

Le procédé industriel décarboné au prisme de l'ingénierie système durable

The low-carbon industrial process through the prism of sustainable system engineering

Jean-Pierre Micaëlli

Centre Magellan, iaelyon, Université Jean Moulin Lyon 3, jean-pierre.micaelli@univ-lyon3.fr

RÉSUMÉ.

Cet article abordera l'analyse du procédé industriel décarboné (PID) en adoptant un style technologique systémique. Le PID sera considéré comme un système artificiel interagissant avec le système naturel (géosphère), social (sociosphère) et technique (technosphère). Il peut être conçu selon les règles de l'ingénierie système durable (ISD). L'ISD propose des concepts, des procédures, des modèles pour contextualiser le PID étudié, en formuler les éco-exigences, en architecturer les fonctions de sorte à les rendre éco-harmonieuses et jalonner des pistes d'invention. Une illustration de cette approche systémique sera donnée dans le cas d'un procédé industriel carboné à fort impact : la clinkérisation. Notre proposition présentera toutefois d'importantes limites. Nous ne bénéficions pas de retours d'expérience sur la mise en œuvre des PID en cimenterie et notre approche est centrée sur l'ingénieur alors que l'ISD ne peut se passer de contributions des sciences de la nature et des sciences humaines et sociales.

ABSTRACT. This paper will address the issue of the Decarbonized Industrial Process (DIP) by adopting a systemic technological style. The DIP will be considered as an artificial system interacting with the earth's natural, the social system and the technical systems. Designing the DIP involves engineering it as a system, and implementing the rules of Sustainable Systems Engineering (SSE). SSE provides concepts, methods and modeling techniques for clarifying the context, the requirements and the architecture of the DIP of interest, and framing the embodiment design of new solutions. An illustration will be given in the case of a highly carbon dioxide-producing process, namely clinkerization. However, our proposal is subject to significant limitations. We do not yet have any feedback on DIPs' concrete implementation, and SSE remains an engineer-centric framework that cannot include key contributions from the natural sciences and the social sciences.

MOTS-CLÉS. Artefact, Conception, Décarbonation, Industrie, Ingénierie Système Durable, Modèle, Procédé.

KEYWORDS. Artifact, Decarbonation, Design, Industry, Sustainable Systems Engineering, Model, Process.

1. Introduction

Certains procédés industriels décarbonés (PID) visent à éliminer ou au moins à réduire la production de chaleur par combustion d'énergies fossiles, un moyen intrinsèquement délétère pour l'environnement [AIT, 2024 ; ADE, 2024a ; THE, 2022]. Même à l'échelle d'un pays désindustrialisé comme la France, développer et diffuser les PID représente un défi d'ampleur. Selon l'ADEME [ADE, 2024b], la combustion d'énergies fossiles associée aux procédés industriels carbonés (PIC) explique 77% des émissions industrielles (EI) de dioxyde de carbone (CO₂), soit 15,4% des émissions nationales (EN). Les EI sont surtout le fait de quelques établissements de grande taille, capitalistiques, techniquement complexes, au fonctionnement reposant sur des chaînes logistiques d'approvisionnement et de distribution étendues [ADE, 2024a]. Il s'agit principalement d'usines sidérurgiques (27% des EI, soit 5,4% des EN), de cimenteries (14% des EI, soit 2,8% des EN), d'installations chimiques et pétrochimiques (10% des EI, soit 1,5% des EN). À l'état de prototypes de laboratoire dans les années 1980, certains PID ont atteint une maturité technique suffisante pour être testés sur site (*Technology Readiness Level*, TRL de 8) avant de passer à un emploi à l'échelle réelle (TRL de 9),

condition *sine qua non* pour ensuite se diffuser à large échelle [OLE, 2020]. Des politiques publiques peuvent accélérer leur rythme d'adoption en jouant sur différents leviers ayant prouvé leur efficacité, dont la fiscalité et la normalisation environnementales [STE, 2024].

Le panorama des PID dressé à grands traits ne paraît pas appeler d'analyse technologique approfondie, au sens originel de Johann Beckmann (1739-1811) de réflexion globale sur la contribution de toutes les techniques au développement d'une société [CAR, 2022]. Il existe des solutions concrètes : les PID s'opposant aux PIC ; des industriels les employant ou non ; des critères orientant leurs choix d'adoption, et des incitations publiques. L'association entre ces quatre types d'atomes est contingente, même si la réglementation et la fiscalité peuvent plus ou moins orienter les choix individuels des décideurs industriels. Analyser l'adoption des PID en ces termes relève d'un « style » technologique [HAC, 2002] que nous qualifierons d'atomistique LE. Celui-ci présente l'inconvénient de sauter de l'énonciation d'un enjeu global relatif aux atteintes atmosphériques du système Terre à des atomes techniques (PIC, PID), sociaux (les décideurs industriels individuels) et économiques (les critères de choix, les incitations publiques). Raisonner de la sorte conduit à admettre un fossé ontologique : l'atmosphère, la Terre formeraient des systèmes biophysiques, mais pas les autres éléments cités. Or ce fossé ontologique viole l'un des principes clefs du « systémisme », à savoir que « tout objet concret et toute idée est soit un système, soit une composante d'un système » [BUN, 2004, p.53]. Ce qui revient à dire que l'association entre la Terre, les procédés industriels, les acteurs, les politiques forment système et sont chacun des systèmes. De plus, l'atomisme technologique considère les procédés ou les objets techniques en général comme des solutions concrètes, finies, disponibles sur étagère, à la manière d'articles posés sur les rayons d'un libre-service. Leur étude se focalise sur l'achat, les autres phases de leur cycle de vie étant éludées. C'est particulièrement le cas de leur phase de conception alors qu'elle est pourtant critique compte tenu de l'importance, de l'irréversibilité des décisions prises lors de cette étape. Pour dépasser les lacunes de l'atomisme technologique, un autre style peut être envisagé. Ce style, nous le qualifierons de systémique. Pour celui-ci, le procédé industriel est un système artificiel se plaçant à l'intersection entre des systèmes naturel (géosphère), social (« sociosphère ») et technique (« technosphère ») [TRI, 2024] et avec un cycle de vie comprenant notamment la conception. Celle-ci peut se faire en référence explicite à la systémique, notamment si elle est « réglée » [LEM, 2014] sur l'Ingénierie Système (IS) [INC, 2023 ; MEI, 1998]. L'IS propose aux concepteurs, aux bureaux d'études (BE) une boîte à outils faite de concepts, d'un lexique, de bonnes pratiques, de processus, de méthodes, de normes, de techniques de modélisation, etc., permettant de concevoir des artefacts techniques compliqués, complexes, critiques et onéreux [HON, 2018], des caractéristiques correspondant aux procédés industriels. L'IS admet différentes variantes, dont l'une nous concernera au premier chef, à savoir l'IS durable (ISD) (*sustainable systems engineering*, SSE) [LEV, 1999]. La littérature académique existante en IS et en ISD n'ayant pas élaboré le lien entre les PID et leur conception, cet article montrera l'apport pratique d'un tel rapprochement dans le cas de tels procédés encore techniquement immatures.

Pour ce faire, nous procéderons en trois temps. Nous résumerons d'abord ce qu'est l'IS, avant de présenter l'ISD (section 1). Malgré son inaboutissement actuel, cette variante de l'IS propose toutefois un processus de conception et une palette de modèles systémiques pouvant être employée pour concevoir les futurs PID (section

2). Nous illustrerons cette idée à l'aide d'un PIC particulier, à fort impact atmosphérique, à savoir la clinkérisation, ou production à très haute température (calcination à plus de 1400°) de nodules combinant des minéraux ; modules ensuite broyés en vue d'obtenir cette poudre appelée ciment. Nous pointerons les limites de notre proposition systémique concernant non une réalité concrète, déjà présente dans les cimenteries, mais un futur possible (section 3). En conclusion, nous suggérerons plusieurs perspectives de recherche. Elles graviteront autour du thème suivant : l'ISD demeure une approche centrée sur l'ingénieur, trop peu participative, trop peu inclusive, incapable d'embarquer des chercheurs de sciences de la nature ou des parties prenantes sociales, économiques ou politiques promouvant la décarbonation. Si la contribution de l'ISD à la conception des PID n'est pas négligeable, elle est donc loin d'être suffisante.

2. Ingénierie Système, un aperçu

L'IS a été imaginée après-guerre en vue de maîtriser la conception des systèmes artificiels complexes destinés à des clients ou des maîtres d'ouvrages régaliens [HON, 2018]. Le cœur de l'IS concerne les armes, les astronefs, les aéronefs, les navires, les véhicules de transports terrestres, etc. [MIC, 2013], soit des artefacts techniques éloignés des préoccupations environnementales. Au cours de ces trois dernières décennies, l'IS s'est institutionnalisée. Une communauté internationale d'environ 25 000 membres se fédère désormais au sein de *l'International Council on Systems Engineering* (INCOSE). Depuis 1998, l'INCOSE édite la revue académique *Systems Engineering*, concourt à l'élaboration de normes, dont l'ISO/IEC/IEEE 15288, et assure la publication d'un wiki et d'un traité, le *Systems Engineering Body of Knowledge* (SEBoK) [INC, 2023]. Compte tenu de son ampleur et de son dynamisme, résumer l'IS est donc une gageure. Dans cette première section, nous n'aborderons que deux points utiles par la suite.

L'IS se focalise sur des systèmes techniques envisagés comme des artefacts, donc des entités fonctionnelles fournissant un service attendu [SIM, 1997] à des acteurs, à des institutions parties prenantes (*stakeholders*) (sociosphère) [INC, 2023], à d'autres objets techniques (technosphère) et au milieu naturel (géosphère). L'artefact appréhendé comme système est par définition abstrait, global, unique, etc. Il n'est toutefois pas un ectoplasme hantant les BE : il se manifeste par de multiples formes, concrétisations, instances, occurrences, réalisations, solutions, etc. [KRO, 2024]. L'IS admet un « dualisme technologique » [MIC, 2013], avec le système d'un côté, les solutions associées de l'autre, ce qui fait écho à la « théorie C-K » [LEM, 2014]. Pour ce qui concerne la structure interne de l'artefact à concevoir, l'IS reprend une approche habituelle en systémique [BUN, 2004] et en ingénierie [MEI, 1998 ; SIM, 1997], à savoir la décomposition hiérarchique en strates. La structure interne de l'artefact à concevoir serait un emboîtement de sous-systèmes aux périmètres sont de plus en plus étroits à mesure qu'on descend dans la hiérarchie [KRO, 2024 ; INC, 2023 ; OMG 2017] (Tableau 1). L'originalité de l'IS est de supposer qu'à tous ses niveaux de décomposition ou de stratification, un même processus est mis en œuvre. Il repose sur un enchaînement de tâches de conception identiques. Il s'agit de contextualiser le système couramment étudié, de prescrire les exigences qu'il devra satisfaire, d'architecturer ses constituants, d'allouer les exigences aux constituants identifiés, de vérifier la cohérence d'ensemble, puis de préparer la conception aval et la validation de la solution concrète produite en conception aval [ISO, 2015]. L'IS met ainsi en miroir la décomposition du système technique et sa validation, qui se fait à rebours selon un

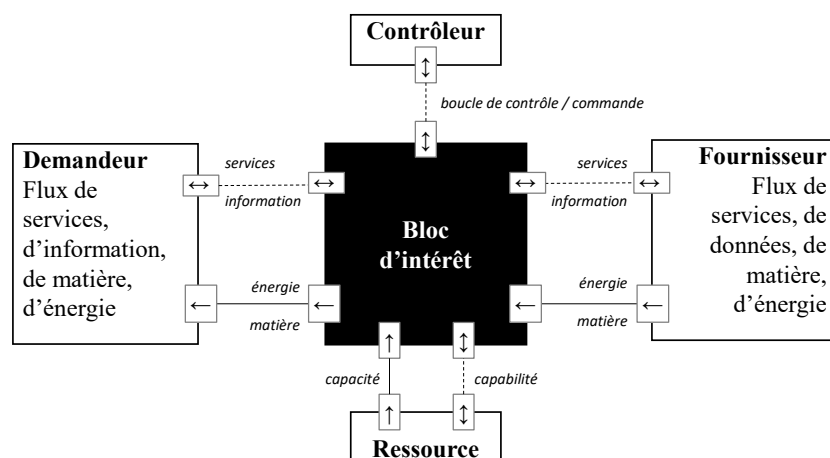
processus d’une durée parfois conséquente [INC 2023 ; ISO, 2015]. Le Tableau 1 donne un exemple de cette symétrie dans le cas d’un four de cimenterie.

Système artificiel...	
...élaboré par descente et décomposition hiérarchiques	...validé par remontée et synthèse hiérarchiques
Le four tournant actuel est un PIC servant à produire du clinker. Ce four a pour fonction de calciner des minéraux utiles au ciment, donc de transformer ces matériaux, de l’énergie, en nodules à broyer ensuite pour obtenir du ciment (contexte). Ses constituants assurent la liaison du four avec l’agencement spatial de la cimenterie (bâti), le chauffage proprement dit, l’approvisionnement en minerais, leur contenance dans des silos, le refroidissement, le contrôle / commande, etc. Le chauffage suppose une source d’énergie, un flux d’air, une montée à température, un contrôle de la température, etc.	Les organes internes de la chambre de refroidissement s’agencent-ils bien ? Le four tournant assure-t-il les fonctions et fonctionnements attendus ? Satisfait-il les exigences ? Pour les opérateurs travaillant dans la cimenterie, est-il sûr, maintenable, contrôlable aisément, etc. ?

Tableau 1. Exemple de hiérarchie d’un système artificiel : le cas du four tournant d’une cimenterie (PIC).

Secondement, dès ses origines [HON, 2018], l’IS s’est penchée sur les façons de codifier les connaissances d’ingénierie et sur les techniques de modélisation à employer à cet effet [ARM, 2004]. La modélisation systémique se veut ainsi consubstantielle à l’IS [LUZ, 2014]. Ce qui décline, dans ce champ pratique et technique qu’est l’ingénierie, la proposition épistémologique générale de Mario Bunge [BUN, 2004] selon laquelle si un objet est défini comme système alors la connaissance portant sur lui forme aussi un système. Ajoutons que si cette connaissance est codifiée, formalisée, modélisée, encodée dans des applications logicielles, alors c’est un système de modèles qui est à constituer [INC SEBok 2023 ; KOZ, 2023 ; LUZ, 2014]. C’est exactement le cas en IS, comme le montre l’exemple du *Systems Modeling Language* (SysML) [OMG, 2017]. SysML est une schématique aidant à créer différents diagrammes complémentaires du système technique à concevoir, chaque figure renvoyant à une de ses dimensions : sa structure, son comportement, ses exigences, les variables ou loi physiques mobilisées lors de sa conception, etc. Dans la palette des nombreux modèles de l’IS ou diagrammes de SysML, l’un importe : il s’agit du schéma bloc. Ses origines en tant que substitut aux équations remontent aux années 1940 et au début de la Cybernétique [KRO, 2024 ; OMG 2017 ; LUZ, 2014 ; ARM, 2004 ; MEI, 1998 ; Ross, 1977]. Comme le montre la figure 1, même s’il est difficile à créer car il suppose de bien définir les entités et les flux étudiés, le schéma bloc est aisé à lire, à être partagé par les nombreux métiers impliqués dans une conception d’un système technique compliqué car multiphysique. Ce schéma est structurel au sens où il distingue et codéfinit le bloc étudié et son environnement ; il est aussi comportemental car ce bloc échange avec ce dernier, manifestant ainsi des comportements appréhendables à partir de flux de services, de matière, d’énergie, d’information transformés. Dans le cas du four tournant produisant le clinker, un schéma bloc peut être à la fois employé par des mécaniciens spécialistes des structures ou de cinématique, des chimistes, des thermiciens, des électriciens, des spécialistes du contrôle / commande, de l’informatique industrielle, etc. Selon les spécialités, les flux étudiés diffèrent. Le chimiste éprouvera le besoin de connaître la composition du gaz injecté dans le four tournant, pas le spécialiste de structures mécaniques ou l’électricien ; l’automaticien, du flux d’information en permettant la contrôlabilité. Du fait de son aspect comportemental, le schéma bloc est un modèle préalable à certaines simulations numériques [AFIS, 2005]. Le

concepteur peut scénariser les dynamiques du bloc d'intérêt en faisant jouer telle ou telle variable agissant sur les flux étudiés. On trouve cette façon de faire dans l'analyse de systèmes et l'application DYNAMO de Jay W. Forrester, à la base des simulations ayant étayé les travaux du Club de Rome [MEA, 2017]. Pour l'IS contemporaine, l'idéal serait que tous les modèles employés en conception puissent être aussi faciles à lire, aussi exécutables que le schéma bloc. La réalité reste éloignée de ce summum, même dans les BE les plus en pointe en matière d'adoption de l'IS et du numérique [KOZ, 2023].



3.

Figure 1. Exemple de représentation d'un schéma bloc. Source : l'auteur.

Nos propos généraux sur l'IS sont déclinés dans cette variante qu'est l'ISD. Dès son premier numéro, *Systems Engineering* l'a placée à l'agenda de la communauté de l'INCOSE. Pour Levy et al. [LEV, 1999], les inventeurs du terme, l'ISD présente de fortes particularités. Tout d'abord, elle est à la fois nécessaire, urgente et proactive. L'ISD se veut une réponse d'ingénieurs à ce qu'on appelle désormais la « crise de l'anthropocène » [AIT, 2024]. L'ISD est aussi multi-échelle et multi-dimensionnelle. Elle considère des systèmes naturels parfois très petits, par exemple des comportements moléculaires, parfois très grands, dont les limites terrestres ou le changement climatique. Elle est sociale compte tenu de l'ampleur des enjeux économiques, politiques, culturels, à traiter pour concevoir, fabriquer et employer des systèmes techniques « écoharmonieux » [AIT, 2024]. L'ISD est aussi utilisatrice des résultats de sciences de la nature fondées sur la modélisation systémique [MEA, 2017], dont la climatologie [SUP, 2023 ; COU, 2022]. Malgré ce bon début, en un quart de siècle, seulement une quinzaine d'articles de *Systems Engineering* ont été consacrés à l'ISD. De plus, comme le notent avec dépit Keating et al. [KEA, 2024], les publications en donnent une vision fragmentée (Tableau 2). Hipel et Obeidi [HIP, 2005] ou Polojärvi et al. [POL, 2023] ajoutent qu'à ce jour, l'ISD repose sur des bases conceptuelles encore trop fragiles. Alors que la modélisation est un pilier de l'IS, trop peu d'articles de *Systems Engineering* précisent comment modéliser un système artificiel durable ou écoharmonieux. Fait toutefois exception le « S-Cycle » de Hay et al. [HAY, 2017]. Ce modèle montre comment allouer des éco-exigences à des blocs fonctionnels interreliés à des flux de ressources naturelles produites, détruites ou recyclées (flux de matière indiqués Figure 1), à la manière dont a procédé, dans un autre domaine, Nicholas Georgescu-Roegen [GEO, 1971] en vue de décrire la structure 'physique' d'une économie nationale. Malheureusement, Hay et al. [HAY, 2017] ne précisent pas les entités environnementales avec lesquelles interagit le système artificiel étudié, ce qui représente une faiblesse majeure de leur proposition. Plus récemment, Edwards et al. [EDW, 2024]

considèrent la durabilité comme une propriété, une performance de niveau système, assurée si chacun de ses constituants est « résilient ». S'appuyant sur des modèles biophysiques, les auteurs identifient les conditions expliquant la bascule du système artificiel étudié vers un état durable ou pas. Pour améliorer la robustesse de leur modèle, Edwards et al. [EDW, 2024] pointent l'importance de renforcer les relations entre les modèles d'ingénierie d'un côté, dont le schéma bloc, et les modèles biophysiques de l'autre. Par contre, leur proposition n'est pas élaborée et la dimension sociale ou sociétale est éludée, ce qui ne satisfait pas les exigences de l'ISD formulées par Levy et al. [LEV, 1999].

Système étudié *	Auteurs de Systems Engineering concernés	Résultats intéressant le présent article
Bâtiments sobres	[KOU, 2008]	Apport de l'ISD pour architecturer un dispositif de contrôle / commande de systèmes artificiels moyennement complexes comme les bâtiments collectifs (par extension : les sites industriels).
Usines vertes	[GAB, 2007]	Architecture fonctionnelle d'une usine complète, avec la prise en compte d'éco-exigences concernant l'eau, les déchets (flux de matière), et l'importance d'un système de supervision centralisé pour vérifier la satisfaction en temps réel desdites exigences (boucle de contrôle/commande).
Traitement des ordures ménagères	[MID, 2021]	Difficulté de la collecte d'ordures pouvant donner lieu à un recyclage industriel suite à incinération (pour produire de l'énergie) ou à la récupération des matières (flux de matière, conversion d'un flux de matière en flux d'énergie).
Parcs éoliens ou solaires	[PAV, 2015]	Possibilité de produire de l'énergie électrique décarbonée sur les sites industriels (circuit court, local), ce qui introduit une dimension spatiale de l'ISD dont ne tient pas compte le schéma bloc.
Systèmes d'irrigation	[STE, 2023]	Conflit d'usage des ressources naturelles (territoires, ressources hydrauliques) et nécessité d'intégrer de multiples parties prenantes dans les projets de conception durable, ce qui relève de la dimension sociale de l'ISD et a une incidence sur la nature d'une boucle de contrôle/commande renvoyant aux différents types de transactions entre parties prenantes (réglementation, taxes, contrats, usages quant au partage des biens communs, etc.).
Systèmes aquatiques, hydrologiques ou halieutiques	[GRI, 2023] [SID, 2016] Fet et al. 2010 [MAR, 1998]	Nécessité de bien intégrer le système artificiel dans un milieu naturel et de mesurer sa pression sur les lieux et cycles naturels, ce qui complexifie le lien entre le bloc et le flux de ressources ; de linéaire, celui-ci devient circulaire.
Écoparcs ou systèmes locaux symbiotiques	[MAY, 2010] [SOP, 2010] [HAS, 2007]	Importance d'une alliance, sur un territoire donné, d'industriels pratiquant tous l'économie circulaire (incidence sur tous les flux du schéma bloc), ce qui fait écho à la récente proposition de Huriez et Boël (2024) de « perma-industrie ».
Exigences liées à la [durabilité	[SVE, 2012]	Esquisse d'un modèle d'exigences prenant la durabilité comme exigence principale à partir de laquelle dérivent toutes les autres. Ces éco-exigences sont intégrées dans le contrôleur, le bloc contrôlé devant les satisfaire.
Gouvernance durable	[KEA, 2024]	Spécification d'un système de gouvernance cohérent avec un système artificiel durable, plus complexe que les systèmes existants, ce qui se traduit par des boucles de contrôle / commande emboîtées.

Tableau 2. Exemples de mise en œuvre de l'ISS. Source : Systems Engineering 1999-2023. * Les systèmes étudiés sont classés par niveau de complexité technique, sociale ou naturelle.

Le constat est sans appel : à ce jour, l'ISD demeure inaboutie. Malgré cette faiblesse à ne pas ignorer, cette variante de l'IS est toutefois susceptible d'apporter une aide précieuse pour concevoir un futur PID en s'inscrivant dans le style technologique systémique. La deuxième section montrera comment en se restreignant au cas de la clinkérisation et des PID envisagés comme substituts à ce PIC à fort impact environnemental.

3. ISD d'un PID : le cas des substituts à la clinkerisation

Le style technologique systémique envisage les procédés industriels, PIC ou PID, comme des systèmes artificiels formant un tout fonctionnel - rendant, fournissant des services - qu'il convient de contextualiser (1) en spécifiant leur environnement externe naturel, social et technique, (2) en définissant leurs exigences, éco-exigences en tête, (3) en identifiant des blocs fonctionnels écoharmonieux et (4) en jalonnant une conception aval visant au développement d'inventions susceptibles d'éliminer ou de réduire les effets délétères de la combustion d'énergies fossiles. Reprenant les acquis de la tradition de modélisation de l'ingénierie ou de SysML, l'ISD unifie les modèles renvoyant aux quatre éléments listés. Ces modèles ne sont pas juxtaposés, à la manière d'une collection : ils forment système.

On peut représenter les échanges entre le procédé d'intérêt et son environnement externe à l'aide du « diagramme de contexte » [OMG, 2017] (Figure 2). Le système d'intérêt, à savoir le procédé étudié, est placé au centre du schéma, sous forme d'une boîte noire autour de laquelle gravitent des entités externes relatives à la géosphère, la sociosphère et la technosphère, avec lesquelles ledit système interagit. Il entretient des échanges avec ces trois sphères ; en retour, celles-ci lui offrent la possibilité de fonctionner (facilitations externes) ou pas (agressions externes), de se transformer (leviers externes) ou pas (freins externes). La boîte en bas à droite de la Figure 2 importe. La technosphère ne se réduit pas à une collection d'artefacts techniques. Elle est structurée sous forme de « filières technologiques » [AIT, 2024]. Plus large que la filière économique des instituts de statistiques ou que la chaîne logistique, les filières technologiques vont de l'extraction de la matière première jusqu'au produit réabsorbé par l'activité anthropique (recyclage anthropique) ou par le milieu naturel (recyclage bionomique). Elles ont, par définition, une dimension environnementale, biophysique, justifiant la relation établie dans la figure 2 entre la technosphère et la géosphère. Ces filières peuvent être identifiées en référence aux flux du schéma bloc de la Figure 1. Trois filières technologiques peuvent être ainsi distinguées, dites de production (relation entre demandeur et fournisseur), d'équipement (relation aux ressources) et numérique (contrôle/commande du bloc concerné). Ce n'est pas tout. En ISD, le procédé étudié entretient des échanges bidirectionnels avec les entités externes intégrées dans des sphères elles-mêmes en interaction. Ce point est considéré dans les « matrices de double matérialité » [UE, 2023]. Malgré leur dénomination, ces matrices demeurent un document, une illustration, non un modèle utilisable en ISD. Une fois le procédé d'intérêt contextualisé en appliquant un stéréotype propre à l'ISD, l'étape de conception suivante consiste, selon la règle de l'IS, à en prescrire les exigences, à préciser ce que les parties prenantes attendent obligatoirement de lui.

La filière de production aide à placer le procédé étudié dans un process œuvrant une certaine matière, lui-même intégré dans une chaîne logistique, elle-même intégrée dans la filière de production. Dans le cas d'un PIC comme la clinkérisation, cette filière va du calcaire, des argiles, des gypses, de toutes les matières premières correctives extraites du sol, jusqu'au béton recyclé utilisable comme substitut du clinker (mâchefer) ou complément (laitier). Le PID supposera une autre filière de production. Produire du ciment suppose différentes opérations logistiques amont (commande, transport, approvisionnement, etc.) et aval (distribution), ainsi que du stockage, notamment sur le lieu même de la cimenterie. La transition du PIC au PID n'est pas susceptible de transformer la chaîne logistique en profondeur. La filière technologique d'équipement, considère le procédé étudié comme une installation, un bien capital, une immobilisation corporelle, à concevoir, réaliser, faire fonctionner, maintenir, moderniser, démanteler (cycle de vie de l'équipement). L'invention d'un PID modifie cette filière de façon plus ou moins large (**Error! Reference source not found.**). La filière numérique repose sur l'idée que le procédé étudié est un système artificiel contrôlable à partir d'un flux de données produites en lien à une avec les différentes parties prenantes en charge de sa régulation. Il peut s'agir des opérateurs assurant la conduite des installations, des maintenanciers en garantissant la disponibilité et le maintien de l'intégrité environnementale (absence d'atteintes à l'environnement), des auditeurs missionnés pour établir la comptabilité environnementale de l'installation, etc.

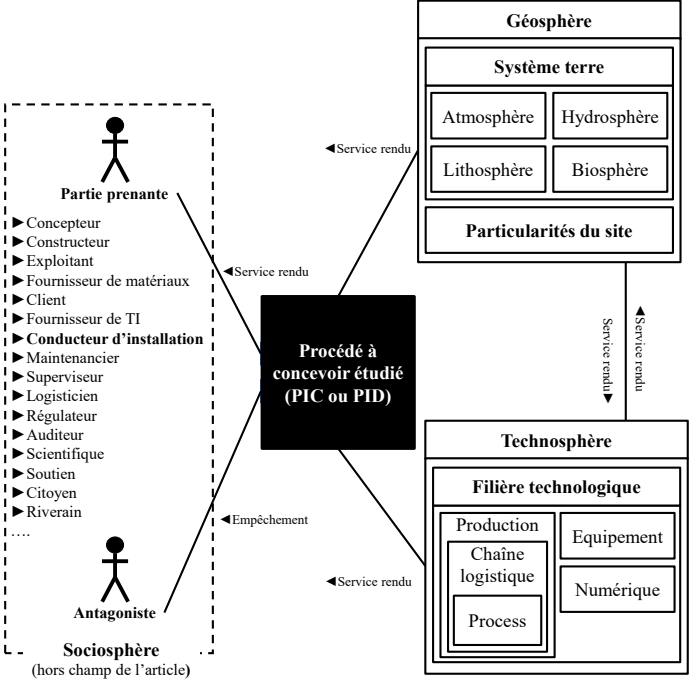
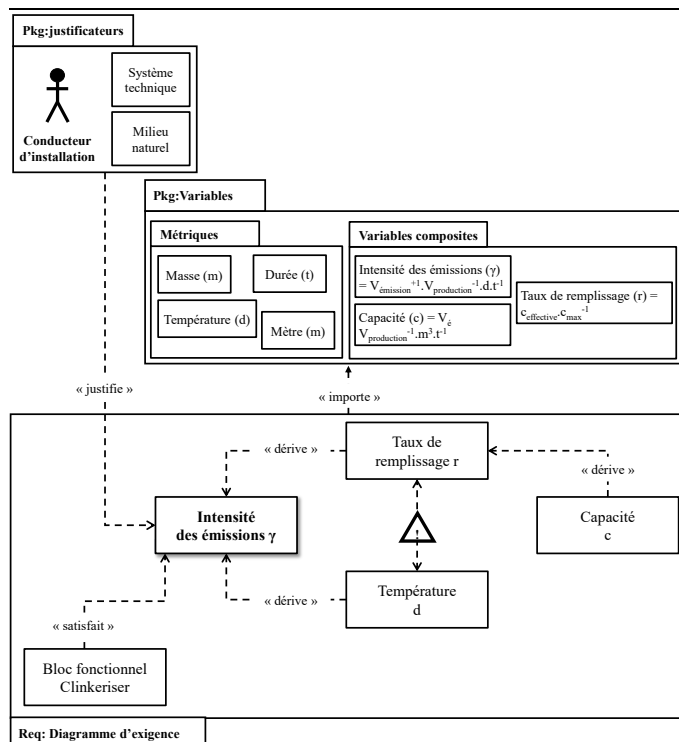


Figure 2. Contextualisation du procédé à concevoir étudié (PIC ou PID). Source : l'auteur.

En IS, toute exigence renvoie à au moins une entité de l'environnement externe, donc à une composante du diagramme de contexte. Cela signifie que les schémas, les modèles sont maillés, chaînés, de sorte à former système. En ISD, les exigences principales sont d'ordre environnemental ; elles concernent prioritairement la géosphère, puis la sociosphère. Les autres exigences en dérivent, comme le montre l'exemple simpliste de la Figure 3.



Le rectangle en haut du diagramme d'exigences aide à justifier l'éco-exigence principale, ici l'intensité des émissions du procédé. Ce rectangle indique qu'elle est prise en compte par le conducteur de l'installation en « opération » [INC, 2023], soit une phase spécifique du cycle de vie du procédé étudié. Le conducteur d'installation est une partie prenante, une composante de la sociosphère indiquée en gras dans la **Error! Reference source not found.** Le bloc au milieu du diagramme regroupe les variables et les métriques physiques utilisées pour quantifier l'éco-exigence. Celle-ci est satisfaite par un bloc fonctionnel, ici appelé 'clinkeriser'. Satisfaire signifie simplement qu'on attend que ce bloc la respecte obligatoirement, donc qu'elle lui sera allouée. L'éco-exigence principale se décompose ici en deux exigences dérivées : le taux de remplissage, la température. Le panneau d'avertissement signale une contradiction entre ces exigences. Ce point importe : il signifie que le concepteur aval, en charge du développement de la solution, manifera son inventivité technique pour imaginer des réponses offrant un meilleur compromis que celui de la solution couramment employée, à savoir le PIC. Cela signifie que la formulation d'exigences sert non seulement à contraindre la conception aval, mais aussi à ouvrir des fenêtres d'inventivité.

Figure 3. Exemple de diagramme d'éco-exigences. Source : l'auteur.

Une fois les éco-exigences bien formulées et modélisées à l'aide de la figure 3, l'ISD envisage de les allouer à des blocs fonctionnels éco-harmonieux. En architecture fonctionnelle habituelle, chaque bloc se résume à un verbe d'action unique, comme le montre les Figures 1 et 3. En ISD, ce bloc comprend nécessairement plusieurs constituants ou modules fonctionnels, dont l'ensemble forme un tout appelé « patron architectural » [INC, 2023]. Les trois premiers modules renvoient aux trois filières technologiques de production, d'équipement et numérique indiquées dans le diagramme de contexte (technosphère) (Figure 2). Le quatrième module garantit le fait que l'ensemble fonctionnel étudié satisfait bien aux éco-exigences prescrites (Figure 3), la décarbonation pour le cas qui concerne les PID. Contrairement au modèle d'Edwards et al. [EDW, 2024], l'éco-performance d'un bloc fonctionnel ne se résume donc pas à la résilience. Enfin, la structure fonctionnelle représentée Figure 4 élargit la focale du concepteur. Le schéma montre la configuration dite « intégrative » [SOS, 2003] dans laquelle les différentes fonctions retenues ne sont pas posées les unes à côté des autres. Cette configuration comprend (1) trois intégrateurs, les filières technologiques et l'entrepôt de solutions ; (2) les liaisons point à point entre blocs et (3) les relations entre leurs modules fonctionnels internes. En modifiant un élément local, par propagation, au moins un autre, parfois éloigné ou de nature différente, est modifié. Cette attention accordée à ce phénomène de propagation distingue le style technologique systémique du style atomistique. Pour ce dernier, il peut y avoir des effets pervers - une incitation à l'électrification portant sur un bloc précis produisant un effet de report de la pollution [AIT, 2024] -, mais la structure technique sous-jacente à ces effets n'est pas identifiée. Pour le style systémique, au contraire, les phénomènes de propagation sont 'normaux' et doivent appeler des réponses techniques globales préoccupant l'ISD.

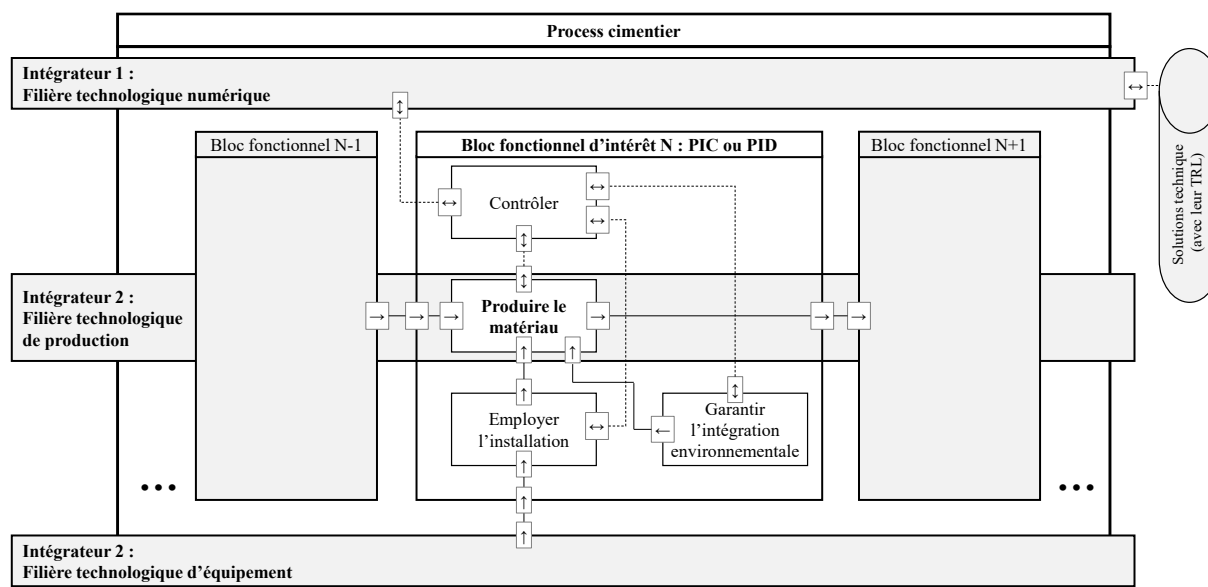


Figure 4. Structure fonctionnelle large du procédé d'intérêt. Source : l'auteur.

En informant les nombreuses boîtes et flux de la Figure 4, il devient possible de disposer d'une structure fonctionnelle panoramique du PIC ou du PID étudié. La question reste de la coupler avec des solutions physiques, organiques, techniques, etc. En ingénierie de conception routinière, ce couplage peut être facilité par l'élaboration du diagramme proposé par la *Function Analysis System Technique* (FAST). Il s'agit de coupler chaque fonction élémentaire, par exemple refroidir un four, une solution de principe existante, par exemple le refroidissement passif. Dans le cas présent, la chose est plus compliquée. Les PID se présentent à ce jour comme une collection sans cesse croissante de solutions techniques avec des TRL variables (2024 a, b). Ce constat posé, nous suggérons de considérer une interface volontairement floue entre la conception fonctionnelle du système résumée ci-dessus et le développement des solutions le concrétisant. L'IS et l'ISD ne proposent pas de modèles pour décrire ce type de zone grise technique. Nous pouvons au mieux nous inspirer de quelques règles de production de feuilles de routes technologiques [DEW, 2022] et se contenter de poser des premiers jalons. Le premier indique un itinéraire de disruption. Il s'agit d'employer des matériaux broyables, mais ne devant pas être calcinés pour obtenir du ciment. Ce qui correspond à « l'euthanasie » du PIC étudié [AIT, 2024]. Cela revient à produire du ciment sans chauffage, donc à enlever un bloc fonctionnel de la filière de production et à propager ce changement majeur dans toute la structure fonctionnelle représentée Figure 4. De portée moindre, les inventions incrémentales sont locales et peuvent concerner tel ou tel flux ou fonction indiquée dans ladite structure. Pour ce qui est des flux, il peut s'agir d'économiser les intrants, de substituer de l'oxygène pur à l'air, de proposer des matériaux calcifiables à une température moindre que celle actuellement en cours dans les fours tournants, de fractionner la masse de matériaux traité et le flux de chaleur, d'adopter la calcination électrique, d'affiner le contrôle/commande de la calcination, à la manière dont les ingénieurs ont procédé pour les moteurs à combustion automobiles depuis les années 1970, etc. Pour ce qui est des fonctions, il peut s'agir de récupérer la chaleur produite afin d'alimenter une turbine sur le site de la cimenterie, de créer une filière de recyclage, d'imaginer une cimenterie symbiotique, etc. Des idées d'inventions peuvent concerner la filière d'équipement, avec la modularisation de la cimenterie de sorte à pouvoir la dimensionner au plus juste, l'allègement du poids des structures ou des pièces mobiles, etc. L'analyse plus approfondie des collections de PIC possibles sort du cadre de l'ISD pour concerner la conception « empirique » ou « expérimentale » [MIC, 2013]. C'est donc à cette articulation entre la conception, abstraite, du PIC et du PID avec une conception expérimentale encore floue que s'arrête notre proposition. On le constate, d'une certaine façon, on reste au milieu du gué.

Le Tableau 3 permet de résumer nos propos.

Règle de l'IS	Règle de l'ISD : cas du PID	Technique de modélisation inspirée de SysML
Contextualiser le système d'intérêt	Placer le PID à l'intersection de la sociosphère (parties prenantes, antagonistes), de la géosphère et de la technosphère (filiales technologiques de production, d'équipement et numérique).	Diagramme de contexte suivant le stéréotype de l'ISD.
Prescrire les exigences	Par partie prenante, définir des exigences correspondant à ses attentes environnementales (sociosphère) et intégrer les contraintes de capacité naturelles (géosphère).	Diagrammes d'éco-exigences
Architecturer les fonctions	Prendre pour brique élémentaire un bloc fonctionnel intégrant des constituants interfacés avec chaque filière technologique et l'un assurant l'intégrité environnementale de la fonction d'intérêt. Considérer le PID comme composante d'une architecture intégrative.	Schéma bloc amélioré, avec une spécification très précise des flux physiques entre les fonctions.
Jalonner les solutions	Ne pas coupler une fonction à une solution détaillée, disponible sur étagère, mais indiquer des directions inventives à explorer lors de la conception de la solution. Il s'agit d'un premier effort vers l'élaboration de feuilles de route technologiques [DEW, 2022].	Aucune à ce jour.

Tableau 3. Propositions méthodologiques de l'article.

Notre proposition systémique ne concerne pas des réalités concrètes. Il s'agit d'un apport conjectural à la conception des PID à prendre avec la plus grande prudence. Malgré ce constat, des limites peuvent être d'ores et déjà mentionnées au sujet de notre approche systémique.

4. Discussion

Nos précédents propos ont visé à sortir du style technologique atomistique et d'un style technologique systémique souvent réduit à un holisme déclamatoire sur lequel ironise justement Mathieu Tricot [TRI, 2024]. Pour le style technologique systémique tel que nous l'entendons, le PIC ou le PID, ou plus généralement les procédés industriels, sont des systèmes artificiels de plein droit. Ils s'intègrent dans un contexte associant la géosphère, la sociosphère et la technosphère. Cette dernière comprend trois filières technologiques, dites de production, d'équipement et numérique. Qu'on change l'un de leurs maillons et c'est tout l'édifice fonctionnel du procédé qui se trouve modifié. Concevoir le PID en respectant le style systémique peut se faire en employant la boîte à outils de l'IS et de l'ISD, et ce même si celle-ci demeure inaboutie. Si l'ISD présente une certaine valeur conceptuelle ou pratique, notamment par rapport au style technologique atomistique, au moins trois limites méritent d'être d'ores et déjà posées et discutées.

La première est factuelle. Début 2025, compte tenu du TRL assez faible des PID, on manque de retours d'expériences et de données factuelles afin de valider, de garantir la pertinence empirique du processus de conception et des modèles esquissés section 2, voire de l'ISD ou du style technologique systémique en général. Notre proposition présente un caractère conjectural dont il convient d'être conscient. Cette limite factuelle a même une incidence sur la qualité de la codification, de la modélisation des connaissances liées au PID. L'IS cherche à modéliser les connaissances d'ingénierie de façon générique [KRO, 2024]. Il est évident qu'à ce jour, nous en sommes encore bien loin pour ce qui concerne les systèmes artificiels éco-harmonieux.

La deuxième limite est méthodologique. L'IS est clairement une approche d'ingénieur (client, maître d'ouvrage) pour ingénieur (concepteur, maître d'œuvre) par des ingénieurs (communauté des experts en IS, par

exemple réunie au sein de l'INCOSE). Le design thinking s'oppose à cette vision élitiste et technocentrique de la conception [ROW, 1991]. Le design thinking se veut inclusif, participatif, accessible pour le novice ou le béotien en conception. Il les rend proactifs en envisageant un processus de conception itératif et en employant des outils visuels adaptés. L'intégration du milieu technique, au sens fort de monde vécu par l'acteur du développement, de la mise en œuvre, de l'usage de la solution décarbonée [PET, 2024] et l'exigence de sobriété [VEL, 2022] supposent *a minima* la reprise de principes d'un design thinking à l'origine plutôt dédié aux biens ou aux services dont l'usage est expérimenté au quotidien par des utilisateurs communs. À l'autre extrême, l'ISD exige de coupler étroitement des modèles d'ingénierie avec ceux des sciences de la nature systémiques, par exemple la climatologie. Si la chose est aisée pour les modèles physiques, elle devient délicate pour les modèles biologiques compte tenu de la faiblesse de la culture des ingénieurs les concernant. L'expérience montre la difficulté du partage de modèles entre métiers d'un même BE [KOZ, 2023], on imagine sans peine combien sera difficile de l'élargir à des acteurs à ce jour en dehors de la technosphère.

La troisième limite de notre proposition est substantielle. Le dualisme technologique de l'IS peut servir à éluder la conception concrète, détaillée, réaliste, etc. Or, l'éco-conception, -ingénierie ou -innovation supposent un retour au réel, au biophysique, au tangible, etc. Il s'agit d'intégrer les contraintes capacitaires et dynamiques du système naturel terrestre, du système culturel, comme le pointent les théoriciens couplant systématiquement, judicieusement, l'innovation verte à « l'innovation frugale » [RAD, 2013 ; LEB, 2023]. Il s'agit aussi de prescrire la simplicité de la solution à développer, mais aussi sa manufacturabilité, sa maintenabilité, sa recyclabilité locales, à moindre coût, voire de valoriser des solutions dites *low tech* [BIH, 2014 ; RAD, 2013] ou vernaculaires [AIT, 2024]. En mettant en œuvre ces pratiques de conception « modestes », l'ISD réelle satisferait les exigences formulées par Levy et al. [LEV, 1999] il y a un quart de siècle. On éloignerait ainsi l'ISD de la sur-ingénierie à laquelle conduit trop souvent l'IS.

5. Conclusion

Se référant au cas spécifique du procédé industriel décarboné (PID), avec une illustration concernant la clinkérisation, un procédé industriel carboné (PIC) à très forte empreinte environnementale, cet article a esquissé ce qu'est le style technologique systémique et sa variante pratique, à savoir l'ingénierie système (IS) et sa variante durable (ISD). Le procédé industriel est un système artificiel interagissant avec la géosphère, la sociosphère et la technosphère. Le concevoir suppose de le conceptualiser non comme une solution concrète, disponible sur étagère, mais comme un système défini en associant un contexte, des exigences, une structure fonctionnelle, voire une première carte de solutions guidant l'activité inventive de ceux ou celles qui auront à le concrétiser. Idéalement, les connaissances utiles à la conception du PID devraient être codifiées, formalisées, encodées dans les modèles informatiques, à la manière de cette référence emblématique qu'est le schéma bloc. Le lien entre l'ISD et le PID n'est pas curieusement pas abordé dans la littérature de l'IS. Traiter de cette question présente une certaine valeur pour qui défend un style technologique systémique allant au-delà de l'holisme déclamatoire. Même si l'intention systémique peut être jugée intéressante, elle présente des limites d'ores et déjà identifiées. À ce jour, le relativement faible TRL des PID ne permet pas de disposer d'une base factuelle solide, y compris pour dresser des feuilles de route technologiques. L'IS reste centrée sur l'ingénieur.

Elle demeure ésotérique pour les parties prenantes pourtant engagées au premier chef dans la transition environnementale, qu'il s'agisse d'exploitants concrets des futurs PID, de citoyens comprenant l'enjeu de la décarbonation, de politiques la soutenant, mais aussi de chercheurs de sciences de la nature désirant coupler leurs modèles systémiques avec ceux de l'ingénierie. Enfin, le dualisme technologique de l'IS peut conduire à accorder trop d'importance à la conception abstraite du système sur celle, concrète, de la solution alors que les travaux sur l'innovation verte et frugale pointent l'importance de la conception concrète.

Plusieurs perspectives théoriques ou pratiques peuvent être esquissées afin de dépasser les très sérieuses limites évoquées. La première concerne la cartographie des PID concrets utilisés, oubliés, ou conçus dans des secteurs aussi variés que l'industrie, l'agriculture, les transports, l'habitat, le numérique, etc. [AIT, 2024], de sorte à proposer une méthode de construction de feuilles de route technologiques propres à ces procédés écoharmonieux. La deuxième perspective vise à étendre l'IS en hybridant ce cadre de référence pour ingénieurs avec des méthodes de conception inclusive, participative d'un côté, et avec les approches de modélisation des sciences de la nature ou des sciences humaines et sociales de l'autre. À ce jour, à notre connaissance, la tension que cette hybridation suppose n'a pas été traitée par la littérature.

6. Références

- [ADE, 2024b] ADEME [Agence de la transition écologique] 2024b. *Décarboner l'industrie : enjeux et défis*. Paris (FR), ADEME.
- [ADE, 2024a] ADEME 2024a. *Guide Méthodologique pour la rédaction d'un plan de transition sectoriel pour la décarbonation de l'industrie*. Paris (FR), ADEME.
- [AFIS, 2005] AFIS [Association Française d'Ingénierie Système] 2005. *Typologie des modèles de l'IS*. Paris (FR), AFIS, mai.
- [AIT, 2017] Aït el-Hadj, S. 2017. *Le Système technologique contemporain*. Londres (UK), ISTE Editions Ltd.
- [AIT, 2024] Aït el-Hadj, S. 2024. *Transition écologique et mutation technologique*. Londres (UK), ISTE Editions Ltd.
- [ARM, 2004] Armatte, M. 2004. Modèles et modélisation, 1950–2000, *Revue d'Histoire des Sciences*, 57(2), 243–304.
- [BIH, 2014] Bihouix, P. 2014. *L'Âge des low tech : Vers une civilisation techniquement soutenable*. Paris (FR), Seuil.
- [BUN, 2024] Bunge, M. 2024, *Matérialisme et Humanisme : Pour surmonter la crise de la pensée*, Montréal (CA), Liber.
- [CAR, 2022] Carnino, G., Hilaire-Pérez, L. 2022. Qu'est-ce que la technologie ? Jalons pour l'histoire longue d'un concept oublié. In Carnino, G. et al. (Dir.), *La Technologie générale : Johann Beckmann, Entwurf der allgemeinen Technologie / Projet de technologie générale (1806)*. Rennes (FR), Presses Universitaires de Rennes 13-36.
- [COU, 2022] Coutellec, L., Schmid, A-F. 2022. Modélisation, simulation, expérience de pensée : la création d'un espace épistémologique – Regards à partir des œuvres de Vernadsky et Poincaré. In : Varenne, F. et al. (Dir.), *Modéliser et simuler – Tome 2*. Paris (FR), Éditions Matériologiques 21-47.
- [DEW, 2022] De Weck, O. L. 2022. *Technology roadmapping and development: a quantitative approach to the management of technology*. Cham (CH), Springer.
- [EDW, 2024] Edwards, C.M., Nilchiani, R. R., Miller, I. M. 2024. Impact of graph energy on a measurement of resilience for tipping points in complex systems. *Systems Engineering*, 27(4) 1-14.

- [FET, 2010] Fet, A. M. et al. 2010. A framework for environmental analyses of fish food production systems based on systems engineering principles. *Systems Engineering*, 13(2) 109-118.
- [GAB, 2007] Gabbar, H. A. 2007. Design of Virtual Plan Environment for Future Generation Green Production Systems. *Systems Engineering*, 10(2) 155-166.
- [GEO, 1971] Georgescu-Roegen, N. 1971. *The Entropic Law and the Economic Process*. Cambridge (MA), Harvard University Press.
- [GRI, 2024] Grigg, N. S. 2024. Systems engineering and water resources management: A closer relationship is needed. *Systems Engineering*, 2024(27) 440-444.
- [HAC, 2002] Hacking, I. 2002. **Historical ontology**. Cambridge (MA), Harvard University Press.
- [HAS, 2007] Haskins, C. 2007. A Systems Engineering Framework for Eco-Industrial Park Formation. *Systems Engineering*, 10(1) 83-97.
- [HAY, 2017] Hay, L., Duffy, A. H. B., Whitfield, R. I. 2017. The S-Cycle Performance Matrix: Supporting Comprehensive Sustainability Performance Evaluation of Technical Systems. *Systems Engineering*, 20(1) 45-70.
- [HIP, 2005] Hipel, K. W., Obeidi, A. 2005. Trade versus the Environment: Strategic Settlement from a Systems Engineering Perspective, *Systems Engineering*, 8(3) 211-233.
- [HON, 2018] Honour, E-C. 2018. A historical perspective on systems engineering. *Systems Engineering*, 21(3) 148-151.
- [HUR, 2024] Huriez, T., Boël, É 2024. *La permaindustrie : Comment le développement d'écosystèmes inspirés de la nature est en train de changer le monde*. Paris (FR), Eyrolles.
- [INC, 2023] INCOSE 2023. SEBoK: *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, version 5.0*. Hoboken (NJ), INCOSE.
- [ISO, 2015] ISO [International Organization for Standardization] 2015. ISO/IEC/IEEE 15288:2015 – *Systems and software engineering – System life cycle processes*. Geneva (CH), ISO.
- [KEA, 2024] Keating C. B. et al. 2024. Sustainability: A Complex System Governance Perspective. *Insight,s* 27(1), 8-17.
- [KOU, 2008] Kouloura, T.C., Genikomsakis, K.N., Protopapas, A.L. 2008. Energy Management in Buildings: A Systems Approach. *Systems Engineering*, 11(3) 263-275.
- [KOZ, 2023] Kozak, L., Bonjour, E., Mayer, F., Micaëlli, J-P. 2023. Challenges in Developing a Method to Support the Adoption of a Model-Based Systems Engineering Methodology. *Insight*, 26(4) 15–17.
- [KRO, 2024] Krob, D., Roques, A. 2024. On reference architectures. *Systems Engineering*, 27(6) 1027-1042.
- [LEB, 2023] Le Bas, C. 2023. *The Economics of Frugal Innovation: Technological Change for Inclusion and Sustainability*. Cheltenham (UK), Edward Elgar.
- [LEM, 2014] Le Masson, P., Weil, B., Hatchuel, A. 2014. *Théorie, méthodes et organisations de la conception*. Paris (FR), Presses Mines.
- [LEV, 199] Levy, J. K., Hipel, K. W., Keith W, Kilgour, D. M. 1999. Systems for Sustainable Development: Challenges and Opportunities. *Systems Engineering*, 1(1) 31-43.
- [LUZ, 2014] Luzeaux, D. 2014. *A formal foundation of systems engineering. Complex Systems Design & Management (CSD&M) conference*. Paris (FR) 15 p.

- [MAR, 1998] Mar, B. W. 1998, System Requirements for Water Resource Systems. *Systems Engineering*, 1(1) 31-43.
- [MAY, 2010] Maya, B. M. et al. 2010. Using systems engineering to create a framework for evaluating industrial symbiosis options. *Systems Engineering*, 13(2) 149-160.
- [MEA, 2017] Meadows, D., Meadows, D., Randers, J. 2017. *Les limites à la croissance (dans un monde fini) : le rapport Meadows, 30 ans après*. Paris (FR), L'écopoche.
- [MEI, 1998] Meinadier, J-P. 1998. *Ingénierie et intégration des systèmes*. Paris (FR), Hermès.
- [MIC, 2013] Micaëlli, J-P., Deniaud, S., Bonjour, É., Loise, D. 2013. How to implement abstract design paradigm? The case of requirements engineering. *International Journal of Product Development*, 18(2) 451–471.
- [MID, 2021] Midgley, W. J. B., Henshaw, M. J., Alshuhri, S. 2021. A systems-engineering approach to nation-scale problems: Municipal solid waste management in Saudi Arabia. *Systems Engineering*, 24(6) 480–496.
- [OLE, 2020] Olechowski, A. L., Eppinger, S. D., Eppinger, N., Tomaschek, K. 2020. Technology readiness levels: Shortcomings and improvement opportunities. *Systems Engineering*, 23(4) 395-408.
- [OMG, 2017] OMG 2017. *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™) -Version 1.0*. OMG, November.
- [PAV, 2015] Pavlak, A. 2015. Inexpensive, Clean, Reliable Energy Will Require Engineered Systems. *Systems Engineering*, 18(3) 241-252.
- [PET, 2024] Petit, V. 2024. « Technologie du milieu versus ingénierie de l'environnement ». In : Triclot, M. (Dir.), *Prendre soin des milieux : Manuel de conception technologique*. Paris (FR), Editions Matériologiques 79-116.
- [POL, 2023] Polojärvi, D., Palmer, E., Dunford, C. 2023. A systematic literature review of sociotechnical systems in systems engineering. *Systems Engineering* 26(4) 482–504.
- [RAD, 2013] Radjou, N., Prabhu, J., Ahuja, S. 2013. *L'Innovation Jugaad : redevenons ingénieux !*, Paris (FR), Les Éditions Diateino.
- [ROSS, 1977] Ross, D-T. 1977. Structured Analysis: a Language for Communicating Ideas. *IEEE Transaction on Software Engineering*, 3(1) 15-34.
- [ROW, 1991] Rowe, P G. 1991. *Design Thinking*. Cambridge (MA), MIT Press.
- [SCH, 1996] Schmid, A-F. 1996. *L'Age de l'épistémologie*. Paris (FR), Quae.
- [SID, 2016] Sidiqqi, A. et al. 2016. Formulating Expectations for Future Water Availability through Infrastructure Development Decisions in Arid Regions. *Systems Engineering*, 19(2) 101-110.
- [SIM, 1997] Simon, H. A. 1997. *The Sciences of the Artificial*, Cambridge (MA), MIT Press.
- [SOP, 2010] Sopha, B. M., Magerholm Fet, A., Keitsch, M. M., Haskins, C. 2010. Using Systems Engineering to Create a Framework for Evaluating Industrial Symbiosis Options. *Systems Engineering*, 13(10) 149-160.
- [SOS, 2003] Sosa, M. E., Eppinger, S. D., Rowles, C. M. 2003. Identifying Modular and Integrative Systems and Their Impact on Design Team Interactions. *Transactions of the ASME*, 125(2003) 240-252.
- [STE, 2024] Stechemesser, A. et al. 2024). Climate policies that achieved major emission reductions: Global evidence from two decades, *Science*, 385(6711) 884-892.
- [STE, 2023] Stern, J. L., Siddiqi, A., Grogan, P. T. 2023. Effects of individual strategies for resource access on collaboratively maintained irrigation infrastructure. *Systems Engineering*, 26(6) 874–890.

[SUP, 2023] Supran, G., Rahmstorf, R., Oreskes, N. 2023. Assessing ExxonMobil's global warming projections. *Science*, 379(6628), DOI: 10.1126/science.abk0063.

[SVE, 2012] Svetinovic, D 2012. Strategic Requirements Engineering for Complex Sustainable Systems. *Systems Engineering*, 16(2) 165-174.

[THE, 2022] The Shift Project 2022. *Climat, Crises : le plan de transformation de l'économie française*. Paris (FR), Odile Jacob.

[PRI, 2024] Triclot, M. 2024. « » Milieu », portrait d'une notion ». In : Triclot, M. (Dir.), *Prendre soin des milieux : Manuel de conception technologique*. Paris (FR), Éditions Matériologiques 41-77.

[UE, 2023] UE [Union européenne] 2023. *Document 2023/2772, Règlement délégué (UE) de la Commission du 31 juillet 2023*. Bruxelles (B).

[VEL, 2022] Veltz, P. 2022. *Bifurcations : Réinventer la société industrielle par l'écologie ?*, La Tour d'Aigue (FR), Les éditions de l'aube.