



HAL
open science

Les expériences urbaines d'écologie industrielle en Europe du Nord : Vers quelles innovations ?

Christophe Beaurain, Chedrak Chembessi

► To cite this version:

Christophe Beaurain, Chedrak Chembessi. Les expériences urbaines d'écologie industrielle en Europe du Nord : Vers quelles innovations ?. Nordiques, 2017, 33, 10.4000/nordiques.2579 . hal-02378689

HAL Id: hal-02378689

<https://hal.science/hal-02378689>

Submitted on 25 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

Les expériences urbaines d'écologie industrielle en Europe du Nord :

Vers quelles innovations ?

Christophe Beaurain

Université de Limoges

Professeur de géographie et d'aménagement

Géolab, UMR 6042

christophe.beaurain@unilim.fr

Chedrak De Rocher Chembessi

Université de Limoges/ Université Laval

Doctorant, Géolab, UMR 6042 / CRAD-ESAD

Chedrak.Chembessi@unilim.fr/chedrak-sylvain-de-rocher.chembessi.1@ulaval.ca

RÉSUMÉ

Depuis son apparition dans les années 1970, l'écologie industrielle est considérée comme source de transformations profondes des pratiques industrielles à l'égard de l'environnement naturel, par la prise en compte du caractère limité des ressources naturelles et des dégâts occasionnés par la pollution. Son application repose sur différents principes, liés notamment à la disponibilité des flux, aux stratégies des acteurs privés et au soutien des acteurs publics. Dans cet article, nous nous intéressons plus particulièrement à quelques démarches urbaines d'écologie industrielle dans les pays nordiques, pour mettre en valeur l'importance de la question des enjeux environnementaux et les sources d'innovation technologique et organisationnelle que représentent ces démarches.

Mots Clefs : Écologie Industrielle – Villes Nordiques – Réseau d'Acteurs – Innovation

ABSTRACT

Since its onset in the 1970s, industrial ecology has been regarded as a source of deep transformation in industrial practices with regard to the natural environment, considering the limited character of natural resources and the damage caused by pollution. Its application is based on different principles, linked in particular to the availability of flows, to private actors' strategies and to public actor's support. In this paper, we focus on a few urban industrial ecological approaches in the Nordic countries, highlighting the importance of environmental issues, and the fact these approaches are a source of technological and organizational innovation.

Keys Words: Industrial Ecology – Northern Cities – Network – Innovation.

Introduction

Dès les années 80, les réflexions sur les limites écologiques de la planète ont ouvert la voie à quelques démarches environnementales, au nombre desquelles figurent entre autres des expérimentations d'écologie industrielle. Celles-ci ont tenté de concrétiser l'hypothèse d'une sortie possible de l'opposition qui semblait jusque-là indépassable entre « économie et écologie »¹. Depuis lors, au moins en théorie sinon en pratique, l'écologie industrielle est associée à une modification radicale de la stratégie des entreprises vis-à-vis de l'environnement, en misant sur une nouvelle façon de concevoir le processus de production industrielle². Elle apparaît alors comme une nouvelle approche dans les procédés industriels, pour la mise en œuvre d'une stratégie de durabilité par les entreprises³. Plus précisément, l'écologie industrielle, s'inspirant du modèle des écosystèmes naturels, insistait à l'origine sur quelques principes forts de l'organisation des relations interindustrielles : boucler les flux de matières et d'énergie de telle sorte que les déchets des uns deviennent des ressources pour les autres ; équilibrer les flux entrants et sortants du système industriel en fonction de l'écosystème naturel à renouveler les ressources disponibles et à absorber les rejets et émissions polluantes ; réduire l'intensité énergétique et dématérialiser les processus de production⁴. Au fil des ans et des démarches mises en place, c'est essentiellement sur le bouclage des flux que se sont concentrées les expériences d'écologie industrielle. Les expressions de « métabolisme industriel » ou de « symbiose industrielle » ont progressivement été utilisées pour désigner ces flux potentiels entre entreprises (substitution de matières par des déchets et résidus, partage d'utilités telles que les flux d'eau, d'énergie, d'eaux usées..., partage de services en communs tels que collecte des déchets, transports...) et leur possible optimisation dans une optique systémique, à une échelle locale ou régionale⁵.

À bien des égards, certains pays d'Europe du Nord⁶ constituent une région pionnière dans ce domaine, avec certaines expériences emblématiques au niveau mondial. Dans cet article, notre objectif sera double. En premier lieu, nous présenterons quelques-unes de ces démarches représentatives de l'avancée de l'Europe du Nord, à l'aide des outils conceptuels proposés dans la littérature⁷. En second lieu, nous

¹S. Erkman, « L'écologie industrielle : une stratégie de développement. », *Le Débat*, n°113, 2013, p. 106-121.

²D. Frosh, N. Gallopoulos, « Strategies for Manufacturing », *Scientific America* n°261 (3), 1989, p. 94-102.

³A. Diemer, S. Labrune, « L'écologie industrielle : Quand l'écosystème industriel devient un vecteur du développement durable », *Développement durable et Territoires*, [En Ligne], Varia, 2007. <https://developpementdurable.revues.org/4121> consulté le 12 novembre 2016); L.W. Jelinski, T.E. Graedel T. E., R.A. Laudise, D.W. McCall, and C.K.N. Patel C., « Industrial Ecology: concepts and approaches », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, February 1992, n°89, p.793-797.

⁴H. Tibbs, *Industrial Ecology. An environmental agenda for industry*. Global Business Network, Emeryville, CA, 1993

⁵S. Erkman, *Vers une écologie industrielle : comment mettre en pratique le développement durable dans une société hyper industrielle*, Paris, Charles Léopold Mayer, 1998. ; M. Chertow, « Industrial symbiosis : littérature and taxonomy », *Annual review Energy Environment*, vol. 25, 2000, p. 25-46 : selon cette auteure on peut parler de symbiose industrielle à partir du moment les flux dépassent les limites du seul processus de l'entreprise pour engager une multitude de firmes.

⁶Nous utilisons ici ce terme pour désigner les pays appartenant l'ensemble formé par les cinq Etats : Suède, Danemark, Finlande, Norvège, Islande (ou Norden).

⁷B. Allenby, « The Ontologies of industrial Ecology? », *Progress in Industrial Ecology-An International Journal*, n°3 (2), 2006, p. 28-40 ; J. Ehrenfeld, « Industrial Ecology: A new field or only metaphor? », *Journal of Cleaner Production* n°12 (8-10), 2004, p. 825-831 ; J. Korhonen, « Theory of Industrial Ecology », *Progress in Industrial Ecology – An International Journal* n°1 (1-3), 2004, p.61-68. ; Suren Erkman, *Vers une écologie industrielle : comment mettre en pratique le développement durable dans une société hyper-industrielle*, Paris, Edition Charles Léopold Mayer, 1998.

soulignerons également les potentialités d'innovations, technologiques et organisationnelles⁸ que ces expériences mettent en évidence, en insistant sur les enseignements à en tirer.

1- Des enjeux liés à l'écologie industrielle en Europe du Nord

Avec une économie longtemps dominée par les activités agricoles et forestières, les pays appartenant au bloc Norden connaissent un développement des industries hydroélectrique, chimique, minière, métallurgique et mécanique dans la première moitié du XIXe siècle⁹. On y dénombre aujourd'hui de grands groupes industriels dont les plus connus sont Carlsberg, Novo Nordisk (Danemark), Nokia, Kone (Finlande), Statoil, Norske Shell (Norvège), Ericsson, Volvo, IKEA (Suède) etc. Cependant, de nombreux défis existent. Au-delà des risques environnementaux, en raison notamment du climat et de leur positionnement géographique, de nouvelles perspectives industrielles s'imposent à eux pour sortir de l'ère du « tout sous-sol » et de l'exploitation effrénée des ressources naturelles¹⁰, ou encore de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, de la perte de la biodiversité etc. Ces enjeux ont conduit à des politiques environnementales plutôt contraignantes en Europe du Nord, principalement orientées vers la limitation des pollutions et des émissions de GES provoquées par les principaux secteurs de l'industrie, et à la création d'agences environnementales d'État, particulièrement proactives dans ces domaines. Starlander et al.¹¹ avancent l'argument que la fragilité morphologique de ces pays et la proximité avec l'Arctique ont largement influencé la radicalité des politiques environnementales. Ces contraintes, associées à une volonté de ne pas entraver le développement industriel se sont traduites par une application concrète de la transition vers des économies locales décarbonées, moins consommatrices de ressources. Ces tentatives rejoignent plus généralement des politiques urbaines résolument tournées vers l'amélioration de la qualité de vie et la prise en compte des contraintes environnementales dans les modes de vie, comme en témoignent par exemple le développement des écoquartiers en Europe du Nord depuis les années 1980¹². Dans le champ de l'écologie industrielle, de nombreuses initiatives ont ainsi été mises en œuvre depuis plusieurs décennies, essentiellement dans les mêmes secteurs économiques que ceux qui ont porté depuis le XIXe siècle le développement industriel de cet ensemble géographique, comme en témoignent la description des quelques démarches présentées dans le paragraphe suivant

⁸N. Buclet, « L'économie de fonctionnalité, entre éco-conception et territoire : une typologie », Développement durable et territoires, [En Ligne], vol 5, n°1, février 2014. <https://developpementdurable.revues.org/10134> (consulté le 12 novembre 2016); B. Allenby, « The Industrial Ecology of emerging technologies », *Journal of Industrial Ecology*, n°13 (2), 2009, p.169-183; K. Green, S. Randles, *Industrial Ecology and Spaces of Innovations*, Cheltenham, UK; Northampton, MA: Edward Elgar, 2006; J. Huber, *New Technologies and Environmental Innovation*, Cheltenham, UK ; Northampton, MA : Edward Elgar, 2004

⁹P. Verley, *Echelle du Monde, Essai sur l'industrialisation en Occident*. Paris, Gallimard, 2016 ; A.C.HanssonLecoanet, « L'attrait des pays nordiques pour les investissements étrangers. », *Fusion & Acquisitions Magazine* Septembre – Octobre 2011, p. 28-30.

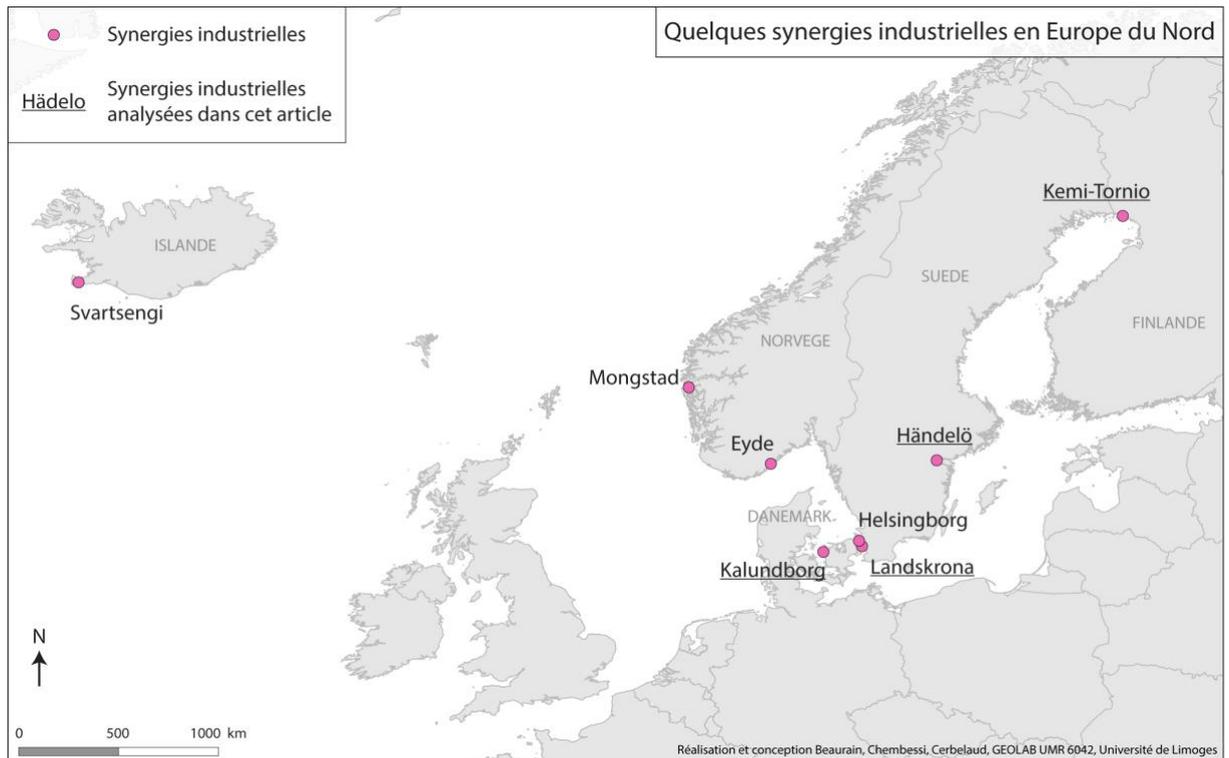
¹⁰L'épuisement des ressources naturelles est une tendance moins présente à l'échelle des pays scandinaves. Cette évolution n'est mise en avant que dans le cadre d'une comparaison globale puisque ces pays disposent encore d'importants stocks de ressources. On parle parfois à ce sujet du dilemme nordique.

¹¹J.-E. Starlander, « Industrial Symbiosis : A closer Look on Organizational Factors : A study based on the industrial symbiosis project in Landskrona, Sweden. », Master Thesis in Environmental Management and Policy, supervised by M. Mirata, M. &M. Backman, IIEE, Lund, 2003

¹²C. Emelianoff. R. Stegassy, *Les pionniers de la ville durable. Récits d'acteurs, portraits de ville en Europe*, Ed. Autrement, 2010.

2- Quelques démarches d'écologie industrielle en Europe du Nord

Nous présentons maintenant quelques-unes de ces initiatives urbaines, en faisant ressortir leurs principales caractéristiques. Plus précisément, nous avons retenu ici les démarches de Kalundborg au Danemark, Kemi-Tornio en Finlande et Landskrona en Suède. Ces démarches ont été retenues en fonction de l'importance qu'elles occupent en ce qui concerne l'engagement de ces pays dans le domaine de l'écologie industrielle. Notons également qu'elles sont situées au sein de territoires qui constituent depuis le XIX^e siècle les premiers bastions industriels de ces pays.



2.1- De la symbiose industrielle de Kalundborg

Petite ville portuaire de 50000 habitants, distante d'environ 120 km de Copenhague et importante plateforme dans le développement industriel du Danemark, Kalundborg marque une profonde rupture dans la conception et la perception des enjeux environnementaux auxquels sont confrontées les villes industrielles.

Avec une forte concentration de l'activité industrielle comparable à celle de Copenhague et avec la présence de grands groupes énergétiques, chimiques, pharmaceutiques, technologiques, Kalundborg est considérée comme une preuve de la réussite possible d'un nouveau paradigme industriel. À l'origine de la mise en place d'un bouclage des flux de matières et d'énergie à Kalundborg (symbiose industrielle), il y a l'implantation à la fin des années 1950 de deux grandes entreprises, une centrale électrique, Asnaes Powers Station (devenue depuis Dong Energy) fonctionnant au charbon et une raffinerie de pétrole, Statoil. Très vite sont venues s'ajouter l'entreprise de biotechnologies Novo Group (qui s'est séparée par la suite en deux

entités Novo Nordisk (produits pharmaceutiques) et Novozymes (production d'enzymes)), l'entreprise de production de panneaux en plâtre Gyproc (BPB), ainsi que la municipalité de Kalundborg. Réduits à l'origine à quelques flux, eau et vapeur, les échanges se sont au fil des années étoffés, le plus souvent de manière spontanée, en incluant plusieurs industries et secteurs de l'économie (cimenterie, production de fertilisants agricoles, ferme aquacole et fermes d'élevage, entreprise de décontamination des sols, entreprise de gestion des déchets, entreprise de production de bioéthanol...). Cette évolution a abouti à la mise en place d'une véritable symbiose industrielle, qui s'est articulée autour de trois objectifs principaux : l'optimisation de l'usage de la ressource en eau, la réduction de la consommation d'énergie, le recyclage des déchets matériels et sous-produits pour limiter la consommation de matières premières¹³. En effet, au début des années 60, les ponctions de plus en plus importantes d'eaux réalisées dans le lac Tisso et dans les nappes phréatiques ont convaincu les industriels et la municipalité de la nécessité de mettre en place un circuit fermé d'échange d'eau¹⁴. Les échanges d'eaux de toute nature (eau de refroidissement, eaux usées, eau de surface, eau de drainage), plus ou moins re-traitées, se sont ainsi multipliés entre les grandes firmes et le réseau public, générant de substantielles économies de consommation d'eau et des réductions importantes de rejets dans le sous-sol ou dans les rivières voisines d'eaux usées. Notons par exemple que l'eau sortant des process de la raffinerie Statoil a pu être largement récupérée par la centrale électrique, notamment comme eau de refroidissement, intrant dans les chaudières de production d'électricité et pour son installation de désulfuration. Réciproquement, l'eau de chaudière de la centrale a pu être récupérée par la raffinerie, évitant à celle-ci d'investir dans une installation de traitement des eaux. Mais d'autres entreprises ont pu également bénéficier de cette coopération, Novo Nordisk par exemple, ou encore les entreprises de ciment et de nickelet et enfin la ferme aquacole, utilisatrice d'eaux chaudes pour l'élevage des poissons. D'autres synergies se sont progressivement développées, portant notamment sur les sources d'énergie, la vapeur ou la chaleur issues du process de certaines firmes, ou le recyclage des produits résiduels ou sous-produits. Au début des années 70, l'entreprise Gyproc, qui utilisait beaucoup d'énergie pour le chauffage du gypse et du plâtre, a sollicité la raffinerie pour utiliser ses excès de gaz comme source d'énergie. De la même manière, les échanges de vapeur sont également devenus une composante essentielle de la symbiose, avec la multiplication des flux depuis la centrale électrique vers la raffinerie, l'entreprise Novo nordisk (pour ses tours de fermentation) et le réseau de chauffage urbain mis en place par la commune de Kalundborg dès 1981. Très souvent, ces flux de vapeur ont largement contribué à l'augmentation des flux d'eau entre les mêmes acteurs.

Plus tard, sous l'influence de l'action de l'Institut de la symbiose, les flux se sont élargis aux déchets et sous-produits des entreprises. À titre d'exemple, l'installation au début des années 90 par la centrale électrique d'une unité de désulfuration, qui capte le gaz à la sortie du four et le fait interagir avec de la chaux pour le transformer en un déchet solide présentant toutes les caractéristiques du gypse naturel, a permis de

¹³C. Beaurain, « Kalundborg : un modèle d'écologie industrielle », *Les Grands Dossiers des Sciences Humaines* n°9 (40), 2015, p.68-71.

¹⁴T. Domenech, M. Davies, « Structure and Morphology of industrial symbiosis network: The case of Kalundborg », *Procedia. Social and Behavioral Sciences*, Vol. X, 2011

mettre en place un flux continu entre la centrale et l'entreprise Gyproc. Celle-ci, utilisatrice de gypse pour la fabrication des plaques de placoplâtre, a ainsi pu cesser d'importer du gypse naturel, jusqu'alors extrait de gisements espagnols et transporté par bateau jusqu'au Danemark, tandis que la centrale a pu éviter le coût de la mise en décharge de son sous-produit. Le séchage plus important requis pour ce gypse artificiel, réalisé par l'installation d'une unité supplémentaire de séchage du gypse, a été alimenté par les effluents de gaz issus de la raffinerie. Au-delà de ces flux majeurs, d'autres types de résidus ont également été échangés entre les firmes, comme par exemple des cendres volantes (à destination de la cimenterie), du bioéthanol, des boues de levure, des engrais de soufre (principalement à destination du secteur agricole) ... Avec plus de 65 entreprises participantes en 2014, en plus de la municipalité de Kalundborg, la symbiose est au cœur d'un projet urbain qui vise à faire travailler en synergies au moins 200 entreprises locales d'ici 2020¹⁵.

2.2- L'exemple de Kemi-Tornio en Finlande

Au nord de la Finlande, à plus de 700 km de la capitale (Helsinki), Kemi – Tornio est un regroupement de cinq villes finlandaises (Kemi, Tornio, Keminmaa, Simo et Tervola) avec 60.000 habitants environ ; elle est dotée d'une importante activité industrielle dans la raffinerie, les mines, la métallurgie, la papeterie, les emballages, les engrais, les produits chimiques fins. Avec des entreprises exportatrices, la région fait à elle-seule presque 8% des gains de devises étrangères de la Finlande. Étant donné la proximité de la région avec l'Arctique, les orientations stratégiques portent sur une économie locale moins polluante et la nécessité de préserver la biodiversité locale. À cet effet, une démarche conjointe entre des industries locales et les acteurs publics a été mise en place dans les années 80, impulsée par quelques documents stratégiques élaborés au niveau national et régional¹⁶, pour la valorisation de quelques 1,3 millions de tonnes de déchets annuels (hors déchets miniers) et l'émergence de nouveaux marchés. À titre d'exemple, les cendres industrielles de l'entreprise Stora Enso (implantée à Kemi) sont recyclées et transportées vers la mine de chrome OutokumpuElijärvi (située dans la ville de Keminmaa), pour être consommées comme ressources¹⁷. Cependant, il faut attendre les années 2000 pour que la mise en œuvre de l'écologie industrielle connaisse une réelle amélioration avec des synergies entre des entreprises forestières, minières, sidérurgiques, de services, des centres de recherche (Lapland University of Science, Aalto University, Kemi Technology Park) etc¹⁸. De grands groupes industriels locaux participent aux synergies industrielles en contribuant à la valorisation de résidus de chaleur, de cendres, des résidus de métaux, de bois, de décontamination des sols.

¹⁵I.H. Johnsen, A. Berlina, G. Lindberg, N. Mikkola, L.S. Olsen, J. Teräs, « The potential of industrial symbiosis as a key driver of green growth in Nordic regions. », NordRegio Report, 2015.

¹⁶Teräs, « Nordic Study on Industrial Symbiosis in North Region », SymCity 2016, Norden. Cette démarche d'écologie industrielle s'est ainsi appuyée sur plusieurs documents stratégiques conduits par le Conseil Régional parmi lesquels le « Lapland's Arctic Specialisation Program » apparaît incontestablement comme celui qui a été au cœur des initiatives puisque sa principale orientation concernait la « Sustainable utilization of natural resources and natural conditions ». Au niveau national, cette démarche a pu s'appuyer également sur une coopération avec le « National Industrial Symbiosis Program ».

Cette démarche rassemble à ce jour principalement les acteurs suivants :

- Entreprises privées : StoraEnso Outokumpu Elijärvi, Outokumpu Kemi, Metsä Group...

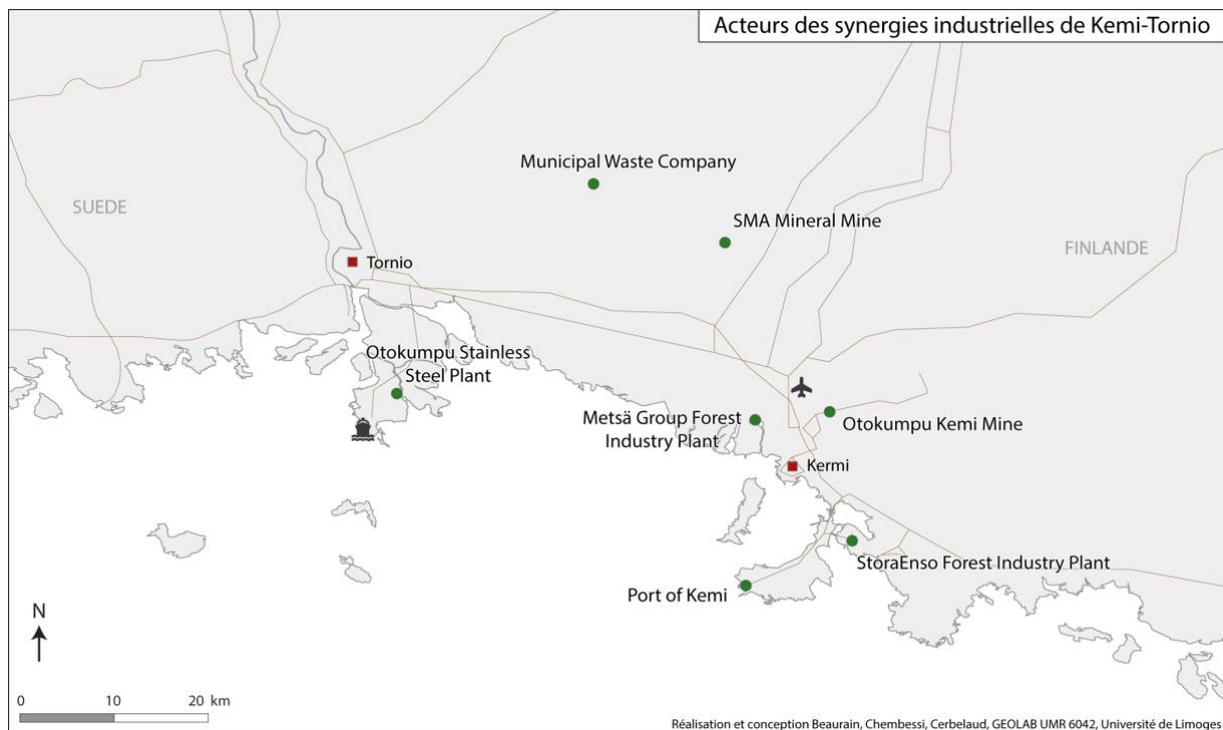
- Acteurs publics : Regional Council of Lapland, Finnish Innovation Fund, National Industry Symbiosis Program (NISP)

- Autres acteurs : Digipolis, Lapland University of Applied Science, Aalto University

¹⁷Johnsen et al., *op. cit.* p.5. Les deux villes de Kemi et Keminmaa sont distantes d'une vingtaine de kilomètres.

¹⁸*Ibid.*

Considérée comme un modèle de grappes d'entreprises (Teräs, 2016)¹⁹, la démarche de Kemi-Tornio s'appuie sur la valorisation des ressources territoriales. Parmi les flux les plus représentatifs, on peut citer le traitement du « laitier » (déchet de la production de l'acier) par l'usine de valorisation de la société Tapojärvi à Tornio, qui transforme les sous-produits de l'aciérie en produits re-valorisables, y compris par l'industrie sidérurgique elle-même. Mentionnons également la réduction des émissions de CO2 grâce à la coopération entre l'usine de SMA Mineral et l'usine de ferrochrome d'Outokumpu : SMA Mineral, producteurs de chaux et de dolomie à grande échelle, utilise du monoxyde de carbone comme combustible, remplaçant ainsi l'utilisation de 17 000 m3 d'huile chaque année. Il s'agit en quelque sorte d'une coopération industrielle visant l'efficacité et la durabilité des ressources naturelles locales, puisque la plupart des matières premières de base des entreprises proviennent de la région.



Welford²⁰ présente ce type de démarche à la fois comme un réseau de recyclage industriel ou un écosystème industriel à ancrage local ou régional, dans sa typologie des différents niveaux de mise en œuvre de l'écologie industrielle²¹. A Kemi-Tornio, le réseau d'acteurs ambitionne de construire un écosystème industriel regroupant toutes les plateformes industrielles de la région, avec la participation des municipalités. Johnsen et al²² soulignent même que le futur économique de Kemi-Tornio dépendrait de sa capacité à valoriser les sous-produits, les flux de déchets de matières et à développer des innovations liées au chauffage, en utilisant les excès de chaleur des industries locales et en misant sur un véritable marché local de sous-produits et de

¹⁹J. Teräs, *op. cit.* p.5

²⁰R. Welford, « Commentary: Regional Environmental Management Systems : lessons and Challenges for Industrial Ecology Research », *Progress in Industrial Ecology – An International Journal*, n°1, (1-3), 2004, p. 286-291.

²¹Welford (2004) décrit différents niveaux de mise en œuvre de l'écologie industrielle permettant d'identifier clairement une relation entre celle-ci et les économies de marché : la symbiose industrielle, les parcs éco-industriels, les réseaux de recyclage industriel et l'écosystème industriel territorial.

²²Johnsen et al, *op. cit.* p. 5

déchets. Toutefois, il existe d'autres démarches d'écologie industrielle en Finlande qui misent également sur la gestion urbaine des déchets ménagers et/ou industriels, par exemple le nitrogène et le phosphore²³ pour l'amélioration du cadre de vie, la réduction de la pollution atmosphérique, ainsi que la valorisation énergétique des ressources locales, notamment forestières, pour la coproduction de chaleur et d'électricité²⁴. En effet, l'application des réglementations nationales et européennes sur la gestion des déchets a conduit les municipalités finlandaises à revoir en profondeur leurs modes d'élimination de ces résidus, qui étaient longtemps basées sur des petites décharges. Cette forme de gestion des résidus ayant occasionné des problèmes de pollution des eaux au phosphore et au nitrogène, les municipalités ont donc développé une approche d'intervention qui s'appuie sur l'analyse des flux de matières (AFM) qui est associée dans la littérature aux démarches d'écologie industrielle. Reposant sur une certaine intégration de la notion de la proximité géographique, l'approche municipale consiste à l'évaluation des flux entrants et sortants de substances chimiques dans une région géographique précédemment déterminée, en y incluant les activités industrielles et agricoles. Le recours à des pratiques associées à l'écologie industrielle permet ainsi de retracer les origines des résidus de matières, et d'identifier des techniques de gestion des flux pour en minimiser les risques, plus particulièrement les problèmes de pollution²⁵. La nouvelle démarche intègre à la fois le traitement des déchets ménagers et industriels et celui des eaux usées de la municipalité, par un traitement essentiellement biologique, et repose sur une circulation des flux dans un écosystème d'acteurs locaux.

2.3- De la symbiose industrielle de Landskrona à l'engagement des villes suédoises

Première grande expérimentation de l'écologie industrielle en Suède (Mirata & Emtairah, 2005²⁶ ; Starlander, 2003²⁷), la symbiose industrielle de Landskrona lancée au printemps 2000 s'est traduite par la participation d'une vingtaine d'entreprises provenant de différents secteurs manufacturiers (Varlet, 2012²⁸). Cette démarche, à l'instar de toutes celles qui ont été entreprises à cette époque en Europe du Nord, a été largement influencée par le succès et le retentissement dans cette région du cas de Kalundborg. Néanmoins, on peut souligner quelques différences notables entre ces deux expériences d'écologie industrielle : d'une part, il semble bien que la participation des acteurs publics au pilotage de la démarche ait été sensiblement plus importante que dans le cas danois ; d'autre part, si l'on en croit Starlander²⁹, ce sont probablement les bénéfices environnementaux qui ont constitué l'objectif prioritaire, beaucoup plus là encore que dans le cas danois.

²³L. Sokka, R. Antikainen, P. Kauppi, « Flows of Nitrogen and Phosphorus in municipal waste: a substance flow analysis in Finland », *Progress in Industrial Ecology – An International Journal* 1(1-3), 2004, p. 165-186.

²⁴J. Korhonen, « Co-production of heat and power: an anchor tenant of a regional industrial ecosystem », *Journal of Cleaner Production* 9, 2001, p. 509-517.

²⁵M. Bouma, R. Heijungs, et al, « Material Flows and economic models : an analytical comparison of SFA ? LCA and partial equilibrium models. », *Ecological Economics*, 32, 2000, pp.195-216.

²⁶M. Mirata, T. Emtairah, «Industrial Symbiosis networks and the contribution to environmental innovation: The case of the Landskrona industrial symbiosis programme », *Journal of Cleaner Production*, n°13, 2005, p. 993-1002.

²⁷Starlander J.-E., « Industrial Symbiosis: A closer Look on Organizational Factors: A study based on the industrial symbiosis project in Landskrona, Sweden. », Master Thesis in Environmental Management and Policy, supervised by M. Mirata, M. & M. Backman, IIEE, Lund, 2003.

²⁸D. Varlet, « Enjeux, potentialités et contraintes de l'écologie industrielle : Le Cas de Dunkerque. », Thèse de Doctorat, Sciences de Gestion, Université du Littoral Côte d'Opale, 2012.

²⁹J.E. Starlander, *op. cit.*, p.36

Dans cette ville d'environ 40000 habitants, située à 500 km au sud de la Suède, la démarche relève de la valorisation de résidus de métaux, d'emballages, de composants de véhicules, de déchets ordinaires, ou la mutualisation de la logistique, du transport, de l'approvisionnement entre les entreprises locales. Elle concerne également l'échange de chaleur, impliquant notamment le système de chauffage urbain local, le développement et l'échange des carburants de remplacement, de produits chimiques et de l'eau³⁰. Elle s'inscrit dans la suite d'un précédent programme mis en œuvre entre 1987 et 1989 par un groupe de chercheurs de l'IIIEE³¹ basés à Lund University, dans le domaine de la production propre (durable) pour répondre aux risques de pollution générés par l'importante activité industrielle locale³². L'une des caractéristiques remarquables de cette symbiose, en plus de s'être développée à l'échelle régionale, c'est d'avoir mis l'accent sur des synergies de mutualisation d'équipements entre acteurs industriels, alors que l'écologie industrielle est souvent réduite aux synergies de substitution des flux physiques. En effet, la démarche de Landskrona était portée dans une perspective régionale avec la participation d'industries et d'acteurs économiques dont la plupart sont situés dans le périmètre municipal. De plus, les acteurs publics, impliqués en grand nombre dans sa mise en œuvre, voulaient une référence nationale qui puisse permettre de diffuser le concept de l'écologie industrielle dans d'autres régions en mettant en avant des résultats significatifs.³³Dans cette démarche, la vision d'une écologie industrielle basée sur une proximité géographique entre les acteurs est très présente puisque les entreprises échangeant des flux entre elles ne sont pas distantes l'une de l'autre de plus de 5 kilomètres. En outre, dans son développement la symbiose de Landskrona ne s'est pas uniquement reposée sur les échanges de flux de matières mais elle a également valorisé des synergies de mutualisation en misant sur des collaborations entre les entreprises en matière de transport et de logistique, en dépit de difficultés portant notamment sur l'origine et la destination des matières premières et des produits finis. D'autres expériences sur la mutualisation de compétences, d'entrepôts de stockage sont aussi décrites à propos de l'écologie industrielle à Landskrona. Ce projet pilote a servi d'exemple par la suite à de nombreuses autres expérimentations d'écologie industrielle en Suède, telles que la symbiose industrielle de Händelö, présentée comme un modèle de contribution de l'écologie industrielle à la transition énergétique³⁴, ou celle de Helsingborg³⁵etc.

D'autres expériences d'EI en Suède.

Ville portuaire située au sud-est de la Suède, avec plus de 125000 habitants, Norrköping abrite la démarche d'écologie industrielle de Händelö. Malgré son port, d'une importance capitale dans l'activité économique régionale, la ville de Norrköping tente de faire face aux menaces de fermeture des industries locales,

³⁰J.E. Starlander, *Ibid.*, p.6

³¹ IIIEE : *International Institute for Industrial Environmental Economics, Lund University, Suède.*

³²*Ibid.*

³³ *Ibid.*

³⁴L. Baas L., « Östergötland : Towards a sustainable region on the basis of industrial symbiosis and renewable energy. », *paper for the 16th Annual International Sustainable Development Research Conference, Hong-Kong, 2010.*

³⁵F. Celander, R. Enquist, K. Friman, P. Karlsson et al., « *IndustrialSymbiosis in Helsingborg* », *TKMJ38 IndustrialSymbiosis, 2013.*

particulièrement dans le secteur textile, suite au ralentissement économique des années 70.³⁶ À cet effet, les démarches environnementales sont conçues comme des outils d'attractivité territoriale pour les entreprises nationales et internationales afin de relancer le développement économique régional. Depuis 2007, la ville s'appuie sur des programmes d'énergies renouvelables, de bioraffinerie, d'industries intelligentes et des technologies propres pour construire des synergies industrielles. Plus spécifiquement, la symbiose de Händelo est centrée sur le développement des bioénergies, la valorisation énergétique des déchets industriels, de la vapeur, sur un réseau de chauffage urbain³⁷. Parmi les flux les plus représentatifs, on citera l'utilisation des cendres de l'usine Kemi de Metsä Fibre comme paillis dans l'aménagement paysager et comme combustible ou encore des échanges de CO₂ entre l'usine d'agroéthanol et l'entreprise de gaz industriel

Citons également la ville de Helsingborg (130000 habitants) et son réseau industriel composé de grands groupes industriels tels que Öresundskraft (première compagnie d'électricité du pays), Kemi AB (spécialisée dans les produits chimiques) Ces diverses entreprises ont mis en place des synergies de recyclage et de valorisation des déchets pour la production de biogaz et d'engrais biologiques. Elles ont également participé à la réalisation d'un réseau de chauffage urbain et à la mise en œuvre de solutions intégrées dans les domaines de l'eau, notamment des eaux usées, mais également d'échanges de résidus de matières et d'un réseau de mutualisation d'équipements³⁸. Au-delà des quelques exemples évoqués ici, il existe d'autres expérimentations de l'écologie industrielle dans les pays nordiques telles que le parc de ressources Svartsengi (Islande), le cluster Eyde (Norvège) et de nombreux projets en démarrage ou à l'arrêt, notamment celui de captation et de stockage de carbone de Mongsatd (Norvège). Ces nombreuses tentatives de symbioses industrielles témoignent d'une prise de conscience très forte dans les pays d'Europe du Nord de la nécessité de faire évoluer les processus de production vers une plus grande prise en compte des contraintes environnementales.

3- De la mise en œuvre de l'écologie industrielle : quelles innovations ?

Les démarches d'écologie industrielle en Europe du Nord, de par leur presque réussite, permettent d'insister sur l'importance des innovations technologiques et organisationnelles dans leur mise en œuvre.

3.1- La question de l'innovation technologique

Fondée sur des synergies industrielles, la mise en œuvre de l'écologie industrielle se traduit au sein du système industriel par des changements techniques dans les processus de production des entreprises. Watkins³⁹ fait ainsi remarquer que les entreprises finlandaises de la symbiose de Kemi-Tornio ont connu plusieurs tentatives de changements de procédés. En effet, les entreprises ont été amenées à renforcer

³⁶ M. Legné, « Regeneration, Quaterization and Historic Preservation in UrbanSweden : Norrköping, 1970-2010 », 2009, 40p., Department of Integrated Conservation, Gotland University, Visby, Sweden., E. Meijers, K. Hollander, M. Hoogerbrugge, « Case study on polycentricmetropolitan areas in Linköping and Norrköping », 2012, 20p., EuropeanMetropolitan Network Institute.

³⁷L. Baas, *op. cit.* p.6

³⁸Celander et al, *op. cit.* p.6

³⁹Watkins G., « Opportunities and Barriers in the Beneficial Utilization of Process Industry Residues, from Resource Efficiency toward sustainability philosophy », Doctoral Dissertation, Aalto University, Department of Forest Product Technology, 2014.

l'efficacité technique de leurs équipements, afin de minimiser la production des déchets et valoriser leurs résidus de matières. Ces changements de procédés concernent particulièrement les entreprises qui exploitent des résidus d'aciers, de papiers-cartons, des pâtes de papeteries, etc⁴⁰. Plusieurs synergies potentielles ont ainsi requis des solutions innovantes, soit de nouveaux outils technologiques ou de nouvelles applications des technologies préexistantes⁴¹. En analysant les démarches des pays nordiques au prisme de la grille de lecture proposée par Huber⁴², elles répondent à ce que l'auteur interprète comme l'innovation technologique environnementale (*Technological Environmental Innovation*). En effet, l'innovation technologique est représentée ici par des changements dans les systèmes énergétiques, l'exploitation des matières premières et des ressources naturelles, la foresterie, les industries chimiques ou la gestion des produits chimiques, les processus de production, le contrôle des émissions et de production de déchets afin de limiter la dégradation de l'environnement⁴³. Si Huber⁴⁴ insiste sur des innovations radicales (changement structurel du métabolisme industriel au lieu d'une adaptation des technologies existantes), d'autres en revanche mettent en avant des changements technologiques sur le long terme⁴⁵. En effet, l'écologie industrielle se distingue comme mettant en œuvre des innovations radicales et/ou des innovations incrémentales⁴⁶. Dans les faits, certaines valorisations de flux de matières s'appuient ainsi sur une transformation globale du système technologique des entreprises, alors que d'autres ont recours à une amélioration de la technologie sans un changement profond des usages et des pratiques. Ces innovations semblent indispensables pour un fonctionnement en boucle où tous les flux territoriaux peuvent être introduits dans la symbiose industrielle⁴⁷. En effet, la mise en œuvre de l'écologie industrielle repose sur la capacité des acteurs économiques à s'adapter aux changements de procédés nécessaires pour valoriser les flux de matières d'autres entreprises situées à proximité et dont les résidus présentent un intérêt pour ceux-ci. Le fonctionnement normal et efficace de la chaîne industrielle dépend donc de ces mutations parfois nécessaires pour les échanges de matières, d'énergies, d'eau, des sous-produits, etc. Cependant, ces démarches ne sont pas nécessairement réduites aux parcs éco-industriels, mais tiennent de plus en plus compte d'une certaine échelle territoriale, indispensable pour estimer les quantités des principales ressources matérielles utilisées ou les rejets sur le territoire⁴⁸. Les travaux qui se sont intéressés à Kalundborg, ont ainsi relevé des changements technologiques fréquents dans les procédés de production des entreprises, ayant progressivement construit

⁴⁰ G. Watkins, M. Mäkelä, O. Dahl, « Innovative use potential of industrial residues from the steel, paper and pulp industries – a preliminary study », *Progress in Industrial Ecology - An international Journal* 7 (3), 2010, 185-204.

⁴¹ D.R. Lombardi, P. Laybourn, « Redefining Industrial Symbiosis: Crossing Academic-Practitioner Boundaries », *Journal of Industrial Ecology* n°16 (1), 2012, p. 28-37 ; B. Allenby, *op. cit.*, p.2 ; J.R. Ehrenfeld, « Eco-efficiency: Philosophy, theory and tools », *Journal of Industrial Ecology* n°9 (4), 2005, p. 6-8.

⁴² J. Huber, *op. cit.*, p.2

⁴³ P. Cooke, « Regional Innovation Systems, Clean Technology & Jacobian Cluster-Platform Policies », *Regional Science Policy and Practice* n°1 (1), 2008, p. 23-45.

⁴⁴ J. Huber, *op. cit.*, p.2

⁴⁵ Lombardi et al, *op. cit.*, p.8 ; Greens et al, *op. cit.*, p.2

⁴⁶ N. Buclet N, *op. cit.* p.2

⁴⁷ Mirata et al, *op. cit.*, p.6

⁴⁸ R.U. Ayres, « Le métabolisme industriel et les changements de l'environnement planétaire », *Revue internationale des sciences sociales*, n°121, 1989, p. 401-412.

l'image de marque de cette référence mondiale d'une symbiose industrielle⁴⁹. Pour ces auteurs, Kalundborg est une « ville en boucle fermée » reposant sur des innovations technologiques qui lui permettent de transformer et/ou valoriser ces flux de matières entre des industries locales et le tissu urbain⁵⁰. L'absence de « lock-in » technologique⁵¹ est d'ailleurs considérée comme la source de réussite de la symbiose de Kalundborg. Les acteurs développent ainsi de nouvelles approches industrielles afin de répondre aux contraintes environnementales. Cependant, les solutions axées uniquement sur la modernisation des systèmes industriels pour revaloriser les déchets et les sous-produits, qu'il s'agisse d'un changement radical ou progressif, ne semblent pas suffisantes à elles-seules pour aboutir à des symbioses durables. Au-delà des trajectoires technologiques, de nombreuses mutations organisationnelles et sociales sont indispensables pour construire des écosystèmes industriels tels que représentés dans les pays scandinaves⁵².

3.2- La place de l'innovation organisationnelle

Green & Randles⁵³ font le constat que les modèles d'écologie industrielle ont été longtemps considérés comme des systèmes fortement fermés, statiques, ne tenant pas compte de la structure sociale dans laquelle ils sont nécessairement encastrés. En effet, l'environnement social, qu'il faut entendre ici par les relations humaines, le degré de confiance entre les acteurs, l'organisation *in fine* du réseau d'acteurs et les logiques organisationnelles et institutionnelles à l'œuvre, est déterminant pour construire une démarche collective durable⁵⁴. Beaurain et Varlet⁵⁵ suggèrent la possibilité d'appréhender ces déterminants organisationnels et sociaux au prisme de la grille de lecture proposée par « l'économie de la proximité ». En effet, la mise en œuvre de l'écologie industrielle ne se réduit pas à une proximité de nature géographique qui favoriserait l'échange de flux. Elle implique également une proximité de nature relationnelle, support des diverses interactions qui caractérisent l'action collective et dans laquelle il faut considérer à la fois les relations inter-entreprises mais également celles entre les entreprises et les acteurs institutionnels représentatifs des espaces urbains⁵⁶.

Les dynamiques nordiques, notamment les plus avancées, se traduisent ainsi par un vaste champ d'apprentissage collectif entre les parties prenantes, qui s'articule autour de différents niveaux d'interactions, des mutations organisationnelles internes aux firmes et entre les acteurs. La symbiose de Kalundborg, par

⁴⁹P. Cooke, *op. cit.*, p.8

⁵⁰Norden, *Industrial Symbiosis for Norden*, Copenhagen, Nordic Council of Ministers, 2007.

⁵¹ Par « lock-in » technologique on entend que la technologie qui est adoptée devient la norme et ferme la porte à d'éventuelles nouvelles innovations technologiques susceptibles de remplir la même fonction.

⁵²F. Schiller, A. Penn, A. Druckman, I. Basson, K. Royston, « Exploring space, exploring opportunities : the case for analyzing space in industrial ecology », *Journal of Industrial Ecology* n°18 (6), 2014, p. 792-798 ; W.S. Ashton, A. C. Bain, « Assessing the "Short Mental Distance" in Eco-Industrial Network », *Journal of Industrial Ecology*, n°16 (1), 2012, p. 70-82 ; N. Jacobsen, S. Anderberg « Understanding the evolution of industrial symbiotic networks: The case of Kalundborg », in *Economics of industrial ecology: Materials, structural change, and spatial scales*, J. C. J. M. Van den Bergh and M. Janssen (eds.) Cambridge, MA, USA, MIT Press ; J.E. Starlander, *op. cit.* p.6

⁵³Green et al, *op. cit.*, p.2

⁵⁴Schiller et al, *op. cit.* p.9 ; Ashton et al, *op. cit.*, p.9.

⁵⁵C. Beaurain, D. Varlet, « Régulation des interactions au sein d'un réseau territorialisé d'entreprises dans le cadre de l'écologie industrielle », *Revue d'économie industrielle*, n°152, 2015, p. 173-206

⁵⁶ Dans le cas français de la démarche d'EI de l'agglomération dunkerquoise, par exemple, ces interactions entre acteurs industriels et acteurs urbains portent à la fois sur la participation des collectivités locales à la symbiose, par le biais notamment de la mise en place d'un réseau de chauffage urbain, mais également sur l'intervention des acteurs publics (autorités politiques et représentants de l'Etat) pour la régulation des conflits apparaissant entre industriels à propos de flux internes à la symbiose (C. Beaurain, D. Varlet, *op.cit.*)

exemple, s'est nourrie de changements managériaux internes aux firmes, de fréquentes rencontres entre les acteurs, la mise en place d'une gouvernance participative ayant favorisé la diffusion des outils et des procédés auprès des différentes parties prenantes⁵⁷. Les synergies industrielles dépendent de l'intersection de plusieurs expertises, d'une diversité d'acteurs et d'une possibilité d'apprendre, de se connaître mutuellement et de comprendre les enjeux⁵⁸. Des interactions permanentes nourrissent les réseaux d'acteurs, avec une coordination assez importante permettant de résoudre des défis complexes, ou d'atteindre des résultats que les acteurs n'auraient pas obtenus individuellement. Ces coordinations sont conduites différemment suivant les expérimentations avec des organes de gouvernance au sein desquels l'on retrouve des représentants des différentes parties prenantes. Dans le cadre de la démarche de Kalundborg, la structure de gouvernance existante (l'Institut de la Symbiose Industrielle, qui joue ici le rôle de véritable plate-forme institutionnalisée) révèle une coordination autogérée et/ou auto-organisée par les acteurs eux-mêmes favorisant une certaine horizontalité bénéfique aux différents acteurs⁵⁹. En effet, cette auto-gouvernance apporte une stabilité au réseau, et facilite les échanges de flux de matières. Quoiqu'il en soit, le succès supposé des démarches d'écologie industrielle en Europe du Nord dépend fortement de la densification du réseau, des modes de gouvernance, de la prise en compte des intérêts économiques de tous les acteurs et de l'intérêt collectif pour la préservation des ressources naturelles.

En outre, dans le cas de Kalundborg la symbiose laisse apparaître une centralité très forte, avec des différences assez sensibles entre le cœur du réseau et sa périphérie, du point de vue des quantités échangées et de l'intensité des échanges. Dans le cœur du réseau, la plupart des firmes sont liées par plusieurs flux s'inscrivant dans la durée, qui ont contribué au développement de protocoles de communication et de liens sociaux et émotionnels très importants. La coopération spontanée entre les entreprises qui s'est installée depuis plusieurs années a ainsi contribué à de hauts niveaux de réciprocité dans les flux physiques comme dans les flux d'information. Et cette configuration a largement influé sur la nature du progrès technique privilégié par les firmes, par le biais notamment des capacités d'innovation générées par les flux existants ou potentiels. Cette démarche est ainsi révélatrice d'une articulation complexe entre les motivations individuelles des firmes, essentiellement économiques et une action collective tournée vers des bénéfices environnementaux.

L'analyse du contenu des interactions nous aide à comprendre le processus de construction de cette

⁵⁷M. Chertow, J.R. Ehrenfeld, « Organizing self-organizing systems », *Journal of Industrial Ecology* n°16 (1), 2012, p. 13-27; M. Chertow, « Uncovering industrial symbiosis », *Journal of Industrial Ecology*, n°11 (1), 2007, p. 11-30.

⁵⁸Lombardi et al, *op. cit.*, p.8

⁵⁹ M. Chertow, J.R. Ehrenfeld, *op. cit.*, p.12. En France, on trouve également cette forme d'auto-gouvernance dans le cas de la démarche dunkerquoise avec l'association ECOPAL. Dans les autres cas nordiques, ce sont davantage des programmes mis en place par les acteurs publics qui jouent ce rôle de coordination, en lien évidemment avec les acteurs privés. Starlander (*op.cit.*) souligne par exemple que l'IIIIEE joue un grand rôle dans la coordination des synergies industrielles de Landskrona, sans que cet institut ne soit pour autant un véritable organisme de coordination dédié à cette mission. Johnsen et al (*op.cit.*) soulignent que l'un des défis de la démarche de Kemi-Tornio est précisément de parvenir à opérationnaliser une véritable coordination ou animation autour des projets et recommandent pour cela la mise en place d'une structure autonome dédiée à cette mission. De manière générale, la littérature sur l'écologie industrielle insiste depuis longtemps sur l'importance de la pérennisation de ces structures de coordination tout autant que sur les problèmes (de financement notamment) qu'elle pose

articulation. L'essentiel des flux inter-firmes s'inscrit en effet dans un cadre contractuel élaboré au niveau individuel, sur des bases essentiellement commerciales qui se rapprochent fortement des règles du marché, avec parfois des arrangements spécifiques liés à la nature et à la valeur des résidus échangés, pour lesquels la confiance entre acteurs est à la fois une condition et une conséquence des interactions⁶⁰. Mais les relations de marché ne font pas tout. En effet, les démarches s'inscrivent dans des relations industrielles et humaines qui reposent nécessairement sur la confiance, l'ouverture, ainsi que sur des interactions sociales et interpersonnelles entre différents acteurs. En quête de solutions, les participants aux démarches finissent par identifier des partenaires et définir des procédés internes auxquels ils n'avaient pas pensé au préalable.

Il convient également d'insister sur le rôle décisif des acteurs publics dans cette dynamique collective en Europe du Nord. En effet, les législations et politiques environnementales locales, plus particulièrement les réglementations sur les déchets et les dérivés chimiques, ont souvent contraint les acteurs territoriaux, les entreprises notamment, à s'engager dans des échanges de flux de résidus de matières, de déchets, d'énergies, d'eaux etc⁶¹. Deux principaux leviers de compétences ont ainsi été identifiés pour les acteurs publics : facilitation et intervention directe⁶². Ces auteurs évoquent un fort soutien public aux entreprises à travers des mesures générales, une priorité accordée aux économies d'énergie et de l'environnement, une participation publique très active. Décrite comme une symbiose industrielle spontanée et auto-organisée⁶³, la démarche de Kalundborg est néanmoins influencée dans son développement par la participation active de la municipalité. Et pour toutes les expériences décrites dans cet article, les réseaux de chauffage urbain ont bénéficié de la participation directe des acteurs publics. En outre, les autorités locales de Kemi-Tornio ont-elles-mêmes largement financé des études et piloté des actions contribuant à l'émergence des synergies, notamment dans le domaine de la récupération des vapeurs industrielles. En Suède, les municipalités et l'Etat central jouent un rôle déterminant dans la mise en place des synergies industrielles dans une approche d'agglomération de flux à l'échelle de plusieurs territoires. L'Etat central suédois a fixé le cap par les diverses réglementations environnementales et il est intervenu également par le biais de programmes de subvention et/ou de financement, à l'instar également de l'Etat finlandais. Du côté des municipalités, elles s'associent très souvent à des organismes locaux, tels que Digipolis à Kemi-Tornio, pour mobiliser les acteurs publics locaux autour du projet. En France par exemple, ce sont les chambres de commerce et d'industrie, ou des agences de conseil et d'expertise en écologie industrielle qui apportent ce soutien aux communautés

⁶⁰K. Sinding, « Environmental management beyond the boundaries of the firm: definitions and constraints », *Business Strategy and the Environment*, n°9 (2), 2000, p. 79-91.

⁶¹Jiao W., Boons F., « Toward a research agenda for policy intervention and facilitation to enhance industrial symbiosis based on comprehensive literature review », *Journal of Cleaner Production*, n°67, 2013, p. 14-25 ; plus précisément, ces auteurs associent l'ensemble des mesures à deux échelles distinctes : la coercition (contrainte) et l'incitation, la coercition étant exprimée par les instruments juridique et réglementaire adoptés pour le pouvoir public.

Sur ce point, voir également : Costa I., Massard G., Argawal A., « Waste management policies for industrial symbiosis development: case studies in European countries », *Journal of Cleaner Production*, n°18, 2010, p. 815-822 ; Jacobsen et al, *op. cit.* p.9.

⁶²Jiao et al, *op. cit.* p.11 ; Lehtoranta S., Nissinen A., Mattila T., Melanen M. , « Industrial Symbiosis and the policy instruments of sustainable consumption and production. », *Journal of Cleaner Production*, n°19, 2011, p. 1865-1875 ; Costa et al, *op. cit.* p.11

⁶³Chertow et al, *op. cit.* p.9 ; Jacobsen et al, *op. cit.* p.9

d'agglomération dans la mobilisation des acteurs territoriaux. Les municipalités se présentent donc comme des bras opérationnels de la politique générale des Etats centraux sur les problématiques de valorisation des résidus de matières.

Le tableau ci-dessous synthétise les principales caractéristiques des démarches analysées

Tableau de comparaison des trois principales démarches d'écologie industrielle présentées

Expérimentations (Année de lancement)	Caractéristiques
Kalundborg (1959)	<ul style="list-style-type: none"> - Démarche spontanée entre entreprises - Participation <i>ex post</i> de la municipalité. - Existence d'une structure de gouvernance autogérée par les acteurs. - Participation d'organismes de recherche. - Synergies principalement axées sur les échanges de flux de matières, d'eau et d'énergies - Principales entreprises = Chimiques, pharmaceutiques, énergétiques, technologies propres.
Kemi-Tornio (2001)	<ul style="list-style-type: none"> - Démarche planifiée - Forte participation <i>ex-ante</i> d'acteurs publics (Conseil Régional de Lapland, Municipalités locales) - Présence d'un acteur intermédiaire entre acteurs publics et entreprises pour l'animation = Digipolis (Kemi Technology Park) - Pas d'organismes de gouvernance et de coordination clairement établis. - Participation d'organismes de recherche non régionaux = Aalto University. - Financement public fortement mobilisé sur les projets - Synergies principalement portées sur les échanges de flux de matières. - Principales entreprises = Minières, Foresterie, papeterie et imprimerie.
Landskrona (1980)	<ul style="list-style-type: none"> - Démarche planifiée - Participation <i>ex-ante</i> d'acteurs publics = Agences et Directions Techniques de l'Etat Central + Municipalités - Financement public fortement mobilisé sur les projets - Pas de structure de gouvernance et de coordination clairement établie. - Synergies industrielles non exclusivement limitées aux échanges de flux de matières - Mise en évidence des synergies de mutualisation d'équipements

	<ul style="list-style-type: none"> - Principales entreprises= chimie, cimenterie, composants automobiles, production de verre, galvanisation des métaux, logistique
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Conclusion

Depuis l'expérience pionnière de Kalundborg au Danemark, les démarches urbaines d'écologie industrielle se sont multipliées dans les pays nordiques, faisant de cette région de l'Europe l'un des territoires les plus en pointe dans ce domaine. L'éclairage que nous avons apporté ici sur quelques-unes de ces expériences nous permet de tirer quelques enseignements majeurs. En premier lieu, ces expériences urbaines sont à resituer dans la prise en compte des contraintes environnementales et de la rareté de certaines ressources naturelles, témoignant d'une sensibilité de l'Europe du Nord aux enjeux environnementaux. En deuxième lieu, l'écologie industrielle doit être appréhendée comme un catalyseur d'innovations technologiques et organisationnelles pour répondre à ces enjeux. L'expérience des pays nordiques fait de l'écologie industrielle une pratique de management environnemental au service de la croissance, n'apparaissant qu'au terme d'un long processus de coopération, de participation, de mise en réseau et de changement technologique. Cela signifie en clair que l'existence de gains économiques, associée à la réalité de bénéfices environnementaux, reste une condition centrale au développement de ces démarches. Enfin, il faut souligner l'importance des interactions, qui impliquent à la fois les accords passés entre les entreprises pour la mise en place des synergies et le rôle souvent décisif des acteurs publics, tant à l'échelle nationale que régionale ou locale. En définitive, les différents enseignements tirés des expériences nordiques renvoient à l'idée de la structuration d'une action collective comme fondement des démarches d'écologie industrielle, qui associe rationalité économique et bénéfices environnementaux, sous l'effet d'une prise de conscience collective de la rareté des ressources naturelles. De manière générale néanmoins, l'analyse des démarches à travers le monde révèle que bien des difficultés demeurent encore avant que ces démarches ne puissent effectivement se généraliser à l'ensemble de l'économie. Nous avons présenté ailleurs les limites de la posture épistémologique des premiers argumentaires défenseurs de l'écologie industrielles, en critiquant notamment leur référence à l'analogie avec les écosystèmes naturels.⁶⁴ D'un point de vue pratique, un certain nombre d'obstacles pour la mise en place de cette action collective et de risques inhérents à son évolution apparaissent fréquemment, qui limitent en définitive l'essor de ces démarches. Les obstacles peuvent être ainsi de nature technique (incompatibilité des process de production, problèmes de quantités, confidentialité des données qui limite les échanges entre firmes...), économiques (rentabilité insuffisante des flux, marchés inexistantes...) ou réglementaires (législation sur les déchets qui empêche leur réutilisation...). Les risques portent sur la pérennité des entreprises participant à la démarche, sur l'instabilité des flux liée à l'évolution des quantités produites et à celle des process, sur la dégradation possible de la qualité de ces flux et sur

⁶⁴ C. Beaurain, D. Varlet, « Quelques pistes de réflexion pour une approche pragmatiste de l'écologie industrielle : l'exemple de l'agglomération dunkerquoise », *Revue Développement durable et territoire*, 2014, Vol.5, n°1

l'affaiblissement des interactions lié à une perte de confiance ou à des changements dans le management des entreprises. Ces obstacles soulignent en définitive la fragilité de ces démarches, surtout en l'absence d'une réelle structure de coordination entre les acteurs.