

## **L'écologie industrielle : avenir de l'économie**

Professeur Suren ERKMAN

[suren.erkman@unil.ch](mailto:suren.erkman@unil.ch) / [suren.erkman@epfl.ch](mailto:suren.erkman@epfl.ch)

*Les Rencontres de l'Entreprise, CCI Grand Hainaut, Valenciennes, 24 janvier 2012*

Autres intervenants :

- Franck SPRECHER, Président du pôle Synéo
- Hugues DENBY-WILKES, Président d'Ecopal

### **Introduction**

L'écologie industrielle est un sujet actuel pour les entreprises. Pour échanger à ce propos, le professeur Suren ERKMAN, spécialiste de l'écologie industrielle, interviendra.

**Franck SPRECHER prend la parole :** On va parler de performance de nos entreprises. Aujourd'hui, nous sommes confrontés à un modèle économique actuel arrivant peut-être dans ces dernières années. Je suis certain qu'il est intéressant de réfléchir à la performance économique de nos entreprises et vers quels modèles on peut s'orienter pour la pérenniser ? La performance de l'entreprise est économique mais elle doit s'appréhender de manière globale. Comment obtenir une performance économique sans considérer les performances sociale, sociétale et environnementale de nos entreprises ? Au sein du Pôle Synéo, que j'ai l'honneur de présider depuis pratiquement un an, avec toute l'équipe et les 80 membres (chefs d'entreprise, décideurs) qui nous accompagnent, nous avons souhaité nous intéresser à la performance globale de nos entités, en travaillant sur trois thématiques (managériales, en interne pour nous faire progresser en tant que décideurs, faire progresser nos collaborateurs) mais qui ne peuvent pas se mettre en œuvre sans cette problématique d'écologie industrielle. Comment mettre en œuvre ces pratiques et progresser sur notre territoire, avec les entreprises et l'environnement qui nous entoure ? Sur le modèle d'Ecopal, nous avons depuis un an commencé un certain nombre d'actions, comme des collectes sélectives de déchets pour les entreprises. Cette initiative va nous permettre de diminuer les coûts tout en étant bon pour l'environnement et d'améliorer l'attractivité de nos territoires. Encore une fois, une action concrète, locale, *win-win* pour tous. On est la tête dans le guidon comme tout le monde. Il est très intéressant de pouvoir se retourner, prendre du recul avec des experts, des gens qui ont pu expérimenter la performance globale et l'écologie industrielle sur d'autres territoires. C'est pour cela que nous avons souhaité inviter le Professeur Suren ERKMAN qui s'est intéressé au sujet dans de nombreux endroits du monde.

**Suren ERKMAN prend la parole :** Je suis venu dans le dunkerquois plusieurs fois il y a une douzaine d'années, pour une des toutes premières démarches d'écologie industrielle qui a contribué à la création d'Ecopal. C'est le moment de prendre un peu de recul, prendre de la hauteur sur notre système économique. On développera une série d'exemples concrets d'écologie industrielle.

Mon activité principale se situe dans le monde académique. C'est assez récent, cela fait quelques années qu'on m'a proposé de rejoindre le pôle académique à Lausanne. J'ai gardé un pied dans le monde réel avec la création d'entreprises. La dernière a été créée en 2008 avec trois de mes anciens étudiants. On a maintenant une vingtaine de salariés et on fait beaucoup de démarches éco-industrielles. A l'Université, on étudie beaucoup les problèmes, mais là, j'avais envie de proposer des solutions. L'entreprise s'appelle : Solutions for Industrial Ecosystems (SOFIES), Geneva [www.sofiesonline.com](http://www.sofiesonline.com). On accompagne les entreprises des territoires en Asie, en Europe, en Afrique, etc. sur des démarches d'écologie industrielle.

J'ai également créée une entité en Inde, car c'est un pays où il se passe beaucoup de choses notamment avec la Chine. J'ai commencé par créer cet institut de recherche indépendant en écologie industrielle, avec mon partenaire : ROI [www.roi-online.org](http://www.roi-online.org). ROI en anglais signifie « return on investment », mais veut aussi dire « Optimisation des ressources ». Il m'avait dit qu'en Inde, les gens ne s'intéressaient pas à l'environnement. Il leur faut un retour sur investissement. Sur notre site Internet, vous pouvez télécharger gratuitement un livre et des études de cas. L'étape suivante, j'attendais que le marché indien mûrisse de créer une société commerciale car les entreprises commencent à accepter de payer pour des services environnementaux. Ce qui n'était pas le cas jusqu'à maintenant.



Un pont très célèbre en Angleterre : l'*Iron Bridge* (1779) = symbole de la révolution industrielle. C'est le tout premier de sa catégorie, fait complètement en métal. Un véritable défi technologique du point de vue de la métallurgie. On y retrouve des éléments typiques de notre système économique : l'innovation technologique et le risque entrepreneurial (parce que les routes d'accès à ce pont ont été terminées seulement 2 ans après la construction du pont. Il a fallu tenir compte jusqu'à ce qu'on puisse commencer à organiser le transport de marchandises. Dès que cela a été fait, cela a été très rentable. On était à l'époque où le commerce de marchandises commençait à exploser en Angleterre. C'est une manière d'expliquer que nous vivons dans un système économique très particulier qui est le **système industriel**

L'humanité a inventé au cours des 10 ou 15 derniers milliers d'années de nombreux systèmes économiques souvent très sophistiqués, très élaborés, qui ont parfois duré très longtemps : les Mayas, les Incas, les Egyptiens, les Chinois, les Indiens...qui étaient souvent des sociétés

technologiquement très avancées (ex : l'hydraulique, la construction). Si on regarde tous ces systèmes économiques, il y en a un qui est unique dans l'histoire de l'humanité c'est celui qui vient de commencer, cela fait 200 ans seulement. C'est ridicule à côté de tant d'autres systèmes économiques qui ont tenu le coup pendant des milliers d'années. Je dis cela parce qu'en Europe, on a parfois le sentiment qu'on est au bout du rouleau, que le système économique est en train de s'effondrer. Mais on peut voir aussi les choses d'un autre angle, en fait c'est un système économique ridiculement jeune, encore en phase de commencement. Je pense qu'il est très intéressant d'avoir une perspective historique ; de se dire que l'industrialisation est un processus historique unique dans l'histoire de l'humanité. Il se caractérise par au moins deux grandes choses :

D'une part, il a apporté un niveau de vie absolument incomparable et inimaginable par rapport à tous les autres systèmes économiques.

Mais d'autre part, ce système économique performant a apporté des problèmes environnementaux.

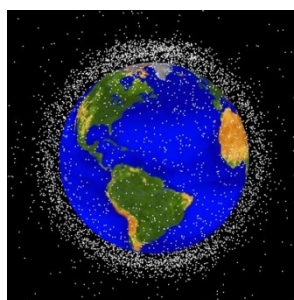
Mais ce système est tellement jeune et on a cette onde de globalisation/d'industrialisation qui se répand sur toute la planète. C'est un processus qui en est à ses débuts.

### **Deux siècles plus tard... Où en sommes-nous ?**

Il y a un événement qui s'est passé il y a quelques mois en mars 2011 lorsque le module européen Kepler totalement automatique s'est arrimé à la station spatiale. Ce que je trouve très frappant, c'est qu'il s'agissait d'un exploit technique inouï. Mais cela n'intéressait plus personne. C'est devenu totalement banal de faire des exploits comme cela. Alors que dans les années 60, les premiers RDV spatiaux étaient encore vus comme quelque chose d'extraordinaire. 30, 40 ans plus tard, on a un RDV spatial infiniment plus complexe et c'est à peine si on s'y intéresse.

On est toujours dans une trajectoire d'innovation technologique qui s'accélère mais qui semble provoquer une espèce d'anesthésie où on a l'air de considérer que c'est normal. Les gens n'y font plus attention.

Cela vaut la peine de temps en temps de se dire qu'on est dans un système économique assez étonnant ; qui certes a ses problèmes, je ne les nie pas du tout. D'ailleurs, tenir compte des problèmes qu'il engendre est aussi important, notamment en termes de puissance de la technologie industrielle. Avant la conquête spatiale qui a commencé dans les années 50/60, il n'y avait pas un seul déchet d'origine humaine dans l'espace. En janvier 2012, on a des milliers d'objets qui ont au minimum 10 cm de diamètre.



En quelques décennies, l'humanité a réussi à polluer gravement un milieu apparemment « infini ». Si cela continue à ce rythme là, on pourra difficilement accéder aux orbites. Imaginez que l'on n'arrive plus à accéder aux orbites géostationnaires, plus de météo, plus de GPS, plus de télécommunications. On est devenu incroyablement dépendant en un laps de temps extrêmement court.

Il y a un autre problème : le **syndrome de Kessler** (astrophysicien de la NASA- 1978) : seuil au-delà duquel le nombre de débris et la probabilité des impacts augmenteront de façon exponentielle. Plus on a de débris en orbite, plus on augmente les risques qu'ils entrent en collision et qu'ils induisent donc de nouveaux débris qui vont eux-mêmes entrer en collision avec d'autres, etc. Il a estimé que d'ici un siècle voire un peu plus cela sera extrêmement dangereux voire impossible d'aller en orbite. Il y a maintenant des entreprises qui travaillent sur des technologies pour aller récupérer le plus gros de ces débris.

Oui on crée des problèmes étonnants, mais cela suscite le besoin de nouvelles solutions, qui elles-mêmes stimulent l'économie. On est dans un système dynamique qui ne sera jamais stable.

C'était une manière d'entamer la discussion, en prenant un peu de hauteur et surtout en rappelant le côté assez particulier de ce système économique.

### **Deux siècles plus tard... Le système industriel, ange ou démon ?**

Les avis sont très partagés, notamment sur le plan géographique. En Europe, le discours est pessimiste. En Asie c'est l'inverse, on en veut encore plus. On a eu tant de privations pendant si longtemps que le discours qu'on entend en Europe sur la décroissance leur semble complètement irréaliste. Je prends note qu'il y a une série d'avis partagés sur la question.

Il me semble aussi qu'il y a une certaine confusion qui règne dans toute cette problématique de l'environnement, de l'avenir du système industriel et de ce qu'on appelle le développement durable en général.

Le grand bazar du développement durable : il existe toute une série de slogans. Il y a des gens qui vous parlent de « *cradle to cradle* » (berceau au berceau), d'autres d'éco-efficacité ou d'émissions zéro, chimie verte, analyse du cycle de vie, production plus propre, écologie industrielle, empreinte écologique, etc. C'est un peu la confusion mais c'est normal car quand la notion de développement durable qui est assez ancienne conceptuellement a été officiellement adoptée par l'Assemblée Générale des Nations Unies en 1987 suite au rapport de Mme Brundtland (ancien premier ministre norvégien) ; tous les milieux économiques et politiques se sont demandés ce que cela signifiait. Petit à petit, ils se sont approprié cette notion très vague pour lui donner un contenu opérationnel pour eux. L'industrie chimique, par exemple, a parlé de chimie verte. Le club des grandes entreprises de la planète : Le *World Business Council for Sustainable Development* à Genève préfère parler d'éco-efficacité, car cela parle aux entreprises.

Comment positionner l'écologie industrielle dans tout cela ? De quoi avons-nous besoin ?

- Un **cadre conceptuel général et rigoureux** pour répondre à la notion de développement durable qui est floue. Je propose l'écologie scientifique : « science qui étudie l'évolution et le fonctionnement des systèmes vivants complexes sur terre » = science théorique et expérimentale ;
- Une **stratégie opérationnelle** (mise en œuvre du développement durable / poursuite d'un développement économique compatible avec la planète) ;
- Une **stratégie collective et coopérative** (échelle systémique) : orienter l'évolution du système industriel dans sa globalité pour qu'il soit compatible avec le fonctionnement de la biosphère. Cela suppose des stratégies collectives et coopératives à grande échelle (c'est l'idée des associations comme Ecopal ou Synéo) pour opérer ces changements. Cela n'empêche pas les entreprises de rester en compétition sur leur marché, mais tout le monde a intérêt à collaborer/coopérer pour faire ces changements à l'échelle systémique.

C'est la combinaison de ces 3 éléments que je vous propose d'appeler l'écologie industrielle.

### **La Biosphère : contraintes et source d'inspiration pour l'économie**

- On admet que le système économique ne flotte pas dans un vide théorique, mais il est ancré dans la planète « terre ». Il y a donc certaines règles de fonctionnement. Tant que le système économique était petit par rapport à la biosphère, les impacts étaient gérables. Mais maintenant qu'il grandit, on doit tenir compte des spécificités de la biosphère. On doit intégrer les contraintes que nous impose le fonctionnement normal des écosystèmes tout en étant au fait que ces contraintes peuvent varier en fonction de la population, son style de vie, ses technologies, etc. L'idée c'est de les prendre en compte, ce qui n'était pas le cas jusqu'à maintenant.
- On peut aussi se dire que dans la mesure où les écosystèmes sont les seuls exemples de systèmes vivants complexes fonctionnant sur le long terme, c'est logique de se dire qu'on peut s'en inspirer. Il ne faut pas stupidement copier la nature mais s'en inspirer. Mais on peut s'intéresser aux solutions retenues dans l'évolution biologique et on voit que souvent c'est difficile de faire mieux. Il faut vérifier que nos solutions soient compatibles avec le fonctionnement des écosystèmes naturels.

### **L'écologie industrielle : une définition**

« Ecologie » = étude scientifique des écosystèmes

« Industriel » = ensemble des activités humaines dans la société technologique moderne (en français, industriel = sens étroit), ici cela inclut l'agriculture, le tourisme, les télécommunications, les loisirs, les soins de santé,...

Le domaine a démarré au début des années 90. Effectivement, j'y ai été associé dès le démarrage. En 1997, la première revue de la discipline (*Journal of Industrial Ecology*) a été créée avec le MIT et Yale. Le terme « écologie industrielle » s'est progressivement imposé.

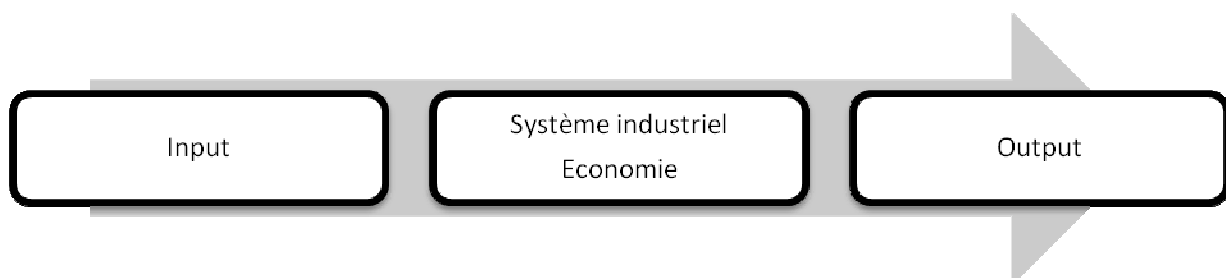
On entend parfois dire que l'écologie industrielle consiste à valoriser les déchets des uns pour en faire des ressources pour les autres. C'est juste mais c'est plus large que cela. L'écologie industrielle vise un usage optimal de l'ensemble des ressources, pas seulement la valorisation des déchets. La valorisation des déchets comme ressource existe dans les écosystèmes, mais il faut le faire en tenant compte du cadre conceptuel de l'écologie scientifique. Sinon les petits malins qui ont eu l'idée de faire des farines animales avec des résidus de boucheries et d'abatage pour nourrir le bétail, ils faisaient de l'écologie industrielle ? Précisément pas, si ils avaient fait de l'écologie industrielle, ils auraient essayé d'optimiser leurs flux de matières mais en vérifiant que le bouclage de ces flux fait sens du point de vue de l'écologie scientifique. Et pas besoin d'être un docteur en écologie scientifique pour savoir qu'en principe les herbivores ne mangent pas de viande. Et si on le fait, il faudrait vérifier les conséquences. C'est là qu'on retrouve le cadre strict de l'écologie scientifique qui nous dit qu'il y'a des choses possibles mais aussi des choses impossibles du point de vue du fonctionnement des êtres vivants.

### **Que fait-on quand on fait de l'écologie industrielle ?**

- **Mesurer, analyser, évaluer, comprendre le système économique.** On le connaît assez bien du point de vue de son fonctionnement financier, et encore. Mais c'est surtout comme cela qu'on l'a étudié et que les doctrines économiques se sont élaborées. En revanche, ce que l'on connaît encore très mal, c'est comment on consomme des ressources, comment elles circulent, comment elles sont utilisées. Et là, on a besoin de nouveaux indicateurs qui permettent de mesurer le système économique, pas seulement en termes de valeurs abstraites mais en termes de son substrat physique, matériel et énergétique. Il existe une série d'outils qui s'est développée ces 15/20 dernières années.
- **Mettre en œuvre des stratégies d'évolution du système industriel**
  - o ...aux différentes échelles pertinentes

Deux grandes méthodologies qui se développent depuis une quinzaine d'années :

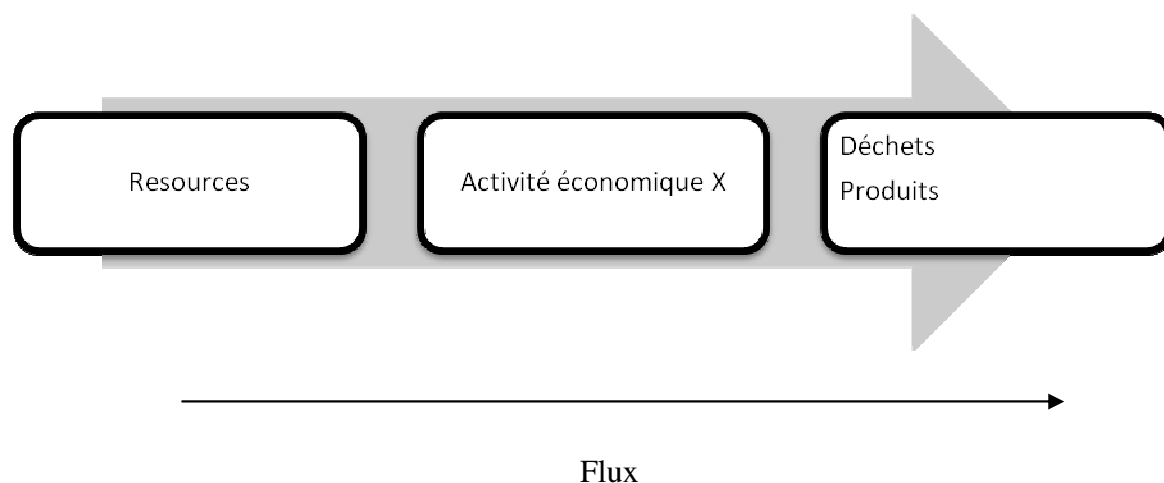
- Analyse de cycle de vie (Life Cycle Analysis qui étudie les impacts potentiels sur l'environnement et la santé – extraction, transport, transformation, fabrication, distribution, utilisation, fin de vie,... (étapes les plus souvent problématiques : utilisation ou fin de vie du produit)
- Métabolisme industriel (Material Flow Analysis - MFA), qui étudie les flux et les stocks de matière et d'énergie



Le métabolisme industriel repose sur une métaphore comme l'écologie industrielle. Si on compare le système économique à un système vivant ce qu'il est puisqu'il est un sous-système de la biosphère avec une espèce particulière (les humains) ; le métabolisme suppose qu'un être vivant prend des ressources dans l'environnement, il les métabolise et puis il les rejette forcément. C'est un schéma tout simple mais par rapport à la vision classique de l'économie, c'est une hérésie. Puisqu'on ne s'intéresse en principe qu'aux flux de valeurs monétaires. L'unité de mesure est monétaire. Ici ce qu'on cherche à savoir, c'est sous chaque unité monétaire (franc, euro,...) qu'est ce qu'on a comme source de valeur. On ne peut pas créer de valeur sans qu'il y ait directement ou indirectement des flux de matière ou d'énergie associés. Même les services les plus abstraits ont besoin d'énergie ou d'un substrat matériel. Ici les unités sont des kilos, des grammes ou des joules pour l'énergie. En fait, on fait de la comptabilité physique. On cherche à comprendre ce qui entre, ce qui sort et comment cela circule. Traditionnellement, les politiques d'environnement se sont focalisées là-dessus, c'est-à-dire essayer de limiter les dégâts à la sortie du processus économique. Il s'agit des technologies « *end of pipe* » (en français : « bouts de tuyaux » c'est-à-dire fin de processus). C'est bien, cela rend service mais cela renforce les technologies existantes. On ne touche rien aux processus existants, on limite simplement les dégâts à la sortie. Cela ne contribue pas vraiment à économiser la ressource en amont.

Quand on fait du métabolisme, on prend en compte les translocations, c'est-à-dire le fait qu'on bouge des quantités gigantesques de matières à la surface du globe, quand on a de l'industrie minière, quand on creuse des tunnels, quand on fait des routes, des ponts, etc. Et cela n'a aucune valeur, en général ce sont des déchets qui sont comptabilisés de manière très indirecte. On ne le voit pas dans les statistiques économiques. Alors que cela et l'irrigation par exemple représentent des flux de matière et d'énergie gigantesques qu'on va maintenant essayer de comptabiliser. Le principe de base est assez simple. Cela consiste à prendre n'importe quelle activité économique et puis de regarder tout ce qui entre et tout ce qui sort. Tout cela découle de la première loi de la thermodynamique qu'on peut aussi formuler sous le fameux principe de Lavoisier : « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » = conservation de la masse et de l'énergie.

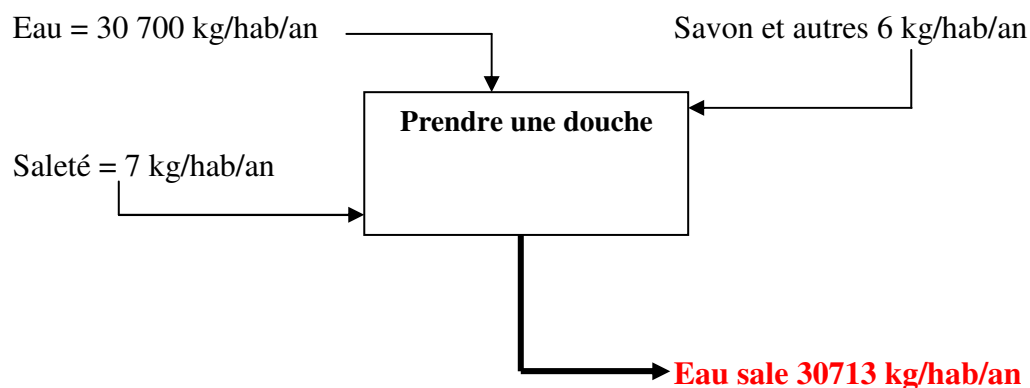
### **Le métabolisme des activités économiques**



Tout ce qui entre ici, obligatoirement ressort là. Il n'y a aucune manière de tricher ou alors si il sort moins qu'il n'entre c'est qu'il y'a un stock qui s'accumule. Comme toujours, il y a au moins une exception que vous connaissez bien en France, c'est que si c'est de l'uranium qui entre, il y'a un peu moins de masse qui sort puisqu'une partie de la masse est convertie en énergie. Mais le bilan (masse + énergie) est toujours constant.

Contrairement à la comptabilité financière, on ne peut pas tricher. Si une tonne entre, une tonne sort. C'est un outil très puissant. Il peut être utilisé pour détecter si des gens touchent des subventions.

Un exemple d'activité économique : prendre une douche. Si il y'a bien une activité hautement industrielle, c'est prendre une douche. Il faut un système très sophistiqué qui va puiser l'eau, la purifier, la mettre sous pression, la traiter, l'amener chez vous, la chauffer (avec tout le système énergétique nécessaire). Ensuite, vous avez des savons, des shampoings. Ensuite, tout cela repart, il aura fallu construire des réseaux d'égouts performants. Tout cela va ensuite dans une station d'épuration des eaux,... ce sont des processus très sophistiqués. On peut faire le métabolisme de la douche :



J'ai pris un exemple totalement invraisemblable. J'ai supposé que le processus était efficace à 100%. Or, on sait bien que ce n'est pas le cas puisqu'une partie de la saleté va aller s'accumuler sur le rideau de douche ou sur les murs de la salle de bain. Ce qui fait qu'il va falloir utiliser des produits de nettoyage. Alors là, cela complique pour la modélisation. Vous pouvez faire cela avec n'importe quelle activité.

### **Le métabolisme du jus d'orange**

On a pris chaque étape du jus d'orange. Il faut commencer par étudier le métabolisme de la culture des oranges. Comme cela vient du Brésil, ça tombe bien il n'y a pas besoin d'irriguer, donc pour l'eau, on met 0 ; et puis il faut du pétrole pour faire marcher les machines, de l'engrais, des pesticides. Ici on s'intéresse à tous les inputs de matière.

Le processus est un peu tarabiscoté puisque l'on a de gigantesques bains-marie pour faire évaporer l'eau pour concentrer le jus à 1000% de sa masse initiale pour éviter de transporter trop d'eau dans les bateaux. Quand cela arrive en Europe, c'est redilué. Ceci pour optimiser les coûts de transports. Le résultat c'est qu'à chaque fois que vous buvez un verre de jus d'orange, en fait vous consommez 22 verres d'eau. Pour tous les produits alimentaires, il y a

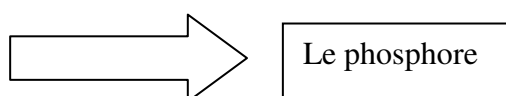
des flux indirects ou « cachés » qui sont considérables. Pour un seul litre de jus d'orange, il faut en tout 25kg de matière. Sur ces objets courants, on informe voire on culpabilise le consommateur sur l'emballage, c'est bien, il faut le recycler mais il faut voir que les vrais problèmes se situent en amont, là où en général, le consommateur final ne le voit pas. C'est en amont qu'il y a souvent des gisements de progrès considérables.

Il y a beaucoup d'études en cours sur les produits mais aussi sur les territoires agricoles. Il y a une étude faite récemment, commandée par plusieurs départements français et le canton de Genève. Il s'agit du métabolisme agricole franco-valdo-genevois : état des lieux et synthèse (Faessler, Gallay, Lachal, 2009). Il est en train de se mettre en place une agglomération franco-valdo-genevoise autour du problème de la transition énergétique auquel on est confronté comme tous les territoires. On voit bien qu'on va assister à une transition où on va essayer de réduire notre dépendance aux combustibles fossiles. En plus du solaire, de l'éolien, on va dépendre de plus en plus de la biomasse, si possible produite régionalement. Il s'agit d'études de métabolisme agricole menées sur deux départements français et deux cantons suisses pour ce projet de coopération transfrontalière. L'idée étant de détecter tous les gisements possibles d'énergies renouvelables sur un territoire donné.

Il est possible de faire le métabolisme sur un flux particulier. Ces dernières années, les études sur le carbone se sont multipliées. Après l'empreinte carbone, l'empreinte hydrique devient à la mode. On a vu l'empreinte hydrique du jus d'orange : 22 litres d'eau pour 1 litre de jus. Pour une tasse de café, on a 140 litres d'eau consommés pour le processus (source : [www.waterfootprint.org](http://www.waterfootprint.org)). On commence à faire des études d'empreinte hydrique, c'est de nouveau dans la problématique des énergies. A un moment donné, dans les énergies renouvelables surtout celles basées sur la biomasse (maïs, blé,...), le facteur limitant pourra devenir l'eau. On a besoin d'avoir un bilan hydrique assez précis de la production de certaines énergies renouvelables. Ces études de métabolisme sont indispensables pour comprendre la durabilité et la viabilité des filières qu'on est en train de mettre en place.

Une ressource particulièrement critique dans un avenir proche ?

- Non substituable
- Non renouvelable
- Recyclable



On parle très peu du phosphore mais il y a une crise du phosphore qui est en train de se préparer. Je ne sais pas où on en est en France ; en Suisse, on a pris cette affaire très au sérieux et on est totalement indépendant des importations de phosphore. D'autant plus qu'il n'y a que quelques pays qui ont de véritables gisements exploitables à des coûts tolérables. Le n°1 c'est le Sahara occidental d'où le problème avec le Maroc mais n'oublions pas que la Chine est un très gros producteur et ils ont très bien compris le problème puisqu'il y'a deux ans, ils ont mis une taxe de 110% à l'exportation du phosphore. Autrement dit, ils veulent garder le phosphore pour eux. Ils ont bien raison, c'est un enjeu crucial. Sans phosphore, il n'y a pas d'agriculture et donc pas de vie puisque le phosphore est la base du métabolisme cellulaire de tous les êtres vivants. On a donc un besoin vital de phosphore. Pendant des millénaires, l'humanité a utilisé le phosphore qu'elle récupérait par le fumier, par les engrais

naturels. C'est bien, mais très limité. On ne peut pas avoir une agriculture industrielle avec cela. C'est au 19<sup>ème</sup> siècle qu'on est allé exploiter les immenses gisements de phosphore minéral mais qui commencent à s'épuiser. Il se pourrait qu'il y'ait un pic de roches phosphatées qui se prépare pour 2030. En Suisse, on a fait une étude du métabolisme du phosphore à l'échelle du pays. Deux usages principaux sont ressortis : agriculture et nourrir les animaux (OFEV, 2009). On étudie où cela passe, qui consomme quoi,... La ressource en phosphore est limitée d'une part et quand on l'utilise, elle est disséminée dans l'environnement d'autre part. Quand on utilise des engrais phosphatés dans les champs, ils sont lessivés et vous avez des problèmes d'eutrophisation des eaux. La priorité est de recycler le phosphore et fermer la boucle. Il existe plusieurs options. La plus étudiée en Suisse comme dans beaucoup de pays européens, c'est d'extraire le phosphore des cendres d'épuration (les boues d'épuration des eaux municipales sont incinérées). Une autre option serait de favoriser l'agriculture qui utilise plus intelligemment les engrais pour diminuer le gaspillage de phosphore. Une autre encore, c'est carrément d'aller chercher le phosphore dans l'urine. Chaque jour, l'être humain excrète 1,5 g de phosphore. Il y a des toilettes qui ont été mis au point (« NoMix ») par l'Institut de recherche sur les eaux près de Zurich consistant à récupérer l'urine et d'en extraire le phosphore. Cela aurait des implications intéressantes en termes d'architecture. Il faudrait concevoir un système de collecte des urines à l'échelle d'un immeuble avec un système de ramassage et de traitement des urines. Cela créerait pas mal d'emplois. Mais ces stratégies ne sont possibles que lorsque vous avez fait l'étude du métabolisme en amont.

Une autre idée qui est assez à la mode : les fermes verticales (3D Farming). L'humanité a toujours fait de l'agriculture en 2 dimensions. Pourquoi pas en 3D ? L'intérêt, outre les économies de terrain serait de permettre de se rapprocher des villes (arrêter de faire venir de la nourriture de l'autre bout de la planète). Ce sont aussi des systèmes quasiment fermés où on peut facilement contrôler les intrants et les extrants. Le peu de phosphore qu'on y mettrait pourrait être facilement récupéré. On ne peut jamais avoir des systèmes 100% efficaces mais cela n'a rien à voir avec le fait de disperser jour après jour des engrais, des pesticides sur les champs qu'on n'arrive pas à récupérer ; ce qui constitue des pertes sèches. En plus, comme c'est en milieu urbain on peut récupérer la chaleur pour chauffer les bâtiments alentours. Alors là, on est tout à fait dans un concept d'écologie industrielle. On essaye de recréer une sorte d'écosystème où les humains maîtrisent autant que possible les différents paramètres. La première ferme qui prétend être une ferme verticale a été inaugurée à Singapour en 2011, mais pour le moment cela ressemble plus à une sorte de serre assez sophistiquée sur plusieurs étages. On voit bien qu'on peut aller beaucoup plus loin. Ce qui importe, c'est cette idée qu'on a des systèmes qui arrivent à stopper le gaspillage de ressources vitales comme le phosphore.

Pour arriver à la conclusion de ce chapitre sur le métabolisme, il y'a un autre projet très intéressant qui se développe depuis quelques années. C'est l'application du métabolisme industriel à l'échelle nationale. Vous connaissez tous la comptabilité nationale. On n'imagine pas aujourd'hui un état moderne sans comptabilité nationale. Rappelez-vous que cela est récent, cela fait à peu près un siècle. Pendant longtemps, les Etats n'avaient pas de

comptabilité véritable. Aujourd'hui, on est en train de mettre en place une comptabilité nationale physique pour nous dire à partir de quoi a-t-on créé de la valeur. Le mouvement a été lancé formellement par le G8 en 2004 lors du sommet à Evian où le Japon a insisté pour que le G8 lance un processus d'harmonisation des comptabilités physiques nationales. Ils ont donné mandat à l'OCDE qui a collaboré avec Eurostat pour mettre au point une méthodologie, à partir de quoi, on a élaboré une série d'indicateurs qui sont des nouvelles mesures de la performance économique et qui vise à mesurer quelle valeur ajoutée on arrive à créer à partir de quelle quantité de matière et d'énergie. De plus en plus, la performance des économies ne sera plus évaluée à partir du PIB mais quel PIB on arrive à avoir avec quelle consommation de matière et d'énergie. Plus les pays vont arriver à découpler, c'est-à-dire à produire beaucoup de PIB avec peu de matière et d'énergie, plus on va considérer qu'ils sont compétitifs. Les enjeux politiques sont importants.

Parmi les intrants dans l'économie nationale, il y a tout ce qui est extrait à l'intérieur du pays (dans ce qui est extrait, il ya tout ce qui est utilisé et non utilisé, en général le « non utilisé » est beaucoup plus gros que ce qui est utilisé car on utilise encore souvent les choses inefficacement- là il y a un gros gisement de progrès) et puis il y a toutes les importations. Il y a des discussions complexes qui vont durer plusieurs années au sujet des flux indirects. Quand vous fabriquez des voitures en France et que vous les équipez de pots catalytiques qui contiennent des grammes de rhodium et palladium pour traiter les gaz d'échappement. Mais derrière chaque gramme de rhodium ou de palladium, il y a plusieurs dizaines de tonnes de déchets miniers quelque part au Chili, en Sibérie, en Afrique du Sud ou en Australie. Pour le moment, ce n'est pas comptabilisé en France mais idéalement on devrait. Il y a tout un débat. A qui alloue-t-on ces flux indirects ou « cachés » ? Ce n'est pas tout à fait trivial de les quantifier, de les évaluer,... Surtout si un jour on veut taxer les économies qui ne sont pas efficaces. Il faudra arriver avec des méthodologies robustes pour quantifier tout cela. On peut le faire à l'échelle régionale. Dans le cas de Genève, on a carrément réussi à mettre cela dans la loi. Il y a même le projet d'inscrire l'écologie industrielle dans la nouvelle Constitution du Canton de Genève. Mais on a déjà passé une loi sur le développement durable qui intègre cette notion de métabolisme et d'écologie industrielle. La première démarche consistait à voir quel était le métabolisme régional. C'est une échelle intéressante, comme l'a aussi fait Ecopal avec les entreprises du dunkerquois, c'est aussi entrain de se faire pour les 5 pays de l'estuaire du Havre, pour la Wallonie,... On l'a fait il y a une dizaine d'années à Genève (Faist et *al.*, 2000). Cela a servi de base pour lancer des programmes d'actions. Ce qui est intéressant, c'est que c'est très spécifique à chaque territoire, dans le cas de Genève il y avait un problème mis en avant très vite : les matériaux de construction. On n'a plus de gravier, et même si il y a du gravier géologiquement accessible, c'est un territoire riche avec de belles villas et les gens n'ont aucune envie qu'on ouvre de nouvelles gravières. On a deux problèmes : on n'a plus accès aux gravières et si on ne creuse plus de gravières, on n'a plus de trous pour mettre les déchets de construction et de démolition. Une seule solution : il faut systématiquement recycler tous les déchets de démolition, de construction et notamment produire du béton à partir de graviers recyclés. Tout cela a servi de base à de grands programmes qui se sont mis en place qui visent à optimiser tous les matériaux de construction à l'échelle de Genève. Cela s'est fait en coopération avec tous les acteurs de la profession de la région.

Si je reviens aux statistiques nationales, je n'ai pas trouvé pour la France. En tout cas, si je reprends la Suisse qui est comparable à la France (pays industrialisé). On a de l'ordre de 15 tonnes de matières directement utilisées (DMI) par habitant en 2001 (103 millions de tonnes). Le plus gros correspond aux matériaux de construction, aux minéraux. Ce qui est important aussi ce sont toujours les produits fossiles. Cela ne va pas être facile de se libérer des énergies fossiles. On en est encore très loin. La biomasse évidemment, ça c'est toute l'agriculture, etc.

Mais maintenant, si on tient compte de ces fameux flux « cachés », ce n'est plus 15 tonnes / jour / habitants, c'est près de 42 tonnes. Encore, on pourrait comptabiliser en plus l'eau et l'air. Ici l'eau, c'est 2,5 milliards de tonnes. Quand je parle de comptabiliser l'air, cela signifie par exemple l'air qu'on consomme pour faire fonctionner l'incinérateur municipal (principale source de consommation de l'air). Ces fameux flux indirects sont très importants, si vous imaginez une bague en platine qui pèse 4 grammes, vous avez l'équivalent d'un camion de 5 tonnes de déchets miniers quelque part sur la planète. (OFS, 2007) = TMR (total material requirement).

On retombe sur la question de l'allocation des flux indirects. Le principe actuel est celui de la territorialité. Un exemple typique : le protocole de Kyoto ; les émissions de CO<sub>2</sub> en Chine sont imputées aux Chinois même si ils produisent des biens pour d'autres pays. Les chinois, les indiens commencent à réagir et disent qu'on devrait imputer aux pays importateurs les flux de CO<sub>2</sub>. La discussion commence à être chaude. Et cela vous pour tous les autres flux.

Encore un mot sur les stocks avant de conclure sur le métabolisme. On ne réalise pas toujours que l'humanité est en train de créer un stock industriel, sous forme de bâtiments, de routes, d'aéroports, de satellites,... surtout depuis la fin de la seconde guerre mondiale. On n'a encore rien vu du point de vue des déchets. Je parle du volume, pas des déchets toxiques. Le jour où il faudra tout démolir, remplacer toutes ces infrastructures, cela va commencer à faire beaucoup de déchets. Il faudrait concevoir ces infrastructures pour qu'elles soient réutilisables ou démontables de manière spécifique. En outre, ces stocks d'infrastructures contiennent des ressources et notamment des métaux. Je vous projette une estimation en bleu des quantités de différents métaux qui ont déjà été extraites de la croûte terrestre à des conditions économiquement acceptables. Il y a d'autres sources mais pour le moment, on considère qu'elles ne sont pas accessibles. Le stock déjà extrait n'a pas disparu. C'est où ? Autour de nous, c'est l'aluminium dans les façades, les poutres en acier,... Ce sont des quantités gigantesques de métaux qui sont immobilisées dans nos infrastructures. L'enjeu va être d'exploiter ces gisements anthropogéniques. C'est quand même paradoxal de se dire qu'on continue à dépenser beaucoup d'argent et d'énergie pour aller creuser des mines qui ont de très faibles teneur en cuivre par exemple alors qu'on a des gisements de cuivre pur dans les infrastructures. Mais cela supposerait de développer des méthodologies spécifiques. On a toujours développé des techniques permettant d'exploiter un gisement à faible teneur mais homogène (gisement géologique). Dans les villes, on a des gisements qui sont extrêmement concentrés mais très hétérogènes. Il va falloir développer des cadastres anthropogéniques pour connaître les quantités de métaux qu'il y a dans les bâtiments.

On veut essayer d'orienter l'évolution du système économique : il s'agit de la « maturation » des écosystèmes industriels. C'est une allusion à la théorie du climax qui décrit l'évolution des écosystèmes naturels. Il y a toujours un état juvénile dans lequel l'écosystème consomme beaucoup de matières inefficacement avec des espèces pionnières, peu d'espèces, peu de biodiversité, beaucoup de compétition. Avec le temps, sous nos latitudes, si on abandonne un bâtiment ; dans un siècle, on aura un écosystème mature sous forme d'une forêt, avec beaucoup d'espèces, qui consomme peu de matière car il la recycle. C'est ce qu'on appelle un écosystème mature. Par analogie, on veut orienter le fonctionnement du système industriel qui est très jeune (état juvénile) vers quelque chose qui ressemble à un écosystème mature, c'est-à-dire viable et durable sur le long terme.

J'ai résumé en quatre mots-clés cette stratégie : boucler, étanchéifier, intensifier (dématérialiser) et équilibrer (décarboniser) :

### 1) Boucler

On cherche à faire ce que font les écosystèmes c'est-à-dire avoir une économie quasiment cyclique. Il est impossible qu'elle le soit totalement à cause de l'entropie. Mais on peut faire infiniment mieux qu'aujourd'hui. Cela inclut le **recyclage** au sens usuel. Je voudrais juste rappeler que ce qu'on appelle aujourd'hui le recyclage est très primitif, c'est le néolithique. On a un gisement potentiel d'innovation pour les technologies de recyclage qui est incroyable. Cela suppose de faire des recherches dans des écosystèmes quasiment clos pour tester comment on arrive à recycler de manière performante. On va maintenant parler des **réseaux éco-industriels** permettant une gestion intégrée des ressources. Il s'agit de la démarche en œuvre dans le dunkerquois avec Ecopal et ailleurs en France et en Europe ; mais aussi à grande échelle en Chine (150 programmes en cours sur les grandes zones industrielles). Dans les écosystèmes, on a des échanges entre les différentes populations d'espèces et notamment, les outputs de certaines espèces servent d'inputs à d'autres. L'idée est simple mais la mise en œuvre est complexe. Le modèle privilégié du développement industriel au plan mondial depuis une quarantaine d'années est le parc industriel. Les gouvernements aiment bien regrouper les entreprises dans une zone donnée. Ceci pour des raisons économiques et politiques. Cela présente un certain avantage du point de vue environnemental puisque dans la mesure où elles ne sont pas trop éloignées, on peut imaginer des échanges de vapeur, d'eau, de cendres,... (co-produits et sous-produits). C'est ce qu'on appelle des réseaux éco-industrielles ou plus spécifiquement des symbioses (faisant allusion au fait que dans les écosystèmes, les espèces différentes vivent en association mutuelle). Cette démarche a été suivie dans différentes régions du monde (Suisse, dunkerque, région du Havre, Wallonie,...). La raison est simple : la pression sur les ressources augmente, et tout ce qui permet d'utiliser des ressources plus efficacement est bon à prendre. Cela permet en principe de diminuer le coût d'achat de la ressource et puis surtout de diminuer les coûts de traitement. C'est aussi un facteur économique qui incite à opérer ce genre de démarche et pas uniquement environnemental. Ce qui est assez nouveau, c'est cette idée de faire des symbioses intersectorielles. A l'intérieur d'une filière donnée, les gens se connaissent, on a déjà ce type de synergies, souvent très anciennes (ex : sidérurgie). Ici, on cherche à réunir des acteurs de différents secteurs. Quelles synergies peut-on avoir entre une blanchisserie, une manufacture

d'horlogerie, une boucherie et puis une scierie par exemple ? On s'aperçoit vite qu'il peut y en avoir. Ou alors entre une usine qui fait du lait et des yaourts et des agriculteurs : la chaleur perdue peut chauffer les serres en hiver, etc. Avec des collègues, on a développé une méthodologie qui permet de détecter et appareiller les flux pour développer des synergies (outil « SymbioGIS »). On a les coordonnées géographiques de toutes les entreprises, on a fait l'étude du métabolisme général, on a les entrants et les sortants. On voit qu'il y a beaucoup de possibilités qui peuvent émerger mais seulement quelques-unes seront faisables du point de vue réglementaire, économique, technique, etc. Ensuite, parlons de la **gestion intégrée des ressources**. Une entreprise qui a bien compris ces enjeux, c'est Lafarge qui a développé un nouveau métier : transformateur de ressources. Sur un territoire donné, il y a beaucoup d'acteurs économiques qui génèrent des déchets dont ils ne savent pas quoi faire (le traitement coûte cher) et puis il y a d'autres acteurs qui consomment des ressources pour leur activité. Mais en général le déchet de l'un n'a pas la forme exacte convenant à celui qui pourrait l'exploiter. Ce n'est pas le bon pH, la bonne température, la bonne granulométrie. Il y a donc un nouveau métier industriel qui consiste à se positionner comme l'acteur qui connaît les process, qui sait où sont les gisements et de quoi ils sont composés, comment on organise la logistique, comment on les transforme, et à qui le vendre. Pour le moment, ils constituent leur seul client. Ils ont créé « Lafarge Industrial Ecology International ». Cette entreprise est active dans une quarantaine de pays. En Ouganda, ils récoltent systématiquement tous les sous-produits de l'industrie du café et ils les exploitent dans leurs cimenteries en substitution du pétrole comme combustibles ; en plus ils améliorent leur bilan CO<sub>2</sub> ; ils créent des emplois localement, etc. Aux Philippines, ils font la même chose avec les cosses de riz. Au Koweït, ils ont un mandat : ils se font payer pour valoriser les gigantesques lacs de pétrole datant de la guerre du Golfe quand Sadam Hussein était parti en incendiant les puits de pétrole. Il reste des lagunes de pétrole mélangées à du sable. Les cimentiers aiment bien le sable. Alors ils ont mis au point une technologie permettant de vaporiser ce sable mélangé à du pétrole pour le valoriser dans leurs cimenteries. D'un pays à l'autre c'est extrêmement différent, mais ce qu'ils ont bien compris c'est ce nouveau business qui consiste à savoir où sont les gisements de matières premières, les transformer et ensuite les réutiliser soit chez eux, soit et ce serait l'étape suivante (je ne sais pas si ils vont le faire, mais nous avons l'intention de le faire) d'accompagner les entreprises pour faire des process de modification. Et là, je pense qu'il y a un gros potentiel pour les entreprises sur ce créneau.

Mais il y'a une autre manière de voir cette idée de symbiose, c'est qu'on appelle les « biocénoses ». En écologie scientifique, on a constaté que les espèces ne sont pas réparties au hasard dans la nature. Tel type d'insecte va avec tel type d'arbre, etc. On peut imaginer de créer des symbioses sur un site où vous avez des activités complémentaires. Il existe une expérience intéressante près de Reims, c'est la Bioraffinerie de Pomacle Bazancourt. A l'origine c'était essentiellement des betteraviers et petit à petit se sont greffées d'autres activités. Bioamber développe les synergies au sein de la bioraffinerie de Bazancourt Pomacle : blé, coproduits blé/betteraves, betteraves, centre de R&D, Biomasse énergie

En outre, il y a une démarche de bioéconomie (se libérer de la source fossile pour aller vers des matières premières d'origine biologique). Là, par exemple, il y a une forte demande pour

un produit qui est l'acide succinique (différentes applications en chimie fine), il y a trois entreprises sur le site qui fournissent chacune un de leurs produits ou sous-produits par exemple du CO<sub>2</sub> pour faire cet acide succinique. Ils sont parmi les tous premiers à faire ce genre de chose. Je pense qu'il y a un énorme avenir autour de ces bioraffineries avec tous les emplois à la clef, qui sont non délocalisables. Ca doit être ancré dans un territoire, cela dépend des spécificités climatiques, des sols, de l'eau et du savoir-faire.

Pour conclure sur les symbioses industrielles et les synergies éco-industrielles, mon expérience c'est que c'est assez rare finalement qu'on arrive à mettre en œuvre une symbiose industrielle entre une entreprise X et une entreprise Y. Cela arrive, mais ce n'est pas facile. Mais j'ai constaté que la démarche de mise en réseau des entreprises sur un territoire (favorisée en général par le biais d'association ou les pouvoirs locaux + les entreprises qui s'impliquent) a souvent des bénéfices collatéraux, immanquablement :

- Mise en relation d'entreprises qui s'ignorent (on n'avait pas eu l'idée de parler de ces sujets là jusqu'à présent)
- Certification de zones (valeur ajoutée territoriale) / Attractivité des zones (c'est notamment le cas en Asie pour garantir que les zones responsables où il n'y a pas de risque que les ONG ou associations environnementales leur tombent dessus)
- Approvisionnement assuré de certains flux, comme l'eau ou l'énergie
- Redynamisation de l'économie locale : plus on rend les entreprises interdépendantes, plus le coût de la délocalisation est élevé (oui l'entreprise aurait gagné à partir à l'autre bout de la planète, mais elle gagne aussi beaucoup ici en recevant des matières meilleur marché parce que ce sont des sous-produits de ses voisins) / Relations de bon voisinage
- Catalyseur pour la transition énergétique ; presque toujours quand on fait une symbiose industrielle, il y a un enjeu énergétique (sous forme d'eau, de vapeur, de chaleur perdue, etc.) / cela va favoriser la transition énergétique en diminuant la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles
- Nouvelles activités industrielles, nouveaux métiers, nouvelles entreprises (ex : Lafarge a développé une nouvelle activité)

Indépendamment de savoir si la symbiose se réalise ou non, ce sont des démarches qui peuvent être intéressantes.

## **2) Etanchéifier**

Il s'agit de minimiser ou rendre bénignes les pertes dissipatives durant tout le cycle de vie des produits et des services. Notre système industriel se caractérise par le fait qu'il jette l'argent et la matière par les fenêtres. On passe notre temps à dissiper de la matière et de l'énergie. Il y a beaucoup de produits qui rendent obligatoire la dissipation dans l'environnement par leur usage normal. Les engrais, les pesticides, les solvants, les cosmétiques, les médicaments,... le fait même de les utiliser suppose qu'ils sont dispersés dans l'environnement sans possibilité de les récupérer en principe. Il faut reconcevoir tous les produits pour que quand on ne peut pas empêcher leur dissipation, cette dernière soit inoffensive pour la santé humaine et l'environnement. C'est la problématique des micropolluants (« Alerte aux micropolluants »,

ERKMAN et Chèvre, 2011) c'est-à-dire les polluants en très faible quantité. L'industrie pharmaceutique va devoir se réinventer. Les gens consomment des médicaments et les excrètent ; ces médicaments se retrouvent dans les égouts, à la STEP et c'est comme cela qu'on a détecté des problèmes comme le changement de sexe des poissons en aval de la STEP du aux œstrogènes rejetés. Les médicaments modifient les milieux et ont des impacts sur les espèces. Jusqu'ici l'industrie pharmaceutique a fait son possible pour développer des molécules très spécifiques qui ont un minimum d'effets secondaires sur la santé humaine. Ce que l'on veut en plus, c'est que ces médicaments n'aient pas d'impact négatif sur les espèces végétales et animales. Cela vaut aussi pour l'industrie cosmétique, la peinture, les solvants, tout ce qui se dissipe dans l'environnement. Tout cela se regroupe sous le terme de la « chimie verte ». Les villes sont des sources importantes de micropolluants : produits pharmaceutiques, produits cosmétiques, trafic automobile, matériaux de construction, produits de nettoyage,...

### 3) Intensifier (dématérialiser)

Il s'agit de découpler les activités économiques de la consommation de ressources matérielles et énergétiques mais aussi des impacts négatifs sur l'environnement. Pas facile, car la population augmente, le niveau de vie augmente. Voici des exemples concrets :

- Dématérialisation des emballages : plus légers : Coca a réussi à diminuer de 15% la masse d'aluminium de ses cannettes, 830 tonnes économisées par an pour les cannettes vendues annuellement en France.
- Nouveau job : dématérialiseur produit : « où puis-je économiser de la matière ? » (faire la même chose avec moins de matière)
- Nestlé avec sa poudre plus fine : les ingénieurs de Nestlé cherchaient à diminuer les coûts de conditionnement du chocolat en poudre (plastique). Les boîtes transportaient de l'air entre les grains, ils ont développé une poudre plus fine qui a permis d'économiser 268 tonnes de matière par an avec toute l'énergie qu'il y a derrière puisqu'il n'a pas fallu transporter et transformer toute cette matière. En termes de design, de conception des produits, on peut faire beaucoup de choses intéressantes. Naturellement, il s'agit d'une dématérialisation relative, parce qu'on a dématérialisé le produit mais en même temps comme on fait tout pour augmenter les ventes, la consommation totale de matières a augmenté mais moins que si on n'avait rien fait. Ce qu'il faut faire pour les ressources cruciales, c'est atteindre une dématérialisation absolue.
- Dématérialisation par allongement de la durée de vie fonctionnelle - ex : (une table qui grandit en même temps que les enfants). Il faut que le produit soit aussi solide que les autres parce qu'autrement vous avez dématérialisé au moment de la production mais vous rematérialisez car le produit dure moins longtemps et il faut en racheter un.
- *Product Service Systems* : économie de fonctionnalité = vendre la location (le service) au lieu du produit – déplacement du « centre de gravité » de l'activité économique. Les modalités d'utilisation et de propriété évoluent. Aujourd'hui si vous voulez chauffer votre maison individuelle, vous devez acheter une chaudière qui va commencer à avoir des difficultés au bout de quelques années. Une fois la garantie

finie, on va vous dire d'en racheter une. En gros, tout le système est fait pour augmenter la production, gaver un public qui n'a pas forcément besoin de ces objets. Mais pour revenir à l'exemple de la chaudière, ce qui m'intéresse c'est le confort thermique. Or, aujourd'hui, dans le système actuel, on a tout intérêt à vendre le plus de chaudières possible puisque les emplois et les bénéfices se font sur la vente de tonnes de métal sous forme de chaudières. En plus, les vendeurs ne se préoccupent pas de la consommation de ma chaudière. En revanche, si je demande plutôt un certain niveau de température, c'est l'entreprise qui reste propriétaire de la chaudière. Le propriétaire de la chaudière qui me vend le service va tout faire pour qu'elle dure le plus longtemps possible, pour qu'elle ne tombe pas en panne, pour qu'elle ne consomme pas. Plus il diminue la quantité de matière et d'énergie consommée, plus il augmente sa marge. Dans ce système, on garantit la performance du service.

- Système industriel actuel : on crée de la valeur en vendant des produits = Value based on product. Maintenant, on aimerait de plus en plus aller capturer la valeur sur la performance des services pour modérer la consommation de matière = Product oriented service (vente de produits, de consommables, de services d'entretien). L'idée est de développer de nouvelles chaînes de valeur. Ensuite on peut s'orienter vers le Use oriented Service (location, contrat d'utilisation, ex : photocopies) – il y a une usine de démontage de photocopieuses en Hollande ; désormais les photocopieuses contiennent des pièces d'autres machines démontées (réutilisation des pièces). On peut aller plus loin en vendant de la performance (Result Oriented Service). Par exemple, je ne vais plus vendre des pesticides ou des engrais, je vais vendre à un agriculteur une garantie de récolte agricole ; l'entreprise va donc essayer d'optimiser l'exploitation des engrais et des pesticides. Un autre exemple, c'est le « chemical leasing ». Je suis une PME qui a besoin de produits chimiques (ex : peinture). Le modèle traditionnel est qu'on veut me vendre de la peinture ou n'importe quel solvant. Maintenant si je dis que je veux acheter de la surface peinte. On ne cherche plus à acheter le produit chimique mais la performance → Value based on service. Dow Chemical avait un slogan : « rent a molecule ». Je n'achète plus un solvant dont je ne sais plus quoi faire après, j'achète la fonctionnalité de la molécule et l'entreprise vient rechercher le solvant et ils ont un système pour le régénérer. Tout cela suppose de repenser les produits en amont et surtout les modèles économiques qui vont permettre de capturer la valeur autrement qu'en vendant de la masse. On aura toujours besoin de masse, mais l'idée est que la source de la croissance économique ne sera pas de vendre toujours plus de matière avec tous les problèmes que cela suppose. N'oubliez pas qu'une bonne partie de l'énergie qu'on consomme c'est pour la matière : l'extraire, la transformer, la raffiner, la traiter. Une des meilleures manières de négocier la crise énergétique qui nous attend, va être de modérer la consommation de matière.

#### **4) Equilibrer (décarboniser)**

Il s'agit de ré-équilibrer la « diète » du système industriel. Le système industriel consomme trop de carbone (une économie omnivore !). Pendant des milliers d'années, l'humanité s'est contentée d'un certain nombre de matériaux relativement simples : bois, métaux, ... Toute

une série de métaux rares a commencé à être utilisé il y a une vingtaine d'années et c'est lié au développement des énergies renouvelables. Si vous voulez faire des bons moteurs d'éoliennes, il faut des aimants très performants donc de Samarium, de Dysprosium,... autant d'éléments que l'on n'utilisait pas auparavant. Il y a un problème de rareté et beaucoup d'entreprises ont lancé des programmes de substitution. Jusqu'à aujourd'hui, on a plutôt cherché la performance. Je vais aller chercher un métal très rare car j'ai besoin d'une performance très spécifique. Si vous prenez l'exemple de la filière photovoltaïque qui est une des filières les plus polluantes au monde (par unité de produit – industrie du silicium). Vous pouvez faire soit des cellules photovoltaïques qui ont une très bonne performance mais qui nécessitent des métaux très rares et très polluants (au moment de leur extraction et de leur purification) soit accepter de diminuer la performance des cellules photovoltaïques en utilisant des matériaux plus courants.

Le problème n°1 c'est le carbone fossile. Ce rééquilibrage va être très spécifique aux régions. Il faut redécouvrir le génie du lieu. Tout s'est fait dans un espace abstrait où n'importe quelle matière première ou n'importe quel process peut être mis n'importe où sur la planète pourvu que le travail soit bon marché. Tout cela suppose au contraire qu'il va falloir de plus en plus remettre en valeur les caractéristiques d'un endroit, optimiser le métabolisme industriel propre à une région. Le métabolisme sera différent suivant que vous êtes dans un pays subsaharien ou en Norvège.

Il faut diminuer les impacts de la consommation de carbone fossile et réduire la dépendance au carbone fossile. J'aimerais attirer votre attention sur une stratégie typique d'écologie industrielle qui est en train de se développer : **la planification énergétique territoriale**. Le plus important ici, c'est un changement de paradigme. On a beaucoup abordé l'énergie d'une manière soviétique, je veux dire par là dans une perspective productiviste. Il faut toujours produire plus d'énergie. Même les gens en faveur des énergies renouvelables sont très souvent dans l'idée de continuer à produire beaucoup d'énergie seulement on va la produire de manière renouvelable. Ici, on va se faire que la production d'énergie n'est pas une fin en soi. Ce qu'on veut c'est un confort, un niveau de vie. On va faire le maximum pour garder notre confort de vie et l'étendre au reste de la planète. Le but n'est pas de consommer de l'énergie en tant que telle. Dans chaque région, on va faire une analyse détaillée de l'offre énergétique régionale en complément des sources d'énergie traditionnelles (ressources énergétiques locales : eau, forêt, biomasse, géothermie,...). Cela peut se faire à différentes échelles. Ensuite, on fait une analyse de la demande énergétique pour une région donnée et on regarde comment diminuer cette consommation en maintenant le même niveau de confort (mesures d'économie d'énergie : isolement des bâtiments,...). Après, on va aboutir à la quantité d'énergie dont on aura besoin (consommation incompressible). Et cette énergie nécessaire à la demande incompressible, on va tout faire pour qu'elle soit d'origine renouvelable. En premier lieu donc, on essaye de minimiser la consommation. Dans un second temps, on s'assure que l'énergie qui sera consommée sera renouvelable avec le moins d'impact possible sur l'environnement. Ce n'est pas vraiment une question d'innovation technologique mais d'innovation organisationnelle, d'idéologie, de planification.

Un exemple de planification énergétique territoriale : le projet de quartier « *Genève Lac Nations* ». On a analysé l'offre énergétique régionale à laquelle on a confronté la demande locale. Le quartier se situe au bord du lac. On va chercher de l'eau à 13m de profondeur (13°C toute l'année) pour créer un réseau d'eau froide pour rafraîchir les bâtiments en été. En hiver, le même réseau est couplé à des pompes à chaleur qui vont extraire la chaleur du sol. Ce qu'il faut c'est de l'électricité qui est produite par un barrage. Elle est donc aussi renouvelable.

Ici ce qui est nouveau c'est la méthodologie, la manière dont on a analysé l'offre énergétique de l'écosystème régional, la mise en relation avec la demande prévisible pour les décennies à venir, toutes les mesures pour maîtriser la consommation et alors ce qu'on va consommer, on le fait sous forme d'énergie renouvelable. Et suivant la région, ce seront des solutions totalement différentes. Ce qui est important, c'est cette démarche de type éco-systémique typique de l'écologie industrielle.

### **Le problème du CO<sub>2</sub> dans la perspective de l'EI ?**

Dans cette perspective, on peut aussi regarder l'enjeu du CO<sub>2</sub> d'une autre manière. On va se tourner vers les écosystèmes naturels pour voir ce qu'ils ont fait avec le carbone. Il y a quelques centaines de millions d'années, la vie a inventé la respiration aérobie en présence d'oxygène. Avant c'était la respiration anaérobie qui produit un déchet : le méthane. Quand on respire de l'oxygène, on produit du CO<sub>2</sub>. Cela a modifié la composition chimique de l'atmosphère. On ne sait pas comment cela s'est passé. Les organismes ont du se rassembler et fermer la boucle : invention de la photosynthèse. J'utilise de l'énergie solaire pour casser la molécule de CO<sub>2</sub>, au passage je régénère l'eau par évapotranspiration et par photosynthèse j'extrait le carbone de l'air qui est le déchet du métabolisme des autres êtres vivants et j'en fais des produits (sucres, éléments chimiques) servant de nourriture aux autres.

Que font les humains depuis deux siècles avec le système industriel ? Ils puisent du carbone essentiellement d'origine fossile. D'une mine souterraine, ils en font une mine atmosphérique. On paye des taxes pour aller créer une mine de carbone dans l'atmosphère. Je me dis qu'on pourrait en faire quelque chose de ce carbone. Pourquoi ne minerait-on pas l'atmosphère de la même manière qu'on mine le carbone fossile. On rajoute 10 milliards de tonnes de carbone chaque année. C'est une idée qui commence à faire son chemin. C'est un projet que j'ai appelé : Richesse Carbonée Globale. Différentes technologies sont entrain d'être développées pour la capture du CO<sub>2</sub>. Attention, je ne vous parle pas de la séquestration du carbone à la sortie des process (sources concentrées : centrales à charbon, cimenteries,...) où l'idée est de comprimer le CO<sub>2</sub> pour aller l'enfouir dans des structures géologiques. Mais pourquoi le cacher ? Pourquoi ne pas en faire un produit à valeur ajoutée ? En allant chercher le carbone pas seulement dans les sources concentrées mais aussi dans l'air (en gros ce que font les plantes). Ce n'est pas facile, mais il y a différentes technologies en cours de développement. L'enjeu sera énergétique : où trouver l'énergie pour casser la molécule de CO<sub>2</sub> de l'air ? Comment faire pour concentrer ce CO<sub>2</sub> ? On sait que les plantes le font. C'est donc en principe faisable. Il y'a beaucoup de travaux sur ce sujet. On commence à faire de magnifiques produits avec le CO<sub>2</sub> atmosphérique : matériaux de construction, polymères,... Une fois que vous avez une source de carbone et d'oxygène, vous pouvez faire toute une

chimie. Vous voyez quand dans la perspective de l'écologie industrielle, on peut voir les problèmes sous un autre angle. C'est clair qu'on a un problème avec le climat, alors pourquoi ne cherche-t-on pas à le résoudre ? Regardons les possibilités qui vont dans ce sens là. Je vais conclure.

### **Des activités pour demain**

Tout cela suppose que de nouvelles activités émergent. Par exemple :

- Analystes en métabolisme socio-industriel
- Gestionnaires de réseaux éco-industriels (invention de Gaz de France. Quand on travaillait sur le projet de Dunkerque il y'a une douzaine d'années, quelqu'un (EDF, GDF, Suez, Veolia,...) voulait se positionner comme gestionnaire d'un écosystème industriel car ces acteurs connaissent tout le monde, fournissent de l'énergie ou de la matière à tout le monde, traitent leurs déchets, connaissent leur process. Ils sont bien placés pour offrir un service à valeur ajoutée de gestion des flux à l'échelle d'une zone)
- Desmologues territoriaux (desmologie : science des réseaux – étude de tous les nouveaux réseaux qu'on peut créer entre les différents acteurs (économiques, politiques,...) d'une région pour redynamiser l'économie avec l'utilisation plus efficace des ressources)
- Optimiseurs de fonctionnalité (au lieu de vendre du produit, vendre de la performance)
- Dématérialiseurs produits et systèmes
- Rudologues systémiques (rudologie : science des déchets – Comment peut-on valoriser les déchets à l'échelle d'un territoire, d'un système ?)
- Diététiciens territoriaux (analyse du métabolisme d'un territoire pour le rendre plus performant et plus équilibré par rapport à l'écosystème local)
- ...

### **Table ronde...**

Franck SPRECHER : Merci pour cet exposé, je vous propose d'échanger.

Question 1 : J'ai une question sur l'obsolescence programmée des produits. Ne serait-il pas plus logique de fidéliser le client en lui amenant un produit récupérable et recyclable en fin de vie et permettre à la personne de payer moins à chaque renouvellement du produit ?

Suren ERKMAN : Oui tout à fait, l'exemple caricatural de l'obsolescence programmée, c'est les ampoules électriques. Il y'a une ampoule célèbre qui brule non-stop depuis 1901 en Californie. Un cartel s'est créé dans les années 20 où ils ont fait travailler les ingénieurs pour concevoir des ampoules dont la durée de vie ne dépasserait pas 1000 heures si je me souviens bien. Ils ont du faire un effort pour diminuer la durée de vie des ampoules. En 1929, un économiste américain a proposé de rendre obligatoire l'obsolescence programmée comme technique de relance de l'économie. Notre système favorise l'obsolescence programmée car on a besoin de vendre des produits, de la masse. Si vous modifiez le système économique et que vous ne cherchez plus à vendre des produits périssables et mais vous favorisez la vente de la performance alors vous pouvez prendre de la distance par rapport à cette stratégie de l'obsolescence programmée. Quand on donne une prime à la casse pour la voiture, c'est une logique d'obsolescence programmée au nom de l'environnement. Car ces entreprises survivent en vendant toujours plus de voitures. C'est ce que les économistes appellent la rigidité de la demande. La demande doit suivre l'offre. On a donc différentes techniques d'obsolescence programmée. La plus en vogue aujourd'hui, c'est d'avoir des objets qui sont beaux mais qui se démodent vite (Ipod, Iphone,...). On a envie d'en changer tous les trois mois. Cette logique d'obsolescence programmée est très puissante. Il ne faut pas la sous-estimer. On a vraiment besoin de développer de nouveaux modèles économiques. L'obsolescence programmée n'est pas une fin en soi, elle a été développée car on pensait qu'elle permettrait d'accroître le profit. Essayons de faire du profit autrement. L'obsolescence programmée a un autre nom : ingénierie de la valeur. On capte de la valeur avec des produits qu'on remplace souvent. L'idée est de reconcevoir la valeur, c'est l'idée de *Product Service Systems* : trouver de nouvelles stratégies de capture de la valeur.

Question 2 : L'écologie industrielle dans les pays émergents ? Prennent-ils en compte l'écologie industrielle dans leurs activités ?

Suren ERKMAN : J'ai le sentiment, d'après ce que j'ai vu en Inde et en Chine principalement, que oui c'est pris en compte, de manière très différente suivant les pays. En Inde, les entreprises sont à la pointe mais l'Etat n'en a rien à faire. Les entreprises sont très compétitives. Beaucoup d'entreprises confrontées au problème du prix des ressources sont entrain de mettre en place des stratégies de ce type. On vient de développer pour 3000 entreprises d'un parc industriel à Bangalore un outil de knowledge management pour cette méthodologie de mise en œuvre des symbioses industrielles. On n'arrive pas à suivre la demande, tellement ils sont pressés. Pourquoi ? Parce qu'il y a des zones industrielles où l'activité s'arrête car ils manquent de ressources, notamment de l'eau. J'ai été contacté par

une grande entreprise française à Bangalore car elle manque d'eau pour fabriquer ses produits. Ils voient bien qu'ils doivent s'orienter vers une autre gestion des ressources. La Chine c'est différent, c'est le gouvernement qui a cette vision très claire qu'ils ne pourront pas atteindre leurs objectifs économiques s'ils n'intègrent pas les contraintes sur l'environnement et les ressources. C'est comme cela qu'ils ont élaboré cette loi sur l'économie circulaire passée il y'a deux ans (adoptée après cinq années de discussion). Cette loi impose dans les parcs industriels de mettre en œuvre des symbioses, des certifications, etc. Jusqu'à ce que cela atteigne la PME chinoise, ça c'est encore une autre paire de manches. Mais ils ont vu que c'était un enjeu stratégique pour leur développement économique. Dans les pays émergents, la pression sur les ressources est plus forte que chez nous, le développement est plus rapide. Et il y a un autre élément qui est regrettable, c'est que ce qui coûte cher dans ces pays, ce n'est pas la main d'œuvre, mais les ressources. Une démarche d'écologie industrielle leur permet d'anticiper des coûts futurs (arrêt d'activités économiques, réparation des écosystèmes et de la santé humaine).

Question 3 : Connaissez-vous à travers le monde des régions qui traitent des micropolluants ?

Suren ERKMAN : A ma connaissance, il y'a des tests qui se font dans les pays nordiques au niveau des STEP. En Suisse, on travaille sur quelques polluants issus des médicaments excrétés par les gens, notamment anti-cholestérol, antiépileptiques,... Il y'a des milliers de molécules, en fait on est face à des sous-produits. Ces molécules une fois métabolisées dans certains cas, peuvent être même plus dangereuses ou plus actives que le produit d'origine. Ce qu'on sait c'est que cela va coûter très cher pour équiper les STEP. D'où l'importance de travailler en amont, d'aller voir les entreprises en leur suggérant de redévelopper leurs produits pour qu'une fois qu'ils se retrouvent dans l'environnement, ils ne soient pas nocifs. Il y'a différentes techniques, notamment l'ozonation qui a été testée en Suisse mais elle produit elle-même un certain type de déchet.

Question 4 : On a du mal à attirer les chefs d'entreprise sur ces réflexions, ils se demandent ce que cela va leur rapporter compte tenu qu'ils ont des visibilitées à très court terme. Comment les motiver ?

Suren ERKMAN : Je vais répondre par une anecdote. Lorsqu'avec mon collègue, nous avons fait cette première étude sur la zone des deux Synthe à côté de Dunkerque en 1999/2000, on a passé deux heures dans une TPE de moins de 10 personnes. Cela n'avait pas été facile d'obtenir un RDV. A la fin, ils nous ont dit qu'on leur avait donné des idées, qu'on leur avait redonné envie, qu'on les avait stimulés. Pour moi, c'est cela le principal. C'est donner envie aux gens, leur montrer qu'ils ont des opportunités à saisir. A partir du moment où il y a cette envie présente, les problèmes peuvent se résoudre. Après on retombe sur les arguments traditionnels (gains économiques). Mais il n'y a pas que les gains financiers immédiats, il y a un autre aspect sur lequel même les PME deviennent sensibles : la diminution des risques (manière dont on est évalué, accès aux prêts bancaires, assurance,...).

**Conclusion de Franck SPRECHER, Président du pôle Synéo.**