

# ÉCONOMIE CIRCULAIRE ET INNOVATION

SESSION 2

## SEMAINE 4 - L'ECOLOGIE INDUSTRIELLE

*Ce document contient les transcriptions textuelles des vidéos proposées dans la partie « L'écologie industrielle » de la semaine 4 du MOOC « Économie circulaire et innovation ». Ce n'est donc pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots, l'articulation des idées et l'absence de chapitrage sont propres aux interventions orales des auteurs.*

### *Symbioses industrielles et parcs éco-industriels : la symbiose de Kalundborg*

**Frédérique Vincent**  
*Professeure, Mines ParisTech*

Lorsque l'on réfléchit à l'écologie industrielle et par analogie à l'écologie scientifique, l'un des premiers concepts qui vient à l'esprit est celui de chaîne alimentaire ou de réseaux trophiques. Ce mécanisme appliqué aux activités économiques consiste à relayer entre eux les différents agents économiques et en premier lieu les entreprises, de sorte que les rejets des uns soient les ressources des autres. Comme pour l'écologie industrielle on utilise donc l'analogie avec la biosphère et on parle alors de symbiose industrielle.

La ville portuaire de Kalundborg fut l'une des toutes premières tentatives d'écologie industrielle. Elle est aujourd'hui devenue une référence mondiale et l'écologie industrielle n'aurait pas connu son essor et ne serait pas ce qu'elle est aujourd'hui si l'on n'avait découvert cette application exemplaire de ces principes. Le concept repose donc sur la gestion raisonnée des matières premières et des déchets entre industries voisines appartenant à même

territoire permettant ainsi la création d'un véritable écosystème industriel où chaque entreprise se nourrit des rejets des autres.

Kalundborg est une petite ville portuaire du Danemark, elle compte à peu près 20 000 habitants et est l'un des rares ports accessibles toute l'année à cette latitude. À Kalundborg, la plus grande centrale électrique du Danemark vend de la vapeur à la raffinerie de pétrole Statoil, laquelle lui vend en retour ses eaux usées qu'elle utilise comme eau de refroidissement. La centrale fournit également de la vapeur à trois sociétés, la société de biotechnologie Novo Nordisk qui est l'un des premiers producteurs mondiaux d'enzymes industrielles et d'insuline, à la société Gyproc qui fabrique des panneaux de construction en plâtre et à la municipalité de Kalundborg qui l'utilise pour son système de chauffage urbain. L'eau tiède rejetée par la centrale est quant à elle utilisée par une ferme piscicole qui se trouve à proximité. Enfin, il y a une unité de désulfurisation des gaz qui permet de fournir du gypse à Gyproc qui du coup n'a plus à acheter ce gypse en Espagne. Enfin, les cendres sont également réutilisées par une entreprise de production de ciment de vanadium et de nickel.

La zone industrielle de Kalundborg est donc passée d'un mode de production linéaire avec un flux de matières premières en entrée et un flux de déchets en sortie à une production circulaire où toutes les unités de production sont interconnectées.

Mais cette symbiose de Kalundborg ne s'est pas faite en un jour, tout a commencé lorsque la raffinerie Statoil s'est installée à Kalundborg au début des années 60. Elle a passé un accord avec la municipalité pour son approvisionnement en eau car c'était vraiment, elle avait véritablement un problème de ressources en eau. L'entreprise ensuite s'est tournée vers d'autres fournisseurs à mesure qu'elle se développait en concluant des partenariats avec d'autres sites de production industrielle à proximité. D'autres projets sont apparus et peu à peu les coopérations se sont développées, fourniture de vapeur, utilisation d'excès de gaz, excès d'eau etc. Aujourd'hui, ce sont 26 entreprises qui coopèrent avec la municipalité en incluant des exploitations agricoles, des pêcheries qui sont approvisionnées en fertilisants, en chaleur, en eau.

Cette symbiose de Kalundborg est une initiative qui est née de la volonté des entreprises mais avec le soutien constant des autorités locales et elle repose sur une coopération constructive basée sur la transparence, la communication permanente entre les participants qui sont installés à proximité les uns des autres. Elle permet à chacun de ses membres d'échanger matières, eau, énergie mais de manière lucrative pour chacun d'entre eux. La dimension écosystémique de ce système, de ces échanges, de ces synergies n'a été remarquée cependant qu'assez tardivement vers la fin des années 80, en 1989 - 1990 et donc après une vingtaine d'années de fonctionnement de cette symbiose. Vis Kristensen qui est un ancien directeur du site de Novo Nordisk considère que la symbiose de Kalundborg est un non projet réalisé par une non organisation. Des synergies externes d'entités se sont également développées avec ce groupe. Au-delà donc des bénéfices économiques impliquant le transfert des déchets, les partenaires entrevoient désormais des perspectives communes de développement. Elles développent non seulement des synergies de substitution de matière mais aussi des synergies de mutualisation pour produire certains composants comme l'air comprimé par exemple ou

pour collecter et valoriser certains déchets tous ensemble. Elles envisagent par exemple collectivement maintenant de passer à l'énergie renouvelable pour l'ensemble du parc industriel.

Si le potentiel de substitution est important comme l'illustre ce schéma qui est relativement illisible du fait effectivement des grands nombres de transferts et d'échanges qui sont possibles entre différents types d'industrie, il reste néanmoins un grand nombre de freins au fonctionnement des symbioses industrielles.

Celles-ci par exemple sont sans redondance, c'est-à-dire qu'un écosystème industriel n'a pas de redondance contrairement à son analogue l'écosystème véritable, écosystème dans l'écologie scientifique. En effet, dans les écosystèmes, les groupes fonctionnels sont en général composés d'un grand nombre d'espèces qui n'utilisent pas exactement les mêmes ressources et servent de ressources à de très nombreuses espèces qui appartiennent à d'autres groupes fonctionnels. Dans le modèle de l'écologie industrielle par contre chaque groupe fonctionnel est composé d'un petit nombre d'entreprises et parfois même une seule entreprise. Il existe donc une forme de rigidité dans les échanges qui est due au nombre restreint d'entreprises qui peuvent être à proximité et également à la nature des infrastructures qui peuvent assurer le transport d'une industrie à une autre industrie.

Deuxièmement, deuxième facteur, deuxième frein, les perturbations du système en cas de défaillance d'un partenaire. En effet, si un partenaire est absent ou ferme ou est en grève, à ce moment-là c'est tout le dispositif d'échanges qui peut être perturbé.

Enfin, on voit bien que la symbiose est plus facile s'il y a la proximité entre les partenaires.

Dernier problème, la relation marchande entre les partenaires, il est très difficile de s'échanger des matières, des ressources si ces ressources et matières n'ont pas une certaine valeur pour les uns et les autres.

La mise en place de l'écologie industrielle ne va donc pas de soi. Peut-être même est-elle utopique parce que le système mature que l'on a vu précédemment de type trois n'existe pas vraiment dans la nature sinon on n'aurait pas eu de charbon ou de pétrole qui sont dans la biomasse qui s'est accumulée au cours des années. Dans le cas de Kalundborg, c'est rarissime c'est-à-dire qu'il y a un grand nombre de facteurs, de conditions historiques et géographiques qui ont favorisé le développement de cette symbiose. Pourtant la mise en place de parcs éco-industriels connaît un certain dynamisme et en particulier en Asie et en Chine. Au-delà des convictions techniques et économiques qui peuvent-être favorables, il faut également un contexte incitatif tant sur les plans législatif, managérial, organisationnel, social et politique pour véritablement faire émerger des réseaux industriels qui fonctionnent.

En tout cas, l'analogie avec l'écologie et le bio mimétisme permet de s'interroger sur les mécanismes perturbateurs à mettre en place dans nos sociétés industrielles pour véritablement faire bouger les choses. Peut-être faut-il maintenant aller vers une dimension plus dynamique de l'écologie afin de faire rimer efficacité technologique avec efficacité économique.

# *Écologie industrielle: création de l'information et contexte collaboratif*

**Cyril Adoue**

*Consultant spécialisé en économie circulaire, Inddigo*

La mise en application de symbiose ou de synergie n'est que trop rarement spontanée. En effet, un certain nombre de conditions sont nécessaires à l'identification de la synergie puis à sa mise en œuvre.

La première condition nécessaire est tout d'abord que l'information sur le potentiel synergique du flux existe et qu'elle circule entre les acteurs concernés. Par exemple, pour un flux F. rejeté par l'entreprise A et potentiellement valorisable par l'entreprise B, il faut tout simplement, que l'on sache que cette complémentarité existe et que cette information puisse circuler entre les deux industriels concernés. Le constat qui a pu être fait et que malheureusement dans la plupart des cas cette information n'existe pas. Les industriels, à de rares exceptions près, n'échangent que très rarement sur leurs flux. Souvent même entre voisins, ils ne se connaissent pas. De plus, autre difficulté, lorsqu'on se retrouve avec des acteurs industriels de secteurs d'activités différents, on s'aperçoit qu'ils ne partagent pas les mêmes problématiques et parfois de manière un peu caricaturale ne parlent pas tout à fait le même langage puisqu'ils ont des cultures différentes, des objectifs différents et des enjeux différents.

Une fois que l'information existe, la collaboration entre les deux acteurs est nécessaire pour arriver jusqu'à la mise en œuvre de la synergie. Il faut effectivement approfondir, voir si la synergie est possible sur le plan technique, sur le plan réglementaire, bien étudier son intérêt économique, les investissements qui vont être nécessaires, si par exemple il faut tirer un pipeline. Le constat qui, là encore, va être fait c'est que ce type de situation est relativement inhabituelle pour les industriels qui sont en général de très bons compétiteurs mais qui sont beaucoup moins habitués à la collaboration, d'autant plus, là encore, avec des acteurs qui n'ont pas tout à fait la même culture qu'eux et peuvent être de secteur d'activités différents. Il faut donc arriver à dépasser ces réticences qui sont parfois liées à une certaine culture du secret industriel, il est vrai qu'on a peu l'habitude de dévoiler tous ses secrets de procédés à ses voisins. Il peut y avoir aussi une certaine méfiance liée à la méconnaissance des activités de quelqu'un qui vient de notre secteur. Ce qui est toutefois encourageant, c'est qu'à partir de certaines situations, on a quand même des acteurs économiques sont relativement rationnels et à partir d'un certain niveau de gain potentiel la collaboration devient beaucoup plus aisée.

Alors, pour remplir ces deux conditions nécessaires, nous disposons aujourd'hui d'outils méthodologiques et informatiques issus de travaux de recherche, de retours d'expérience et qui permettent de répondre à ces deux problématiques. Pour créer l'information tout d'abord la première étape consiste à aller collecter les données de flux, relever les flux entrants, les

flux sortants de matière et d'énergie des différents acteurs industriels du territoire sur lequel on souhaite développer la symbiose. Il faut ensuite traiter ces informations pour identifier les synergies présentant un certain potentiel. La dernière étape consiste à restituer ces informations, les informations pertinentes aux acteurs concernés donc les synergies qui peuvent les concerter et qui, pour eux, vont répondre à un certain nombre de problématiques, par exemple un souci avec un déchet, une problématique d'approvisionnement. En ce qui concerne la collaboration des acteurs, la première étape, le préalable, est tout d'abord de bien comprendre les relations préexistantes entre ces acteurs. Avoir une idée du jeu d'acteur à l'échelle de la zone industrielle. La deuxième étape, consiste à créer de la motivation et de l'intérêt autour de cette démarche d'écologie industrielle, l'idée de symbiose, de synergie reste relativement exotique chez les acteurs économiques. Il faut donc leur en expliquer l'intérêt donc une communication sur ce sujet doit être relativement étudiée et adaptée à chaque territoire, il faut ensuite en démontrer la faisabilité à savoir que les symbioses industrielles sont possibles partout, pas uniquement à Kalundborg et donc démontrer effectivement que l'on peut réaliser, mettre en place des synergies sur le territoire de manière à créer une dynamique et arriver à entraîner dans la démarche les différents acteurs que l'on souhaite toucher.

Le dernier point, lorsqu'effectivement on arrive à la dimension collaborative dans l'approfondissement d'une synergie, consiste à diminuer le risque perçu autour de la synergie par les différents acteurs. Effectivement, là encore, on se retrouve avec une situation qui n'est pas habituelle et il peut y avoir des craintes. La crainte effectivement si on se met à intégrer un déchet au procédé, de créer des tensions avec les salariés, avec les riverains voire même avec les clients. Il y a donc un gros travail à faire également en termes de communication à chaque étape de la démarche pour diminuer le risque perçu par les industriels autour de cette idée de synergie.

En dernier point, il y a un outil pour arriver à développer toutes ces choses-là, un point qui est vraiment essentiel dans ces démarches c'est l'animation. L'animation pour arriver à faire collaborer les acteurs qui n'ont pas du tout l'habitude de ce type de démarche est absolument fondamentale, c'est un travail qui doit être mené sur la durée et qui doit être fait, effectivement, dans l'intérêt de tous et qui peut parfois déborder de l'écologie industrielle car il faut s'adapter aux besoins des industriels.

qu'il existe au sein des entreprises de nombreuses barrières organisationnelles et psychologiques au développement de l'écologie industrielle. Les outils de gestion et les procédures des entreprise quel que soient leur domaine, achats, qualifications de matière sont en effet conçues en fonction de logiques linéaires et cette linéarité a également façonné les habitudes de travail des personnes en charge des fonctions. À titre d'exemple, un cahier des charges correspond, de manière générale, aux caractéristiques d'un flux physique pur et d'une matière vierge stable et standardisée. Or comme nous l'avons vu, l'essentiel des flux des écosystèmes industriels ne répond pas directement à ces critères. Il existe donc au sein de nombreuses structures une résistance au changement qui peut dans certains cas s'avérer relativement tenace.

# *Écologie industrielle : gestion des flux et faisabilité des synergies*

Rémi Beulque

*Ingénieur de recherche en environnement, Groupe Renault*

Dans cette partie, je vais vous présenter certaines des nouvelles problématiques que les symbioses industrielles font apparaître en matière de gestion de flux. Ces problématiques influencent fortement la concrétisation d'une synergie, elles sont donc à connaître et à intégrer dans les stratégies de création de boucle de matière et d'énergie sur un territoire.

La première de ces problématiques est celle de l'adaptation qualitative des flux. Un flux n'est en effet en général pas adapté aux besoins de l'acteur qui pourrait le valoriser. L'utilisation directe d'un flux sortant d'une entreprise dans le procédé d'une autre est de fait rarement possible. La pureté du flux peut être en cause. Un flux de déchets végétaux issu de l'industrie agroalimentaire peut par exemple contenir des fragments de plastiques issus d'emballages, il sera donc difficile de le valoriser directement en alimentation animale. Ses caractéristiques physiques peuvent aussi se révéler problématiques. Les gravats provenant d'opérations de déconstruction auront ainsi probablement un calibre hétérogène, pour des opérations de terrassements il sera donc impossible de les substituer directement à un flux de graviers au calibre plus régulier. La transformation du flux constitue donc en général un préalable à sa valorisation. La solution peut être de nature technique, dans l'exemple mentionné les gravats pourront par exemple être calibrés à l'aide d'un équipement spécial, la solution peut également être de nature organisationnelle. Dans le cadre de flux de déchets végétaux pollués par des plastiques, un tri à la source peut par exemple s'avérer utile. Selon les cas, cette opération de transformation peut être assurée directement par le producteur du flux sortant, par l'acteur qui le valorisera ou par les deux acteurs. Il arrive aussi que cette opération soit externalisée auprès d'un prestataire de services.

Un flux doit aussi être disponible dans des ordres de grandeur appropriés. En effet, si l'offre d'influx est trop supérieure à la demande, de nombreux débouchés devront être identifiés, chacun nécessitera potentiellement des opérations différentes de transformation. À l'inverse, si l'offre est trop inférieure à la demande, le valorisateur devra trouver d'autres sources d'approvisionnement, ce qui constitue un facteur de complexité pour lui. Au sein des symbioses industrielles, il est également nécessaire de maîtriser, dans la mesure du possible, la variabilité des flux de matières et l'énergie. À titre d'exemple, les unités de désulfuration des fumées d'une centrale thermique à charbon produisent du sulfate de calcium, ce flux est en général considéré comme un déchet mais il peut toutefois dans certains cas servir de matière première à la fabrication de panneaux en plâtre. On le voit bien, dans ce cas, que la variation d'activité de la centrale en fonction de la saison impactera la production de sulfate de calcium, la quantité de matières premières valorisables par un potentiel producteur de plâtre variera donc aussi. À noter que cette variabilité saisonnière peut-être plus forte encore

notamment dans le cadre des déchets agricoles. La variabilité constitue donc un facteur de risque important en termes de sourcing, risque qu'il convient de maîtriser. Les entreprises engagées dans des démarches d'écologie industrielle doivent de ce fait identifier des sources d'approvisionnement alternatives et dans ce cas recourir à un prestataire de service qui garantit la transformation et la fourniture du flux peut constituer une solution d'externalisation adaptée.

Il est également nécessaire d'acheminer un flux de son producteur à son valorisateur. Deux types d'enjeux ce posent alors, des enjeux techniques au-delà d'une certaine distance, la qualité de certains flux se dégrade interdisant de ce fait toute valorisation. C'est notamment le cas pour les flux d'eau et les vecteurs énergétiques telle la vapeur ou l'air comprimé. Se posent également des enjeux économiques, le transport d'eau et de vecteurs énergétiques nécessitent en effet la construction d'infrastructures, en l'occurrence de canalisations. Bien évidemment, cette opération impactera l'équation financière de la synergie qui pourra perdre de l'intérêt si la distance entre les deux acteurs est trop longue. Cette remarque est également vraie pour les flux de matière en général acheminés par transport routier.

La gestion d'un flux est encore impactée par la réglementation en vigueur. Concernant les flux de vecteurs énergétiques et d'eau, cet impact reste minime en France. La réglementation de l'interaction concerne en effet essentiellement les infrastructures support de ces échanges, à savoir les canalisations et les lignes électriques. Concernant les flux de matière, la situation est totalement différente. Un flux sortant a souvent le statut de déchet et ce statut s'avère lourd de conséquences. La législation en vigueur peut ainsi tout d'abord empêcher la mise en place d'une synergie. La gestion de ce flux peut aussi entrer dans le champ d'application de la réglementation sur les installations classées pour la protection de l'environnement dites ICPE, cette réglementation contrôlant les impacts sur l'environnement et les populations des installations industrielles considérées comme à risque. Relever du régime d'autorisation de cette réglementation représente un coût important, de nombreuses études techniques doivent en effet être réalisées et cela impacte aussi la temporalité de la synergie puisque deux ans peuvent être nécessaires à la réalisation de l'entièvre procédure. C'est notamment lorsque un flux au statut de déchet est valorisé sous forme énergétique en remplacement d'un combustible fossile classique. Lorsque le flux de déchet est valorisé directement en tant que matière, cela peut être aussi le cas. L'impact est notamment important si le flux de déchets doit être transformé avant d'intégrer le procédé qui le valorisera. En effet, l'acteur qui réalise cette opération est, d'un point de vue juridique, considéré comme traiteur de déchets.

Enfin, la mise en place d'une synergie doit, de manière évidente, comporter un intérêt économique pour les acteurs en jeu. Cet intérêt peut découler de coûts de traitement évités, de la vente d'un flux, ou de la baisse de coûts d'approvisionnement ou de production. Or comme je vous l'ai montré dans cette partie, de nombreux facteurs peuvent impacter l'équation financière d'une synergie. Le calibrage du flux par rapport aux exigences du procédé valorisateur peut exiger la construction d'une plate-forme de transformation, son acheminement représente également un coût que ce soit au travers de l'investissement dans une infrastructure ou des charges liées au transport. Enfin, les études imposées par la législation ICPE représentent un poste de coût supplémentaire qui peut se révéler non

négligeable. De ce fait, le différentiel de prix entre le flux initial et le flux circulaire qui pourrait le remplacer est absolument fondamental pour déterminer l'intérêt d'une synergie. Il doit permettre un retour sur investissement relativement court, adapté au temps industriel.

Dans cette optique, un des principaux leviers au développement de l'écologie industrielle est donc d'intégrer le potentiel de synergie entre acteurs dès la conception des processus industriels, des zones industrielles ou des quartiers. En effet c'est à ce moment que la décision d'investissement sera la plus facile et c'est aussi à ce moment que l'investissement sera le plus efficace. À noter enfin que l'équation financière d'une synergie est d'autant plus importante qu'il existe au sein des entreprises de nombreuses barrières organisationnelles et psychologiques au développement de l'écologie industrielle. Les outils de gestion et les procédures des entreprise quel que soient leur domaine, achats, qualifications de matière sont en effet conçues en fonction de logiques linéaires et cette linéarité a également façonné les habitudes de travail des personnes en charge des fonctions. À titre d'exemple, un cahier des charges correspond, de manière générale, aux caractéristiques d'un flux physique pur et d'une matière vierge stable et standardisée. Or comme nous l'avons vu, l'essentiel des flux des écosystèmes industriels ne répond pas directement à ces critères. Il existe donc au sein de nombreuses structures une résistance au changement qui peut dans certains cas s'avérer relativement tenace.