

La théorie C-K : Fondements et usages d'une théorie unifiée de la conception.

Armand Hatchuel, Benoît Weil
Ecole des mines de Paris
Armand.hatchuel@paris.ensmp.fr

Colloque « Sciences de la conception » (Lyon 15-16 mars 2002)

English Summary

In this paper we present the main notions and applications of a unified Design theory. This theory is based on the distinction between two expandable spaces : a space of concepts C (concepts are sets defined under « ZF without choice axiom » in Set theory), and a space of knowledge K (K is defined as CAT, the set of categories in category theory). The process of Design is defined as the co-evolution of C and K through four types of interdependant operators (C-C, C-K, K-C, K-K). In spite of its high level of abstraction C-K theory shows a large interpretative power and important practical applications :

- All usual Design theories appear as restrictions of C-K theory ; and C-K theory is the only theory that explains the different forms of creativity observed in Design within the same formal model. It allows also the operationalization of a concept of « expandable rationality » (Hatchuel 2002) that is better adapted to Design than Simon's « Bounded rationality ».

- Practically, C-K theory is a very powerful tool for : i) training people to avoid « Design illusions » (a notion generalizing the classic optical illusions) ; ii) memorizing the history of a design process ; iii) structuring and organizing group work in innovative design projects. All these applications have been validated in several companies (Renault, Avanti, Alcatel,...).

Introduction : qu'est-ce que la conception ?

1. Depuis l'Antiquité nous considérons l'activité de conception comme une activité consciente (Alexander 1964) aussi bien individuelle que collective, c'est à dire organisée. Cette activité s'est constituée au cours de l'Histoire selon plusieurs traditions différentes. On peut distinguer au moins trois traditions principales : celle des architectes ou des artistes (et designers), celle des ingénieurs et plus récemment, celle des chercheurs en sciences des organisations (organizational design). Or, les activités de conception dans les organisations contemporaines (entreprises) mobilisent ces trois traditions simultanément, alors même qu'elles diffèrent non seulement par le contenu de leurs connaissances mais aussi par leur approche du processus de conception lui-même. *Comment donc penser et organiser le processus qui les réunit ?* Cette question a pris une ampleur nouvelle dans les entreprises avec la croissance des activités de R&D qui sont étroitement liées à l'activité de conception.

2. Dans cet article, nous n'aborderons pas tous les aspects de cette question. Nous avons pu traiter certains d'entre eux dans des publications différentes (Hatchuel et al. 2001) Nous présenterons ici les éléments d'une théorie unifiée de la conception qui peut constituer une base commune à ces différentes traditions et contribuer aux mutations contemporaines des activités de conception. Des chercheurs venant de plusieurs disciplines se sont intéressés récemment aux activités de conception¹. Nous disposons aujourd'hui de meilleures descriptions empiriques et nous cernons mieux les caractéristiques pratiques et organisationnelles des activités de conception. Mais malgré la richesse de ces travaux, ils ne fournissent que des indices, des fonctionnements observés ou des histoires de cette activité. Nous ne disposons d'aucun cadre théorique permettant de donner à ces observations une véritable portée intégratrice et scientifique.

3. *Ainsi qu'appelle-t-on « conception » ?* Force est de constater que nous manquons d'une définition formelle et claire de cette notion qui ne soit ni une illustration pratique (concevoir un pont), ni l'évocation d'un métier (architecte, ingénieur, designer...). Notre démarche est donc analogue à celle qui a conduit de façon similaire à unifier une théorie de « la Décision » après la seconde guerre mondiale. Cela a permis de comprendre les principes communs sous-jacents aux différentes disciplines de la décision (économie, statistiques, théorie politique...). Cependant, pour atteindre un tel objectif, une théorie de la conception doit répondre à de nombreux critères : elle doit avoir des fondements rigoureux et d'une grande généralité ; elle doit être capable de rendre compte des « surprises » caractéristiques du raisonnement de conception ; elle doit être aisément articulable à une théorie de la production des connaissances. Une telle théorie permettrait de mieux comprendre les spécificités de chaque tradition et de situer chacune d'entre elles dans un même cadre général. Dans cet article, nous présentons un ensemble de notions qui, selon nous, fondent une telle théorie de la conception et nous en discuterons les enjeux théoriques et pratiques.

4. **La contribution inachevée d'Herbert Simon :** Dans la littérature, peu d'auteurs ont entrepris de construire la notion de « conception » sur des bases claires et universelles. Parmi ceux-ci, la contribution d'Herbert Simon occupe une place particulièrement importante, quoique selon nous, elle demeure inachevée :

¹ Cf . notamment le programme du GIS conception et cognition du CNRS.

- Simon est le premier à affirmer l'existence, dès les années 1960, qu'une science de la conception est possible. Sur cette voie, il mobilise la plupart des outils issus de la théorie de la décision (decision-making theory) en situation de rationalité limitée (bounded rationality), y compris les approches issues de l'intelligence artificielle.

- Mais, Simon tend aussi à restreindre la spécificité d'une théorie de la conception en affirmant qu'elle sera proche d'une théorie de la résolution de problèmes. « *When we study the process of design we discover that design is problem solving. If you have a basic theory of problem solving then you are well on your way to a theory of Design* ». (Simon 1995).

Nous avons discuté cette position ailleurs (Hatchuel 2002)). Pour nous, elle restait trop attachée au paradigme de la décision et était peu adaptée à des situations de conception mêmes assez simples. En revanche, l'approche de Simon, dont le formalisme relève de l'approche par séparation et évaluation, constitue un cadre théorique de référence, certes inachevé, mais que nous aurons à généraliser, étendre et adapter à la conception, pour construire notre propre approche.

5. Cet article comporte quatre parties : I) une présentation de notre programme de recherche ; II) Une introduction à la notion de « partition expansive » ; III) Une introduction à la distinction entre « concepts » et « connaissances » qui sont à la base de la théorie C-K présentée ici ; IV) Nous discuterons ensuite son pouvoir interprétatif et ses applications actuelles et futures.

I. LE PROGRAMME DE RECHERCHE : UNE THEORIE FONDAMENTALE DU RAISONNEMENT DE CONCEPTION

Avant de présenter les notions de base de notre approche, nous rappellerons quelques traits théoriques constitutifs des grandes traditions de la conception. Nous insisterons ici sur les traditions de l'architecte, de l'artiste, et de l'ingénieur². Chacune délivre des enseignements et souligne des aspects de la conception qu'une théorie universelle doit expliquer.

1. La tradition Architecturale et Artistique : raisonnements, connaissances, expansions.

Historiquement, il s'agit de la tradition originelle de la conception. Elle est si vaste que nous ne retiendrons que quelques points de repère essentiels à notre programme de recherche.

1.a. L'héritage de Vitruve :

Dans, les « Dix livres d'architecture » de Vitruve, les chapitre I et II du livre premier³, constituent semble-t-il le plus ancien texte théorique connu sur le sujet. L'activité de la

² Nous ne traiterons pas dans cet article de la tradition des sciences de l'organisation, car elle est multiple, spécifique et suffisamment distincte des deux autres pour justifier un traitement particulier dans un autre article.

³ Chapitre I : *De architectis instituendis, de l'éducation des architectes* ; Chapitre II : *ex quibus rebus architectura contest, En quoi consiste l'architecture Vitruve (1919). De l'architecture. Paris, Les Belles Lettres..*

conception y est définie comme une théorie et une pratique. La théorie doit « *expliquer la convenance des proportions* » à l'aide d'une « *démonstration que l'on donne par le raisonnement soutenu de la science* ». De quelle Science parle Vitruve ? La « Science » de l'architecte, nous dit-il, doit être « *enrichie de la connaissance de tant de diverses choses qu'il n'y a pas d'apparence de croire qu'un homme puisse devenir bientôt architecte, qu'il n'ait commencé des son enfance* ». Mais heureusement, « *s'il est nécessaire que l'architecte s'occupe de toute ces choses* », celui-ci peut affirmer « *qu'il est raisonnable de croire qu'une médiocre connaissance de chacune lui suffit* ». Quels enseignements retenir de Vitruve ?

- **Distinguer raisonnement et connaissances** : Ainsi Vitruve distingue-t-il un raisonnement et un ensemble de connaissances nécessaires. Ce point est essentiel : cette distinction ne signifie pas l'indépendance de ces deux aspects. Bien au contraire : l'espace des connaissances utiles à l'architecte étant sans limites, le raisonnement de conception est ce qui lui permet de dégager la matière même de son travail, à partir des connaissances auquel il a accès,. Ces présupposés ont chez Vitruve une valeur universelle, ils caractérisent l'essence du travail de l'Architecte. On pourrait oublier que l'architecte a d'abord vocation à réaliser des édifices et des ouvrages d'art. Vitruve évidemment ne néglige pas les objets spécifiques de son travail.

- **L'espace des « fonctions »** : il aborde les grands objets de l'architecture au chapitre II du livre 1, avec un autre ensemble de considérations remarquables. Cette fois, il décrit l'architecture, ni par le raisonnement ou les connaissances, mais par les propriétés de l'objet dont l'Architecte doit se préoccuper. On connaît les grands critères vitruviens : « l'ordonnance, la disposition, l'eurythmie, la proportion, la convenance, et la distribution ou économie ». Vitruve s'inspire de la conception des bâtiments pour énoncer ce que nous appellerions, en langage contemporain les six grandes « fonctions » attendues de l'objet. Ainsi Vitruve distingue-t-il la part universelle du raisonnement de conception et la part plus spécifique à l'objet concerné.

1.b La posture de l'Art : Expansion et construction des mondes

La tradition artistique entretient des rapports plus complexes avec la notion de conception. L'Artiste du moyen-âge ou de la Renaissance voulait imiter la nature ou retrouver la tradition Antique. L'Artiste romantique, puis les mouvements modernistes, adopteront une vision plus libre de l'œuvre d'Art. Comme l'architecte, l'artiste revendique la paternité de sa création. Mais contrairement à l'Architecte, il ne subordonne pas son travail à la réalisation de fonctions pré-définies. Il ne le voit pas non plus comme la résolution de problèmes anciens et bien répertoriés. L'artiste revendique le caractère unique de son travail et de son intention. Pour cette même raison, il considère que le destin de son œuvre dépend uniquement du jugement d'autrui. Chaque artiste se veut un créateur de « mondes nouveaux » et sait que ces « mondes » peuvent être perçus de manière unique par chaque « regardeur » (Duchamp 1999). La tradition artistique nous offre donc *une vision extrême de la conception* : un acte créateur de mondes, tous uniques, et qui sont d'autant plus riches qu'ils sont perçus ainsi par les personnes qui les reçoivent. Le philosophe Nelson Goodman a cherché à formuler avec précision cette approche : « *la manière dont un objet ou un événement fonctionne comme œuvre (d'Art) explique la manière dont à travers certains modes de référence, ce qui ainsi fonctionne peut contribuer à une vision – et à la construction d'un monde* » (Goodman 1978). Que retenir pour notre projet de cette tradition ?

- **Une logique « d' expansion ».** La tradition artistique de la conception est une épreuve pour le théoricien de la conception. Elle est un défi et une limite à son travail. Une théorie universelle de la conception doit pouvoir rendre compte de l'émergence de l'unique, de l'inattendu. Nous appelons «**capacité d'expansion**» cette aptitude du processus de conception à générer du « nouveau ». Cette notion jouera un rôle central dans notre approche.

- **Le rôle « concepteur » de la réception.** Le résultat d'un travail de conception ne peut prétendre être achevé : il est le point de départ d'un travail de conception différent celui qu'accomplit le spectateur. *On peut dire que le spectateur se voit proposer de poursuivre la logique d'expansion de l'artiste avec ses propres moyens.* Une théorie de la conception doit donc être inévitablement reliée à une théorie de la réception.

Ces deux logiques appartenaient déjà à la tradition architecturale. Mais elles ne sont pas aussi importantes que dans la tradition artistique. A l'inverse, la tradition artistique ne rejette pas le raisonnement et les connaissances : elle ne s'interdit pas une logique fonctionnelle. Simplement, ils n'ont pas dans la tradition artistique un rôle central et spécifique. On peut être un artiste reconnu sans avoir à défendre de tels éléments dans son travail. En revanche, l'artiste prétend nécessairement occuper une place inédite et sans équivalent : *il fait de la logique d'expansion une condition sine qua non de son travail.*

2. La tradition des ingénieurs : une logique d'expansion fondée sur la connaissance et l'expérimentation .

La tradition des ingénieurs est postérieure de beaucoup à celle de l'Architecte. L'identité des ingénieurs s'est d'ailleurs progressivement construite par différenciation vis à vis de l'Architecte (Picon 1988). Elle se mêle à la tradition artistique pendant la Renaissance, mais elle n'aura ensuite que peu de liens avec la tradition moderne de l'artiste. Car, les Ingénieurs se définissent d'abord par un rapport inédit aux connaissances.

- **La découverte : l'expansion des connaissances scientifiques et techniques.** C'est dans le développement des connaissances que les ingénieurs voient une logique d'expansion différente de celle de l'Architecte et de l'Artiste. Ils seront confortés dans cette orientation par la fécondité des découvertes et des démarches scientifiques qu'ils adopteront très vite au point d'en faire un aspect central de leur métier notamment par différence avec l'Architecte. L'expansion des connaissances scientifiques peut être obtenue aussi bien par l'observation, l'expérience, le calcul ou « la modélisation ». Ces démarches seront donc adoptées par les ingénieurs, qui auront tendance à les assimiler à des méthodes de conception (Reuleaux et al. 1854).

- **Systématique et abstraction des raisonnements de conception.** Mais y a-t-il un raisonnement de conception spécifique à l'ingénieur, et différent de celui que Vitruve prête à l'architecte ? Les pratiques de l'Ingénieur recoupent souvent celles de l'Architecte. Ainsi l'ingénieur adoptera une partie des « fonctions » Vitruviennes pour la conception des machines ou des instruments. Mais la variété des machines et des systèmes dont il s'occupe deviendra infiniment plus variée que celle de l'architecte, encore spécialisé aujourd'hui dans le domaine des édifices de l'espace public. Les raisonnements de conception de l'ingénieur doivent donc s'adapter à des objets très différents. Il n'est pas possible de retracer ici l'histoire de la conception

chez les ingénieurs. Mais il est certain que la variété des machines ainsi que la nécessité d'une pratique de la conception collective due à l'expansion des connaissances, les placent dans une situation paradoxale.

- La pratique collective impose aux ingénieurs une **systematisation** du raisonnement de conception : définition d'étapes et d'épreuves de contrôle des appareils élaborés. D'où la naissance d'un langage spécifique de **la validation** : essais, prototypes, tests, ...
- Ce langage doit rester suffisamment **abstrait et universel** pour s'adapter à toutes les industries et toutes les techniques.

C'est la tradition du MaschinenBau allemand autour de Lergenthaler vers 1848, et de Franz Reulleaux (vers 1880) qui a fourni les raisonnements dominants dans le monde des ingénieurs. Pahl et Beitz (Pahl et al. 1977) ont fait la synthèse de ces raisonnements dans un ouvrage qui sert souvent de manuel obligé à beaucoup d'étudiants dans le monde.

- **La systématique allemande : une proto-théorie** Par son effort d'abstraction, la systématique allemande, peut être vue comme une proto-théorie de la conception. Elle se caractérise par la décomposition de tout raisonnement de conception en trois étapes principales : une étape d'identification des fonctions ; une étape de choix des modèles conceptuels (de type scientifique) ; une étape « d'embodiment » c'est à dire de déploiement physique du système. L'idéal consisterait à mener à bien chacune de ces étapes en s'affranchissant le plus possible de la suivante. Cela permet de protéger la liberté d'action à chaque niveau. On peut trouver beaucoup de variantes à cette approche mais elle conserve toutes la même logique. On peut trouver chez Nam Suh (Suh 1990), une autre systématization du raisonnement de conception, mais il s'agit en fait d'une optique très différente, car cette auteur ne cherche pas à proposer une théorie du processus temporel de la conception. Suh propose les axiomes d'une « bonne conception ». *Il s'agit donc d'une démarche évaluative qui introduit des règles fonctionnelles nouvelles inspirées de l'automatique et des théories de la commande des systèmes.*

- **Application ou Invention ? Les paradoxes de l'expansion chez les ingénieurs.** La tradition des ingénieurs est inséparable de l'idée *d'invention, de perfectionnement ou d'innovation*. Elle rejoint sur ce point la tradition d'expansion des mondes de l'Artiste. Mais l'ingénieur ne s'impose pas d'inventer à chacune de ses réalisations. Il conserve la mémoire des « expansions » passées qui peuvent être réutilisées aujourd'hui. Ce qui hier a « marché » est une ressource pour demain. L'ingénieur peut donc selon son talent ou les nécessités du moment reprendre les solutions passées, les adapter, ou encore s'efforcer de renouveler complètement ce qui a été proposé avant lui. Il s'exposera alors au risque de l'échec technique ou comme l'artiste au risque de voir refuser sa proposition. La place qu'occupe l'invention dans la tradition des ingénieurs est donc un défi pour la théorie de la conception : *l'ingénieur doit pouvoir penser en même temps l'innovation et l'imitation du passé*. Il doit pouvoir les comparer. Il ne peut comme l'artiste valoriser à tout prix l'originalité. Celle-ci n'est pas une valeur en soi parce qu'il accepte la logique des fonctions ou celle des buts affichés.

3. Que doit-on attendre d'une théorie de la conception ? le rôle central du concept « d'expansion ».

Ce bref parcours de grandes traditions permet de préciser les objectifs et les attentes que l'on peut assigner à une théorie unifiée de la conception ayant une ambition de clarification et d'universalité. En effet, il y a quatre notions de base que l'on retrouve dans toutes les traditions avec des poids variables.

- **Le raisonnement de conception**
- **La logique des fonctions.**
- **L'expansibilité des connaissances**
- **L'expansion innovante des propositions**

Il nous semble que ces notions constituent un ensemble minimal dont toute théorie de la conception doit rendre compte pour être pertinente dans ces différents contextes. Elles indiquent aussi les questions à résoudre.

- **Proposition : «L'expansion», une notion centrale pour toute théorie de la conception.** A quoi reconnaît-on une situation de conception ? Quelle est la notion qui nous est à la fois familière et énigmatique ? C'est la notion « d'expansion ». Elle exprime le talent de l'architecte, la découverte et l'invention chez l'ingénieur, l'originalité de l'artiste. Cette notion a été introduite de façon intuitive mais nous voyons bien qu'elle joue un rôle central dans toute tentative théorique. Une théorie de la conception qui ne rendrait pas compte du processus par lequel on peut aboutir à des propositions nouvelles ou à des connaissances nouvelles n'atteindrait pas son objectif.

- **Un programme de recherche :** On peut donc clarifier notre programme de recherche de la façon suivante : il s'agit de :

- *Définir un raisonnement de conception qui rende compte aussi bien de la logique fonctionnelle, de l'expansibilité des connaissances et de l'expansibilité des propositions.*
- *Etablir les conditions de possibilité d'un tel raisonnement.*
- *Spécifier ses opérations principales.*
- *Dégager ses enseignements les plus généraux.*

4. Préalables sur la notion d'expansion :

Avant d'exposer les bases de la théorie, il nous faut explorer la signification de la notion « d'expansion ». Car elle n'appartient pas au vocabulaire épistémologique ou théorique traditionnel. Mais elle joue un rôle central dans la théorie que nous allons présenter.

- **Notion d'ensembles indéfiniment «expansibles» :** En mathématique, la notion « d'expansion » n'a pas de statut précis. En revanche, la fécondité d'une axiomatique se manifeste par une « expansion » de l'espace des théorèmes connus. Nous connaissons aussi des ensembles qui ont la propriété d'être indéfiniment « expansibles » comme par exemple

l'ensemble des Réels qui est non dénombrable. Par ailleurs, certains êtres mathématiques comme les figures fractales ont aussi la propriété d'être indéfiniment expansibles⁴.

- **Nécessité des notions « expansibles »** : à un ensemble indéfiniment expansible nous pouvons faire correspondre une « notion indéfiniment expansible ». Un « nombre réel » est une telle notion expansible car nous *ne pouvons jamais en donner une définition achevée*. A contrario, la notion de « nombre entier » n'est pas expansible, nous savons parfaitement la définir. S'il n'existait aucune notion indéfiniment expansible le travail de conception serait ou réduit à la sélection dans une liste d'objets ou achevé de façon absolue ce qui serait en contradiction avec la capacité du « regardeur » à le recevoir à sa manière.

- **Relativité de la notion d'expansion, notion de K-relativité** : Dans le monde des objets, parler d'« expansion » exige que nous soyons capables de reconnaître des objets *que nous ne connaissons pas*. L'expansion n'a donc pas un statut universel ou objectif. Là où nous ne voyons rien de nouveau, un spécialiste peut voir une innovation frappante, donc une expansion invisible pour nous. Notre capacité à reconnaître une expansion peut dépendre de notre sensibilité, de notre entraînement ou des savoirs dont nous disposons. Pour simplifier l'exposé de la théorie, nous unifierons ces différentes situations en posant que la relativité de l'expansion dépend de nos *connaissances* (l'émotion ou la sensibilité étant prises ici comme des formes particulières de connaissance). **On dira alors que l'expansion est une notion K-relative** : ce qui veut dire que sa signification dépend des connaissances d'un concepteur ou de tout autre observateur, utilisateur, juge etc.

- **La notion d'expansion dans la littérature** : Les théories classiques du « problem solving » n'accordent pas de place précise à la notion « d'expansion ». Dans ses tentatives pour proposer une théorie de la pensée créative (« Creative thinking »), Simon (Simon 1979) a toujours défendu l'idée que cette pensée ne se distinguait pas du raisonnement en situation de rationalité limitée. Mais alors comment l'innovation, l'invention, donc l'expansion est-elle possible ? Simon a ramené celle-ci à l'intervention de l'imagination (imagery) qui présente à l'esprit des solutions nouvelles. Cette approche a ses limites. Il a aussi montré qu'une combinaison ingénieuse des connaissances disponibles pouvait faire émerger des solutions nouvelles. Cette deuxième approche est acceptable mais elle reste restrictive. Elle ne permet pas de faire la distinction entre deux types de situations :

- **les solutions étaient déjà là** (ready made) et il suffisait d'aller les chercher : *l'expansion est alors réduite à une exploration* : par exemple, lorsque nous cherchons un « bon restaurant » dans une ville, ou « un artiste contemporain susceptible de bien décorer un espace » .
- **les solutions n'existent pas au début du processus** et l'activité de conception doit les élaborer : l'expansion est alors bien plus qu'une exploration.

La théorie que nous proposons modélise clairement la deuxième situation.

⁴ En astrophysique, l'expansion de l'univers est une notion connue. Elle désigne la capacité des galaxies à s'éloigner les unes des autres.

II. LA THEORIE C-K DE LA CONCEPTION : NOTIONS ET PRINCIPES

La théorie C-K de la conception a été développée à la suite de nombreux travaux empiriques. Elle a été esquissée par Hatchuel (Hatchuel 1996), puis consolidée par Hatchuel et Weil (Hatchuel et al. 1999); elle a bénéficié de plusieurs travaux qui ont permis son état de développement actuel (LeMasson 2001)). L'habitude a été prise de l'intituler « théorie C-K de la conception » car elle s'appuie sur la distinction entre un espace de concepts et un espace de connaissances que nous décrirons plus loin. Compte tenu de sa relative abstraction de la théorie et des développements formels qui lui sont associés, nous avons choisi de la présenter en comparant des situations de conception simples (Hatchuel 2002) qui par contraste permettent de la différencier des théories du *problem solving* proposées par Herbert Simon et notamment du raisonnement par séparation et évaluation. (Branch and bound). Nous retiendrons ici comme exemples : le problème de la sélection d'un « bon film » à voir en ville (cas 1); par opposition au projet d'organisation d'une « surprise party sympa » (cas 2). Ces deux situations ne sont pas artificielles et nous avons tous une expérience pratique de chacune.

1. L'opération élémentaire de la conception: partition restrictive et partition expansive d'un ensemble :

Dans la tradition du « *problem solving* », le point de départ du raisonnement est « l'ensemble des solutions possibles » ou ce que Simon appelle le « *problem space* ». Dans le cas 1, il s'agit de l'ensemble S_f de tous les films actuellement projetés dans les salles de cinéma. Dans le second cas, il s'agit de l'ensemble S_p des « surprises-parties ». On peut remarquer intuitivement que les deux ensembles ne sont pas de même nature. Nous pouvons dire ce qu'est un « film » avec précision, cela est moins facile pour une surprise-party. Nous exprimerons mieux ce qui les distingue en précisant la théorie. Supposons que ces ensembles existent. Que voulons nous en faire ? Nous souhaitons « choisir » dans ces deux ensembles des solutions à notre projet. Comment sélectionner une première solution ? Il s'agit là d'un problème de partition bien connu que l'on retrouve dans l'approche classique dite par séparation et évaluation (Branch and Bound). Or, nous n'allons pas partitionner de la même façon dans les deux cas :

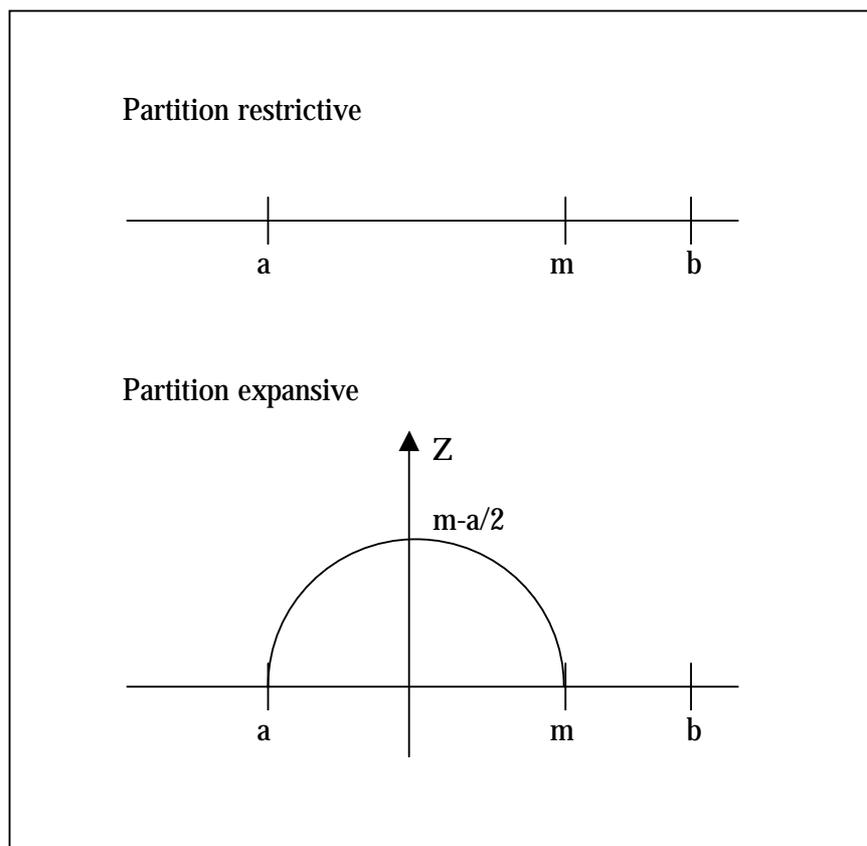
- **Notion de partition restrictive** : dans le cas 1, il suffit de prélever n'importe quel film dans le répertoire des films en cours. L'ensemble des films S_f est un ensemble que nous appellerons *complètement spécifié*. Une remarque cruciale peut être formulée : la sélection d'un ou plusieurs films ne changera rien aux films eux-mêmes. Nous partitionnons cet ensemble à l'aide de *critères de restriction* qui ne changent pas la définition des films. Nous pouvons distinguer, les mélodrames, les westerns, les films qui passent dans le cinéma le plus proche ou les films où joue Brigitte Bardot. A chaque fois, nous restreignons l'espace des possibles sans modifier la définition ou les attributs de ce qu'est un film. Nous appelons ces partitions des *partitions restrictives*.

- **Notion de partition expansive** : dans le cas 2, l'ensemble des « surprise-parties » S_p n'est plus complètement spécifié. Nous pouvons nous remémorer une surprise-party que nous avons connue, mais que faire si elle ne nous convient pas ? Nous sommes libres de concevoir ce qu'est une surprise-party comme nous l'entendons. Là aussi il nous faut partitionner mais dans un autre but. Car si les critères de partitionnement étaient exclusivement restrictifs, il nous ferait

conserver une définition des surprises-parties que nous n'avons pas encore ! Nous devons rechercher des partitions qui *construisent progressivement des définitions des surprises-parties*. Nous dirons de ces partitions qu'elles sont *expansives* puisqu'elles modifient la définition des surprises-parties en ajoutant des propriétés à la notion initiale. Par exemple, on peut envisager des surprises-parties comportant des « évènements imprévus préparés en secret par certains de nos amis ». L'ensemble des « évènements imprévus préparés par des amis » n'a aucune raison d'être contenu dans Sp . Mais alors comment savons nous que nous sommes toujours dans l'ensemble de départ Sp ? A quel moment saurons nous qu'une partition a une intersection vide avec Sp ? **Nous touchons là une propriété spécifique du raisonnement de conception : il comporte nécessairement des partitions expansives successives, et c'est précisément parce que ces partitions sont expansives que l'invention, la surprise sont possibles.**

- **Modélisation des partitions expansives** : Pour rendre compte rigoureusement de la distinction entre partition restrictive et partition expansive on doit donc faire intervenir *la connaissance que nous détenons sur les objets*. Cette difficulté n'était pas visible dans les approches du problem solving traditionnel, car en général elles supposent, une connaissance figée des objets dès le début du problème. De ce point de vue l'analogie avec le jeu d'échecs souvent utilisée par H. Simon est peu adaptée. Car la définition des « objets » (pièces, règles) ne change pas au cours du jeu. L'espace des stratégies est lui-même parfaitement spécifié et notre seul problème est due à l'étendue de cet espace. Dans le cas 2, ces hypothèses ne tiennent pas. L'espace des surprise-parties est inaccessible. Non parce qu'elles seraient en trop grand nombre, mais parce qu'il y a autant d'ensembles que de définitions possibles. Dès lors, l'ensemble des surprise-parties est **un ensemble infini d'ensembles infinis** ; on peut techniquement montrer qu'il est alors infini non dénombrable. **La partition de cet ensemble s'effectue donc paradoxalement par une expansion de la définition, donc des attributs, des surprises-parties**. En ajoutant de nouvelles propriétés à la notion de « surprise-party », nous sélectionnons un « monde » et en même temps nous nous donnons les moyens de le rendre acceptable aussi bien pour le concepteur que pour d'autres destinataires. Mais d'où viennent ces nouvelles propriétés ? Elles sont inséparables d'un processus d'acquisition des connaissances.

- **Une interprétation géométrique des partitions expansives : expandeurs et projecteurs**. On peut facilement illustrer la distinction entre les deux types de partition sur un exemple géométrique. Considérons un segment de droite $S = (a,b)$ (voir figure ci-dessous). Cet ensemble de points est un sous-ensemble de \mathfrak{R} (ensemble des réels). Si nous coupons ce segment en deux en m , nous obtenons une partition restrictive $S = ((a,m);(m,b))$. En revanche supposons que nous dotions les points du segment (a,m) d'une dimension supplémentaire portée par un axe Z perpendiculaire au segment. Par exemple en transformant le segment (a,m) en un demi-cercle de rayon $(m-a)/2$. Nous avons ainsi créé une partition expansive du segment initial dans $\mathfrak{R} \times \mathfrak{R}$. Nous pourrions encore recommencer en dotant certains points de ce demi-cercle de valeur dans $\mathfrak{R} \times \mathfrak{R} \times \mathfrak{R}$ et ainsi de suite. **On voit donc que nous pouvons à la fois partitionner le segment initial et « expandre » les propriétés d'un point**. Après plusieurs itérations nous pourrions atteindre des sous-ensembles très restreints mais dont les points sont maintenant définis par un grand nombre de propriétés. L'introduction de ces propriétés suppose une source de connaissances car on ne peut déduire d'un point de \mathfrak{R} , sa position dans $\mathfrak{R} \times \mathfrak{R}$. Les applications qui vont de $\mathfrak{R} \times \mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{R}$ sont bien connues en géométrie : il s'agit de projecteurs. Si nous appelons



« **expanseurs** » des fonctions qui réalisent des partitions expansives, alors nous constatons qu'une théorie de la conception doit se forger une modélisation spécifique de cette notion⁵.

- **Conditions de possibilité des partitions expansives :**

Le mécanisme des partitions expansives est le moteur élémentaire de la conception. Dès lors, une théorie de la conception doit donner les conditions de possibilité des partitions expansives et leurs effets sur le raisonnement de conception. Or, si nous voyons qu'il exige deux

examinons en détail le mécanisme des partitions expansives, nous voyons qu'il exige deux conditions :

- *l'ensemble à partitionner n'est pas complètement spécifié, il est donc expansible* : nous allons montrer que l'on peut représenter ces ensembles comme des ensembles de concepts notés C.
- *la partition opère à partir d'une connaissance extérieure à cet ensemble*, nous aurons à considérer un espace de connaissances noté K.

Ces deux remarques ont déterminé la forme de la théorie C-K.

2. Espaces de concepts et Espaces de connaissances :

2.a. La distinction entre Concepts et Connaissances

La théorie C-K repose sur la distinction formelle entre « concept » et « connaissance ». Cette distinction n'est pas usuelle et nous devons la préciser. Le terme de « concept » appartient à la tradition philosophique générale. On parlera du concept du « bien » chez Platon, ou du concept

⁵ Ce n'est pas un hasard si nous devons la première intuition de ces « **expanseurs** » à Marcel Duchamp, le père de l'Art Conceptuel moderne qui précisément voulait inverser le raisonnement de la perspective classique Clair J. (2000). *Sur Marcel Duchamp et la Fin de l'Art*. Paris, Gallimard., Amar G. (1992). "Notes cursives sur la joie de l'existence, la grâce des apparences, l'art géopoétique, et ce diable d'homme de Marcel Duchamp..." *Cahier de Géopoétique* 3: 107-135..

de « force » chez Newton. Nous désignons ainsi, un terme qui prend un sens précis au sein d'une pensée ou d'une théorie particulières. Le sens que nous allons lui donner s'éloigne de l'approche traditionnelle et suit plutôt les traditions des architectes, des designers ou des ingénieurs qui parlent d'un « concept » pour désigner *une proposition novatrice* à partir de laquelle on veut initier un travail de conception. Ainsi on parlera en architecture du concept de « salle de séjour », en design automobile du concept de « monospace », en ingénierie du concept de « découpe par laser ». Le concept désigne ici une notion qui a un statut intermédiaire particulier que nous allons définir relativement à celui de « connaissance » par les propositions suivantes.

- **Une connaissance est une proposition ayant un statut logique pour le concepteur ou pour le destinataire de la conception.** Peu importe la manière dont ce statut est fixé : toutes les formes de la logique, qu'elles soient « standard » ou « non standard » sont a priori acceptables pour une théorie de la conception. Un ensemble de connaissances est donc un ensemble de propositions ayant toutes un statut logique.
- **Un concept est une notion ou une proposition sans statut logique :** on ne peut dire d'un concept, par exemple celui de « salle de séjour oblongue », qu'il est vrai, faux, incertain, ou indécidable. Un concept n'est donc pas pour « une connaissance ». En revanche, on peut construire des propositions à statut logique incluant un ou plusieurs concepts. Je peux penser que les « salles de séjour ne doivent pas être placées près des cuisines », autrement dit j'attribue à cette proposition un statut logique (de vérité, ou de probabilité par exemple). Ce qui revient à dire in fine : « Il est vrai que cette proposition a tel statut logique pour moi ». Lorsque un ingénieur se propose de concevoir un « avion à hélices carénées qui vole convenablement », il ne peut donner aucun statut logique à cette proposition : s'il affirme que cette proposition est fautive, il énonce une connaissance qui arrête le raisonnement de conception. S'il dit que cette proposition est vraie, il affirme qu'il existe déjà des « avions à hélices carénées volant convenablement » et donc il doit alors reformuler son concept en le différenciant de ce qui existe, par exemple en ajoutant « plus léger que celui de X ». *On voit qu'un concept évoque une proposition « inconnue » relativement à la connaissance disponible.*
- **Notion d'ensemble associé à un concept ; rejet de l'axiome du choix.** A un concept donné comme, « salle de séjour oblongue », « bateau qui vole », ou « maisons anciennes à colombages placées près d'une rivière » on peut définir un *ensemble associé* : l'ensemble des « salles de séjour oblongues », ou des « bateaux qui volent », ou des « maisons anciennes à colombages placées près d'une rivière ». Mais on doit ajouter ici quelques conditions formelles. Les concepts seront associés à des ensembles possédant toutes les propriétés classiques des ensembles à l'exception de l'axiome du choix. En effet, si nous posions systématiquement cet axiome cela reviendrait à supposer que nous puissions extraire un élément de tout ensemble associé à un concept. *Ce qui reviendrait à dire que nous pourrions choisir « un bateau qui vole » avant même de l'avoir conçu !* Le rejet de l'axiome du choix a un sens profond ; il exprime la nature des concepts : nous pouvons les considérer d'un point de vue ensembliste mais nous ne savons pas définir complètement les éléments de cet ensemble. L'espace C est défini sur la théorie des ensembles de type ZF-sans choix. Un concept au sens que nous donnons à cette notion n'est donc défini ni par extension, ni par compréhension, mais par une extension relative à une compréhension partielle.

- **Espace des concepts C et espace des connaissances K** : à partir des définitions précédentes nous pouvons poser deux espaces, C l'espace des concepts et K l'ensemble des connaissances. Dans le premier espace nous aurons des ensembles associés à des concepts, dans le second des ensembles associés à des connaissances. L'espace des connaissances K peut être définie sur CAT, l'ensemble des catégories (au sens de la théorie des catégories). L'espace des Concepts est indissociable de l'espace des connaissances puisque sa définition est relative à K. En effet, un concept est une proposition sans statut logique, ce qui veut dire aussi que cette proposition n'appartient pas à l'espace K. *Nous pouvons poser une notion de K-relativité de C*. De plus C et K sont nécessairement associés à un concepteur particulier.

Proposition fondamentale : tout raisonnement de conception suppose la distinction entre deux espaces associés : l'espace des concepts et l'espace des connaissances.

Ces distinctions permettent de donner une représentation théorique précise du raisonnement de conception. Nous allons d'abord introduire les opérateurs de disjonction K-C et de conjonction C-K qui marquent le « début » et « la fin » d'un raisonnement de conception.

2.b. Naissance des concepts : la disjonction K-C :

Comment débute un raisonnement de conception ? En posant un problème à résoudre ? Une telle formulation n'apporte aucune précision utile sur le raisonnement de conception. Ce qui fait la spécificité de ce raisonnement tient à ce que « le problème » suppose la formulation d'un concept, ce qui n'est pas le cas de la plupart des problèmes que nous rencontrons : si nous disons, « *je cherche mes clés et je ne sais pas où elles sont* », nous avons un problème à résoudre sans énoncer aucun concept. Les clés dont nous parlons ne sont pas à concevoir et nous les reconnaitront dès que nous les verrons. En revanche si nous disons que nous voulons concevoir « *des clés faciles à retrouver* », nous formulons un concept ayant toutes les propriétés énoncées plus haut. Quelle opération a permis cette « naissance » ? Nous appellerons **disjonction C-K**, cette opération qui allant de $K \rightarrow C$ permet la formulation d'un concept. Quelles conditions sont nécessaires ? Pour que la proposition « des clés faciles à retrouver » soit une disjonction C-K, il faut :

- que tous les termes de cette proposition appartiennent à des propositions de K.
- que cette proposition n'ait pas de statut logique, sinon elle serait une connaissance de K.

Lorsque nous voulons organiser une « surprise-party sympa » nous opérons implicitement une disjonction C-K : *nous disons que nous savons ce qu'est une « surprise-party », mais que nous n'en savons pas assez pour éviter un travail de conception*. En revanche, une disjonction serait inutile quand nous cherchons « un bon film » à voir. La disjonction K-C marque l'engagement d'un raisonnement de conception ; mais une disjonction K-C suppose l'existence de la distinction C et K. Le fait que la théorie C-K nous permette de clarifier l'opération de disjonction est un premier résultat en sa faveur.

2.c. Quand arrêtons nous un raisonnement de conception ? La conjonction C-K

La conjonction C-K est symétrique de la disjonction. Elle marque le moment où nous pensons avoir terminé de concevoir une « surprise-party sympa » ou des « clés faciles à

retrouver ». Comment caractériser ce moment ? Il intervient quand nous jugeons que nous *savons* ce qu'est une « clé facile à retrouver » ! *Autrement dit lorsqu'une proposition du type : « une clé facile à retrouver possède les propriétés $P_1, P_2...P_i.. P_k$ » est vraie dans K . Lorsqu'une telle proposition est acceptée, le raisonnement de conception peut être arrêté ; de plus, « clé facile à retrouver » n'est plus un concept, c'est une proposition de K . Et l'on peut même lui donner un nom : « la Clé XXX est la clé facile à retrouver ayant les propriétés $P_i...$ ». Nous appelons conjonction C-K, l'opération qui va de $C \rightarrow K$, et qui transforme un concept en connaissance. Un raisonnement de conception peut aboutir à plusieurs opérations de conjonction à partir d'une seule disjonction. Il y a en effet ainsi plusieurs manières de réaliser des "clés faciles à retrouver".*

2.d. Les opérateurs de la conception : interprétation et généralisation dans la théorie C-K de la méthode de séparation et d'évaluation .

Nous savons maintenant que le raisonnement de conception démarre avec une disjonction K-C et se termine par une ou plusieurs conjonctions C-K. Mais comment passe-t-on d'une opération à l'autre ? Quelle est la différence entre le concept obtenu par disjonction et le concept enfin propre à la conjonction ? Ce dernier comporte un **ensemble de propriétés qui lui permettent d'acquérir un statut logique dans K**. Ces propriétés constituent donc une expansion du concept initial. Elles permettent de partitionner l'ensemble associé au concept initial tout en augmentant les propriétés définitionnelles du concept. Comment cela est-il possible ? Nous allons retrouver maintenant la notion de partitions expansives. Mais pour que puisse s'opérer ces partitions expansives il faut pouvoir mettre en place des opérateurs qui vont permettre ces partitions. Nous allons les construire en généralisant l'approche classique de la « problem-solving theory » : la méthode dite de séparation et d'évaluation (SEP ou branch and bound).

Cette méthode on le sait repose sur les séparations successives et l'évaluation d'un ensemble de solutions admissibles pour un problème donné. Si nous relisons cette méthode dans un cadre C-K nous allons montrer comment la distinction C-K permet de généraliser et de doter de capacité d'expansion toutes les notions de base .

a) L'ensemble des solutions admissibles : Dans la méthode SEP, cet ensemble se déduit de l'énoncé même du problème et il est complètement spécifié (par exemple Sf l'ensemble des films). Il n'y a donc pas de distinction entre Concepts et Connaissances. Il n'y a que des connaissances. La proposition qui caractérise l'ensemble des solutions admissibles est une connaissance. On peut dire que la méthode SEP est une opération de $K \rightarrow K$. **Il n'y a aucune partition expansive possible**. On pourra dire que la méthode permet de trouver des solutions inconnues, mais ces solutions ont une définition acquise dès le début de la méthode. Il n'y a rien de différent ici avec la recherche de solutions à un système d'équations.

b) Les partitions : La séparation dans SEP est constituée uniquement de partitions restrictives qui ne changent pas la définition des solutions admissibles quelque soit le nombre de ces partitions et leur profondeur. Cette stabilité de la définition permet là encore de poser des règles de partition qui sont indépendantes du processus lui-même : on sait comment l'on va partitionner dès le début du processus. Or, cette stabilité disparaît avec les partitions expansives. En effet, le choix d'une partition modifie cette fois la définition des concepts initiaux. Comment peut-on alors construire une partition expansive ? Par exemple, **à partir d'un concept comme**

« bateau qui vole » doit-on partitionner « bateau » ou « vole » ? On doit maintenant construire trois opérateurs :

- **Sélection de la partition à opérer** : Cette opération se construit par une règle systématique (ex : prendre le premier) de type $C \rightarrow C$;
- **Mobilisation d'une connaissance de K** activable à partir de C.
- **Partition de C à l'aide de K**

Le chemin peut être modélisé ainsi :

$C \rightarrow K$ (identification de la connaissance partitionnante),
 $K \rightarrow C$ (retour au concept) ,
 $C \rightarrow C'$ (création du nouveau concept partitionné).

De même, si nous choisissons de partitionner « vole », nous trouverons dans K une proposition qui dit « *pour voler il faut des ailes ou des hélices* ». Les nouveaux concepts sont alors : « *bateau qui vole sans ailes et sans hélices* », « *bateau qui vole avec des ailes* », « *bateau qui vole avec des hélices* », « *bateau qui vole avec des ailes et des hélices* ». La même démarche est possible avec le concept de « surprise-partie », K peut contenir des propositions comme il y a des « *surprise-parties costumées* », des « *surprise-parties en bateau* » etc...

c) K-Validation et Expansion de K : Supposons que nous ayons retenu les partitions « surprise-party en bateau », et « surprise-party costumée ». Dans la méthode classique, on disposerait d'une règle d'évaluation qui sélectionne le sous-ensemble à partitionner . Les deux sous-ensembles sont constitués de concepts différents dont on peut par exemple comparer les coûts. Mais comment savoir si chaque proposition peut avoir un statut logique dans K ? Comment savoir qu'il ne s'agit pas d'une « fiction » ? *Cette question n'existe pas dans SEP* car la définition des solutions admissibles est connue dès le début du raisonnement. Dans C-K, cette interrogation est inévitable. Comparer les deux sous-ensembles suppose alors la définition dans chaque cas d'une « épreuve » qui permettrait d'éliminer les non-sens. *Or il est possible qu'aucune épreuve de ce type ne soit possible à ce stade compte-tenu de K.* On doit alors poursuivre les partitions jusqu'à ce qu'une épreuve soit possible. Ainsi, la notion de règle d'évaluation doit être remplacée par une notion de **K-validation** propre à chaque concept. De plus, l'expansion de l'espace K découle de cette mise à l'épreuve.

La K-validation d'un concept C est un opérateur $C \rightarrow K$, qui **transforme un concept en question logique**. Supposons que nous ayons partitionné l'espace des surprises-parties entre celles qui se déroulent le jour et celles qui se déroulent la nuit. Le concept « *les surprises-parties en bateau ayant lieu la nuit* » devient la question logique : « *Les surprises-parties en bateau peuvent-elles avoir lieu la nuit ?* ». *Le traitement de cette question est une opération de $K \rightarrow K$, qui peut donner naissance à des propositions nouvelles de K.* La réalisation d'une **K-validation d'un concept** inclut toutes les formes connues dans K d'acquisition des connaissances (consultation de bases, plan d'expériences, consultation d'expert...). Si K ne contient aucune méthode d'acquisition de connaissances nouvelles (un plan d'expériences est une connaissance disponible ou non) aucune expansion n'est possible. Lorsque ces méthodes existent, on voit comment les partitions successives de C permettent de former des propositions de K inattendues. Ces nouvelles propositions ont un statut logique mais rien ne prouve qu'elles vont être utiles à la validation de C ou à une partition future dans C. Ainsi la K-Validation est un processus mobilisant les opérateurs suivants :

- **$C \rightarrow K$ (du concept à la question logique),**
- **$K \rightarrow K'$ (expansion par K-Validation),**

- $K' \rightarrow C'$ (validation, échec ou autre)

d) Echecs et départition du concept initial : le processus peut-il échouer ? Dans la méthode SEP, si l'ensemble des solutions admissibles est non vide, il y aura toujours une solution puisque l'on ne fait que sélectionner une solution parmi d'autres. Dans C-K, cela n'est plus vrai. *On peut ne jamais réussir à réaliser une conjonction.* Il faut donc remonter à la disjonction initiale pour **départitionner** le concept initial. On forme alors **une disjonction plus générale**. Par exemple, si nous formons le concept de « *voiture qui roule à 400km/h* », il est probable que nous serons conduit à formuler une disjonction plus générale du type « *système de transport terrestre roulant à 400km/h* » si nous disposons dans K de la proposition « *il est vrai que la voiture est un type de système de transport terrestre* », et si cela ne suffit pas à « *système de transport autorisant des vitesses de 400km/h* ». **La départition est une expansion inversée : on cherche le concept dont « voiture » est une partition expansive.**

Nous disposons maintenant d'un tableau d'ensemble des notions et des opérateurs de la théorie C-K par comparaison avec la théorie SEP. Le tableau 1 résume ces différences en prenant dans le premier cas l'exemple du « bon film à voir en ville » et dans le second celui des « surprises-parties sympa ». *Nous allons maintenant montrer la puissance interprétative de la théorie C-K.*

Tableau 1. Principales différences entre SEP (les films) et C-K (les surprises-parties »

Théorie	SEP	C-K
Espaces de Départ	Espaces de Connaissances K : les films qui passent en ville	Espaces des concepts C : « les surprises parties sympa » et espaces des connaissances K : tout ce que le concepteur peut savoir
Projet	Question ayant un statut logique : « quels sont les bons films à voir ? »	Concept obtenu par disjonction K→C « une surprise parties sympa »
Ensemble initial	Ensemble des solutions admissibles	Ensemble associé au concept. Ensemble expansible
séparation	Partition restrictive K→K , « les films de type western »	Partition restrictive et partition Expansive : C→K, K→K, K→C' Les surprises-parties en bateau et/ou costumées
Sélection	Règle d'évaluation K→K « les avis des critiques »	K-Validation, expansion de K C→K, K→K', K'→C' « En visitant les bateaux qui accueille des parties nous apprend que pour moins cher on peut se faire transporter dans une île avec nos invités »
Solution retenue	Sommet terminal ayant la meilleure évaluation « le film retenu est un western avec une excellente critique »	Conjonctions C→K . « nous avons retenu une surprise-party non costumée, sur l'île, pas cher, sympa et très original »
Résultats du Raisonnement	Structure de K inchangée,	Expansion de C « arborescence » Expansion de K « on a appris des tas de choses sur les fêtes, les parties etc.. Nouvelles Conjonctions C-K : les parties dans une île sont abordables » Nouvelles Disjonctions C-K « les surprise-parties avec concours de pêche »

III. Première Discussion : Puissance interprétative et explicative de la théorie C-K

La théorie C-K, on va le voir, possède une grande puissance interprétative. Elle éclaire avec un formalisme précis des questions difficiles ou que nous n'arrivons pas à formuler dans le langage ordinaire.

a) Les enseignements généraux de la double expansion C-K :

- **Pas de théorie autonome de la connaissance** : La théorie C-K propose de traiter simultanément de deux expansions : celles des concepts et celle des connaissances. Elle nous montre que nous ne pouvons penser l'une sans l'autre. Sans concepts, pas de connaissances nouvelles possibles ou limitées aux connaissances associées à des partitions restrictives. Sans concepts, nous sommes condamnés à explorer indéfiniment des objets dont la définition ne change jamais. Mais sans connaissances préalables, pas de concepts sinon comment opérer des disjonctions ? Le dualisme C-K est donc une condition de possibilité de l'expansion des connaissances. Mais l'espace des concepts s'étend aussi à mesure que s'expandent les connaissances. La théorie de la conception est donc un préalable nécessaire à toute théorie de la connaissance et de l'apprentissage.

- **Comment faire de l'inconnu avec du connu ?** le formalisme C-K fait disparaître ce vieux paradoxe. Nous créons de l'inconnu en acceptant des propositions n'ayant pas de statut logique. Ensuite, nous « expandons » ces propositions en les dotant de connaissances additionnelles. *Mais simultanément, nous créons de nouvelles questions logiques qui nous permettent d'étendre les connaissances existantes.* La vraie difficulté était de comprendre comment ce mécanisme s'opère sans perdre l'intelligibilité du raisonnement. Or, ce processus est incompréhensible si nous l'observons dans un seul espace, qu'il s'agisse de l'espace des concepts ou de l'espace des connaissances. L'expansion des concepts n'est interprétable qu'en référence à ce qui se passe dans K et inversement. Cette co-génération des concepts et des connaissances pouvait être perçue intuitivement mais nous lui donnons maintenant des assises solides.

- **Rationalité limitée et Rationalité expansible** : la théorie C-K offre un cadre formel qui permet de dépasser le paradigme trop étroit de la problem-solving theory. Contrairement à ce que pensait Simon, la « problem solving theory » a masqué la dualité C-K nécessaire à une théorie de la conception. Elle tendait aussi à confondre partition restrictive et partition expansive. Enfin, la théorie C-K nous permet d'opérationnaliser le concept de « **rationalité expansible** » (Hatchuel 2002) qui est opposable à celui de « rationalité limitée » lorsqu'il s'agit d'une activité de conception (qui est indéfiniment expansible). En effet, la vision commune de la rationalité limitée semble enfermer le raisonnement rationnel dans un espace de contraintes qui le délimite fortement. Cette analyse reste enfermée dans une logique de la connaissance sans concepts. Or, en rétablissant cette notion, nous montrons qu'il n'y a pas d'espace de contraintes donc de connaissances qui ne soit pas expansible. La rationalité limitée est implicitement construite sur des partitions restrictives. Nous pouvons mieux comprendre et déjouer les « **illusions de**

conception »⁶ qui sont propres à la rationalité expansible : par exemple, un projet peut sembler très contraint alors qu'il repose sur un concept indéfiniment expansible qui laisse une marge infinie à la conception. Si je forme le concept « d'une surprise partie qui ne me coûterait rien », je peux immédiatement penser que c'est impossible ! Or, c'est une proposition fautive car le concept de « surprise-partie » autorise toutes les formes possibles de financement y compris le sponsoring. C'est une autre manière de vérifier l'extrême relativité sémantique des concepts, mais nous ne pouvons ici exposer en détail cet aspect de la théorie⁷.

- **une relecture de certaines « étrangetés » mathématiques** : La théorie C-K est un raisonnement au sens le plus fort de ce terme. En mathématiques on peut dire que ce raisonnement suggère non pas une théorie de la génération de théorèmes, mais une théorie de la conception d'objets mathématiques. Ce point demanderait évidemment des développements qui sortent du cadre de cet article. Mais on pourra se reporter à (LeMasson 2001) pour une interprétation C-K des paradoxes classiques de Bertrand en probabilité ou pour une relecture des objets fractals de Mandelbrot. *Dans les deux cas on peut montrer que ce que l'on croyait être une simple opération de mesure ou de calcul était en fait un raisonnement de conception supposant la modélisation de partitions expansives et non pas seulement restrictives.*

a) Les enseignements de la théorie C-K sur les approches classiques de la conception.

Nous ne pourrions donner dans cet article que les enseignements les plus immédiats, et ne nécessitant pas tout le formalisme technique de la théorie C-K.

a.1. Une relecture de la systématique allemande (Pahl et al. 1977) :

Cette approche domine on l'a vu le monde de l'ingénierie des systèmes techniques et on peut montrer que la plupart des approches connues en découle plus ou moins. Réinterprétée dans le cadre C-K, l'approche systématique se caractérise par plusieurs restrictions :

- *L'absence de toute notion de « concept »* : le point de départ de la théorie est défini comme un énoncé parfaitement spécifié : par exemple, «un système de freinage plus efficace et moins cher ». Mais il n'est jamais précisé si l'expression de « système de freinage » doit être pris comme un concept indéfiniment expansible ou dans une liste connue de systèmes de freinage !
- *La structuration de l'espace des connaissances en trois niveaux indépendants* : L'approche systématique, se caractérise par la définition de phases ou niveaux distincts de conception : le niveau fonctionnel, le niveau conceptuel, le niveau de l'embodiment. Tout l'enjeu de l'approche est dans cette hypothèse. Il est très difficile, sauf dans des cas limites, de définir ces niveaux de façon universelle. Le plus souvent on illustre ces notions mais on est incapable

⁶ Par analogie avec les illusions d'optique : on peut montrer que « voir » est un « concevoir » particulier déterminé par les règles de la connaissance « optique » (ou « rétinienne » au sens de Marcel Duchamp, l'initiateur du « conceptual Art »).

⁷ Les liens entre la théorie C-K et les différentes théories sémantiques sont en cours d'examen. pour un premier pas dans ce sens on pourra se reporter à Szpirglas M. (2001). Théorie C-K et le quiproquo dans le théâtre de Molière. Paris, Université Dauphinep. : « théorie C-K et le quiproquo dans le théâtre de Molière » mémoire de DEA Université Dauphine, septembre 2001.

de vraiment les définir indépendamment des connaissances disponibles. Certes on peut définir les fonctions d'une montre, sans préciser si elle est mécanique ou à quartz (modèle conceptuel). Mais nous ne découvrons certaines « fonctions » que parce que nous connaissons déjà la montre à quartz. Et la structuration en niveaux est un raisonnement souvent postérieur au travail de conception. *Cette approche n'est complètement justifiée que lorsque les connaissances dans K sont déjà structurées en couches quasi-disjointes.* Par exemple, lorsque l'on peut, comme en informatique, clairement distinguer les connaissances en matière de logiciel de celles relatives au matériel.

La systématique allemande est donc une approche restrictive de la conception et la théorie C-K nous permet de mieux en préciser les présupposés et les conditions de validité. Ceci peut aussi se vérifier pour l'axiomatique de Suh (Suh 1990) ou pour les différentes approches en génie logiciel décrites par Dasgupta (Dasgupta 1991).

2.a. Une nouvelle typologie de l'innovation et des « surprises en conception : critique de la notion de créativité

Le processus de double expansion C-K permet d'expliquer l'existence observable de deux grandes classes d'innovation ou d'expansion « surprises » .

- *Les expansions C-k (grand C-petit k) ou « innovations conceptuelles »* : elles mobilisent une expansion importante (en nombre de partitions successives en C) alors que les connaissances K mobilisées sont très répandues ou très localement étendues. La surprise du concepteur, ou celle du destinataire de la conception est alors maximale : car une fois la conception innovante terminée (conjonction établie) on éprouve le sentiment bien connu du « *il fallait y penser !* », ou du « *c'est très astucieux* » etc... Ce sentiment repose précisément sur le fait que toutes les connaissances nécessaires à la conception nous semblaient déjà là sans que le concept nous saute aux yeux. Mais la théorie C-K nous montre bien en quoi cette impression était illusoire : la connaissance n'est rien sans les concepts qu'elle permet de former ou qu'elle aide à expandre. Cette créativité surprenante, « style concours Lépine », joue aussi un rôle important dans le monde industriel. Ainsi comprenons nous pourquoi l'invention banale et quotidienne est d'abord affaire de ténacité et de patience, il faut accepter *la suspension du statut logique* longtemps et multiplier les partitions expansives avant d'aboutir. On se trouve ici face à une forme de conception innovante particulièrement proche du monde artistique, notamment de l'Art moderne, qui n'impose aucune connaissance technique préalable et où tous les moyens sont autorisés. La difficulté de cette forme d'Art découle à l'évidence de la théorie : il faut vraiment que le « concept » proposé nous surprenne ou nous « touche » : c'est donc une démarche d'une exigence extrême pour le concepteur et pour le spectateur.

- *les expansions c-K (petit C-grand K) ou l'innovation « faussement » applicative* : elles mobilisent des connaissances rares et un développement conceptuel limité. Le téléphone mobile, la télévision ne nous surprennent pas, ils nous émerveillent ! Nous sommes fascinés non parce que nous n'avons jamais pensé à communiquer à distance, mais parce que nous ne savons pas comment y arriver, et parce que même devant l'objet technique nous ne savons pas (sauf compétence spéciale) expliquer comment cela marche. Ce deuxième type d'expansion est caractéristique du monde technologique dans lequel nous vivons. De nouvelles connaissances sont produites en permanence, à partir de processus de conception dont nous ignorons tout et

nous découvrons soudain à travers des objets la rencontre inattendue entre un concept simple et une connaissance complexe. Ce modèle a fortement pesé sur nos représentations du travail de conception, nous avons le sentiment fallacieux qu'il se réduit à une simple « application » des connaissances scientifiques et le travail conceptuel ne se voit guère. C'est évidemment un modèle très tentant : il suffirait de connaître les sciences de base pour être un bon concepteur industriel !

Ces deux modèles sont évidemment des situations limites : la grande majorité des projets de conception exigent à la fois de grandes expansions en C et en K, donc un travail à la fois savant et conceptuellement exigeant. Mais il est vrai que les deux modèles extrêmes sont éclairants :

- Dans le premier cas, la surprise nous apparaît comme le fruit du talent non explicable et non répétable de l'inventeur ou de l'artistique : *La conception est un mystère.*
- Dans le second cas, la conception semble une déduction logique de la science : *elle disparaît*

Ces deux dérives expliquent les difficultés récurrentes des théoriciens de la créativité, ou plutôt la faiblesse théorique de cette notion. Soit on identifie la créativité au premier cas et on néglige l'expansion des connaissances, soit on l'identifie au second et on croit qu'elle n'a pas vraiment d'intérêt. Ces paradoxes disparaissent avec la théorie C-K. La non-séparabilité des concepts et des connaissances réapparaît et les deux situations ne sont plus que les points extrêmes d'un vaste continuum. **On ne saurait donc définir la créativité sans une théorie de la conception.** Les tentatives pour faire le contraire ont échoué jusqu'ici.

Cette première série d'enseignements suggère le potentiel important des utilisations de la théorie C-K. Nous allons en donner quelques éléments.

IV. Deuxième discussion : Les usages pratiques et industriels de la théorie C- K :

Dans cet article, nous ne pourrions traiter exhaustivement de ces questions. On pourra se référer à plusieurs publications spécialisées mobilisant la théorie C-K dans un contexte industriel : (Toulemonde et al. 2000), (Lenfle 2001), (LeMasson 2001). Nous donnerons donc ici quelques indications de ces usages

- Elle permet de comprendre **pourquoi le travail de conception est une épreuve cognitive et organisationnelle**, tant individuelle que collective. Il suffit de remarquer que nous n'avons aucun moyen dans le cadre du langage naturel pour savoir si nous raisonnons sur des concepts ou sur des connaissances. Tant que l'on n'a pas reconnu les spécificités déconcertantes du raisonnement de conception, alors on observe en pratique une très grande difficulté du travail collectif et une multiplication des situations de quiproquo (Szpirglas 2001).
- Elle permet **la représentation du processus historique de conception** en conservant la mémoire des connaissances acquises relativement aux concepts explorés (Morin et al. 2000)

- La théorie C-K permet ainsi une clarification de ce que l'on peut entendre par « knowledge management » (Hatchuel et al. 2002), (LeMasson 2001).
- Elle permet **d'évaluer les différents outils d'aide à la conception** (TRIZ, management par la valeur, analyse fonctionnelle..) pour en délimiter les conditions d'application et l'efficacité.
- Enfin, la théorie C-K est directement utilisable dans les situations de conception innovante où le travail collectif ne peut s'appuyer sur un cahier des charges précis ou sur une définition identitaire de ce qui est à concevoir (par exemple, concevoir : « un bateau qui vole », « Internet dans la voiture », etc...). **En aidant à la structuration du raisonnement et à l'organisation du travail collectif**, elle répond à un besoin essentiel des entreprises contemporaines confrontées à la nécessaire mutation des activités de R&D dans un "capitalisme de l'innovation intensive". Une nouvelle économie la conception devient possible (Hatchuel et al. 1999), (Hatchuel et al. 2001); (Hatchuel et al. 2001)), (Segrestin et al. 2001).

Ces différents usages ne sont pas limitatifs, mais ceux que nous venons d'évoquer ont tous été validés, depuis quelques années, dans de nombreux contextes industriels (Alcatel, Avanti, Renault, Arcelor, STS consultants...).

V. Conclusion : perspectives de recherche

1. La théorie C-K est née de la nécessité d'une théorie rigoureuse et universelle de la conception. Elle ne réfute pas les approches classiques, elle démontre leurs présupposés et leur appartenance à un cadre plus général. Seul ce cadre général permet de bien résoudre les difficultés, les paradoxes, les confusions que la notion de conception présente habituellement. Par ailleurs, la théorie C-K s'inscrit parfaitement dans une longue tradition : elle apparaît comme une expansion-généralisation des théories de la décision, du « problem-solving », de l'IA, etc... Toutes ces théories sont intégrées dans un modèle plus général, de même que la théorie des nombres réels intègre par expansion-généralisation la théorie des nombre entiers, rationnels et irrationnels.

2. Mais dès lors que nous disposons d'une théorie de la conception bien fondée d'autres problèmes connexes sont clarifiés. Nous distinguons mieux ce que l'on peut entendre par invention, créativité, ou découverte. Nous comprenons les difficultés des notions de concept ou de connaissance que nous avons l'habitude de traiter séparément, provoquant des difficultés et des contradictions qui paraissaient insurmontables. Enfin, la théorie nous dévoile la puissance de notions nouvelles comme celle « d'expansion » qui n'avait jusque là qu'un statut métaphorique.

3. Comme pour toute théorie ayant à la fois un formalisme abstrait et un référent empirique, les perspectives de recherche futures sont de trois types :

- **une orientation formaliste** : confronter le modèle C-K à des formalismes plus généraux : La théorie C-K a des liens étroits avec la théorie des Catégories et la

théorie des ensembles ; son formalisme pourrait être plus rigoureusement construit au risque bien sûr d'une abstraction accrue.

- **Une orientation transversale** : née comme une théorie de la conception, la théorie C-K, peut aussi apparaître à certains égards comme une théorie du langage, de la compréhension, de la genèse des formes, etc...
- **Une orientation industrielle et instrumentale** : Les usages de la théorie dans l'univers industriel sont déjà significatifs, mais la théorie est d'un accès relativement difficile. Elle est cependant très vite adoptée du fait de sa puissance interprétative. Mais il n'y a pas aujourd'hui d'outillage spécifique (logiciel par exemple) adapté à la théorie et certains d'entre eux sont en cours de développement.

Notre groupe de recherche poursuit ces trois orientations. C'est un programme particulièrement vaste, mais n'est-ce pas un bon indicateur de la fécondité d'une théorie ?

Références

- Alexander C. (1964). *Notes on the synthesis of form*. Cambridge, Massachusetts, Harvard university Press.
- Amar G. (1992). "Notes cursives sur la joie de l'existence, la grâce des apparences, l'art géopoétique, et ce diable d'homme de Marcel Duchamp..." *Cahier de Géopoétique* 3: 107-135.
- Clair J. (2000). *Sur Marcel Duchamp et la Fin de l'Art*. Paris, Gallimard.
- Dasgupta S. (1991). *Design Theory and Computer Science*, Cambridge University Press.
- Duchamp M. (1999). *Duchamp du signe*. Paris, Flammarion.
- Goodman N. (1978). *Ways of Worldmaking*. Indianapolis, Hackett Publishing Company.
- Hatchuel A. (1996). *Théories et modèles de la conception, Cours d'ingénierie de la conception*. Paris, Ecole des mines de Paris.
- Hatchuel A. (2002). "Towards Design Theory and expandable rationality : The unfinished program of Herbert Simon." *Journal of Management and Governance* 5(3-4): 260-273.
- Hatchuel A. & LeMasson P. (2001). Innovation répétée et croissance de la firme : microéconomie et gestion des fonctions de conception. Paris, Ecole des Mines de Paris Cahier de recherche n°18 61.
- Hatchuel A., LeMasson P. & Weil B. (2001). *From R&D to R - I - D : Design strategies and the management of "Innovation Fields"*. 8th International ProductDevelopment Management, Enschede, Netherlands.
- Hatchuel A., LeMasson P. & Weil B. (2002). "De la gestion des connaissances aux organisations orientées conception." *Journal des Sciences Sociales de l'UNESCO*.
- Hatchuel A. & Weil B. (1999). *Design-Oriented organizations : Towards a Unified Theory of Design Activities*. 6th International Product Management Conference, Cambridge, UK.
- Hatchuel A. & Weil B. (1999). *Pour une théorie unifiée de la conception*. Conception et Cognition, GIS Cognition CNRS, Lyon.

- LeMasson P. (2001). De la R&D à la R-I-D : Modélisation des fonctions de conception et nouvelles organisations de la R&D. Paris, Ecole des mines de Paris 467 p.
- LeMasson P. (2001). La théorie unifiée de la conception : théorie C-K. Paris, Cours " Management de l'innovation et ingénierie de la conception" Ecole des Ponts et Chaussées.
- Lenfle S. (2001). Compétition par l'innovation et organisation de la conception dans les industries amont : le cas d'Usinor. Thèse de doctorat en Sciences de gestion. Paris, Université de Marne la Vallée 354 p.
- Morin P., Sauvage D. & Hatchuel A. (2000). *L'innovation intensive et rapide par la dynamique des équipes projet chez Alcatel Optronics*. Congrès francophone du management de projet AFITEP, Paris.
- Pahl G. & Beitz W. (1977). *Engineering Design : a Systematic Approach*. Berlin, Springer-Verlag.
- Picon A. (1988). *Architectes et Ingénieurs au siècle des lumières*. Marseille, Editions Parenthèses.
- Reuleaux F. & Moll C. (1854). *Konstruktionslehre für des Maschinenbau*. Brunswick, Vieweg.
- Segrestin B., Lefebvre P. & Weil B. (2001). "The role of design regimes in the coordination of competencies and the conditions of inter-firms cooperation." *International journal of Automotive Technology and Management* 1(2).
- Simon H. A. (1979). *Models of Thought*. New haven and London, Yale University Press.
- Simon H. A. (1995). The Scientist as Problem Solver. *Complex Information Processing :the Impact of Herbert Simon*. D. Klahr and K. Kotovsky. Hillsdale, NJ, Lawrence Erl Baum Associates.
- Suh N. P. (1990). *The principles of Design*. New York, Oxford University Press.
- Szpirglas M. (2001). Théorie C-K et le quiproquo dans le théâtre de Molière. Paris, Université Dauphinep.
- Toulemonde G. & Tuchendler A. (2000). Innovation répétée et conception systématique dans une PME : le cas des "outils malins" - Avanti SA. Paris, Ecole des Mines de Paris 55.
- Vitruve (1919). *De l'architecture*. Paris, Les Belles Lettres.