Pourquoi et comment développer des technologies génériques au CEA – apports d'une approche par les théories et méthodes de la conception contemporaines

N Popiolek, Sophie Hooge, Olga Kokshagina, Pascal Le Masson, Kevin Levillain, Benoit Weil, Vincent Fabreguettes

▶ **To cite this version:**

N Popiolek, Sophie Hooge, Olga Kokshagina, Pascal Le Masson, Kevin Levillain, et al.. Pourquoi et comment développer des technologies génériques au CEA – apports d'une approche par les théories et méthodes de la conception contemporaines. Lettre de l'I-Tese, 2014. hal-01485013

HAL Id: hal-01485013

https://minesparis-psl.hal.science/hal-01485013

Submitted on 8 Mar 2017

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.

Pourquoi et comment développer des technologies génériquesau CEA – apports d'une approche par les théories et méthodes de la conception contemporaines

N. Popiolek[(1)],S. Hooge[(2)], O. Kokshagina[(2)], P. Le Masson[(2)], K. Levillain[(2)], B. Weil[(2)], V. Fabreguettes[(3)]

1) Institut de technico-économie des systèmes énergétiques, CEA, Saclay
2) Centre de Recherche en Gestion Scientifique, Mines ParisTech,
3) Direction de l'innovation, DIR Cadarache, CEA

11/02/2014

Cet article est le fruit d'une réflexion menée par le Centre en Gestion Scientifique de l'Ecole des Mines et le CEA (I-tésé, Direction de l'innovation de Cadarache) dans le cadre d'un projet financé par le Conseil Français de l'Energie. Le projet n'étant pas terminé, d'autres résultats sont attendus et feront vraisemblablement l'objet d'une suite dans une prochaine Lettre.

Sources :

Kokshagina O (2014) *Risk Management in Double Unknown: Theory, Model and Organization for the Design of Generic Technologies*. MINES ParisTech, Paris

Le Masson P, Kokshagina O, Weil B, Hatchuel (2014) Combining C-K theory and Matroids: a computational approach of the design of generic technology. In: Gero JS (ed) *Design Computing and Cognition*, London, 2014.

Kokshagina O, Le Masson P, Weil B (2013) How design theories enable the design of generic technologies: notion of generic concepts and Genericity building operators Paper presented at the *International Conference on Engineering Design, ICED'13*, Séoul, Korea,

Le Masson P, Weil B, Kokshagina O (2013) A new perspective for risk management: a study of the design of generic technology with a matroid model in C-K theory. In: Taura T, Nagai Y (eds) *Nara Workshop*, Nara, Japan, 2013. p 15

Hooge S, Kokshagina O, Le Masson P, Levillain K, Weil B, Fabreguette V, Popiolek N (2014) Designing generic technologies in Energy Research: learning from two CEA technologies for double unknown management. Paper presented at the *European Academy of Management*, Valencia,

Pour apporter des éléments de réponse à la question, « *Pourquoi le CEA a-t-il intérêt à développer des technologies génériques et de quelle façon?* », nous commençons par nous entendre sur le terme de technologies génériques puis nous situerons les cas de figure où leur conception est particulièrement justifiée. Nous montrerons ensuite que les modèles d'aide à la décision classiques en incertitude, comme les modèles à options réelles, sont insuffisants en général, pour évaluerla valeur économique de la R&D en faveur des technologies génériques et qu'il est plus judicieux dans ce cas, de se référer à la théorie de la conception innovante.

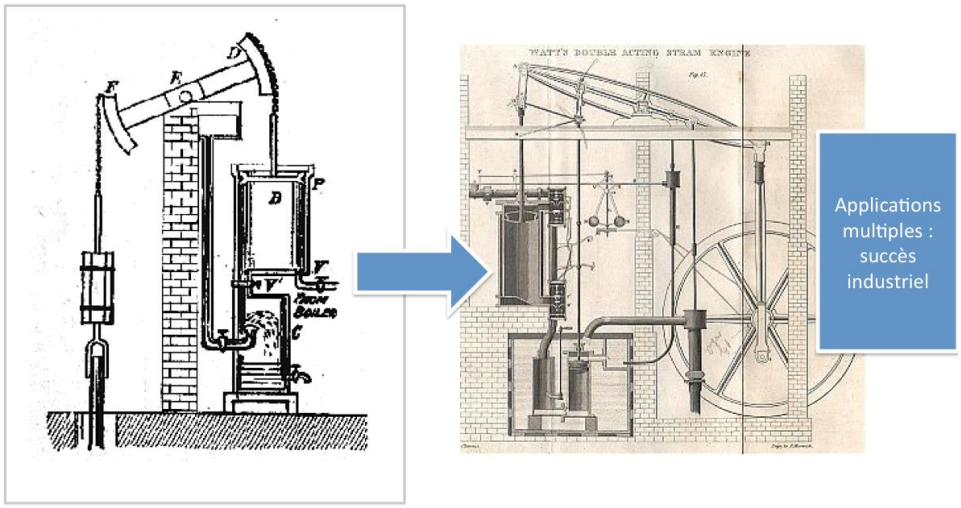
Utile pour *évaluer*la valeur économique de la recherche sur les technologies génériques, la conception innovante est aussi un outil pour aider les chercheurs à *concevoir* les technologies génériques. C'est ce que nous allons montrer rétrospectivement en nous basant sur des études de cas menées au CEA. Nous soulignerons qu'une des clés de succès de ce type de programme, est la

façon dont la recherche est organisée. Nous conclurons en tâchant de donner, à la veille de la grande transition qui est appelée avec force par les pouvoirs publics, des recommandations pour la recherche dans le champ énergétique, une des missions phares du CEA.

Technologie générique : qu'est-ce que c'est ?

Une technologie générique est une technologie qui s'adapte, moyennant des ajustements mineurs et peu coûteux à une multitude de marchés. Autrement dit, est générique une technologie qui a de nombreuses applications, i.e., si l'on utilise le langage fonctionnel, qui répond à plusieurs fonctions. Dans l'histoire, on peut citer comme exemple à la fin du XVIII^{ème} siècle, la machine à vapeur de Watt & Bouton qui, parce que son axe était horizontal (et non plus vertical) pouvait être utilisée indifféremment dans les mines à charbon, les usines textiles ou les fonderies.On notera que ce qui fait généricité n'est pas toujours évident : pendant longtemps on a considéré que les machines à vapeur étaient des pompes à eau et il a fallu un effort de conception particulier pour rendre la machine à vapeur compatible avec des applications plus variées. C'est l'invention d'une machine « double acting », permettant de transformer le mouvement linéaire alternatif en un mouvement rotatif (voir articles historiques et synthèse in Kokshagina et al. 2013) ..

Figure n°1 :De la « pompe à eau » à la machine à vapeur générique – l'invention de la machine à vapeur « double acting »



Machine de Watt 1770s Machine de Watt 1780s

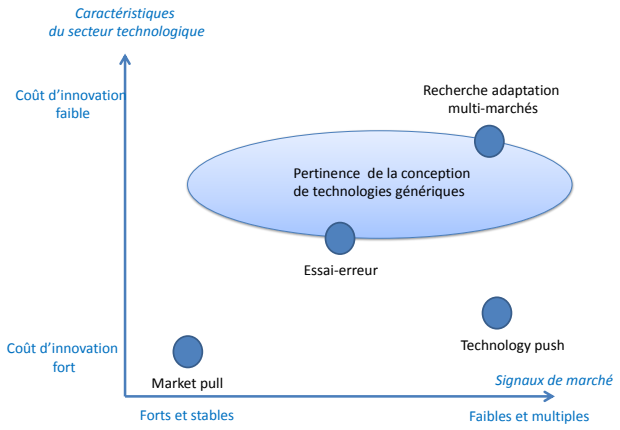
Les technologies devant découler de la toute première inventionpar adaptations mineures, n'ont pas nécessairement besoin d'être connues et décrites à l'origine pour créer de la valeur économique.

Stratégie de recherche dans un univers à double inconnu

Quand une stratégie de conception de technologie générique est-elle pertinente ? Lorsque marchés et technologies à venir ne sont pas identifiés *a priori*, l'univers est qualifié d'**univers à double inconnu**et, en général, un tel contexte justifie larecherche de généricité. A noter que, si au contraire le marché est ciblé ou bien la technologie maîtrisée, il peut être plus judicieuxde faire appel aux stratégies classiquesde « market pull » (recherche pharmaceutique pour traiter une maladie répandue ou mettre au point un vaccin attendu par la population) ou de « technology push » (diffusion sur un marché *a priori* non soupçonné de la téléphonie mobile).

Les travaux de Kokshagina et al. (2011, 2013,…) ont permis de montrer, plus précisément, quels étaient les environnements technico-économiques dans lesquels développer une technologie générique était pertinent. Deux critères apparaissent déterminants : 1) la précision (resp. le niveau d'inconnu) des signaux des marchés ; et 2) le caractère plus ou moins aggrégatif des univers technologiques – ie : l'ajout d'une technologie nouvelle facilite (resp. renchérit) l'ajout d'autres technologies nouvelles (Par exemple un chipset incorporant une nouvelle technologie de réception radio-fréquence pourra plus facilement intégrer par la suite des technologies de traitement du signal radio). Sur la figure n°2 ci-dessous, le domaine où la stratégie de recherche de généricité se justifie tout particulièrement est situé sur la partie supérieure droite, domaine dans lequel les marchés sont incertains et les technologies agrégatives.

Figure n°2 : Positionnement des stratégies de conception en fonction du degré d'incertitude marché et du coût de l'innovation



La question de l'évaluation de la recherche : la théorie des options réelles

Pour estimer la valeur de la R&D de type « technology push », il suffit de considérer différents états du monde plus ou moins favorables quant à la demande (ou la compétitivité) du produit innovant sur le marché et d'affecter à chacun d'eux une probabilité de réalisation. Un calcul en espérance donne le retour sur l'investissement de la recherche.

Si on fait l'analogie entre « coût de la recherche » et « coût de l'erreur vestimentaire », le promeneur calcule, en fonction de la probabilité qu'il pleuve[1], s'il a intérêt à prendre une casquette ou un parapluie pour sortir.

On peut perfectionner le modèle pourvu que l'on ait à choisir entre plusieurs programmes de R&D, plus ou moins flexibles (ex : investir la totalité de son budget de R&D aujourd'hui ou bien échelonner la dépense dans le temps) et que l'on fasse l'hypothèse que l'information est croissante, i.e. que comme le dit Claude Henry, « *on en saura plus demain sur après-demain que ce que l'on sait aujourd'hui* ». Avec un arbre comportant des nœuds de décision au moment de l'arrivée

[1] opposée à celle qu'il y ait du soleil

d'information, la **théorie des options réelles** aide à évaluer les programmes de recherche et à les classer en fonction de leur rentabilité (séquentielle) espérée[2].

Si le promeneur a la possibilité d'acheter un journal pour s'inquiéter de la prévision météo dont la fiabilité est supposée maximale dans cet exemple simple, il va arbitrer entre le prix du journal et la valeur de l'information recueillie, lui indiquant une marche à suivre sans regret : parapluie et pluie, casquette et soleil. La valeur de l'information est estimée grâce à la théorie des options réelles et comparée au prix du journal en kiosque.

Limite de la théorie des options réelles en situation de double inconnu

D'une grande utilité pour les cas à incertitude simple (« technology push » mais aussi « market pull »[3]), les modèles à options réelles deviennent non-opératoires si l'incertitude pèse à la fois sur le marché et la technologie : toutes les alternatives ont une espérance d'utilité très faible et très proche. Pour autant le cadre formel décisionnel demeure intéressant car il conduit à énoncer de nouvelles « alternatives », qui ne sont complètement conçues mais pourraient, si elles étaient conçues, avoir une espérance d'utilité très favorable : il aide à préciser ce que serait une technologie gagnante. En particulier, le cadre décisionnel conduit à montrer qu'une alternative intéressante serait une technologie valable dans plusieurs états de la nature, donc une technologie générique (voir Le Masson et al. 2013).

Pour reprendre l'analogie avec le promeneur et en supposant qu'il n'ait aucun moyen de prévoir la météo, il conviendrait d'imaginer une combinaison (agrégation) entre la fonction remplie par le parapluie et celle remplie par la casquette. La technologie « parapluie-casquette » n'existe pas (elle est inconnue), mais par l'agréation de deux fonctions, elle serait **indépendante des conditions de la météo**, i.e., elle serait **générique**.

Ainsi, la valeur de la R&D consistant à mettre au point des technologies génériques ne se mesure pas comme le produit d'un marché ciblé[4]par sa probabilité d'occurrence. Le pari est plutôt de dire que les chances de son succès sur un marché ciblé sont très faibles mais dans la mesure où elle touche potentiellement une multitude de marchés, la probabilité qu'il y en ait au moins un favorable devient très grande et la recherche est rentable[5].

L'apport de la théorie de la conception innovante (théorie C-K)

[2] Cf. les travaux d'I-tésé sur l'estimation par les options réelles de la valeur économique de la R&D en faveur d'ASTRID : "Economic value of R&D in the field of fast reactors taking into account uncertainty on their competitiveness", N. Taverdet-Popiolek &B. Shoai Tehrani, CAHIERS DU CREDEN 13-09-101, 9 septembre 2013, 48 pageset « Une analyse économique de la valeur de la R&D dans le domaine des réacteurs rapides : analyse simplifiée et modélisation sous l'hypothèse d'une augmentation à terme du prix de l'uranium naturel », N. Taverdet-Popiolek & Gilles Mathonnière, REVUE DE L'ENERGIE N°595, mai-juin 2010, pp. 179-191. Dans le cas d'ASTRID, l'univers n'est pas en double inconnu et, dans la mesure où l'information sur les états du monde est croissante, l'application de la théorie des options réelles est tout à fait justifiée.

[3] « market pull » si c'est la technologie qui est incertaine.

[4]ou d'une technologie visée

[5] Techniquement, c'est toujours une espérances d'utilité, mais sur une technologie qui a une utilité intéressante dans de nombreux états de la nature (et non pas dans un seul, comme dans le cas d'un marché ciblé)

Peut-on aider à concevoir des technologies génériques ? Faute de cadre théorique, on a souvent fait l'hypothèse que les technologies génériques étaient le résultat aléatoire de processus de sélection évolutionnistes. Les théories de la conception contemporaine ont atteint un niveau de formalisme permettant de discuter et de dépasser cette hypothèse. En effet, les théories de la conception, et notamment la théorie C-K que nous avons mobilisée dans le cadre de ce travail, sont suffisamment générales pour ne plus porter seulement sur la conception d'un objet mais sur la conception de configurations d'ensembles de technologies interdépendantes.

La théorie CK (pour concept-knowledge ou concept/connaissance) est une théorie de la créativité qui est née à l'Ecole des Mines, au Centre de Gestion Scientifique, sous l'impulsion notamment d'Armand Hatchuel et de Benoît Weil[6].

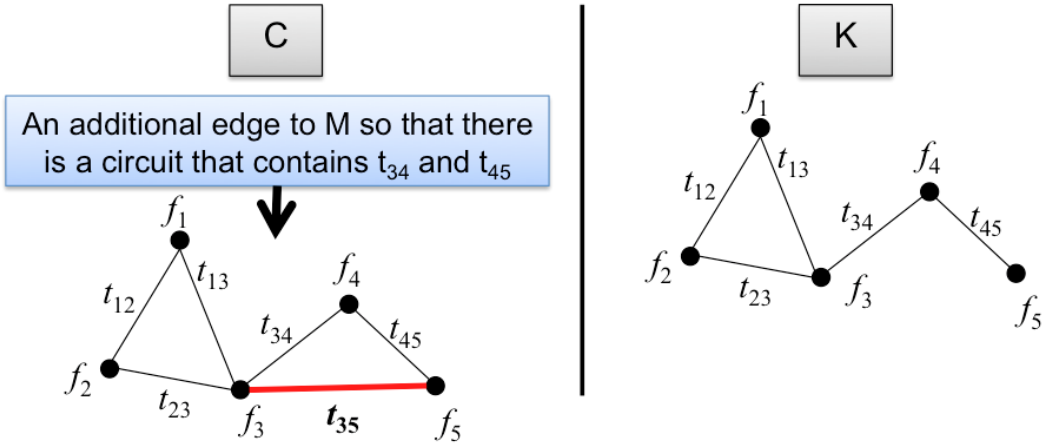
Son apport dans la recherche de technologies génériques est double :

- D'une part, on a vu qu'en utilisant la théorie de la décision dans les cas de double inconnu, on pouvait formuler des propositions d'« alternatives » qui ne sont pas des décisions mais qui sont plutôt des points de départ pour concevoir (cf. « parapluie-casquette »). La théorie C-K permet précisément de modéliser les raisonnements à conduire sur ce type de proposition. Elle indique que ces propositions requièrent une double expansion : création de connaissances nouvelles et révision de l'espace des alternatives.

- D'autre part, en utilisant la théorie C-K avec, dans l'espace K, un modèle de connaissances sur les structures d'indépendance (matroïde), il a été possible de mettre en évidence des logiques de conception de nouvelles indépendances et de nouvelles interdépendances dans des configurations de technologies. En particulier on peut modéliser la façon dont une nouvelle technologie va permettre de mettre en relation des technologies déjà existantes pour atteindre des applications variées (création de nouvelles interdépendances pour gagner en généricité). On peut ainsi expliciter des modèles de conception de technologies génériques, une des conclusions principales étant la surprenante variété et la surprenante sophistication des stratégies de conception générique.
-

Figure n°3 : Exemple de conception d'une nouvelle configuration de techniques, sans accroissement des indépendances

[6]Hatchuel, A. and Weil, B. (2009). C-K design theory: an advanced formulation. Research in Engineering Design, 19(4):181-192.



Analyse empirique au CEA de la mise au point de technologies génériques : méthodologie

Nous nous sommes concentrés sur deux portefeuilles de brevets à succès : les « fluides supercritiques »(47 brevets de 1985 à 2013) et les « joints HELICOFLEX » (40 brevets de 1969 à 2013). L'objectif était de mettre en évidence que le succès rencontré par chacune de ces technologies et le paiement élevé des royalties associées,n'étaient ni dû au hasard, ni à une stratégie de « trial and learning »,ni encore à la vision individuelle éclairée d'un entrepreneur « héroïque ». Elle était bel et bien le fruit d'une stratégie collective de recherche de généricité.

Pour les deux études de cas, la méthodologie a consisté à analyser le portefeuille de brevets et les documents associés (archives[7],communications…), puis à interroger des experts qui connaissaient l'histoire de la conception de ces technologies génériques (cf. encadré)[8].

Entretiens réalisés (Marcoule, Pierrelatte, Saclay)

Direction de la valorisation de la R&D du centre CEA de Marcoule,

- Philippe Dehaudt

Laboratoire d'étanchéité

- Cécile Ferry (CEA)
- Alain Béziat (CEA)
- Jean-François Juliaa (Technetics)

Fluides Supercritiques

- Guy Lumia (CEA)
- Frédéric Charton (CEA)
- Stéphane Sarrade (CEA &Innovation Fluides Supercritiques)

[7] Notamment C. Rouaud (1997)« Le joint HELICOFLEX : La petite histoire d'une innovation », 32 pages, CEA

[8] Pour une description détaillée de ces études de cas empiriques, cf. article des auteurs « Designing generic technologies in Energy Research: learning from two CEA technologies for double unknown management », soumis en janvier 2014 au congrès *European Academy of Management*de juin 2014.

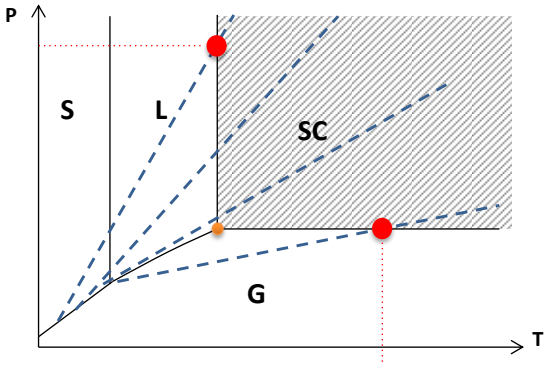
L'analyse empirique s'appuie sur les modèles issus de la théorie CK et des « matroides » évoqués ci-dessus. Elle est basé sur cœurmême du sujet de la conception de la généricité, à savoir la **conception de l'indépendance** puisqu'il faut rendre les technologies indépendantes des conditions de marché. Ainsi notre méthodologie repose sur les trois questionnements suivants :

1. Analyse des structures d'indépendance initiales : quelles relations entre technologies et marchés ?
2. Analyse de l'évolution des structures d'indépendances : quels nouveaux liens entre fonctions et quels nouveaux marchés ?
3. Analyse des organisations ayant rendu possibles ces changements : quel type de partenariat chercheurs et industriels ? quelle gouvernance ?

Les fluides supercritiques au CEA (portefeuilles de brevets avec très grande variété de classes applicatives)

Concernant les fluides supercritiques et plus particulièrement le CO_2supercritique, la construction de la généricité, qui a permis à cette technologie d'être appliquée à une multitude de marchés allant de la décontamination de sites nucléaires[9]à la cosmétique,la nutraceutique…en passant par le fameux secteur du bouchon de vin[10] alors totalement imprévisible, a coïncidé avec une recherche **d'accroissement du domaine d'application défini par le couple Température et Pression (T, P)**.Une R&D ciblée, reposant sur une description fine des processus chimiques, a permis d'accroître le domaine des connaissances (K) pour que puissent avoir lieu de nouvelles dissolutions imaginées dans (C) et nécessitant des niveaux (T,P) jusqu'alors incompatibles avec les matériaux sollicités. La figure 4 représente le domaine d'application de la technique de dissolution par CO_2 supercritique en fonction de la température T et la pression P avec identification des points durs technologiques en rouge sur les courbes d'*isomasse* du CO_2

Figure n°4 :Domaine d'application de la technique de dissolution par CO_2 supercritique



Cette recherche de généricité par accroissement du domaine d'applicabilité (T, P) a été rendue possible grâce à des partenariats entre des équipes de chercheurs du CEA et des industriels, modèle organisationnel ayant inspiré la création en 2006 del'association de loi 1901 *Innovation Fluides*

[9]dissolution des déchets contaminés dans le cadre de la construction engagée de l'usine EURODIF
[10]brevet Liège – Guy Lumia

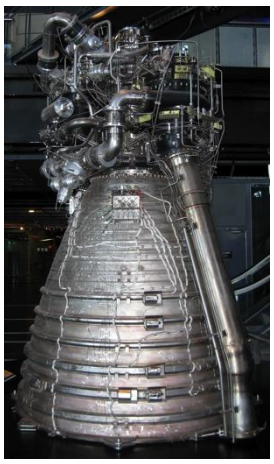
Supercritiques(IFS). IFS met en relation chercheurs et industriels afin de dissocier la recherche (augmentation du domaine) et le développement (mise au point de la dissolution) pour mieux répartir les coûts. Le *dispatching* entre recherche*lab-scale*, génératrice de publications scientifiques et les tests *pilot-scale*,valorisés par des brevets, est réalisé grâce à une prestation qui consiste à évaluerle degré d'innovation de chaque application proposée.

Les joints HELICOFLEX (portefeuilles de brevets dans une seule classe fonctionnelle)

Contrairement aux fluides supercritiques, la généricité associée aux joints HELICOFLEX était pressentie au départ du fait que le joint d'étanchéité est un élément utilisé dans de très nombreuses situations (Domaine d'application D connu, déjà très vaste).

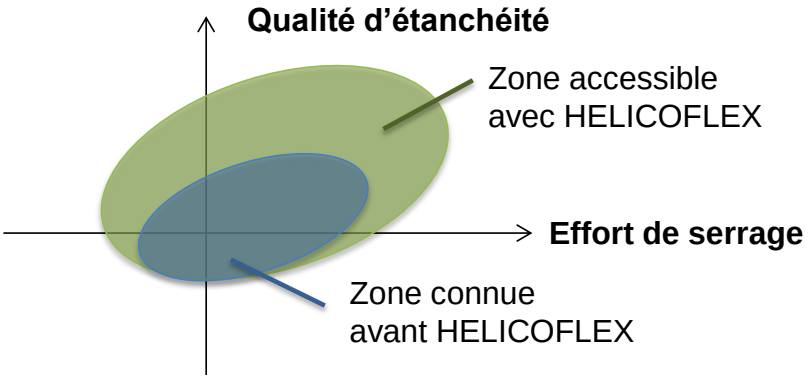
Pourtant le cahier des charges à l'origine de la recherche relevait plutôt d'une stratégie de « market pull », tirée par l'usine d'enrichissement EURODIF qui avait des exigences très fortes en termes de durée de vie, de maintenance et de résistance aux conditions extrêmes de température et de pression. De telles exigences se situaient à la frontière des abaques.

L'analyse empirique a révélé que la recherche de généricité s'est faite ici **en découplant des caractéristiques du joint alors liées : l'étanchéité et l'élasticité**. Cette séparation a desserré des contraintes (ex : gamme de température étendue) et conduit à agrandir D (voir figure n° 5) pour répondre à une plus grande variété de marché : le spatial avec le moteur cryogénique Vulcain du lanceur Ariane 5, la formule 1, l'industrie pétrolière, etc.



Moteur Vulcain au Musée des Sciences et des Techniques de la Villette à Paris

Figure n°5 : Agrandissement du domaine d'application du joint suite au découplage des caractéristiques étanchéités et élasticité



Quant à l'organisation qui a accompagné cette recherche de généricité, elle était basée sur une collaboration forte entre le CEA et Cefilac (aujourd'hui Technetics) avec exclusivité de la relation du laboratoire d'étanchéité à l'industriel, copropriété intellectuelle et contrats d'exploitation. L'objectif du partenariat était d'enrichir les abaques, d'accroître la capacité de recherche sur les points en dehors des abaques, de mobiliser des clients potentiels avec une approche technico-commerciale…La cellule de valorisation au CEA, prenant en charge la diffusion technologique a joué le rôle d'intégrateur et de financeur.

Quelles leçons dans le secteur de l'énergie en général et pour le CEA en particulier ?

Ce projet n'est pas terminé puisqu'il s'oriente à présent vers une analyse des portefeuilles de brevets« batterie » avec des interviews à mener à la Direction de la Recherche Technologique du CEA.

Dans le domaine du stockage comme dans de nombreux domaines en lien avec le secteur de l'énergie, les enjeux de la R&D sont considérables puisque les objectifs français de la transition énergétique sont très difficiles à concilier avec les connaissances actuelles : répondre à la demande électrique croissante, diminuer la part du nucléaire, tout en limitant les émissions des gaz à effet de serre, pour ne citer que trois d'entre eux. Cette équation énergétique, sociale et environnementale n'est pas plus facile à résoudre dans les autres pays d'ailleurs.

Il est nécessaire alors d'augmenter l'espace (K) des connaissances pour mettre au point des technologies indépendantes des conditions de marché car celles-ci restent très mouvantes dans le temps. Une réflexion dans l'espace (C) des concepts devrait être particulièrement utile pour imaginer des technologies rassemblant à la fois des fonctions d'usage énergétique et des fonctions relevant des Tic par exemple. La palette des technologies possibles est très vaste et incertaine.

La recherche étant fortement contrainte par la stagnation, voire la diminution des subventions d'origine publique, **le partenariat avec les industriels est un élément clépour favoriserl'évolution des structures d'indépendance** (équipements Pilot-scale, proximité des marchés…), le modèle de gouvernance restant à définir selon les cas (PI notamment). Néanmoins, il ne faudrait pas que les acteurs industriels fassent uniquement appel au CEA pour atteindre demain une application ciblée mais, en bon joueurs d'échec, anticipent aussi le coup suivant en aidant au financement de la

conception de technologies génériques pour augmenter leurs chances de succès après-demain (cf. figure n°6).

Tel est le défi. Il y a encore du chemin à parcourir mais la théorie de la conception innovante est peut-être une piste dans la bonne direction d'autant que le secteur énergétique a aujourd'hui toutes les caractéristiques d'un univers à double inconnu. Cependant, la question est de savoir si, dans ce secteur aux investissements majoritairement lourds et de durée économique longue, on trouve suffisamment de technologies à caractère agrégatif…

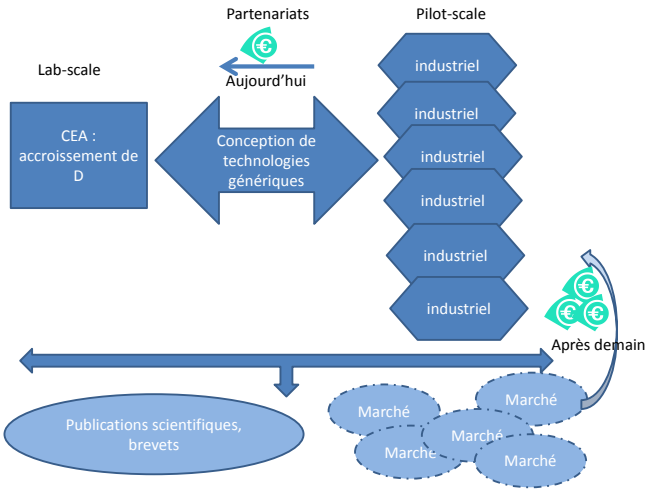



Figure n°6 : Partenariat CEA et industriels pour la conception de technologies innovantes