bio-raffinerie est d'essayer d'utiliser la plante entière. Sur un site industriel, le projet est de tenter d'avoir une utilisation optimale de l'énergie en réutilisant les déchets, voire en utilisant comme matière première de départ un déchet ou un sous-produit. C'est le principe que Dominique Bourg étudie dans le champ de l'écologie industrielle et qu'il qualifie de métabolisme industriel. La stratégie de bio-raffinerie utilise donc la plante entière, non seulement pour en faire un produit énergétique mais pour les champs de la chimie ou encore de l'alimentaire.

Dans une raffinerie pétrolière, le pétrole brut est une substance complexe à raffiner. De la même manière, la biomasse est un ensemble de substances encore plus complexe dont il faut valoriser tous les constituants. En se basant sur des ressources provenant de la biomasse agricole et forestière, il faut inventer et créer des procédés plus intelligents qui produisent autre chose que du sucre et des amidons. Pour cela, il faudra faire appel à la « chimie verte » et les douze principes de la « biotechnologie blanche ».

La nécessité première sera d'intégrer de nouveaux marchés avec la logique de produire de façon renouvelable et de respecter l'environnement en étant capable de calculer l'impact écologique des produits et d'analyser leur cycle de vie. Il ne s'agit pas simplement d'une analyse de produit de l'entrée à la sortie de l'usine. Il faut établir un diagnostic global qui va du champ où a poussé la biomasse jusqu'au consommateur final ainsi que ses déchets en passant par les procédés de transformation.

Cette nouvelle vision de la production et de l'analyse du cycle de vie demande des connaissances très complètes, complémentaires et variées dans les champs de l'agronomie, de l'ingénierie, de l'industrie et de la socio-économie du secteur rural. Ces connaissances sont en train de se développer dans notre consortium « Industrie et Agro-ressources ».

Il ne faut pas tomber dans l'écueil de penser qu'on aura une biomasse indifférenciée au niveau mondial. Cette localisation imposée démontre qu'il est nécessaire d'associer le monde agricole dans son ensemble à un tel projet. Il faut l'associer tout au long du cycle du produit et surtout lors des négociations dans chaque pays sur la distribution de la valeur ajoutée afin qu'elle soit harmonieuse. Dans la région Champagne-Ardenne, par exemple, nous avons pu établir une idée très précise de la quantité de biomasse disponible en partant directement des exploitations agricoles.

Il est important de noter que jusqu'à maintenant, cette biomasse produite n'a pas seulement été utilisée pour maintenir le cycle agricole, notamment la fertilisation des sols ou l'alimentation du bétail, mais aussi à d'autres fins. Nous avons constaté cela en travaillant plus particulièrement sur les utilisations de la paille. Ainsi, la quantité de biomasse réellement disponible est souvent moins accessible que prévu : la disponibilité est relative aux usages propres aux exploitants et ne représente environ que le tiers de ce qui existe. En bref, la bio-raffinerie passera nécessairement par des contrats et une certaine complicité entre le monde de l'industrie, le monde agricole et la recherche par des accords solides.

Dans une logique de développement durable, il nous faut utiliser du carbone renouvelable en remplaçant des molécules carbonées venant de la biomasse agricole et forestière. Pour cela, nous devons faire appel à de nouveaux outils industriels dont la chimie verte. Les bio-raffineries visent quatre grands marchés, l'un d'entre eux (celui qui nous intéresse particulièrement dans cette conférence) étant le marché de la bioénergie. Le marché des biocarburants liquides a énormément évolué depuis ses débuts. Les biocarburants de première génération ont eu le mérite de poser le problème mais ne dureront pas, principalement car ils n'utilisent que les sucres et l'amidon de la plante ce qui reste peu efficient.



La deuxième génération utilise des parties de la plante peu valorisées, du type cellulose par différentes voies et nous pouvons espérer qu'elle soit opérationnelle dans 6 ou 8 ans. La troisième génération de biocarburants repose sur l'appareillage photosynthétique des microalgues par captation solaire. Elle a fait l'objet de beaucoup de travaux, notamment en France avec quelques résultats. Dans l'objectif d'une valeur ajoutée élevée, la production est peut-être possible mais elle ne l'est pas sur une grande échelle et pour une valeur ajoutée modérée. Ainsi, il n'y a pratiquement pas eu de saut technologique dans le domaine de la bioénergie, et il n'est pas envisageable ni même possible d'utiliser les micro algues à large échelle dans les prochaines années.

Aujourd'hui, l'Union européenne assure que même la deuxième génération de biocarburants aura une vie transitoire. Tant qu'il faudra du carburant liquide pour les transports terrestres, ce domaine restera intéressant, mais lorsqu'on sortira de ce paradigme les biocarburants liquides auront vocation à disparaître. Dès qu'il sera possible de faire autrement, il y aura un pic comme pour le pétrole puis une descente des biocarburants. De ce fait, en quoi la bio-raffinerie a-t-elle de l'avenir ?

Nous pouvons estimer aujourd'hui qu'il se produira une montée de biocarburants jusqu'à environ 2030-2035. Cependant, ce qu'il ne faut pas oublier c'est qu'il y aura aussi probablement une montée en puissance très importante de la partie bio-moléculaire de secteur. Il faudra trouver d'autres matériaux et ingrédients qui exploseront. En ce qui concerne le pétrole comme source d'énergie, il y a beaucoup de possibilités de substitution même si elles ne sont pas toutes au point aujourd'hui. Il s'agit de l'éolien, du solaire, de la géothermie, de l'énergie marémotrice etc... Ainsi, il y a une concurrence grande entre l'énergie provenant de la biomasse et toutes les autres sources d'énergie renouvelable.

En revanche, pour faire des molécules, il n'y a pas d'autre solution que l'utilisation de la biomasse. Dès 2030-2035, après le pic pétrolier, la chimie verte aura tendance à remplacer la pétrochimie. Je n'ai pas la prétention de dire que ce scénario se produira forcément mais il est très probable. C'est pour cela que nous développons dès maintenant des projets dans ce domaine. Sur la deuxième et troisième génération de biocarburants, par exemple, beaucoup d'acteurs développent des projets (notamment dans le secteur aérien) pour que des carburants liquides soient encore disponibles après le pétrole.

Le schéma est plus certainement plus complexe que cela car chacun devra chercher sa place au fur et à mesure de l'évolution du marché, entre maintenant et 2040. Ces trente prochaines années seront une véritable période de transition. A partir du moment où le marché va complètement changer jusqu'en 2040, la clé de la bio-raffinerie sera la flexibilité. D'une part, la flexibilité des ressources sera primordiale : il faudra savoir travailler avec une biomasse nouvelle, diversifiée et adaptée au terrain local. D'autre part, il faudra faire preuve de flexibilité dans l'utilisation de la biomasse.

Comme nous l'avons vu, le secteur des bioénergies verra certainement sa part de marché réduite dans la production des bio-raffineries. Il faudra alors rééquilibrer les quatre marchés de production. Le premier marché vu précédemment est celui des biomolécules. Il sera possible de produire des intermédiaires chimiques, de la colle verte, des biolubrifiants ou encore des surfactants d'origine végétale. Le marché des matériaux pourra comprendre les fibres végétales mais aussi des bio-polymères utilisables dans le bâtiment, le textile, les matières plastiques anciennement pétrochimiques, le transport ou l'emballage. Le marché des bio énergies couvre donc les technologies de biocarburants de 2^e et 3^e génération, la production d'électricité et le chauffage. Enfin, le marché des bio ingrédients a vocation à s'étendre. Il s'agit d'ingrédients alimentaires ou cosmétiques mais aussi de composés bio actifs et nutraceutiques.

Ce n'est que lorsqu'on pourra véritablement valoriser la plante entière qu'on aura un mode de production plus durable. Il ne s'agit pas de maximiser le sucre ou l'amidon à l'hectare mais de maximiser la biomasse à l'hectare. Ce changement de paradigme est une petite révolution pour l'écologie. Il implique d'encourager la diversification sur les sols et de pouvoir utiliser les terres pauvres ou en difficulté (polluées, très sèches ou très humides) en y introduisant des plantes dédiées. Ces plantes seront dites pérennes, ce qui aboutira à des écosystèmes nouveaux à mi-chemin entre l'agriculture et la forêt. Ceci aura un impact sur la quantité et la nature des intrants dans les sols. On pourra espérer une diminution des intrants chimiques phytosanitaires ce qui mènera à une réapparition de la diversité biologique de la flore comme de la faune.



En résumé, le schéma a tendance à évoluer. La bio-raffinerie aura tendance à se rapprocher de la situation et du fonctionnement des raffineries pétrolières mais avec plus de flexibilité dans les intrants et les extrants pour les raisons citées précédemment. La production de la raffinerie végétale portera sur des applications aussi diverses que le transport, le textile, l'alimentation et l'emballage, l'environnement, la communication, l'habitat, les loisirs, la santé, l'hygiène... Le type de plantes utilisé permettra d'extraire du glucose, de l'amidon, de la cellulose et de plus en plus l'accent est mis sur les oléagineux. Nous pouvons prévoir et espérer que le principe de la raffinerie végétale atteindra son rythme de croisière en 2015.

Je vais vous présenter maintenant un commentaire assez rare, que l'on rencontre rarement dans les discussions sur l'énergie. C'est Sanders et al. qui l'ont publié en 2007. On considère toujours que tout ce qui provient du pétrole a un niveau énergétique beaucoup plus élevé que le niveau de la biomasse. Ce n'est pas une théorie mais une constatation, on appelle cela le mur thermodynamique. Cependant, on oublie que les barrières d'énergie d'activation pour la biomasse sont beaucoup plus faibles, sans compter les catalyseurs naturels de type enzymes. De ce fait, un certain équilibre est provoqué. Les dérivés du pétrole sont bien faits pour brûler et exploser, mais les barrières d'énergie d'activation plus faibles des matières végétales constituent un autre avantage.

En somme, la bio-raffinerie sera de plus en plus utilisée pour créer une énergie moléculaire (d'ici 2035). Certainement, à l'horizon 2035-2040, dans une logique de développement durable et de logistique de mobilisation de la biomasse, on utilisera la biochimie industrielle et agricole.

Je vais terminer par l'exemple de l'acide succinique, qui est développé actuellement par une des entreprises de notre consortium. Cet acide permet de faire dix familles de produits différents.

On va vers un véritable métabolisme industriel. Sur le site de Bazancourt-Pomacle, il y a un passage de l'eau de la transformation de canne à sucre où l'eau est excédentaire vers la transformation de l'amidon du blé où il y a un manque d'eau. Ce processus bénéficie en plus de la mutualisation de l'énergie et des composants de gestion pour une efficacité accrue.

Ce développement des fonctions de la biomasse n'est pas une idée figée dans un contexte temporel particulier. Nous pensons que la biomasse servira à d'autres applications, dans d'autres endroits et à d'autres temps.

Questions:

1. Quel est le rôle de la fertilisation dans cette boucle ? Je me pose notamment la question des engrais et du retour de la biomasse aux sols.

« Oui bien sûr, il y a beaucoup moins de biomasse dans cette boucle. Si on appauvrissait les sols et qu'on désorganisait le monde agricole, il ne faudrait pas le faire. C'est pour cela qu'il faut des accords solides avec le monde agricole. Il faut privilégier les solutions locales. Pour la raffinerie de pétrole, 80% va au secteur de l'énergie, 9% à la chimie. Pour la biomasse, ça sera à peu près pareil au début, puis on attend une baisse du secteur énergétique. »

3. La question de l'industrialisation des agro-ressources pose la question de la biomasse intrante : qu'en est-il des produits phytosanitaires ? Ne craint-on pas une augmentation des monocultures ? Quels sont les risques ?

« La nouvelle génération pourra utiliser des plantes très diverses, c'est le but. Les déchets forestiers, le compost ménager, les plantes pérennes pourront tous être utilisés. On va au contraire vers plus de diversité biologique, plante et animale. »

4. Votre présentation soulève un challenge pour le chimiste, notamment sur les étapes de transformation. Je pense surtout aux catalyseurs par voie d'enzymes, y'en a-t-il d'autres ?

« C'est une remarque très pertinente. Beaucoup de recherches sur des catalyseurs améliorés sont en train d'être conduites, notamment à l'université de Lille. Lille a le plus gros programme de recherche européen sur la question. Ils recherchent notamment sur l'association de catalyseurs traditionnels avec des catalyseurs enzymatiques. »



5. Je pense qu'il faut faire attention aux avis péremptoires sur la biomasse. Il y a des avantages et inconvénients dans chaque solution. Pourquoi la production de biocarburants par micro algues est-elle limitée ?

« J'ai travaillé dessus il y a 25-30 ans. Il y a eu bien sûr des réalisations non négligeables. Mais dans l'état actuel des connaissances, le processus reste trop cher. On peut produire aujourd'hui des lipides avec les micro algues, mais ce n'est applicable que pour des activités à valeur ajoutée élevée, comme la chimie fine ou les cosmétiques. »

VIII- Stockage du CO₂, énergies fossiles et hydrogène : quelles connections ?

Francois Guyot, Université Paris Diderot, Institut de Physique du Globe de Paris

Mon intervention se place dans une réflexion géologique. Il est important de commencer par positionner les énergies fossiles dans les grands cycles de la Terre.

La « respiration » représente la première source d'énergie. On récupère de l'énergie en respirant. La photosynthèse est la transformation de l'énergie solaire en biomasse, ou en matière organique. Les êtres vivants récupèrent cette énergie et ferment le cycle.

Pendant très longtemps, nous nous sommes inscrits dans ce cycle naturel du carbone. La révolution industrielle a constitué une rupture géologique majeure. L'humanité a alors eu besoin d'une énergie très concentrée (biomasse fossile, déshydratée et abondante). Le cycle du carbone a été à jamais transformé par l'utilisation des énergies fossiles.

Seulement 1/10 000^e de la biomasse est transformée en énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), formé par échappement du cycle du carbone. L'utilisation du carbone pour faire de l'énergie a introduit un déséquilibre énorme dans le cycle. La Terre est capable de réguler une certaine quantité de CO₂ rejetée. Or, nous rejetons du CO₂ dans des proportions soixante fois supérieures à ces valeurs.

Cette conduite provoque le risque Co₂. L'activité humaine est un agent géologique fort, représentant une révolution épistémologique que beaucoup ont encore du mal à accepter.

Le risque CO₂ et sa «remédiation»: Faut-il réguler le Co₂ ?

La chimie de l'atmosphère a changé. Or le CO₂ est l'élément sur lequel nous avons le plus de prise. Nous comprenons donc que le changement est vraiment dû aux combustibles fossiles.

Par ailleurs, la combustion du CO₂ entraîne une baisse de la quantité d'oxygène. Si cela n'est pas un problème pour l'instant, les quantités d'oxygène sont considérables, il est clair que la concentration de CO₂ représente un événement géologique majeur.

On le remarque également à travers les isotopes 12 et 13 et dans les bulles prises dans les carottes glacières datant de plusieurs millénaires. Les changements récents en concentration de CO₂ sont dramatiques.

Jusqu'où risquons-nous d'aller ?

Nous envoyons chaque année 26 giga tonnes de CO₂ dans l'atmosphère, augmentant la concentration de 4ppm/an. Nous savons que la part des énergies fossiles au sein de nos énergies actuelles est écrasante et le restera sûrement d'ici 2030.

Nous allons continuer à brûler ces énergies, mais à quel moment va-t-on les épuiser ? Nous avons malheureusement assez de combustible pour arriver à une teneur de 800ppm vers 2100. N'en déplaise aux théories positivistes d'Arrhénius (1908) qui avançait que le réchauffement va bénéficier à l'agriculture, nous privilégions pour le moment le principe de précaution et nous avons peur.

Une des inquiétudes est l'acidification potentielle des océans. 1/3 du CO₂ émis est réabsorbé par les océans. Aujourd'hui, 9 giga tonnes de CO₂ sont relâchés dans l'océan. Cela a pour effet de déséquilibrer le Ph et contribue ainsi à acidifier les océans. Les organismes calcaires peuvent en absorber une partie, mais à un moment donné, les coquilles ne peuvent plus survivre, et se dissolvent. A 700 ou 800 ppm il est quasi certain que cela arrivera. On ne sait pas encore si cela nous expose à des conséquences majeures. Des extinctions massives sont déjà arrivées. Cependant, cette situation crée des risques pouvant nous exposer à une catastrophe.

Oui, il faut vraiment faire quelque chose pour réguler le Co2 :

Ce qui m'inquiète c'est la quantité de combustibles fossiles pas trop chers disponibles. Qu'est-ce qui nous pousserait à ne pas les brûler ? Nous avons les quantités nécessaires pour passer de 26 giga tonnes à 54 giga tonnes en 2054.

Comment peut-on substituer une technologie non émettrice de CO₂ aux énergies fossiles? En se basant sur un point de départ à 26 giga tonnes, il faudrait être capable de remplacer le surplus par des technologies qui éviteraient les émissions. Chaque technologie devrait ainsi éviter l'émission de 4 giga tonnes CO₂ par an.

Le Carbon Capture and Storage CCS

Cette méthode consiste à capturer le CO₂ à la sortie des centrales thermiques et à le stocker en sous-sol. On peut citer, à titre d'exemple, le cas du site norvégien Sleipner qui réinjecte le CO₂ dans une couche souterraine. Malheureusement, on ne sait pas ce qu'il devient.

Cette pratique se fera à grande échelle éventuellement lorsque le prix du CO₂ dépassera les 150 dollars la tonne, et quand nous saurons quels effets cela a sur le sol. Sur le site de Sleipner, on injecte 3000 tonnes de CO₂ par jour (20 millions en tout). Sur Terre, il faudrait 10 000 sites comme celui-ci pour infléchir la tendance. Mais est-il raisonnable d'élargir cette technologie non maîtrisée à 10 000 sites?

Question scientifique : que devient le CO2?

Le CO₂ peut rester en profondeur, s'infiltrer dans l'eau ou être dissout en carbonates.

La conversion du CO₂ en carbonates solides pose des enjeux technologiques mais possède un caractère pérenne et rassurant car il reste stocké plusieurs dizaines de millions d'années. C'est le mécanisme naturel de stockage du CO₂ dans la terre au sein de la boucle de régulation. En revanche cela ne fonctionne pas comme on le voudrait. En effet, ce processus est extrêmement lent.

Il faudrait accélérer cette réaction d'un facteur 10. Une des solutions entrevues à été l'injection du CO₂ dans des roches volcaniques basiques ou ultrabasiques susceptibles de bien interagir avec le CO₂ et de le convertir en carbonates solides. Théoriquement la réaction devrait apparaître en quelques jours. Or, en pratique elle a lieu très lentement. Une couche de silice non poreuse se développe à la surface. Celle-ci bloque totalement la réaction faisant passer la vitesse de réaction à plusieurs milliers d'années. Les minéraux céramiques ne peuvent pas interagir. La clé de la conversion est là et représente un véritable défi technologique et chimique.

Selon toute vraisemblance, une biomasse supplémentaire pourrait exister. Cette biomasse capterait jusqu'à la moitié du CO₂ mais entraînerait une pollution à grande échelle, provenant des fertilisants. Sur le papier, on pourrait retrouver un cycle du carbone antérieur à la révolution industrielle avec l'économie de biomasse industrielle.

Quelques réflexions sur l'utilisation de l'hydrogène

Du point de vue de l'évolution des combustibles c'est assez intéressant. Le rapport carbone/eau pour l'énergie est favorable. Le gaz naturel est le plus propre avec une empreinte CO₂ beaucoup plus faible que pour le charbon du point de vue des kilojoules. D'ailleurs, nous sommes passés d'une économie dominée par le charbon au pétrole, et peut-être vers le gaz.

La communauté scientifique s'intéresse au fait à l'hydrogène comme source primaire d'énergie, produite notamment par les micro algues. Par ailleurs, il y a de la génération naturelle de H₂ dans le sol. Si on catalyse correctement et chimiquement dans le sous-sol, on peut trouver de l'hydrogène. En revanche, on ne sait pas trop pourquoi il est tantôt conservé et tantôt transformé en méthane.

Nous ne sommes donc pas sûrs de pouvoir nous en servir. En effet, la relation CO₂/H₂ dans le sous-sol peut présenter des dangers d'émission de gaz à effet de serre. Si l'on injecte du CO₂ à grande échelle et qu'une petite fraction forme du CH₄ avec le H₂, le résultat est un gaz à effet de serre très puissant. Si cela a lieu sur un site précis cela ne posera pas de grand danger, en revanche, à grande échelle c'est très dangereux..

Injecter le CO₂ ne peut être considéré comme une opération neutre.

Questions

1. Pouvez-vous donner des chiffres sur la perte énergétique de l'enfouissement du CO₂ ?

« Si je me souviens bien, 60-80 dollars la tonne pour la capture du CO₂. Ça ne sera rentable qu'à partir de 150 dollars la tonne de CO₂. Le stockage coûte 20 dollars la tonne ce qui n'est pas très cher. Mais ce n'est pas qu'une question de coût mais plutôt une question d'acceptabilité. On calcule le CO₂ évité dans toute la boucle, en comptant l'énergie qu'il faut dépenser pour l'enfouir. Le bilan global est le CO₂ évité. »

2. Connaît-on l'évolution de l'acidité du CO₂ en fonction de la profondeur d'enfouissement ? La connaît-on par expérience ?

« Les réactions de bases sont déjà connues ».

3. On a l'intuition que la finitude des ressources n'est pas le problème. Pensez-vous qu'on va exploiter bientôt les hydrates de gaz et gaz de schiste ?

« Evidemment c'est énorme, cela peut multiplier les énergies fossiles par 10. Mais cela n'en fait pas pour autant une ressource renouvelable. On passe d'une centaine d'années d'autonomie à plusieurs milliers. Mais cela ne change pas vraiment le problème du CO₂ dans l'atmosphère. Quels sont les indicateurs dans l'histoire de la terre qui nous font penser que c'est un problème ? Dans le passé, 800 ppm est facteur d'extinctions massives. Ensuite, les hydrates de gaz sont des composants importants de stabilité des terrains. Cette géotechnique est encore très mal maîtrisée. Peut-on jouer aux apprentis sorciers ? »

IX - Politique et sécurité énergétique dans le contexte des nouvelles énergies

Didier Houssin Ancien élève de Sciences Po et de l'Ecole Nationale d'Administration, Directeur Energy Markets and Security à l'Agence Internationale de l'Energie.

Je souhaiterais aujourd'hui faire un exposé général sur le rôle des énergies renouvelables dans les politiques énergétiques actuelles. Créée en 1974, l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) a uni les grands pays consommateurs de pétrole pour leur permettre de faire face aux crises pétrolières avec, notamment, la création de stocks stratégiques pour diminuer les effets des ruptures d'approvisionnement. Aujourd'hui, l'AIE s'occupe de la politique énergétique au sens large : comment améliorer la sécurité énergétique des Etats à long terme et lutter contre le changement climatique ; le tout dans des conditions économiques satisfaisantes et en concertation avec tous les pays. Le rôle des pays émergents, en effet, est de plus en plus important dans le domaine de l'énergie.

Les grandes tendances en matière d'énergie renouvelable

Le développement des énergies renouvelables est très récent ; il est marqué par une croissance extrêmement rapide. L'éolien et le solaire, notamment, ont connu des taux de croissance à deux chiffres, favorisés par les politiques de soutien mises en œuvre par les Etats, tout particulièrement en Europe. Ainsi, l'éolien a connu une croissance de 25% au cours des 10 dernières années, soit une multiplication par dix des capacités de production depuis 2000. Environ 200 GW sont aujourd'hui installés, et certains pays comme le Danemark ont une contribution de l'éolien tout à fait marquante dans leur mix énergétique. Au niveau des investissements également, c'est dans le domaine du renouvelable que les flux sont les plus importants.

L'autre tendance de fond, c'est le déplacement du renouvelable vers les pays d'Asie et notamment la Chine. En 2010, elle représentait en effet la moitié des nouvelles installations de production d'électricité renouvelable et dépassait même le rythme de développement des Etats Unis.

Cette tendance se confirme aujourd'hui avec une accélération notable du développement des énergies renouvelables en Chine dans un souci de diversification du mix notamment. La Chine souhaite en outre créer une filière industrielle complète à l'image de l'Allemagne qui a réussi à générer 400 000 emplois dans le secteur du renouvelable. A l'inverse, on constate, sur la même période, un fort ralentissement des investissements aux Etats Unis à cause de la récession mais également de la concurrence accrue entre les énergies renouvelables et les gaz de schistes dans un contexte de prix du gaz extrêmement bas.

D'une manière générale, la récession de 2008/2009 a impacté fortement la demande d'électricité avec un niveau de consommation dans les pays de l'OCDE encore en dessous de ce qu'on constatait en 2007. C'est surtout la production d'électricité thermique qui a baissé et qui reste très inférieure des niveaux d'avant crise alors que dans le même temps, les investissements dans le domaine du renouvelable ont continué de progresser quant à eux. En conséquence, la part de marché des renouvelables a donc bien augmenté sur la période et malgré la crise. C'est une bonne nouvelle en termes de sécurité d'approvisionnement. L'une des difficultés, en revanche, c'est que les renouvelables dont la production n'est pas continue comme l'éolien ou le solaire rendent plus difficile la gestion de la demande électrique.

Les énergies renouvelables dans les scénarii de l'AIE

L'AIE a étudié différents scénarii en fonction des choix politiques qui ont été faits ou qui le seront : Le *Current Policies Scenario* (CPS), le *New Policies Scenario* (NPS), et le *450 scenario*.

- Le scénario des nouvelles politiques (NPS) correspond *grosso modo* au « 3 fois 20 » européen auxquels se rajoutent en plus les engagements pris à Cancún et à Copenhague. On constate que dans les pays émergents, la demande d'énergie primaire progresse fortement alors que pour l'OCDE, on a une forte baisse de la demande de charbon et de pétrole. Le point significatif, c'est la progression des renouvelables sauf pour l'hydraulique car le potentiel dans ce domaine a déjà été largement utilisé, et ce sont donc les autres renouvelables qui progressent.

La consommation d'énergies renouvelables va être multipliée par trois et en ce qui concerne l'électricité, la part des renouvelables, qui s'élevait à 19% en 2008, devrait monter à un tiers en 2035. L'Union Européenne (UE), pionnière dans le renouvelable, a beaucoup d'avance mais semble de plus en plus concurrencée par les Etats Unis et par la Chine dans leur souci de diversifier leur mix énergétique. Il y aura donc de plus en plus de concurrence entre les zones, et plus particulièrement en ce qui concerne la fourniture des installations et des équipements. Sur ce point, le Congrès américains a d'ailleurs débattu sur la nécessité de soutenir le renouvelables sachant que les équipements vont de plus en plus venir de Chine. Au Brésil et en Inde également, les énergies renouvelables sont appelées à occuper une place de plus en plus importante.

- Le scénario 450 est le scénario le plus volontariste permettant d'arriver aux objectifs de limitation de rejet de carbone pour limiter le réchauffement climatique. Comment y arriver à des conditions économiquement supportables ? Par les économies d'énergie d'abord avec un plafonnement de la demande mondiale d'énergie. Par plus de diversification des sources ensuite : sans un scénario *business as usual*, on a déjà des niveaux d'émissions bien moindres que ce qu'on a pu connaître dans le passé. Le scénario NPS table sur une croissance de la demande de 1,2 % mais pour arriver au scénario 450, il faut réduire la croissance de la demande de 0,7 % par an : effort considérable compte tenu de la croissance démographique mondiale.

Comment arriver au scénario 450 PPM ? Il faudrait à partir de 2020, avoir une inflexion très forte des tendances actuelles qui passe par plusieurs actions :

- L'efficacité énergétique constitue la moitié de l'effort : Ce sont des mesures pas forcément les plus spectaculaires mais les résultats sont garantis.



- La décarbonisation des systèmes électriques. 80 % de la production d'électricité en Chine ou en Inde se fait sur la base de carbone. Le poids des énergies fossiles est également très important aux Etats Unis et en Allemagne. Le développement des énergies renouvelables à hauteur de 21% est donc indispensable. En parallèle, l'AIE estime que le nucléaire devrait également jouer un rôle à hauteur de 9% (chiffre avant Fukushima).
Le CCS, enfin, devrait également permettre de réduire de 15% les émissions par le biais de la capture et du stockage du carbone. Technique prometteuse, le CCS n'est malheureusement pas compétitif sur le plan économique pour l'instant.

Le renouvelable, après l'efficacité énergétique, est donc le 2^e contributeur le plus important pour la réduction des émissions de CO2 dans l'atmosphère. La Chine à elle toute seule devra compter pour un tiers des efforts à fournir alors que l'Europe, du fait de l'avance qu'elle a prise, devra également contribuer mais dans des proportions relativement moins importantes.

Dans tous les scénarii, on constate de toutes les façons une très forte progression de la part des renouvelables pour la production d'électricité. Selon le scénario en effet, les renouvelables constitueraient 45% (450ppm Scenario) ou 30% (NPS) pour une part actuelle de 18%. Dans le secteur des transports également, les biocarburants de seconde génération font figure de contributeurs importants pour la décarbonisation. Les perspectives sont donc positives dans l'ensemble des secteurs et notamment le transport.

Les problématiques à venir

Le développement des énergies renouvelables est passé par l'instauration de politiques actives de soutien évaluées, au niveau mondial, à 57 milliards de dollars US en 2009. Ce chiffre devrait passer à 200 milliards d'ici 2035. On parle souvent de subvention mais c'est un peu impropre car la plupart du temps, la technique utilisée est celle des tarifs de rachat obligatoire faisant porter le coût par le consommateur. L'objectif est de favoriser le développement de filières émergentes et de les faire arriver à la compétitivité en diminuant le coût des équipements.

Les politiques de soutien, néanmoins, ne vont pas sans poser un certain nombre de problèmes, notamment sur la question des tarifs de rachats. Le système d'aide au photovoltaïque en France en est un bon exemple : il souligne le problème de durabilité sur le plan du soutien financier. Il existe de fait des effets d'aubaine qui rendent le système ingérable sur le long terme et il est donc important que les politiques de soutien soient suffisamment flexibles pour s'adapter à la baisse des coûts d'équipement.

L'AIE a eu l'occasion de déterminer un certain nombre de bonnes pratiques en comparant les politiques de soutien dans les différents pays. Les étapes suivantes ont été identifiées pour la mise en œuvre réussie de politiques de soutien efficaces :

- Le traitement des obstacles non-économiques, notamment les procédures administratives ;
- Assurer la transparence et le caractère prévisible des dispositifs d'incitation ;
- Mettre en place des systèmes d'aide qui soient transitoires et qui diminuent au fur et à mesure que les technologies progressent ;
- Prendre en compte l'intégration dans les réseaux pour rendre moins difficile la gestion de la variabilité de la production de certaines énergies renouvelables, notamment le solaire et l'éolien.

L'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques intelligents

La demande d'électricité est très variable et se caractérise par une saisonnalité forte associée à des pics journaliers et hebdomadaires. La demande est donc très difficile à prévoir en cela qu'elle est particulièrement erratique. On constate ainsi qu'avec un taux important d'éolien et de solaire, on a beaucoup plus de mal à gérer les variations de la demande dans le temps et dans l'espace qu'avec un mix composé d'énergies moins variables dans leur production. Il faut donc soit des systèmes de *back-up* pour la production de pointe, soit une gestion intelligente de la consommation du côté de la demande.

La gestion de la demande passe alors par le développement des réseaux intelligents, les *smart grids* mais également par la possibilité de stocker l'électricité, et d'assurer l'existence d'interconnexion avec les marchés voisins. L'exemple de l'électricité scandinave est de ce point de vue tout à fait révélateur : le mix se compose essentiellement d'électricité d'origine hydraulique en provenance de Norvège, d'éolien produit au

Danemark, et de beaucoup de nucléaire suédois. L'AIE, en étudiant la flexibilité des systèmes entre les pays développés, constate en revanche que le Japon est peu flexible en raison de son manque d'interconnexion (insularité) et de la multiplicité de petits systèmes électriques régionaux.

R&D / Feuilles de route de l'AIE

Le développement des technologies est indispensable sur les sources d'énergie comme sur les réseaux. Beaucoup d'efforts ont déjà été réalisés en 2009 dans le cadre des programmes de relance et il est important de poursuivre dans cette voie.

Les Feuilles de route proposées par l'AIE ont pour ambition de favoriser les investissements en fournissant des analyses de long terme sur les possibilités de réduire les coûts d'exploitation des différentes énergies renouvelables dans chaque région.

A un moment où les énergies fossiles, et notamment le pétrole, deviennent durablement chères, les renouvelables sont appelés à se développer partout dans le monde. Pour que ca se produise, les politiques de soutien seront indispensables sur le long terme.

Questions:

1. Si on n'intensifie pas nos efforts et qu'on garde la cadence actuelle, on atteint les 450 ppm en 2025. Parallèlement, l'Allemagne qui refuse de produire le nucléaire nous impose de le produire pour elle en important notre électricité alors même que le transport est source de déperdition (au moins 5%). Qu'en pensez-vous ?

« On est effectivement loin de la trajectoire des 450 PPM et la décision de l'Allemagne ne va certainement pas dans le bon sens. »

2. Vous avez évoqué le problème des gaz de schistes. Avez-vous, dans le cadre de l'agence, des études concernant l'exploitation de ce type d'énergie.

« L'AIE n'est pas un organisme technique et ce n'est donc pas la mission de l'AIE d'apporter une expertise scientifique sur ces domaines. Dans nos scénarii en revanche, on intègre le développement des gaz de schiste aux Etats unis. Est-ce que ca va se développer ailleurs ? Probablement en Chine avec un potentiel très important. La Pologne également. Les pays qui développent cette énergie le font car ils ont une incitation forte en termes de politique énergétique. Si on écoute les experts : le schiste pose des problèmes mais ces problèmes sont gérables. En Europe en revanche, on est assez sceptique sur le développement des schistes en raison des problèmes de coût et d'environnement. »

3. Est-ce que l'AIE croit au scénario 450 qui implique une croissance du nucléaire qui n'est plus à l'ordre du jour ? Ce qui serait vraiment important, ce serait d'indiquer en milliards quels sont les investissements à réaliser à l'échelle de l'Europe et de chaque pays plutôt que de fixer des objectifs en termes de production.

« Le scénario 450 est un scénario politique ambitieux qui vient des négociations sur le changement climatique. Notre message c'est que pour l'instant de dire que le 450 PPM est de plus en plus impossible à réaliser. Sur l'importance des investissements à réaliser, le manque de nucléaire pose de très gros problèmes. Et sur le renouvelable, on a une baisse des coûts spectaculaire combinés à un prix de l'électricité qui augmente et rend donc relativement plus compétitif les énergies renouvelables. Le choix nucléaire allemand augmente de 10% le coût de l'électricité en Europe. On verra ça l'hiver prochain. »

X – Photosynthèse artificielle : des concepts de base aux développements récents

Marc Fontecave est issu de l'ENS de Cachan et est actuellement professeur au Collège de France. Il est spécialiste de la production photochimique d'hydrogène dans les systèmes biomimétiques de photosynthèse. Il travaille au Laboratoire de Chimie et Biologie des Matériaux à l'Université Joseph Fourier, au CNRS ainsi qu'au CEA de Grenoble.

Je remercie tout d'abord Jean-Marie Tarascon ainsi que les CHADOC (Chercheurs Associés et Doctorants du Collège de France) pour l'organisation de ce colloque qui mélange les sciences dures ainsi que les sciences humaines et sociales comme l'économie et la politique. Mon exposé va traiter de choses plus techniques, à savoir de la photosynthèse artificielle et du soleil. Je vais essayer de vous décrire le fantastique mécanisme qu'est le phénomène de photosynthèse par les plantes et les micro-organismes, et comment on peut s'en inspirer pour créer les catalyseurs de demain. Je vous parlerai donc du type d'expérience que l'on mène actuellement dans nos laboratoires afin de vous illustrer la démarche.

Evidemment, toute cette recherche ne se fait pas sans hommes et femmes de talent, et le travail pour ce qui concerne mon laboratoire est fait étroitement en collaboration avec Vincent Artero qui est un chimiste exceptionnel, ainsi qu'avec beaucoup de jeunes brillants, post-doctorants ou thésards. C'est une recherche qui s'est faite aussi beaucoup au CEA, qui ne s'intéresse pas seulement à l'énergie atomique, mais aussi aux énergies alternatives. Il y a un certain nombre de laboratoires du CEA, en particulier à Grenoble et à Saclay, qui ont contribué à ces résultats.

Capter l'énergie du Soleil

Le Soleil fournit une puissance sur Terre de presque 100.000 TW (un Watt équivaut à une joule par seconde), ce qui est considérable à côté des 10 à 15 TW de consommation de la planète. Il y a donc quelque chose à tirer du Soleil, d'où toutes les stratégies pour transformer cette énergie, soit en électricité soit en carburant.

Nous avons trois grandes branches : premièrement la conversion de l'énergie solaire en énergie chimique, c'est la photosynthèse naturelle, qui correspond à environ 100 TW, lesquels sont stockés sous forme de biomasse à la surface de la planète. Il s'agit là de toutes les molécules contenues dans les organismes vivants, dans les plantes etc. Une autre façon de convertir cette énergie est le photovoltaïque, qui correspond à une conversion d'énergie solaire en électricité. On ne le dit d'ailleurs jamais assez, mais l'avenir sera très électrique, et une grande partie de nos énergies seront transformées en électricité. Et enfin, il y a la photosynthèse artificielle.

Pour cela, on va parler des cellules de Grätzel (du nom du chimiste Michael Grätzel). Bien qu'il ne s'agisse pas là de photosynthèse à proprement parler, dans la mesure où il n'y a pas de production de carburant mais d'électricité, nous y reviendrons car les principes sont les mêmes.

La photosynthèse artificielle permet de créer des carburants de synthèse, soit par la réduction du dioxyde de carbone, produisant des composés comme le méthane, le méthanol ou l'acide formique, mais j'en dirai peu car on a très peu avancé dans ce domaine. La deuxième façon, c'est la photodécomposition de l'eau, qui convertit l'eau en hydrogène, ce dernier étant un carburant.

La photosynthèse

La photosynthèse est un processus à faible efficacité. Les systèmes vivants ne font pas de la photosynthèse avec des rendements de 100% : chez les plantes, le rendement est inférieur à 1%, et dans les

micro-organismes photosynthétiques, on atteint difficilement les 3 à 4%. Il faut noter par ailleurs que le maximum théorique n'est que de 10%.

La photosynthèse naturelle se produit dans les organismes photosynthétiques (plantes, micro-algues, cyanobactéries). Comment convertir de l'énergie lumineuse en carburant ? On entend par carburant toutes les molécules comme les carburants cellulaires, les sucres, les molécules synthétisées dans un organisme vivant.

Pour cela, il faut capter les photons de la lumière, ce qui se fait au niveau d'un système multi-protéique d'une très grande complexité, lequel conduit à une excitation d'électrons générant à leur tour un courant électrique au niveau d'une chaîne de transfert d'électrons. On appelle ce phénomène le PS II (photosystème II).

Malheureusement, ces électrons perdent de l'énergie au niveau de la chaîne, et un deuxième processus, appelé PS I, réénergise ces électrons par l'effet d'un autre photon, qui ensuite conduit à la production d'un réducteur biologique, le NADPH.

Ce dernier intervient dans la conversion du CO₂ qui est capté par ces organismes en carburant cellulaire. Les électrons impliqués proviennent de l'eau, qui est oxydée, libérant ainsi de l'oxygène (c'est ici un déchet qui peut s'avérer utile). Le bilan de la réaction, c'est donc de l'eau + de la lumière + du CO₂ pour créer de l'O₂ et du glucose (ou autre molécule organique).

Pour cette réaction, il faut une molécule appelée un « photosensibilisateur » qui capte les photons, des chaînes de transfert d'électrons et des catalyseurs pour réduire le CO₂ et pour oxyder. Toutefois, il faut bien savoir que la nature ne « réduit » pas le CO₂ en méthanol ou en acide formique comme on essaie de le faire en laboratoire. C'est un mécanisme très complexe qui mène à ce que le CO₂ soit intégré à ces organismes pour donner à travers des transformations des molécules organiques. Ainsi, quand on parlera de photosynthèse artificielle, pour ce qui est de la réduction de CO₂, on ne mimera pas le vivant.

On a donc une conversion du CO₂ en molécules organiques. Mais il y a certains micro-organismes (micro algues) qui utilisent la même chaîne de transfert d'électrons photosynthétique, mais qui réduisent les protons en hydrogène. Autrement dit, ces organismes ont la capacité de faire de la photodécomposition de l'eau en H₂ et O₂.

Le chimiste s'intéresse naturellement à ces procédés car sur une plus grande échelle, ils permettent de fabriquer des sucres ou de l'hydrogène. D'un côté, on a le photosystème II dont le principe est le suivant : on a un photosensibilisateur comme la chlorophylle, qui sous l'effet de la lumière, fait passer un électron de son état fondamental à un état excité. Dans cet état qui est très instable, cette molécule a la capacité de donner des électrons à très bas potentiel qui vont contribuer à réduire des protons et du CO₂ pour créer des molécules organiques.

Les débuts de la photosynthèse artificielle

Quels sont tous les problèmes qu'il faut résoudre si nous voulons copier ce système ? Le premier est d'avoir des molécules qui absorbent bien la lumière du soleil. L'eau n'absorbe pas la lumière du soleil, d'où la nécessité de photosensibilisateurs comme la chlorophylle pour créer cet état de séparation de charges.

Le deuxième est de stabiliser cet état, d'où la nécessité de mettre en place de chaînes de transfert d'électrons qui vont éjecter cet électron le plus loin possible de manière à n'avoir pas de recombinaison. Enfin, des catalyseurs sont nécessaires pour réduire le substrat, car les réactions sont extrêmement lentes sur le plan cinétique. En particulier du côté du photosystème, l'oxydation de l'eau en oxygène se fait à partir d'un système à base de manganèse et de calcium qui nous montre la voie pour un futur catalyseur de synthèse.

Une fois ce système bien compris, peut-on le copier pour bien construire des dispositifs qui reproduisent des éléments de la photosynthèse. Michael Grätzel, professeur à l'EPFL, a mis en place un système de photosensibilisateurs à base de ruthénium capable d'imiter la chlorophylle en ce qu'elle permet de faire passer un électron d'un état fondamental à un état excité, et ce photosensibilisateur a été déposé sur des nanoparticules d'oxyde de titane, permettant de récupérer les électrons et éviter la recombinaison de charges.



D'une certaine façon, cela modélise la chaîne de transfert d'électrons. Ces électrons passent ensuite dans un circuit, et arrivent sur une 2^e électrode où ils réagissent au sein d'un système Redox qui permet de faire passer ces électrons et remplir le « trou » créé. Le circuit est donc totalement fermé, et il génère du courant. On a donc une vraie conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique. Certains éléments ressemblent à la photosynthèse.

Ces systèmes peuvent atteindre des rendements de plus de 10% (le rapport entre l'énergie fournie en termes de soleil et l'énergie récupérée sous forme de courant électrique). Il y a beaucoup de recherche sur la structuration des oxydes, sur les photosensibilisateurs, sur le système Redox qui permet la circulation des électrons. C'est un domaine en plein développement.

Fabriquer du carburant à partir du Soleil

Passons maintenant à la conversion d'énergie solaire en carburant, qui rentre vraiment dans le cadre de la photosynthèse artificielle, et je ne parlerai pas de la réduction du CO₂, bien qu'il s'agisse de projets qui connaissent une renaissance partout dans le monde. Je développerai essentiellement la production d'hydrogène à partir de l'eau.

C'est un rêve, une vision particulièrement excitante : prendre du soleil, de l'eau, et avoir de façon presque infinie, le carburant qu'est l'hydrogène, que l'on peut utiliser dans les piles à combustible ensuite. L'hydrogène amène avec lui, il faut le reconnaître, son lot de désavantages, mais ce n'est pas là l'objet de cette conférence.

Si l'on simplifie ce que fait la nature, on a un photosystème avec le contexte de manganèse et de calcium, qui est capable de tirer les électrons de l'eau. C'est la première étape. Chez les organismes vivants, il y a certaines enzymes, appelées hydrogénases, qui sont capables de récupérer les électrons et de réduire les protons pour donner de l'hydrogène. Voilà les deux grands systèmes biologiques qui font la photodécomposition de l'eau.

Cette première phase est thermodynamiquement défavorable, car il faut tirer 4 protons et 4 électrons de l'eau. Il faut former une liaison oxygène-oxygène à partir de deux molécules d'eau, sans parler de tout un système de collecte de la lumière. La deuxième phase est plus facile car la réaction est thermodynamiquement favorable. Elle n'a pas besoin de lumière. Il faut combiner deux protons et deux électrons pour donner une molécule d'hydrogène.

Un système artificiel de photosynthèse fonctionne de la même manière. Il faut des molécules qui collectent la lumière et qui séparent les charges efficacement en évitant la recombinaison. Ces molécules peuvent être des molécules organiques (il y a beaucoup de recherche sur ce type de molécules, notamment sur les semi-conducteurs). Une fois que cette énergie se traduit par une excitation du photosensibilisateur, il faut un catalyseur pour oxyder l'eau et donner des électrons pour compléter le trou qui a été créé, et les électrons excités partent pour réduire les protons et former de l'hydrogène, et ici aussi il faut un catalyseur. Il y a donc deux aspects : collecte de l'énergie et catalyse. Ces catalyseurs sont des entités très particulières qui sont construites pour accumuler plusieurs électrons (plusieurs « trous », ou « potentiels réducteurs) et les recracher d'un coup.

Le catalyseur : un vrai défi

Regardons à présent les problèmes des catalyseurs. Le processus de photolyse permet de transformer l'eau en hydrogène, cet hydrogène étant ensuite retransformé en eau avec sa combustion dans une pile à hydrogène par exemple. Le bilan n'entraîne aucune production de CO₂.

Comme on l'a vu, ces réactions sont cinétiquement très lentes, d'où la nécessité d'utiliser des catalyseurs. Or la plupart des catalyseurs sont aujourd'hui fabriqués à partir de métaux nobles, comme le platine, le rhodium, etc. Mais ces métaux coûtent cher, avec un facteur de 1000 à 10.000 entre les prix du platine et du manganèse ou du fer. L'autre problème, c'est que le platine est en quantité limitée. On ne peut donc pas imaginer le moteur à hydrogène si on ne règle pas d'abord le problème de la catalyse. C'est ici que les chimistes ont leur rôle à jouer. Si on devait mettre une pile à hydrogène sur tous les véhicules de la planète (700 Mio de véhicules), nous n'aurions de platine que pour 15 ans.

Le rêve du chimiste est donc de créer une cellule photoélectrochimique sans métaux nobles avec une photoanode qui modélise le photosystème (c'est à dire qui remplace la chlorophylle par exemple), et qui capte les photons, excite les électrons, lesquels réduisent ensuite les protons en hydrogène. Pour cela, il faut aussi des catalyseurs, qui peuvent être des oxydes de manganèse (ce qui ressemble au photosystème II), mais aussi

des complexes de manganèse et de calcium, ou des oxydes de cobalt. Au Collège de France nous travaillons, notamment dans le laboratoire de Clément Sanchez, sur des oxydes de fer et des catalyseurs à base de cobalt.

Beaucoup de chercheurs se focalisent aujourd'hui sur l'oxyde de fer comme catalyseur parce que c'est un élément peu cher, très abondant, qui absorbe la lumière visible. Il a aussi plusieurs inconvénients, et c'est la raison pour laquelle il y a tout un travail qui a été mis en œuvre pour optimiser l'oxyde de fer comme élément photosensibilisateur. Beaucoup de travaux se focalisent aussi sur les oxydes de tungstène.

Les hydrogénases : des catalyseurs cathodiques

Pour ce qui est de la cathode, les hydrogénases sont particulièrement inspirantes. Il s'agit d'enzymes qui catalysent la conversion de protons en hydrogène ou l'oxydation de l'hydrogène en protons. Elles travaillent exactement au potentiel Redox thermodynamique.

Ces hydrogénases sont le platine du vivant. Des structures aux rayons X ont été obtenues pour ces molécules, et il est remarquable qu'elles ne contiennent pas de platine mais des métaux comme le nickel et le fer. Si la nature a pris du nickel et du fer et non pas du platine, c'est une bonne nouvelle. Dans leur site actif, on voit que ces molécules contiennent du cyanure et du monoxyde de carbone !

Nous avons donc essayé de travailler sur la base de complexes de nickel, et on a mis au point un catalyseur que l'on a posé sur des électrodes d'électrolyseur de pile à combustible, et on a découvert ainsi un catalyseur doué pour l'oxydation et la production d'hydrogène, capable de faire plusieurs milliers de cycles catalytiques, compatible avec les piles à combustible usuelles, avec une surtension proche de celle du platine et qui est résistant au monoxyde de carbone. Pour le moment, on l'améliore et on l'étudie encore, car les densités de courant sont encore trop faibles par rapport au platine. Toutefois, avec une approche bioinspirée, nous sommes arrivés à créer un catalyseur avec des propriétés remarquables.

La démarche bioinspirée que je vous ai indiquée est actuellement développée par énormément de mes collègues dans le monde, avec la mise en place de photoanodes (qui à mon avis resteront des matériaux, des oxydes), de catalyseurs à base de nickel ou de cobalt, ainsi que des cathodes qui devront être des photocathodes, car les électrons seraient sinon trop déchargés.

Pour conclure, je tiens à rappeler que ce qui meut toute cette recherche est la démarche bioinspirée, c'est à dire la tentative d'imiter le vivant dans ce qu'il sait faire de mieux.

Questions

1. Le CO₂ est très dilué dans l'atmosphère, et les plantes utilisent cet environnement. Comment faire si on est dans une logique de génie chimique avec des objectifs plus chiffrés et des concentrations plus fortes ?

« Oui, il faut concentrer le CO₂, et les projets de faire des cellules électrochimiques devront fonctionner avec des concentrations plus élevées. Concentrer (et donc capter le CO₂ de l'atmosphère) n'est pas évident. Mais on a des projets de stockage (CSS) et on pourra s'en servir pour ça. »

2. Oui, mais ma question était que ces systèmes naturels sont conçus pour fonctionner avec des niveaux très bas (dilués).

« Effectivement. La recherche ne s'est pas encore attaquée à cette question. »

3. Le problème n'est-il pas justement du côté de la photoanode, plutôt que du côté de la cathode ?

« Du côté de l'anode, il est vrai que nous avons des problèmes d'oxydation (oxyde de fer), mais c'est sans doute parce que je travaille essentiellement sur la cathode ! (rires) »

4. On ne pourra pas utiliser l'hydrogène dans les avions car la vapeur d'eau est un gaz à effet de serre.

« Oui, mais comme l'eau a été prise sur terre, le bilan reste nul. »

5. Les hydrogénases ne marchent pas, car elles sont vulnérables à l'oxygène. Et aussi bien en théorie qu'en pratique de tels systèmes ne sont pas viables.

« On fait actuellement des molécules de plus en plus résistantes à l'oxygène, et donc à l'oxydation. »

XI – Technologie pile à combustible : quels seront les gagnants ?

Après avoir dirigé un laboratoire centré sur l'hydrogène et les piles à combustible au Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) de Grenoble, Florence Lefebvre-Joud s'y charge aujourd'hui de la coordination des programmes sur la même thématique.

Les piles à combustible connaissent un réel problème : leur durée de vie. Pour que cette technologie devienne viable, il faudrait pouvoir atteindre au moins 40.000 heures. Et c'est autour de cette problématique que va se dérouler cette conférence.

Ma conférence va traiter de trois grands aspects : d'abord de la technologie des piles à combustible, où je parlerai du principe de fonctionnement, des différentes technologies ainsi que de leur rôle possible dans le paysage énergétique d'aujourd'hui. Une deuxième partie sera consacrée à une brève revue de l'état de l'art international : quels sont les programmes de déploiements pour le transport, la cogénération et les marchés précoces ? Où se situe la France ? Puis ma troisième partie se focalisera sur les conclusions à tirer et les perspectives d'avenir pour cette technologie : quelle technologie pour quelle application ? Qu'est-ce qui conditionne l'entrée des piles à combustible sur le marché ?

Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Comme une batterie, une pile à combustible transforme directement et de façon continue de l'énergie chimique en énergie électrique. Il faut pour cela une réaction très exothermique. On appelle ça l'enthalpie.

La réaction chimique globale est décomposée en deux réactions d'électrodes faisant intervenir un ion commun qui migre dans l'électrolyte, et produit un courant électrique. L'hydrogène est donc oxydé à l'anode, et l'oxygène est réduit à la cathode. Il s'établit une tension aux bornes de la cellule.

Contrairement aux piles traditionnelles ou aux batteries, l'énergie n'est pas stockée dans le volume du générateur électrochimique mais dans des réservoirs de gaz continuellement renouvelables. En d'autres termes, le potentiel d'énergie n'est pas stocké dans la pile. Ainsi, seul le paquet « pile à combustible + réservoirs » peut être assimilé à une pile ou une batterie classique.

La bonne pile à combustible

Comment faire une bonne pile ? En effet, plus on tire du courant, plus la tension diminue. En fonctionnement, le passage d'un courant engendre des phénomènes irréversibles qui dissipent une énergie thermique non récupérable sous forme d'énergie électrique. Il y a donc une composante ohmique (résistance électrique) qu'il s'agit de limiter au maximum. Selon les systèmes et la qualité des interfaces ou des catalyseurs, il peut y avoir une accumulation de charges, et pas de transfert, ce qui conduit à une perte de puissance.

Pour faire une bonne pile, il faut donc que la conductivité soit maximale, à la fois dans l'électrolyte (la solution ionique) que dans les électrodes. L'électrolyte doit par ailleurs avoir une bonne étanchéité entre O₂ et H₂. Les électrodes doivent, en plus d'être conductrices, être stables et poreuses. Enfin, d'un point de vue d'architecture générale, il faut limiter toute résistance en facilitant la circulation des espèces chargées et gazeuses.

Deux technologies de piles font actuellement l'objet de nombreuses études car elles ont de meilleures performances : la pile SOFC (fourchette de températures 600-1000°C) et la pile PEMFC (50-180°C).

Une pile SOFC est entièrement en céramique. Elle n'a pas besoin d'être alimentée en hydrogène pur, et c'est celle qui tolère le mieux les impuretés comme le soufre dans le gaz. Son point faible est qu'elle est en céramique, donc très fragile. Par ailleurs, les phases transitoires sont lentes, c'est à dire qu'elle met du temps à chauffer ; de fait, elle ne serait pas adaptée pour une utilisation dans une voiture qui doit démarrer tout de suite. Bloom Energy a développé ce type de piles et connaît actuellement beaucoup de succès. Ils équipent notamment des bâtiments.

Pour ce qui est de la pile PEMFC, sa structure est à base de Téflon (pour l'électrolyte). Toutefois, ce type de pile a besoin de catalyseurs. Sa durée de vie est insuffisante et elle reste très sensible aux polluants et aux impuretés.



Quelle place pour ces technologies aujourd'hui ?

La pile à combustible s'inscrit dans une longue perspective historique. En 1839 a eu lieu la première démonstration en laboratoire de la pile à combustible par Sir W. Grove (4 cellules en série). En 1869, mise au point d'une pile alcaline fonctionnant à 400-500°C.

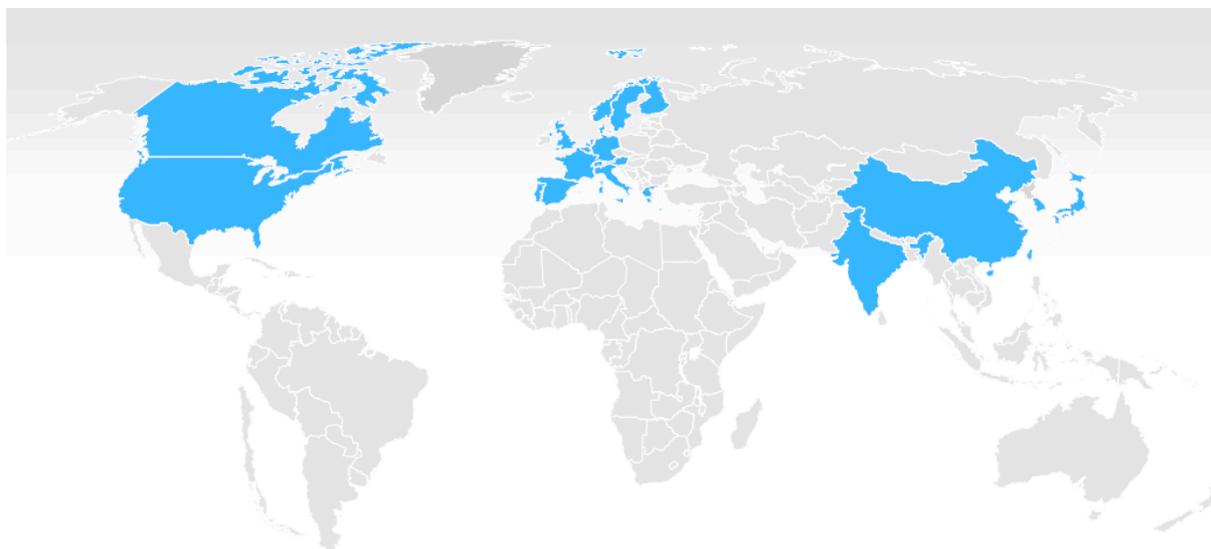
Mais c'est surtout au XXe siècle que la pile a connu un véritable essor : on l'a essentiellement utilisée dans les navettes spatiales sur lesquelles on embarquait des réservoirs d'hydrogène et d'oxygène afin de créer de l'eau et de l'énergie pour les astronautes.

Au XXIe siècle, il y a un changement de paradigme : Nous avons besoin de convertisseurs d'énergie à hauts rendements, et les piles à combustible en sont. Le principe, c'est de récupérer l'enthalpie libre, autrement dit, la part d'énergie chimique pouvant être convertie en énergie électrique. Il faut pour cela un taux d'utilisation proche de 100% (peu d'usure) ainsi que de bons conducteurs. On a ainsi des rendements de 40% à 60%. Pour les véhicules, la pile à combustible reste ainsi toute de même plus intéressante que les moteurs essence ou diesel en termes de rendement.

Par ailleurs, quand une cellule est intégrée dans un système, on s'aperçoit que le rendement sur chaque cellule reste stable même si la puissance varie (alors que ce n'est pas le cas d'un moteur thermique), d'où l'intérêt de l'hybridation.

L'état de l'art international

Les pays en bleu affichent une politique forte en faveur des piles à combustible. Aux Etats-Unis, le DOE (Department of Energy) a une politique très volontariste. Dans l'Union Européenne, on assiste à de nombreuses initiatives publique-privé. Le programme scandinave à lui seul représente quasiment autant que le programme de l'Union Européenne. Parmi les pays d'Europe continentale, les Allemands affichent aussi une politique très volontariste.



Les Etats-Unis ont mis en évidence qu'il existe des niches de marché pour la pile à combustible, notamment l'utilisation dans les véhicules utilitaires. On a assisté à un décollage de la production de ces véhicules dans les années 2007-2008-2009. Il existe également beaucoup d'aides aux Etats, notamment en Californie, où l'on trouve de nombreuses stations service où il est possible de faire le plein d'hydrogène. L'autonomie des véhicules est généralement de 300 à 500 km, et la pile connaît une faible usure. On parle au Japon d'une autoroute hydrogène pour bientôt, et les plus grands producteurs automobiles comme Toyota, Nissan et Honda s'y sont mis.

Pour ce qui est de l'efficacité, le mieux reste encore l'électrique pour les faibles distances. Pour le reste, il faut se rabattre sur les hybrides électrique-essence. Mais bientôt, les hybrides pile à combustible-essence feront leur entrée sur le marché. Le moteur thermique (à essence) sert essentiellement pour le démarrage car la pile a généralement besoin d'être chauffée avant de pouvoir être utilisée, surtout la pile

SOFC. L'hydrogène, d'un autre côté, sert à garantir l'autonomie. De premières voitures sont déjà disponibles en leasing, pour des prix certes encore élevés (600\$/mois).

Au Japon toutefois, il n'y a pas que dans les véhicules que le marché se développe : un marché est en train de se créer pour des chaudières électrogènes à pile à combustible.

En Allemagne, il y aura bientôt une autoroute Berlin-Hambourg. De telles initiatives ouvrent la voie pour Europe.

En France, de nombreuses questions ont été posées, mais il a été créé une plateforme pour mettre en place une feuille de route. On dispose actuellement de la feuille de route et nous sommes actuellement dans une phase d'appel à projets.

Les applications/marchés pertinents

Selon la puissance requise et le type d'installation, il faut faire appel à différents types de piles (PEMFC, SOFC, DMFC, MCFC, PAFC etc.). En partant du moins gourmand au plus gourmand en énergie, on pourra avoir des applications dans les équipements nomades (tourisme, soldat de demain), sur les sites isolés (bornes, pylônes télécom, gites, habitations isolées...), pour la cogénération domestique (maisons individuelles, quartiers, habitations collectives), pour le transport (véhicules utilitaires, flottes captives, véhicules de tourisme, gros transport), et pour l'industrie, voire pour le couplage au réseau électrique général.

Pour les équipements nomades, la pile PEMFC fournit les meilleurs résultats. Par ailleurs, pour des pays comme l'Inde où l'utilisation du téléphone portable est très courante, il faut alimenter les pylônes télécom isolés et la pile à combustible est une solution efficace.

Les verrous au déploiement de la pile à combustible

Pour que cette énergie soit pertinente, il faut un pouvoir fabriquer un hydrogène à faible empreinte carbone. Il ne peut donc pas provenir du charbon (comme ce qui se fait actuellement en Allemagne). Il manque encore par ailleurs les structures de distribution de l'hydrogène qui sont soit insuffisantes, soit inexistantes. Or ces structures sont coûteuses, et ne se rentabilisent que si suffisamment de personnes utilisent ce système. C'est le serpent qui se mord la queue. Et c'est dommage, parce qu'en Espagne, où selon l'époque ils doivent débrancher les éoliennes car ils ont une surproduction d'électricité, cette énergie pourrait être stockée sous forme d'hydrogène si les infrastructures étaient reliées. On pourrait ainsi gérer la variation de production d'énergie. Un autre verrou reste l'absence de réglementation unifiée à propos du transport/stockage de l'hydrogène entre les pays.

Mais la pile à combustible connaît aussi certains verrous technologiques. On ne sait pas encore comment se passer efficacement du platine comme catalyseur. Il faut aussi pouvoir rendre les prix compétitifs, et les piles durables. Pour ce qui est des piles SOFC en céramique, il faut trouver un palliatif à leur fragilité.

Enfin, un des problèmes sur lesquels nous travaillons actuellement est la dissolution du carbone de la pile qui devient moins dense, mais également moins conducteur, bien qu'il facilite le passage des gaz. Un autre problème est que le platine a tendance à migrer vers la membrane où il ne sert plus à rien. On travaille actuellement sur des systèmes de régénération de piles. On a ainsi assez peu de dégradation sur une durée de vie d'environ 3000 heures.

Pour conclure, je voudrais rappeler qu'il n'y a pas de solution miracle. Les piles PEMFC et SOFC sont jugées prometteuses, mais elles doivent encore être améliorées. Ce n'est pas non plus une solution unique : pour le transport ces piles seront souvent associées à des batteries. Enfin, il faut impérativement trouver un combustible à faible empreinte carbone pour que cette nouvelle technologie soit pertinente.

Questions

1. Les rendements indiqués sont très intéressants, mais prennent-ils en compte l'étape de compression du gaz ? Et si non, est-ce que cela représenterait une perte de rendement importante ?

« Non, cette phase n'est pas prise en compte. Mais au delà de 700 bars, ça n'en vaudrait de toute manière plus la peine. »

2. Peut-on embarquer de l'éthanol et du méthanol pour le reformage de la pile ? Cela poserait-il des problèmes de sécurité ?

« Oui, il y a des problèmes de sécurité, notamment car l'hydrogène à une flamme incolore. Mais ce ne serait pas plus dangereux que le GPL si la technologie est bien maîtrisée. »

3. Les piles ne sont pas encore compétitives d'un point de vue coût. Par quel facteur ? 1, 2 3 ?

« La pile à combustible n'a pas de production automatisée. C'est donc comme de la haute couture. Avec les aides gouvernementales, on arrive à un facteur 2-3. Le vrai problème, c'est le platine, mais il faut tout de même amorcer le marché. »

4. En France, les moyens de recherche pour cette pile ont été réduits : le cahier des charges n'était pas le bon, car on voulait remplacer le moteur thermique. En effet, il est impossible de déployer des stations service sur tout le territoire : les pétroliers ne le feront jamais. En revanche, il faut l'utiliser sur des flottes captives. Il faut donc des cahiers des charges pertinents. Ce ne sera jamais un substitut pour les moteurs thermiques.

« Effectivement, des flottes captives sont plus pertinentes. »

XII – Véhicules Electriques : l'impact de la batterie sur leur usage

Anna Teyssot est docteur de l'Ecole Polytechnique, spécialisée sur batteries électriques. Sa thèse s'est focalisée sur l'étude de l'interface lithium-métal. Elle travaille actuellement chez Renault pour la Direction Métier Electrochimie Batterie.

Je vais développer durant mon intervention l'état actuel d'utilisation de la batterie électrique dans les véhicules, ses paramètres clés, et ce qui se passe lors de son usage. Comment elle évolue, etc.

Historique de la voiture électrique

Mais d'abord, je souhaite inscrire la voiture électrique dans son cadre historique. L'aventure de la voiture électrique commence au début du siècle dernier, chez Renault notamment, et elle a été en concurrence avec le moteur thermique à ses débuts. Toute l'énergie pour faire fonctionner le véhicule était stockée dans la batterie. Le plomb est resté le roi pour toutes les applications pendant le XXe siècle. Le lithium-ion et métal ont ensuite pris le pas. Ces nouveaux matériaux permettent en effet d'emmagasiner plus d'énergie. Dans les années 1990, Sony commercialise la 1^{re} batterie lithium-ion, et c'est aujourd'hui la plus répandue. La technologie lithium métallique consiste à ne pas utiliser de matériaux d'intercalation au niveau de la batterie. Ce système fonctionne avec un polymère utilisé à chaud (notamment chez Bolloré). Ce type de technologie est potentiellement supérieur au lithium-ion.

Avec l'abondance et le développement du nucléaire dans les années 1990, Renault et surtout Peugeot ont fabriqué beaucoup de véhicules. Les premiers avaient une autonomie de 70km, et connaissaient une usure rapide. Ainsi, cette autonomie pouvait descendre jusqu'à 40km. En 1997, Toyota est le premier producteur à commercialiser en masse un véhicule équipé d'une batterie avancée. Cela a nécessité un grand effort de recherche. Il s'agissait d'un moment charnière, l'industrie de l'automobile électrique venait d'être bouleversée.

Les véhicules hybrides

Il existe différents niveaux d'hybridation, selon le type de véhicule et les fonctions souhaitées. Le micro-HEV (Stop/Start) permet des gains de consommation entre 3 et 7%.

Le Mild-HEV peut monter jusqu'à une économie de 15% (on trouve ici la technologie de récupération d'énergie de freinage). Enfin, le Full-HEV qui inclut, en plus du reste, la possibilité de faire de la route sur batterie électrique permet des économies de 30% en termes de consommation. On peut vraiment parler de

gains de consommation dans la mesure où le système fonctionne en cycle fermé : la batterie se recharge à l'essence quand le moteur thermique fonctionne.

Renault prévoit une gamme de nouveaux véhicules pour 2011-2012 qui bénéficieront de ces nouvelles technologies d'hybridation : la Kangoo Z.E et la Fluence Z.E. qui a gagné de nombreux prix au Challenge Bibendum sur la mobilité durable à Berlin en mai dernier. 2012 verra la nouvelle Zoe et la nouvelle Twizy, un mini-véhicule à une place sur quatre roues, entièrement électrique.

Les batteries des véhicules électriques doivent intégrer plusieurs facteurs clés :

- Performances (énergie & puissance)
- Coût (batterie & véhicule)
- Durée de vie (cyclage & stockage)
- Sécurité/Fiabilité (un « must aujourd'hui »)
- Cycle de vie & recyclage

Performances

Nous avons deux questions ici : quelles sont les performances batterie, les prestations du véhicule ? Les limites en autonomie sont-elles bloquantes ?

En termes de performances batterie, on a pour chaque application (et donc type de batterie) un ratio puissance-énergie différent. Le lithium-ion fournit aujourd'hui le meilleur ratio. Ces batteries sont ensuite construites de façon modulaire. On a des plaques qui sont modulables en « packs ». Ces plaques représentent une certaine quantité de Wh. La masse toutefois reste non-négligeable, car elle avoisine les 200kg.

Pour ce qui est de l'autonomie, la future Fluence aura une autonomie de 185 km (NEDC : véhicule déjà homologué), et une vitesse maximale de 135 km/h, ce qui peut parfaitement rivaliser avec des moteurs thermiques.

Les autres véhicules auront les autonomies suivantes : Kangoo, 170km NEDC ; Twizy, 100km ; Zoe, 160. De manière à prolonger l'autonomie, nous avons envisagé quatre mécanismes : la charge rapide de 30 minutes (à la maison, au bureau ou dans un parking), le système Quick Drop développé par Better Place qui permet de changer de batterie dans une station service (le conducteur n'est donc pas propriétaire de sa batterie), la navigation intelligente permettant d'optimiser le déplacement et de localiser les points de charge, et enfin une dernière possibilité, qui serait de mettre à disposition à des tarifs préférentiels des véhicules thermiques pour les très longs trajets.

Coût

Quel est le coût pour le client ? Comment cela se compare au thermique ?

Un véhicule électrique coûte cher, d'où la nécessité de mettre en place un modèle de « location » de la batterie, car il s'agit là de l'élément le plus cher. Ainsi le coût du véhicule serait réduit au profit d'un carburant un peu plus cher. Mais une telle « mutualisation » des batteries, comme on l'a vue dans le système Quick Drop permet d'optimiser l'usage des batteries et de réaliser une économie pour le client. Il s'agit à terme d'être compétitif sur le marché sans l'aide de subventions d'Etat comme le bonus écologique.

Durabilité

Les performances de la batterie évoluent : on parle dans le cadre de leur perte de puissance de « beginning of life », « middle of life », « end of life ». On parlera ensuite de 2^e vie, ou la batterie est nettement moins bonne, sauf si l'on arrive à stabiliser son état d'altération au delà d'un certain point. Vu le coût de la batterie, on n'envisage pas de remplacement. Il s'agit de gérer le vieillissement de manière optimale.

Sécurité

Chez Renault, on se pose la question de la sûreté des batteries : il est impossible de faire de compromis dans ce domaine.

La sécurité doit être au moins aussi sûre que celle d'un véhicule thermique, et cela doit se faire à trois échelles : celle de la cellule de la batterie, celle du pack (assuré par le BMS : Battery Management System) et

celle du véhicule (tous les véhicules électriques Renault subissent les mêmes tests de sécurité et d'homologation que les véhicules thermiques).

Cycle de vie et recyclage

Quel est le bilan CO2 de la batterie électrique en France et ailleurs ? Peut-on recycler les batteries ?

Il faut d'abord regarder d'où vient l'énergie électrique servant à alimenter ces nouveaux véhicules. En effet, si cette électricité provient de centrales à charbon, le bilan CO2 n'est pas amélioré. En revanche le nucléaire est une meilleure solution dans un premier temps. De ce point de vue, si l'on compare les émissions de CO2 en grammes par kilomètre d'un véhicule électrique en France, on s'aperçoit qu'elles sont de 5 à 6 fois plus basses que la moyenne européenne. En effet, les autres pays européens comme le Danemark ou l'Allemagne se servent de charbon pour leur énergie électrique.

En termes de recyclage, une directive européenne oblige à recycler ces batteries (qui n'utilisent pas de cobalt et pour lesquelles la technologie de recyclage n'a pas encore été bien mise au point). C'est donc un des grands défis que devront relever les producteurs automobiles dans les années à venir.

Et à l'avenir ?

Actuellement, les anodes des batteries sont fabriquées à partir de cobalt. L'idée sur le long terme est de les remplacer par du lithium ou du manganèse. On n'a pas de grand favori, car on peut varier selon les différents modèles de véhicules (qui correspondent à différents besoins). Pour l'avenir, il y a beaucoup de pistes. Il s'agit de porter tous ces systèmes vers une utilisation compatible avec les véhicules électriques. On a par ailleurs un tiraillement entre durée de vie et énergie. Il faut concilier les deux et obtenir le meilleur des deux mondes.

Questions

1. Dans les modèles de coût que vous nous avez présenté, prenez-vous en compte une taxe sur l'électricité ?

« Avec la démocratisation de la voiture électrique, la législation sur les taxes à appliquer à l'électricité pour les voitures électriques va sans doute évoluer. Toutefois, il y aura un boîtier dans le garage sur lequel vous rechargez votre véhicule et qui donnera une facturation spéciale. »

2. Vous parlez de technologies plus sûres car elles contiennent moins de cobalt. Ne sont-elles donc pas moins valables au recyclage ? Une écotaxe prendra-t-elle en compte le prix de ce recyclage cher ?

« Pas à ma connaissance, mais les batteries ont tout de même une valeur résiduelle. »

3. L'électricité ne vaut le coup que si elle est produite par le nucléaire, non ?

« Tout à fait, l'énergie doit provenir de sources sans carbone, ce qui ne se limite pas au nucléaire, bien entendu. Le mix français est aux alentours de 12 g/km par exemple, alors que le mix européen est de 62 g/km. »

4. Est-il possible de faire de la récupération de freinage ? La batterie peut-elle gérer une charge élevée en cas de fort freinage ?

« Absolument. Un système de freinage hydraulique permet de découpler l'énergie produite par le freinage et de la restocker. Pour ce qui est de la puissance, les systèmes sont parfaitement capables d'emmagasiner l'énergie récupérée. »

5. Renault vise-t-elle des véhicules petits (1-2 places) pour des zones urbaines ?

« On pense qu'il y a un marché, ce sont essentiellement des trajets du type aller-retour qui sont visés, avec la possibilité de recharger son véhicule dans un parking. »

XIII - 25 ans de développement durable: Quel Bilan ?

Dominique Bourg, Institut de Politiques Territoriales et d'Environnement Humain, Université de Lausanne

Il faut revenir sur la notion de développement durable. Nous fêterons bientôt l'anniversaire des 25 ans du rapport Brundtland. C'est donc l'occasion de dresser un bilan.

Les deux déséquilibres

Qu'est ce que le développement durable ? Il y a deux affirmations au cœur de la notion de développement durable : la question de la pauvreté et de la répartition de la richesse sur terre et les problèmes globaux d'environnement qui sont à l'interface entre nos sociétés techniques et la biosphère. Si on traduit les choses, on dirait que cette notion de développement durable renvoie à deux objectifs :

- La volonté de réduire les inégalités quant à la répartition de la richesse sur terre ;
- Mettre fin ou limiter les grands déséquilibres environnementaux.

Si on considère le premier déséquilibre dans la durée – celui de la pauvreté - on a des écarts de richesse assez faibles : ainsi, le PIB par habitant en 1776 est inférieur à 1 ou 2. A la fin du XIX^{ème} siècle en revanche, on assiste à une explosion des écarts de richesse qui ne va pas cesser de s'accroître : en 2010, on a en effet un ratio de 1 à 400 entre le Qatar et le Zimbabwe. L'énergie est pour beaucoup dans ces écarts et on assiste même à une explosion des inégalités quand on regarde le partage des richesses au niveau mondial : 2% des populations se partagent 50% de la richesse. Les inégalités ont donc fortement augmenté. *Grosso modo*, 1,5 milliards de la population vit bien, le même nombre vit très mal, et le reste ne bénéficie que de quelques dollars par jour. On a donc une répartition de la richesse qui n'a jamais existé dans notre histoire. De plus, ces écarts de richesse se font en toutes transparences : les populations riches ont conscience de l'être beaucoup plus que certaines autres, qui ont elles même conscience de l'énorme écart qui les sépare des populations favorisées. En 25 ans, les choses qui devaient être corrigées ont en fait empiré.

Si on considère le second déséquilibre à présent, il s'agit de constater que la population est passée de 3 à 6 milliard entre 1950 et 2000. Durant la même période, on a assisté à un quasi décuplement du PIB mondial et c'est également à compter des années 50 qu'on voit croître de façon exponentielle un certain nombre de flux : CO₂, dégradation des systèmes marins... les économies connaissent, avant la crise et depuis le début des années 2000, une croissance très forte de la demande d'énergie et on est revenu à un niveau comparable aujourd'hui. A l'échelle globale, les énergies renouvelables ne représentent que 2% et si l'énergie ne représente que 4% du PIB mondial, on retire toutefois 80% des activités mondiales si on retire ces 4% qui servent à tout le reste ou presque. Et en dollar constant, si on exclut les deux crises pétrolières, on a connu un baril de pétrole à un coût extrêmement bas. Ces différents indicateurs expliquent en grande partie toute la structuration de nos sociétés, l'emploi, de l'urbanisme...

Sommes-nous sauvés par les énergies non-conventionnelles ? En 2006, l'AIE a reconnu qu'on avait atteint le pic de production. Le prix ne redescendra donc pas beaucoup car la part de pétrole liquide venant de sources non-conventionnelles implique des coûts plus élevés. Nous sommes donc face à un paradoxe : d'un côté nous savons que nous allons manquer de pétrole pour maintenir nos niveaux de production mais de l'autre, il nous en reste quand même suffisamment pour nuire de manière irréversible à l'environnement. En effet, nous avons déjà consommé plus du tiers du budget d'émission qui avait été prévu pour limiter l'augmentation de température à 2 degrés d'ici 2025. Donc une équation très difficile : pas assez de pétrole mais pourtant déjà trop : 6 fois plus que nécessaire pour dépasser la barre d'augmentation de température.

Etat des ressources

Etat des ressources minérales : sur le front des minéraux en commençant par les métaux précieux et semi précieux qu'on utilise dans l'industrie, les tensions sont fortes avec un épuisement à hauteur de 5 décennies sur la base des stocks connus. On a donc affaire à un problème de quantité de minéraux disponibles.

Autre point, l'essor des *clean tech* et de la croissance verte repose sur ces métaux qui sont pour la plupart sous tension et difficilement substituables les uns aux autres.

C'est à compter des années 2000 en effet qu'on a commencé à utiliser plus de métaux. Aujourd'hui, environs un tiers des types de métaux disponibles sont exploités activement par l'homme. Troisième difficulté pour les métaux : leur répartition. Entre 60 et 90% de la ressource se trouve dans 3 pays : l'Inde, la Chine et le Brésil.

Etat des ressources en eau : les choses sont encore plus délicates. Localement il y a des tensions très fortes. Comme toujours, les pays qui se situent au nord n'ont pas trop de problèmes alors que les autres sont beaucoup plus atteints.

Etats des ressources halieutiques : C'est un exemple symbolique : nous avons vidé les mers. Les prises moyennes en moins de 25 ans sont passées de 800 à 200 grammes. La biomasse a été réduite de 80%

Ressources alimentaires : si les indiens consommaient la moitié de ce que consomment les américains, il faudrait doubler les besoins en céréales. Ce problème va de pair avec le manque d'eau et la dégradation des sols... donc là encore on note un phénomène de tension important.

Au final, on distingue donc de très nombreux problèmes en matière d'environnement. Le plus souvent, on les qualifie en termes de pollution. Or les pollutions ne constituent pas l'essentiel des problèmes environnementaux. Plus classiquement, on trouve neuf grandes limites globales :

- Le changement climatique ;
- Le taux d'érosion de la biodiversité ;
- Les interférences de nos activités avec les cycles de l'azote et du phosphore ;
- La déplétion de l'ozone ;
- L'acidification des océans ;
- L'usage de l'eau douce ;
- La quantité et la qualité des sols.

Le cas de l'acidité des océans est critique. Si nous dépassons la barre des 430 PPM, on arrivera à un seuil dangereux pour la chaîne trophique marine.

Quelles ont été les réponses en termes de développement durable ?

En quelques sortes, on a mis tous nos œufs dans une stratégie : celle du découplage : produire plus mais avec une consommation sous-jacente de ressources moindre. On sait le faire à l'échelle relative mais on n'y parvient pas au niveau global. Pour preuve, si on regarde par points de PIB, on constate qu'on consomme 30% de moins qu'en 1970 et pourtant, nos émissions ont augmenté de 80% sur la même période.

Quels sont les moyens sur lesquels on aurait pu compter ?

- L'économie circulaire (celle des trois R : *reduce, reuse and recycle*) ;
- L'économie de fonctionnalité (substituer la vente de l'usage d'un bien à la vente du bien lui-même). L'exemple des pneus est révélateur. Les pneus durent en effet plus longtemps quand on achète l'usage (dans le cas des camions pour les sociétés de transport) que le bien (dans le cas des voitures des particuliers).

L'échec du développement durable

Regardons attentivement la question du recyclage en prenant l'exemple de l'acier. Le taux d'augmentation de la production mondiale est d'environ 3,5%. Même en parvenant à un taux de 62% de recyclage de cet acier, et bien on ne repousse les réserves que de 12 ans, en les faisant passer de 50 à 62 ans. Le même raisonnement conduit d'ailleurs aux mêmes conclusions pour l'aluminium. Donc en d'autres termes, soit on diminue le taux d'augmentation de la production, soit il y a épuisement rapide de la ressource. Cet exemple souligne donc l'échec des stratégies de dématérialisation.

En outre, le progrès technique a plusieurs effets rebonds :

- Mettre sur le marché des biens et des services avec une consommation intermédiaire de sous-jacents moins importante a souvent pour effet d'augmenter la demande. En d'autres termes, ce qu'on gagne



en réduisant la consommation de ressource par unité produite, on le perd à cause de l'augmentation de la demande de ce bien résultant de la baisse relative de son coût.

- Mettre sur le marché des biens nouveaux qui génèrent des flux inédits de consommations d'énergie et de matière première. Le PT n'est donc pas nécessairement favorable à l'environnement et ses gains sont souvent récupérés par l'emballement de la demande.

Dernière difficulté : l'augmentation de la part du capital naturel que l'on entame. Avec les défis devant nous, on ne peut pas se passer de progrès technique. En revanche il est aussi stupide de croire que l'on fera face aux défis à venir avec seulement de la technique. Les 25 années écoulées montrent qu'on n'y arrive pas. On doit donc adjoindre à l'innovation technologique, une régulation qui pourrait, dans un cadre démocratique, faire baisser la demande.

Questions

1. Sur la question de la durée des réserves de ressources, la situation est elle si urgente que vous la décrivez ?

« Les chiffres ne sont pas à prendre au pied de la lettre. La seule chose qui compte ce sont les ordres de grandeur et tous les Etats réfléchissent aujourd'hui à faire repartir la prospection minière. Mais nous ne sommes pas sûrs de retrouver les mêmes quantités et de toute façon, on aura au moins une phase de rupture relative d'approvisionnement. »

2. Vous annoncez une population de 9 milliards d'hommes en 2050. Pas plus ?

« Pour une partie de cette population, on a un énorme problème. On est déjà sur une planète sous tension et on va ajouter une partie importante de consommateurs. A population constante le défi est dur à relever. Avec une augmentation, ça paraît impossible. Si on a une alimentation moins carnée, on nourrit les 9mds, dans le cas contraire c'est impossible. Nous ne sommes donc pas à 500 000 hommes prêts. »

XIV – La réincarnation des matériaux

Farouk Tedjar est professeur associé à l'Institut National Polytechnique (INP) de Grenoble ainsi que fondateur et président de la société Récupyl SA, dont le but est de donner une deuxième vie aux piles et matériaux métalliques usagés.

Le recyclage connaît des limites comme on l'a vu dans la conférence précédente. C'est la raison pour laquelle nous allons parler ici de réincarnation. En effet, nous sommes aujourd'hui face à quatre défis : le changement climatique, le problème de la pénurie de carburants fossiles (pic de pétrole), la limite des ressources aquifères et la finitude des ressources minérales. C'est sur ce dernier point que je vais baser ma conférence : en effet, si les ressources minérales sont en quantité limitée, il faut rentrer dans une logique de substitution et de recyclage.

La mine urbaine : une nouvelle source de matériaux

Si les minéraux comme le cuivre et l'or approchent de leur fin, on peut constater qu'il nous reste encore un demi-millénaire de fer. On peut donc retourner à l'âge de fer ! Sur le cuivre ou l'or, il ne reste pas grand chose. Les matériaux peuvent être classés en fonction de leur autonomie (en nombre d'années) et leur vulnérabilité, et on peut voir que le fer et l'aluminium tirent bien leur épingle du jeu.

Ces ressources se trouvent essentiellement dans des continents concurrents. Les déchets produits en revanche se trouvent beaucoup en Europe. D'une certaine manière les mines à l'étranger se vident, et l'on peut parler aujourd'hui de « mines urbaines ». On peut réutiliser ces matériaux usés qui se trouvent chez nous plutôt que d'en acheter des neufs. Il est certes illusoire de réutiliser le manganèse des piles usagées pour faire de nouvelles piles. Mais ce manganèse est précieux, et il peut servir pour faire autre chose. Il n'y a pas de règle pour le recyclage, et cela reste à l'imagination des ingénieurs.

Toutefois, il faut que tous les acteurs s’y mettent : les législateurs, les producteurs, les utilisateurs. Il faut qu’il y ait consensus. Il faut suivre le produit partout, de la conception à la fin de vie, sinon nous avons des ressources perdues, soit dans des décharges ou les incinérateurs, soit dans la nature, soit dans des conteneurs vers la Chine.

Le recyclage des piles

Les piles et les accumulateurs sont un concentré d’énergie dans une masse réduite. La batterie permet de se passer de fil, et c’est une problématique de liberté et d’évolution sociale. Les progrès ont été fulgurants en termes de technologie, mais aussi en termes de consommation. Cette croissance s’accompagne d’une croissance de la chimie des piles : aujourd’hui, la chimie s’est énormément enrichie avec la création constante de nouveaux matériaux. Il s’agit là d’une ressource, mais également d’un potentiel polluant. En faisant du recyclage de piles alcalines salines, on peut récupérer de l’acier, du zinc, du manganèse. Cela sert par exemple à faire des bordures d’autoroutes en acier galvanisé, des céramiques au manganèse, ou encore de nouveaux catalyseurs comme on a vu dans une conférence précédente.

Les batteries lithium-ion sont un segment très dynamique et très riche. Il y a deux types de recycleurs. Tout d’abord les traders : très pointilleux, ils prennent le cobalt ou les autres métaux chers. Le manganèse (300€/T, tandis que cobalt 40.000€/T), et le zinc ne les intéressent pas. D’autres recycleurs prennent tout, mais pour adresser ces matériaux, il faut une technologie permettant de les traiter.

L’autre élément, c’est l’élément économique. En poids, la cathode représente 28% et l’anode 20%. Les autres composants ne dépassent pas les 5-7% en poids. La répartition économique est différente : ce qui coûte le plus cher à traiter (à ne pas brûler), est ce qui est le moins important. Il faut donc adapter les technologies, et non pas brûler pour récupérer les métaux.

Comment réutiliser les matériaux ?

Nous investissons actuellement pour récupérer du lithium dans l’eau, à 2 ppm (parts par million). Visiblement, le lithium est loin d’être une ressource finie.

De plus, en termes de lithium, les « mines urbaines » sont plus concentrées en Li (35%) que les mines ou sources (6% dans les déserts). Pour produire une tonne de lithium, on peut au choix utiliser 250 T de minerai, 750 T de saumure (déserts salins), ou alors 28 T de batteries de portable usagées !

Toutefois, il faut prendre garde à ne pas faire baisser l’économie carbone réalisée en recyclant les matériaux. D’une certaine manière, les électrons « verts » doivent le rester jusqu’au bout.

On a mis en place un nouveau mécanisme dans lequel on ne brûle pas, mais on extrait dans dégrader les matériaux. Ainsi, on ne fait plus de sulfate de cobalt (qui s’hydrate) mais du tricarbonat de lithium qui est plus valorisable.

Concernant les terres rares, elles sont rares sauf en Chine, où 88% de la production mondiale se trouve. L’utilisation de ces terres rares est de plus en plus intense sur les secteurs stratégiques, les batteries ne représentant que 7%, ce qui peut mener à un certain risque de distorsion de concurrence entre industries des différents pays. On souhaite faire des technologies propres mais on n’en a pas la ressource. Pour la Toyota Prius, l’anode est en terre rare (un concentré de 4 terres rares, très riche et disponible ici, c’est à dire en mine urbaine).

Les autres « mines »

Au sujet de la pile à combustible, on risque d’en avoir bientôt non seulement dans les domaines habituels (véhicules, navettes spatiales), mais aussi dans les portables. Et cela représentera d’autant plus de déchets à traiter. Récupyl a démantelé la première pile à combustible en récupérant le platine par un procédé breveté. On ne brûle rien. Au cours de la récupération, nous n’avons obtenu qu’1% de déchets, essentiellement du plâtre (ce qui ne pose pas de problème).

Les écrans LCD ou CRT sont aussi de véritables mines. On peut, d’un produit, le décomposer en composants identifiables : cuivre, céramique, plomb (38% de plomb dans le tube d’un écran cathodique), poudre luminophore... Tout cela crée du travail non qualifié : c’est donc un secteur économique non négligeable. D’ailleurs, pendant la crise, seuls les domaines du développement durable ont créé de l’emploi. Pour les écrans plats, le verre permet de faire de la laine de verre, l’aluminium est récupérable, etc.



Les cellules photovoltaïques contiennent beaucoup de silicium. On peut le récupérer soit par affinage (voie métallurgique) soit un procédé chimique permettant de créer du silicium pur. Un deuxième procédé permet de récupérer du verre trempé et un mélange de polymères sans passer par la carbo-réduction du quartz.

Si les hauts fourneaux disparaissent, on peut maintenant avec des fours à arc réutiliser des poussières de production de l'acier. Lorsque l'on produit de l'acier, on crée en effet des poussières contenant du fer, du zinc, du plomb, etc.

Dans la filière classique on ne récupère que le fer et le zinc. De nouveaux procédés permettent d'extraire non plus que du zinc mais aussi des pigments.

Enfin, je souhaiterais parler de la chimie verte. Il faut limiter les impacts de nos modèles de production par de nouveaux procédés chimiques, mais également éviter de créer de nouveaux impacts par ces mêmes procédés. L'hydrométallurgie me semble une solution. Et pour cela, il faut adjoindre de la chimie verte, sans l'impact environnemental des filières chimiques traditionnelles. En effet, on peut récupérer de l'or par dissolution/dépôt de composants électroniques. Le dépôt est très facile, c'est la dissolution qui est importante. Et cela est possible sans cyanure !

En conclusion, si les anciens alchimistes voulaient changer le plomb en or, on s'est vraiment sentis comme des alchimistes quand on a changé des déchets en or. Mais le plus important, avant même la technologie, c'est le capital humain qui passe par de nouvelles normes et de nouveaux comportements.

Questions

1. Quand on a voulu recycler des ferrailles, on a eu la surprise désagréable d'avoir à faire face à un effet crocodile. Comment faire à encore plus grande échelle ?

« Ce n'est en effet pas qu'un problème de recyclage, mais aussi de sécurité. Les piles ne sont pas toujours déchargées. Et il faut savoir ce qu'on traite, d'où la nécessité d'équipements adaptés. »

2. Que faire des déchets issus du recyclage des déchets ?

« Si les ressources sont finies, l'innovation est infinie. Le problème, ce n'est pas tellement la technologie, mais l'économie. Les financiers ne veulent pas revaloriser à n'importe quel coût. »

3. Est-ce rentable ?

« La revente des matériaux issus de cette transformation/recyclage couvre largement les coûts de ce recyclage. La raison pour laquelle ce n'est pas encore si répandu est qu'il existe des solutions moins chères, notamment mettre dans une fosse ou juste brûler pour récupérer les matériaux les plus précieux. D'où la nécessité d'une réglementation plus stricte : les profits seront moindres, mais l'environnement s'en portera mieux, et c'est une économie qui bien que non chiffrée, outrepassa les gains réalisés lors d'une simple incinération. »

XV - Après les années « tout pétrole »

Economiste et urbaniste, Jacques Saint Marc est membre du Groupe Interministériel Mobilités

J.M. Tarascon a souhaité aborder la question de l'énergie vue par un urbaniste, un témoin des utilisations finales, leurs conséquences sur notre environnement quotidien comme planétaire. Il m'a confié cette tâche. Urbaniste et économiste, j'ai pu constater l'évolution des occupations territoriales en Europe, en Amérique du Sud comme du Nord et en Asie depuis plus d'une quarantaine d'années.

La question que l'on va se poser ensemble, c'est celle de la mobilité urbaine et de ses moyens : aujourd'hui on prend un véhicule de 2 tonnes pour faire 5km et on est seul dedans. Une des questions, c'est comment on peut modifier cet état de fait car de toute façon, 1 litre d'essence, ca fait 2kg de CO2. Donc quand on utilise une camionnette, on rejette, par an, l'équivalent de deux fois le poids de la camionnette en CO2.

La diversification des sources d'énergie, son transport vers les lieux d'utilisation, l'évolution « exponentielle » des progrès techniques depuis deux siècles dont celle de la médecine, et celle des populations comme leurs transferts territoriaux du rural vers l'urbain ont conduit à une consommation non connue des ressources naturelles et en premier à une « réaffectation » de sols agricoles vers l'urbanisation et de forêts vers des sols agricoles.

La liberté « d'aller et venir » est vitale à notre vie personnelle comme professionnelle. La préserver, la favoriser dans cette perspective de développement durable passe par une double rupture :

- La conception de l'offre de services et des moyens des déplacements des biens et des personnes,
- Une urbanisation à l'échelle de la marche.

Il faut également prendre en compte l'évolution de la population mondiale : on est passé de 1 à 6 milliards en un siècle et en 2050, on sera 9 milliards environs, soit autant de consommateurs d'énergie, de transport ou de nourriture... Dans cette perspective, si on ne maîtrise pas aujourd'hui les modes de déplacement, on ne gagnera pas le pari de la réduction des émissions.

Le problème de la gestion des périmètres

Depuis 2007, et pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, la population urbaine était égale à la population rurale. En 1950, 30% de la population mondiale vivait en zone urbanisée et en 2030, ce pourcentage sera probablement autour de 60%. Mais vers quelle urbanisation avance-t'on ? Quels périmètres, quelle densité, quels services de la vie de tous les jours (poste, hôpital...), quels taux de motorisation ?

Un exemple rapide : Grenoble à 450 000 habitants et 300 km de piste cyclable. En 1900 la ville était dans ses murs ; en 2005, on a un éparpillement à plusieurs kilomètres autour de la ville et donc des besoins inédits en matière de transports. Notre métier est d'étudier ces personnes qui doivent arbitrer entre temps et coût de transports vis à vis du lieu de résidence dans une ville qui a « sauté les rocade » et dont le centre coûte de plus en plus cher. Dans cette perspective l'agglomération de Grenoble a lancé des enquêtes ménage qui n'ont d'ailleurs plus lieu uniquement sur la ville mais sur quasiment toute l'agglomération pour essayer de trouver des solutions globales en terme de transport. >Les résultats présentés ci dessous ont été mis en évidence par l'étude sur le « Grand Grenoble » qui sera publié prochainement :

- 3,6 déplacements par personnes et par jour
- 11% de non mobiles
- 5% d'hyper-mobiles (+de 8 déplacements par jour)
- 2.9 millions de déplacements quotidiens réalisés par les habitants, en grande majorité des déplacements de proximité
- 467 000 voitures soit 0.58 voiture par personne

Grenoble contient 40% de la population de l'agglomération. Dans son centre ville, 15 000 déplacement particulier. Du centre ville à la périphérie environs 150 000. Et de la périphérie à la périphérie, 600 000 déplacements quotidiens. Donc les transports en commun ne peuvent pas concurrencer la voiture. La solution: trouver de nouveaux moyens de déplacement qui soient le moins polluant possible.

Le même problème de gestion des périmètres se pose d'ailleurs pour le grand Lyon avec une tentative de rationalisation par la création d'un schéma de cohérence territoriale. L'une des idées : structurer l'agglomération en répartissant les services et valorisant les périphéries. Je peux vous donner l'exemple de la reconquête des berges à Lyon qui sont maintenant de belles promenades au lieu d'être une autoroute urbaine. Idem pour la zone de « Lyon confluence » qui a été réorganisée à l'échelle de la marche.

La question centrale des transports

Entre 1990 et 2005, les voitures ont pris 25% de poids et de puissance même si ça a commencé à baisser en 2005. Parallèlement, on a atteint des taux d'équipement automobile proche de 100 %. Face à cela, des stratégies différentes ont été adoptées : la ville de Shanghai, bien que très grande, est paradoxalement restée à l'échelle de la marche avec en plus un réseau de transport très efficaces. Brasilia, en revanche, s'est développée sur un modèle opposé : une ville douée pour l'automobile mais pas pour la marche à pied. La question de la densité des habitations est donc tout à fait majeure.

La croissance de la demande dans les différents domaines de l'énergie est également intéressante à analyser et on constate d'emblée que la plupart de l'augmentation de la demande de pétrole est le fait du secteur transport. Si tous les pays s'équipent de véhicules à moteur thermique comme en Europe, la consommation de pétrole sera doublée pour le secteur du transport terrestre. S'ils s'équipent comme aux USA, la consommation de pétrole sera plus que quintuplée pour ce secteur (12 milliards de tep). La baisse du rythme d'émission de CO₂ est donc indispensable et des progrès incontestables ont été réalisés sur les émissions par véhicule en raison d'une croissance accrue du nombre de voitures, aucune diminution globale n'est prévue avant 2050. L'Europe compte 600 véhicules pour 1 000 habitants, le Brésil 150, et la Chine 60

Si on met cet état de fait en parallèle avec le pic pétrolier, on constate qu'on ne peut pas miser seulement sur le tout pétrole. Non seulement sur le plan de l'approvisionnement, mais également sur celui des externalités négatives, en termes de santé publique notamment. L'exemple de la pollution à Paris est tout à fait révélateur à cet égard : le graphique des bouchons en Ile de France souligne les variations de la qualité de l'air en fonction des pics de circulation.

Au niveau global, les conséquences sont connues : augmentation de la température et du niveau de la mer combinée à une baisse de la biodiversité. Il faut en outre prendre en compte l'inertie du système climatique. Même si les concentrations de tous les gaz à effet de serre et des aérosols avaient été gardés constants au niveau de 2000, un réchauffement induit, d'environ 0,1 °C par décennie se produirait.

Qu'est ce qu'on peut faire localement ?

Il s'agit évidemment de mettre en place un système mais lequel ? Une analyse partagée par des entrepreneurs et par des responsables territoriaux a conduit aux conclusions suivantes :

- La mise en œuvre de nouvelles solutions pour le déplacement des personnes et pour la livraison ;
- Une réglementation favorisant l'émergence de cette nouvelle offre qui tente de concilier la liberté d'aller et venir avec la préservation des ressources et réduction des émissions ;
- Une belle courbe d'apprentissage et un long chemin à parcourir en termes d'évolution des comportements (dont éco-conduite) et d'évolution de l'offre : énergie, véhicule, service.

La Rochelle offre de ce point de vue un exemple intéressant avec le développement important des transports électriques : bus, bateaux, vélo. La Poste, également, a fait le choix du tout électrique ou presque. Aussi, le centre ville de la rochelle a été interdit aux camions à moteur thermique et la ville a également mis en place un système de distribution/livraison par petites camionnettes électriques pour compenser. Des voitures électriques en libre service sont également mises à la disposition des habitants.

Dans plusieurs villes en France, les initiatives des maires pour mieux adapter les transports en communs aux impératifs écologiques ont été lancées, notamment autour de l'électrique. Les premiers enseignements de ces réalisations sont les suivants :

- 15 000 véhicules à motorisation électrique ont été vendus en France depuis 1995 ;
- La motorisation électrique a un excellent rendement (de 3 fois supérieur à celui d'un moteur thermique voire 4 en ville) ;
- Les voitures, les scooters, les camionnettes, les bus électriques sont des vrais véhicules fiables et sûrs, très appréciés en ville ;



- Le plaisir de conduire est bien réel, la conduite est apaisée ;
- Leur intégration dans une flotte passe par une stratégie et donc par un décideur de haut niveau ;
- Ils ont permis aux transporteurs publics de concevoir de nouveaux services de déplacements des personnes et de livraison ;
- Le gain de CO2 dépasse la tonne par an/véhicule (de la batterie à la roue) ;
- Une autonomie de 100 à 200 km avec des batteries de nouvelles générations pour une large diffusion vers les entreprises de services urbains (Eau, Electricité, courrier ...).

Questions

1. « Je vois une solution que vous n'avez pas évoquée : le covoiturage public avec une petite flotte. Est-ce possible ? »

« Evidemment mais c'est illégal de faire s'arrêter un transport public ailleurs que dans un arrêt prévu à cette effet. »



Table ronde : Quelles réponses face aux défis énergétiques ?

Le colloque s'est conclu sur une table ronde réunissant les différents participants autour d'une question : Quelles réponses face aux défis énergétiques ? Les débats ont été animés par Vincent Dusastre du *Nature Publishing Group* et ont réuni, dans l'ordre de la prise de parole :

Jean Marie Tarascon (JMT)

Farouk Tedjar (FT)

Pierre Maturasso (PM)

Marc Fontecave (MF)

Jacques Saint Marc (JSM)

Vincent Dusastre : « Je voudrais commencer par remercier l'organisation du colloque. Ces derniers jours ont été l'occasion de découvrir beaucoup de solutions technologiques mais aucune solution miracle n'est ressortie en raison, notamment, de la présence d'un nombre important d'obstacles. Une chose est sûre, on ne peut pas continuer à produire et consommer comme nous le faisons aujourd'hui et il faut donc agir de façon coordonnée pour éviter des conséquences désastreuses. Trois axes principaux ont été identifiés :

- L'amélioration de l'efficacité énergétique
- Le développement massif des énergies renouvelables
- L'encadrement des émissions de carbone par la régulation

Jean Marie Tarascon : « J'ai deux messages principaux à faire passer. Le premier, c'est que les matériaux sont essentiels dans tous les domaines et la recherche ne doit pas cesser de creuser dans cette voie. Le second, c'est que les échéances sont connues mais le temps imparti est limité. On a 50 ans maximum et c'est maintenant qu'il faut diffuser le message : travailler ensemble avec un effort mondial et surtout, prendre conscience de la nécessité pour les pays de se fédérer.

Toutes les branches de la recherche ainsi que toutes les volontés politiques doivent se lier et sur ce dernier point je suis optimiste : je vois une jeune génération passionnée par l'énergie. L'innovation est infinie, nous sommes là, nous avons des neurones, à nous de jouer. Je vous remercie. »

Farouk Tedjar : « Je souhaiterais vous raconter un souvenir qui me remonte à l'esprit. Pendant mon service militaire dans le Sahara, j'ai eu l'occasion de visiter un camp d'autochtones dans lequel j'avais été frappé par la précaution avec laquelle le chef de la tribu avait ouvert un pot remplis de bouse de chameau pour alimenter le feu. Tout ça pour dire qu'il va falloir penser autrement les déchets au regard de l'énergie. Il n'y aura pas de petites économies et pas de place dans le futur pour les ayatollahs technologiques. Ça ne sera pas « tout nucléaire », « tout solaire » ou « tout quelque chose ». Ça sera un mix intelligent. Globalement, nous devons éviter de nous concentrer sur des *a priori* à défendre becs et oncles. Le déchet doit donc être une composante essentielle dans la réflexion sur l'énergie. »

Pierre Matarasso : « Je suis renté au CNRS en 1974 et je voudrais commencer par faire un bref rappel sur notre histoire. Notre manière de vivre est liée à des circonstances toutes particulières. En effet, on utilise l'énergie en raison d'une circonstance historique hasardeuse : la découverte des Etats Unis d'Amérique. Il a fallu occuper un territoire gigantesque et depuis, une grande partie de notre vision de la vie se base sur *l'American Way of life* qui s'est développée en Europe après le plan Marshal. Ce n'est pas un hasard d'ailleurs si les théories économiques de la croissance sont toutes issues d'économistes américains. Mais les conditions actuelles ont changé. Aujourd'hui, c'est la question du développement de l'Inde et de la Chine qui se pose, ces deux pays ayant une situation opposée à celle des Etats Unis. L'Inde par exemple fait le tiers du territoire des EU avec 1,2 milliards de personnes. Il n'est donc pas question d'y faire le même urbanisme ou de s'y déplacer

de la même façon. Il faut donc comprendre que si nous avons été influencés par *l'American Way of Life*, nous le serons bientôt par la *Chinese or Indian way of Life*.

Je suis préoccupé depuis longtemps par le changement climatique. Il faut impérativement diviser par 4 (facteur 4) nos émissions et nos consommations. Je déclare que c'est possible.

Pour les bâtiments, on peut en faire qui consomment très peu d'énergie en les isolant notamment. Pour le neuf ça ne coûte pas plus cher et pour l'ancien il faut les refaire. Il s'agit au moins de densifier et d'agrandir la surface habitable pour y faire ce qu'on peut faire dans une ville dense au niveau des transports en commun notamment. Pour les transports d'ailleurs, c'est l'idée d'un écosystème de transports qu'il faut instaurer, avec des micro-véhicules à utiliser à la demande, des bus navettes type aéroport et pour l'agriculture: 1 litre de lait de soja coûte quatre fois moins de terre, d'énergie... donc tout ça est possible mais il faut le vouloir socialement ! »

Marc Fontecave : « Quelques mots pour dire que je suis d'accord avec les autres. L'énergie est le vrai problème que nous avons à gérer, peu être même plus que le changement climatique. Avec l'énergie, on sait qu'on peut traiter les problèmes et apporter des solutions. La complexité de la planète me fait penser en revanche qu'à court terme, on ne traitera pas le problème du changement climatique. L'énergie en revanche on peut l'attaquer. Beaucoup de solutions déjà ; non optimales. Et mon message c'est de dire qu'il faut faire attention de ne pas avoir de positions péremptoires sur l'une ou l'autre de ces solutions. C'est d'ailleurs la difficulté du problème énergétique : il faut traiter l'ensemble même si c'est coûteux et compliqué.

En tant que chimiste, je suis convaincu que la chimie sera une discipline centrale. Ce n'est malheureusement pas le secteur le plus soutenu en ce moment et j'appelle à un retournement des investissements des sciences de la vie vers la chimie.

Dernier point, en tant que citoyen, faisons pression pour que lors des prochaines élections présidentielles, la question de l'énergie soit posée de manière intelligente en évitant deux écueils : la démagogie et le pessimisme. On doit dire aux citoyens qu'il faut être optimiste, qu'on a des solutions et qu'on va y arriver. Point négatif que je souhaiterais soulever néanmoins : je ne vois pas encore assez de jeune dans mes conférences et je crois qu'il faut mobiliser nos jeunes qui ont peut être le nez dans le guidon à cause de l'emploi mais ils sont les premiers concernés donc ils doivent venir ! »

François Guyot : « Ma discipline c'est la géologie et ce qui me frappe, c'est que l'homme a un impact sur les grands cycles. Je trouve qu'une voie intéressante pour réfléchir sur la notion de « *sustainability* », c'est de voir dans quelle mesure telle ou telle pratique influe sur les grands cycles de la planète. Ça fait réfléchir à ce qu'on entend par la notion d'emprunte. Donc l'intérêt est de comprendre l'influence de telle ou telle nouveauté sur les grands cycles de fonctionnement de la planète. C'est une opportunité formidable pour les sciences de la planète.

Sur le plan des relations avec les sciences humaines et sociales, il y a une chose fascinante. On se pose la question : qu'est ce qui nous fera arrêter d'utiliser les énergies fossiles ? Juste une question de coût ? Ou est ce qu'on ne subit pas en plus des phénomènes d'inertie ? En tant que scientifique je ne me sens pas autorisé à donner une vision du mix énergétique en 2050 mais ce qu'on peut faire, c'est la meilleure science possible vis-à-vis des matériaux et des techniques ! »

Yves Brechet : « Je suis un métallurgiste et je vais vous parler d'énergie. J'en fais depuis très longtemps : quand on essaye d'alléger un véhicule, on en fait déjà par exemple. Donc la première chose à faire c'est de se dire que le problème énergétique est multi-facette. L'optimum pour un pays dépend des décisions précédentes et il y a toujours une inertie qu'il faut prendre en compte.

Mon second point, c'est que ces deux jours ont vu s'accorder des compétences variées et ça prouve qu'aucune discipline n'a la totalité de la réponse et il va falloir travailler ensemble. Il ne faut pas prendre nos

rêves pour des réalités et nos cauchemars pour des fatalités. Identifier les verrous est crucial, et notamment le problème du stockage de l'énergie qui est tout à fait central.

Hier, on me posait la question de la transition vers l'énergie décarbonée. Le nucléaire est décarbonée mais c'est une technologie difficile. La gestion de la transition est également difficile. Il semble important de ne pas abandonner les technologies existantes sans pour autant se dispenser de chercher autre chose. Comment faire mieux sans faire table rase du passé ?

Dernier point : dans les années 70, il y avait pleins de projets pour les jeunes: les trains les avions, l'électronucléaire ont motivé une génération. Et le problème de l'énergie peut motiver les générations. Il y a du travail à faire, prenez-le en main et vous aurez trente belles années de sciences devant vous. »

Jacques Saint Marc : J'ai déjà beaucoup parlé aujourd'hui. On dit toujours que l'énergie qu'on ne consomme pas, c'est la meilleure façon de réduire la demande. Un exemple parlant, c'est celui de l'éco-conduite. En passant une demi journée de formation on peut diminuer sa consommation de 10 à 15 %.

Sur le reste, la meilleure énergie c'est la nôtre et utilisons la marche à pied. Il faut quand même manger et je voudrais rappeler ce titre de conférence à laquelle j'avais assisté et qui m'avait beaucoup plu : « on peut sauver la planète en mangeant mieux ». Utilisons donc d'abord l'énergie qui est sur place. Le pétrole aujourd'hui est une énergie de la cueillette !

Pour terminer je suis toujours interrogatif avec les suédois. Mes amis suédois me disent « Nos bus roulent à l'éthanol ». « Il vient d'où votre éthanol ? ». « Du Brésil ! »

Questions

1. « Comment rendre les scientifiques plus crédibles alors que les populations ne croient pas aux problèmes qu'ils évoquent, en matière énergétique notamment ? »

PM : « Il y avait il y a peu un colloque « énergie et régions ». Il suffit de fréquenter des réunions publiques dans les collectivités territoriales pour se rendre compte que les gens se préoccupent des problèmes environnementaux. Je n'ai pas l'impression d'une passivité de la population française »

FT : « Je voudrais rajouter un exemple : il y a sept ans les grands groupes de déchets me disaient qu'on ne recyclerait jamais les piles car les gens sont feignants et ne rapporteront jamais les piles au magasin. Et pourtant les citoyens ont fait ce geste sans campagne publicitaire fabuleuse. Même chose pour les bouteilles en plastique. C'est donc juste un problème de gagner la confiance et les gens adhèrent. »

2. « L'élection présidentielle est dans peu de temps. Le politique est essentiel. Nos politiques savent-ils ce que cet échantillon de scientifiques nous dit depuis hier ? Est-ce qu'il ne faut pas que le Collège de France organise une rencontre pour qu'une confrontation soit organisée avec le politique sur le problème énergétique. »

JMT : « Le gouvernement interroge régulièrement l'Académie des Sciences sur les questions énergétiques. »

3. « Quelle est la responsabilité des grands groupes pétroliers dans la non transition vers le décarboné ? »

YB : « Un exemple pour vous répondre : les réponses sont difficiles et on ne les règle pas en désignant un coupable. La quantité d'émission de CO2 par tonne d'acier a été divisée par deux et c'est le profit qui a mené à ses efforts, pas la stigmatisation d'acteurs. Il ne faut donc pas chercher des responsables mais plutôt trouver des leviers : taxe, pression du public... il est urgent d'éviter les slogans simplistes et de pointer des coupables du doigt. »



PM: « On est dans une situation politiquement très étrange. Il faut agir rapidement, on ne peut plus être de simples observateurs. La première chose c'est qu'au CNRS, un groupe a été désigné pour faire un rapport sur le changement climatique. Et les scientifiques ont parfois un rôle d'attester un phénomène tel qu'il existe. La question des groupes industriels est compliquée. Exemple caricatural : Aujourd'hui, les grands groupes des NTIC, comme Google, ont besoin de vendre de la connexion internet. Ils savent que dans les villes américaines, les gens seront ruinés par le prix de l'essence quand il montera trop haut. Ces groupes financent donc le solaire. La leçon, c'est que les nouvelles industries ont donc des intérêts qui dépassent les vieilles industries. Certaines industries n'ont pas intérêt à changer c'est certain, mais des fractions de l'industrie s'engagent tout de même dans la grande transformation de la ville et des transports. Maintenant j'en viens à l'Allemagne. La sortie du nucléaire s'est faite avec des pous et des contres et on ne peut pas donner une image homogène des industries. »

4. « Juste un commentaire pour finir : il y a une nécessité qui repose sur une non communication entre scientifique, citoyen, media et politique. Le monde politico-médiatique a besoin de réponses manichéennes. Je dois prendre une décision donc il me faut une réponse noire ou blanche. Les scientifiques réfléchissent à plus longue portée et mesure la complexité des systèmes. Un des manques de communication se base là dessus. C'est quelque chose qu'il faudrait aplanir et je crois qu'on a besoin d'un consensus, un véritable projet de type « Manhattan » pour obtenir un résultat. Non seulement les choses sont complexes mais il y a vérité en un lieu, erreur au delà, vérité un jour, erreur le lendemain. »

Conclusions

Guillaume Muller : « Les jeunes sont prêt à relever les défis en apprenant de leurs pères/pairs, main dans la main. L'association des Chadoc souhaite d'ailleurs poursuivre ces organisations qui sont très utiles pour favoriser les échanges. »

JMT: « On a essayé de peindre le paysage pour vous alerter sur la gravité et l'ampleur des défis énergétiques. Merci à tous les contributeurs et à l'audience car comme en sport, un évènement est d'autant plus beau qu'il y a une audience. Je remercie aussi le prestigieux Collège de France pour son accueil ainsi que Total pour son sponsoring. Enfin, je remercie l'association Chadoc pour avoir su mettre ce colloque en place car ceux que me connaissent savent que je ne suis pas un spécialiste d'organisation ! »