



HAL
open science

Invention collective, formalisation, diagrammes

Mathias Béjean, Andrée Ehresmann

► **To cite this version:**

Mathias Béjean, Andrée Ehresmann. Invention collective, formalisation, diagrammes : Réflexions sur l'apport de la théorie mathématique des catégories. Pierluigi Basso Fossali. Créativité sémiotique et institutions du sens - dans la dialectique entre l'individuel et le collectif, édition PULIM, pp.229-252, 2021, 9782842878399. hal-03626759

HAL Id: hal-03626759

<https://hal.science/hal-03626759>

Submitted on 31 Mar 2022

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.

Invention collective, formalisation, diagrammes : réflexions sur l'apport de la théorie mathématique des catégories

Mathias Béjean

Maître de conférences HDR
Université Paris Est Créteil, IRG

Andrée Ehresmann

Professeur émérite
Université de Picardie Jules Verne, LAMFA

Introduction

Cet article s'intéresse à l'apport de la théorie mathématique des catégories pour appréhender les processus d'invention collective. En particulier, il s'agit de présenter et de discuter une approche « catégorielle » fondée sur les *systèmes évolutifs à mémoire* (MES)¹. Les MES ont été introduits dans les années quatre-vingt dix (Ehresmann et Vanbremeersch, 1991) dans le but d'analyser des systèmes complexes évolutifs intégrant une hétérogénéité de composants, d'échelles et de temporalités (Ehresmann and Vanbremeersch 2007). Conçus pour synthétiser les caractéristiques communes à des systèmes biologiques, cognitifs ou sociaux, ils ont eu des applications variées en biologie ou en traitement de l'information, mais leur principale application a été l'étude du développement des processus cognitifs d'ordre supérieur, incluant les processus de créativité et d'anticipation (modèle « MENS »). Cet article approfondit la construction d'un MES particulier, nommé D-MES (Béjean et Ehresmann, 2015), pour appréhender les processus d'invention collective.

1 De la théorie des catégories aux systèmes évolutifs à mémoire

1.1 La théorie mathématique des catégories

La « Théorie des Catégories » est un domaine conceptuel des mathématiques introduit par Saunders Mac Lane et Samuel Eilenberg dans les années 40 (Eilenberg et Mac Lane, 1945). Initialement créée pour relier algèbre et topologie, cette théorie s'est ensuite développée en une « mathématique relationnelle » (Mac Lane, 1971), au sens où elle aborde l'information sur les objets à partir de la seule considération des liens et des opérations sur ceux-ci, quelle que soit la nature ou la structure des objets considérés. En mathématiques, elle a permis d'unifier les constructions sous-jacentes à différents domaines (ex. : structure quotient, produits, sommes), en particulier via les « constructions universelles » (ex. : foncteur adjoint, (Kan, 1958)). Si ses développements autonomes ont parfois été

¹ MES pour *memory evolutive systems* en anglais

qualifiés d'« *abstract non sense* » par certains mathématiciens, la théorie de catégories est aujourd'hui mieux reconnue et son rôle dans l'étude des structures mathématiques est acquis. « *A la frontière entre mathématique, logique et métamathématique, la théorie des catégories reflète les principales opérations du 'working mathematician'.* » (Ehresmann et Béjean, 2016)

S'il est impossible d'effectuer, ici, un exposé détaillé de la théorie des catégories, ce qui ne serait d'ailleurs pas utile pour notre présent propos, il nous paraît en revanche important d'évoquer deux notions de base intervenant dans la plupart des diagrammes que nous allons utiliser dans la suite : la notion de « catégorie » elle-même, pour la distinguer de celle de Graphe, et la notion de « colimite », permettant d'aborder le problème du « recollement » entre différent (sous)-patterns d'objets.

En ce qui concerne la notion de *catégorie*, il existe beaucoup de manière de la définir, les approches pouvant varier dans la manière d'interpréter certains constituants d'une catégorie (ex. : le sens des flèches). Les MES utilisent la présentation des catégories donnée par Charles Ehresmann (1965). Cette approche ne constitue pas la présentation la plus usuelle des catégories aujourd'hui, mais elle possède l'avantage de mettre l'accent sur la nature géométrique et diagrammatique de la théorie, sans pour autant mettre de côté les approches plus logiques. Elle définit une catégorie par la donnée d'un « graphe »² G quelconque (cf. Figure 1), équipé d'une loi de composition interne partielle, associative et unitaire, permettant de composer et comparer les chemins du graphe entre eux. Un chemin est une succession de flèches, aussi appelées *morphismes*. Le trait distinctif des catégories est de privilégier l'étude des liens sur celle des objets. On parle d'approche *relationnelle*.

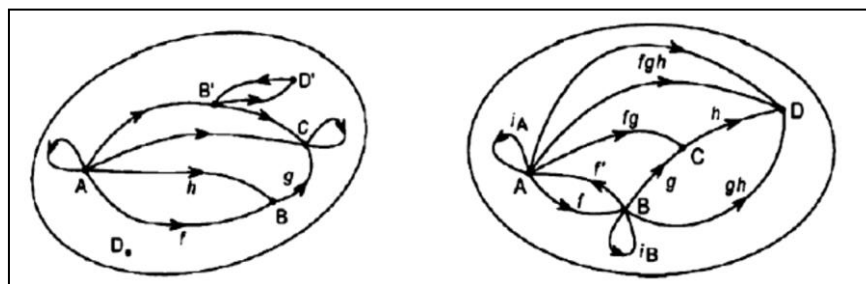


Figure 1 – Un Graphe (à gauche) et une Catégorie (à droite)

Légende : pour le Graphe, les sommets du graphe son représentés par les points A, B, B', etc., les arrêtes par des flèches telles que f (par souci de lisibilité la figure ne nomme pas toutes les flèches). Pour la Catégorie, deux flèches successives du graphe sous-jacent ont un composé. Par exemple, la flèche f de A vers B et g de B vers C ont une flèche composée fg de A vers C de sorte que chaque chemin (f, g, h) a un unique composé fgh .

Tant que l'on respecte les conditions précédentes, il est possible de construire un graphe ou une catégorie à partir de n'importe quel type de diagramme d'« objets ». Si l'on considère des villes, il est possible de considérer différents graphes ayant pour *objets* les villes, que l'on peut doter de multiples caractéristiques (superficie, nombre d'habitants, loyer moyen, etc.), et pour *liens* des chemins reliant une ville à l'autre, dotés de propriétés (longueur, trafic, etc.). Dans la mesure où nous souhaitons construire une catégorie, et non uniquement un graphe, les liens (morphisms) exprimant des relations entre les villes considérées doivent pouvoir se composer (ce qui n'est pas requis dans un Graphe). Par exemple, les morphismes pourraient représenter des routes entre les

² On considère ici des « multigraphes orientés ».

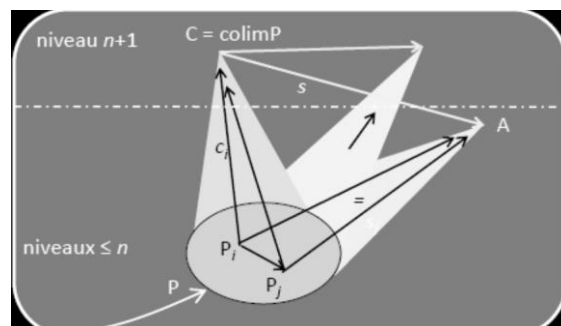
villes, munies de leur orientation et de leur longueur, le composé additionnant les longueurs. Les composés appartiennent à la catégorie, mais pas au Graphe sous-jacent (Cf. Figure 1).

Cette première approche permet de comprendre en quoi une catégorie est plus « riche » qu'un graphe en termes d'information. Mais quel peut en être l'intérêt? Une manière de faire sentir l'intérêt de cette information supplémentaire est de considérer le *recollement* d'objets. Un graphe G permet de repérer des relations plus ou moins fortes entre des acteurs (les objets), de façon, par exemple, à caractériser des sous-groupes d'acteurs pouvant devenir très connectés (les liens) dans la structure générale du système social considéré. En théorie des graphes, on parlera par exemple de *hubs* d'objets. Cependant, un tel recollement d'objets très connectés formant un sous-groupe constitué n'a pas de statut *interne* dans le graphe G . Les *objets* de G resteront toujours les acteurs individuels considérés et les *liens* du graphe les relations entre eux. Il ne sera pas possible de tenir compte de la formation d'objets nouveaux par recollement d'objets de niveaux inférieurs dans G .

Contrairement à un graphe, il est possible de donner un statut mathématique précis au problème du recollement d'objets dans une catégorie, où il est formalisé par une « colimite ». Lorsqu'elle existe, une *colimite* (Kan 1958) permet de représenter un objet formé par recollement d'objets d'ordres inférieurs, liés par des relations entre eux, et de déterminer comment il peut activer d'autres objets du système, un point très important qui permettra d'intégrer davantage d'information sur le système considéré. Par exemple, pour un groupe d'acteurs quelconque, la colimite peut formaliser le passage de relations informelles (ex. : acteurs interagissant momentanément) à une organisation formelle instituée, pouvant contractualiser en propre avec d'autres groupes institués, indépendamment des arrivées et départs de certains de ses membres (ex. la notion de « personnalité morale » en droit). Lorsqu'on s'intéresse aux dynamiques sociales, il n'est peut-être pas sans intérêt de conserver cette possibilité de recollement, présente dans les catégories, au risque sinon de se priver de l'information présente, entre autres, aux niveaux symboliques et institutionnels des groupes considérés.

Dans la suite de cet article, les colimites seront représentées par des « cônes » dans nos diagrammes (voir Figure 2). Elles interviendront, en particulier, pour modéliser : la *formation*, la *fusion* ou la *disparition* d'objets des catégories, tout au long des processus d'invention collective considérés.

Figure 2 – L'apport de la notion de colimite dans une catégorie



1.2 Les systèmes évolutifs à mémoire

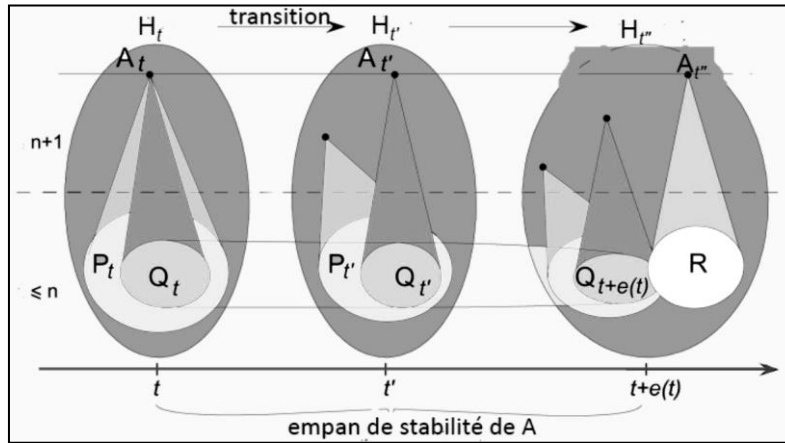
1.2.1 Temps et changement

On ne peut pas dire que les MES sont un développement mathématique de la théorie des catégories. En revanche, ils *utilisent* des notions catégorielles existantes (ex. : colimites) et ont conduit à *inventer* de nouvelles notions catégorielles (ex. catégories hiérarchiques) pour résoudre des problèmes théoriques nouveaux, posés notamment par les systèmes « vivants ». En particulier, les MES utilisent les catégories pour « plonger » un système S dans une structure décrivant ses transformations successives au cours du temps. Cette structure s'appelle un « Système Hiérarchique Évolutif » (SHE), elle utilise la notion catégorielle de « semi-faisceau de catégories » développée par Andrée Ehresmann. Comme le montre la Figure 3, un SHE formalise une *famille* de catégories H_t indexées par le temps, reliées entre elles par des *transitions*. Le temps considéré ici est donc le temps « horloge » des physiciens, il est continu. Chacune des catégories H_t décrit la *configuration* du système S en t , c'est-à-dire l'état de ses composants et des relations entre eux à chaque instant t , les transitions décrivant leurs changements au cours du temps, qu'ils résultent d'*ajout* de nouveaux composants, tout autant que de *disparition* de composants. Alors qu'elle est cruciale pour aborder la plupart des phénomènes « vivants », dont les processus d'invention collective qui nous intéressent ici, la *disparition* de composants est souvent insuffisamment considérée par les approches classiques, à l'exception notable des approches morphodynamiques (Thom, 1988).

Un composant A est alors défini par un ensemble maximal d'états successifs $A(t)$ liés par transitions. Cette définition formalise le processus d'*individuation* de A au fil du temps. C'est l'un des apports de base des MES que de proposer une ontologie dynamique et évolutive, où les composants sont considérés à partir de leur devenir en acte et non comme des substances statiques et éternelles. Les configurations H_t sont « hiérarchiques », un composant A recollant (i.e. étant *colimite* d') un pattern de composants interconnectés de niveaux inférieurs. La notion d'*identité complexe* permet de caractériser la manière dont le composant A peut exister *en tant que tel* sur une période de temps donnée (« empan de stabilité »), malgré des changements structuraux internes dans ses niveaux inférieurs (cf. Figure 13 : le passage de Pt à R). Par rapport à ce que nous avons considéré précédemment, il s'agit d'un cas particulier de recollement qui intègre en outre le temps.

Figure 3 – Un système évolutif hiérarchique

Légende : la figure montre un « Système Hiérarchique Évolutif », c'est-à-dire un « Système Évolutif » tel que les configurations H_t sont « hiérarchiques » et les transitions respectent les « niveaux ». Un système évolutif H est formé de : (i) une échelle de temps T contenue dans R ; (ii) pour chaque t de T une catégorie H_t configuration en t . (iii) pour $t < t'$, un foncteur transition kt, t' d'une sous-catégorie de H_t vers $H_{t'}$ vérifiant des conditions de transitivité.



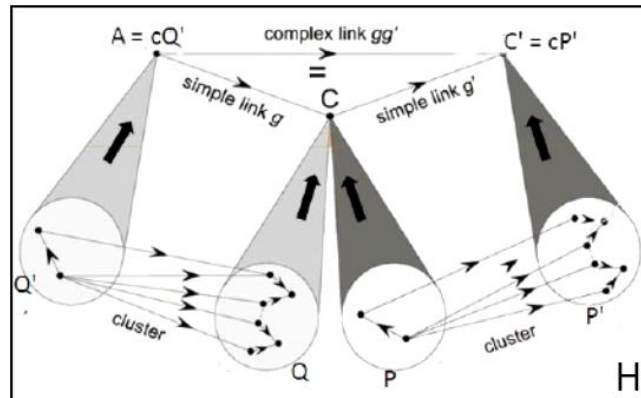
1.2.2 Multiplicité et émergence

A la complexité « verticale » de la hiérarchie précédente s'ajoute une complexité « horizontale ». Cette nouvelle complexité vient du fait que l'on souhaite considérer les cas où un composant C possède de multiples décompositions dans les niveaux inférieurs, formant ce que les MES nomment des « ramifications » différenciées de C . Le point important ici est de pouvoir donner une interprétation mathématique à l'idée qu'un objet est à la fois « même » (identité complexe, complexité verticale) et « autre » (multiplicités des ramifications, complexité horizontale). Par exemple, un groupe de concepteurs travaillant sur un prototype de robot nommé Cobby manipule à la fois « Cobby », comme le nom d'un objet de conception commun, possédant une forme de stabilité en tant que projet du groupe de travail, et comme un nom renvoyant à des imaginaires, expériences et expertises variées pour chacun des membres de ce groupe de concepteurs. Dans les MES, on dira que le nom « Cobby » active le composant C le formalisant. Celui-ci est cependant « agi » de façon multiple, chacun des membres du groupe lui conférant un sens différent.

Cette *multiplicité* est peut-être l'un des apports les plus importants des MES pour notre propos. Comme le montre la Figure 4, lorsque C admet des décompositions multiples (et évolutives) dans des *patterns* non connectés de niveaux strictement inférieurs (P et Q sur la figure), on dit qu'il est un « composant multifacettes ». Or un théorème des MES dit que l'existence de tels *composants multifacettes* dans un système, existence formalisée par le « Principe de Multiplicité », est une condition nécessaire de l'émergence dans ce système (« théorème de l'émergence »). Autrement dit, en ne considérant pas la multiplicité des composants du système étudié, on aboutit à une forme de réductionnisme qui ne permet pas d'intégrer l'émergence d'objets nouveaux, c'est-à-dire procédant d'un recollement d'objets existants dans des niveaux inférieurs mais non déductible des relations existant à ces niveaux (Cf. Figure 4). Ce recollement émergent de l'organisation *globale* des niveaux inférieurs s'écarte d'une vision combinatoire ne considérant pas l'émergence des liens complexes.

Figure 4 – Un composant multifacettes et des liens simples et complexes

Légende : la figure montre une catégorie H contenant un composant C « multifacettes » admettant 2 décompositions non connectées dans les patterns P et Q . En bas à gauche, la gerbe de liens entre des composants de Q' et Q se recolle au niveau supérieur en un lien g , en haut à gauche; de même, à droite, la gerbe entre P, P' se recolle en g' . Comme H est une catégorie, on a un lien composé gg' entre A et C' ; par contraste avec g et g' , dits « liens simples », gg' est un « lien complexe » car qui il ne recolle aucun lien des niveaux inférieurs de Q' vers P' , tout en « émergeant » de l'organisation globale des niveaux inférieurs

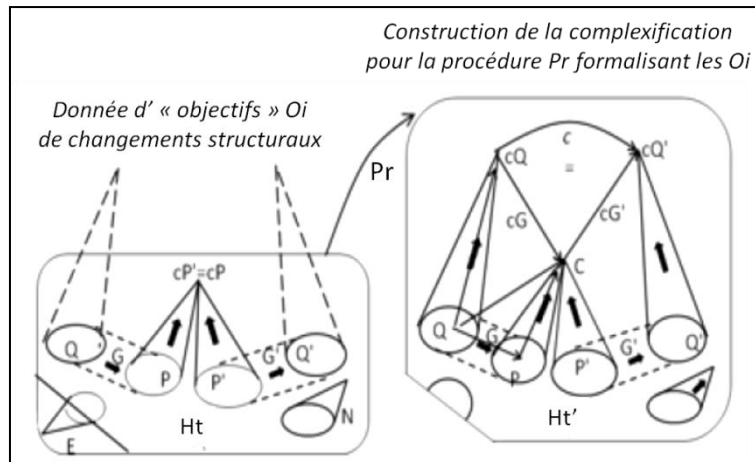


1.2.3 Formalisation des changements structuraux au niveau global

En théorie des catégories, lorsqu'on cherche à construire un objet mathématique vérifiant des propriétés souhaitées, on dit que l'on cherche à résoudre un « problème universel ». On parle de « construction universelle » lorsqu'on arrive à trouver une construction « optimale » permettant de résoudre le problème énoncé. Dans les MES, les changements structuraux sont : la fusion, l'absorption, l'ajout et la suppression de composants. Ils sont obtenus via un cas particulier de problème universel nommé « complexification ». Entre deux configurations successives H_t et H_t' , il s'agit de plonger la première configuration dans la seconde, de sorte qu'elle intègre les changements souhaités. Comme l'illustre la Figure 5, les changements structuraux souhaités sont représentés par la donnée d'une procédure Pr , les ayant pour « objectifs » O_i ; la nouvelle configuration H_t' après ces changements est modélisée par la complexification pour cette procédure.

Figure 5 – Construction de la complexification pour une procédure donnée

Légende : la figure montre la donnée d'objectifs de changements structuraux O_i (suppression de E , Q et Q' acquièrent les colimites cQ et cQ' , le cône inductif N devient un cône colimite). La complexification ajoute alors les nouveaux liens simples cG et cG' recollant les gerbes $-G$ et G' , ainsi qu'un nouveau lien complexe c composant ces deux liens.



1.2.4 Formalisation d'une dynamique à un niveau local

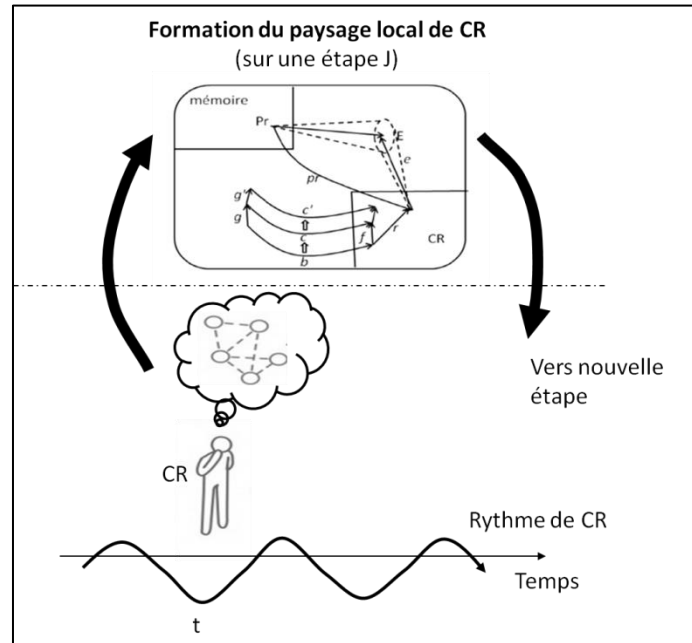
Dans les systèmes représentés par des MES, l'analyse de la dynamique globale intègre la multiplicité des dynamiques locales. Internes au système, ces dynamiques sont développées par les différents « Co-Régulateurs » (CRs), humains ou non humains, lui appartenant. Par exemple, dans une équipe de conception, chaque membre peut être formalisé par la donnée d'un sous-système CR correspondant à son rôle dans cette équipe³. Chacun de ces CRs possède sa temporalité propre, opérant par étapes ; il n'a qu'un accès partiel au système et à la « mémoire globale » de ce système, qu'il contribue à développer en utilisant ses « procepts admissibles ».

Les « procepts » (Gray et Tall, 1994) sont les concepts de procédures auxquels ce CR a accès pour intervenir dans l'action, on pourrait parler de schèmes opératoires, en ajoutant que, comme tout composant, ils sont multifacettes et évolutifs. Ils forment un sous-système de la mémoire globale à laquelle le CR a un accès *partiel* via son « paysage local ». Le *paysage local* d'un CR est une notion importante, elle formalise son monde phénoménal propre pendant une certaine étape. Comme le montre la Figure 6, le paysage se formant à chaque étape du CR, ce monde phénoménal n'est pas stable, mais évolue au rythme propre du CR au fil du temps.

³ Un membre pouvant jouer plusieurs rôles dans plusieurs équipes, il y aura autant de CRs, que de rôles et d'équipes que l'on souhaite considérer dans l'analyse.

Figure 6 – Paysage local d'un CR à l'instant t

Légende : la figure montre le « paysage local » d'un co-régulateur CR ;
il est modélisé par un système évolutif sur J (durée de l'étape de CR),
dont les composants sont les liens b vers CR qui sont actifs en t sur J (flèches courbes)



1.2.5 Interactions et genèse du commun

A un instant donné, t chaque CR opère sur son propre paysage local, mais les actions qu'il cherche à accomplir peuvent faire intervenir des parties du système hors de son paysage local. Ainsi les procédures des différents CR en t peuvent ne pas être compatibles entre elles et éventuellement provoquer des *fractures* à d'autres CR. Ainsi la procédure globale devra résulter d'échanges entre les CR, qu'on nomme « le Jeu des CRs », pouvant conduire à une cascade de fractures se répercutant entre des CR « hétérogènes » de par leurs différences de temporalités et de complexité (niveau hiérarchique). C'est notamment le cas lorsqu'un co-régulateur CR1 ayant une longue étape ne peut repérer que globalement (et non en temps réel) une suite de petits changements produits par un CR2 opérant sur une « durée » d'étape beaucoup plus courte. Dans le cas de l'invention, certains concepteurs peuvent ainsi se projeter assez « loin », manipulant des objets mentaux d'un ordre de complexité élevé, que d'autres ne parviendront pas à se représenter.

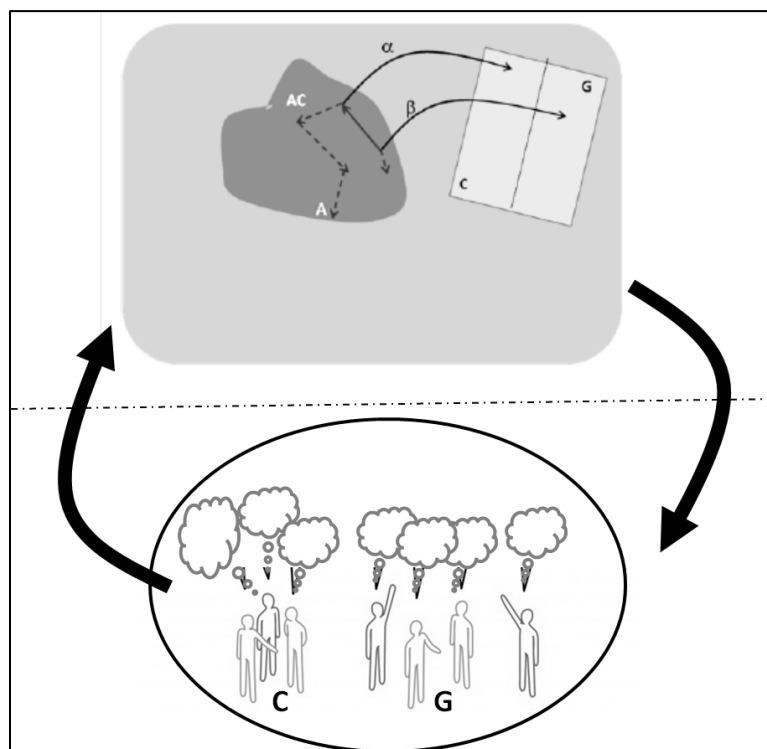
Un aspect important du Jeu des CRs, est donc de générer une dynamique commune pour rendre la coopération possible. Dans certains MES, comme le modèle MENS, cela est rendu possible en développant un sous-système particulier de la mémoire, nommé « noyau archétypal ». Celui-ci permet de former un « macropaysage », intégrant et étendant différents « paysages locaux » de CRs d'ordre supérieur. Malgré des différences notables entre la situation individuelle considérée dans MENS et la situation collective, que nous souhaitons considérer ici dans D-MES, nous avons cherché à donner un sens à la notion de *macropaysage* pour penser les conditions de l'invention collective.

2 Construction d'un D-MES

2.1 Illustration dans un cas générique de conception

Au-delà du développement conceptuel difficile à reproduire ici, un exemple va nous permettre de montrer la manière de construire un D-MES, ainsi que la façon dont les notions développées s'articulent les unes aux autres. Cette illustration considère le cas simplifié où deux « co-régulateurs », C et G, coopèrent dans une situation générique de conception, G représentant par exemple une équipe d'ingénierie et C une autre équipe de concepteurs, par exemple des designers. La Figure 7 représente la situation avant la rencontre. C et G, sur la droite du diagramme, ont un accès partiel, sur la gauche du diagramme, à des objets connectés (flèches droites) du noyau archétypal (AC), via les liens actifs α et β (flèches courbes). Les autres flèches droites en pointillés représentent des liens existants mais non activés. Cette première figure formalise le fait qu'on considère ici que C et G partagent des connaissances minimales sur leur objet de conception.

Figure 7 – Situation avant la rencontre

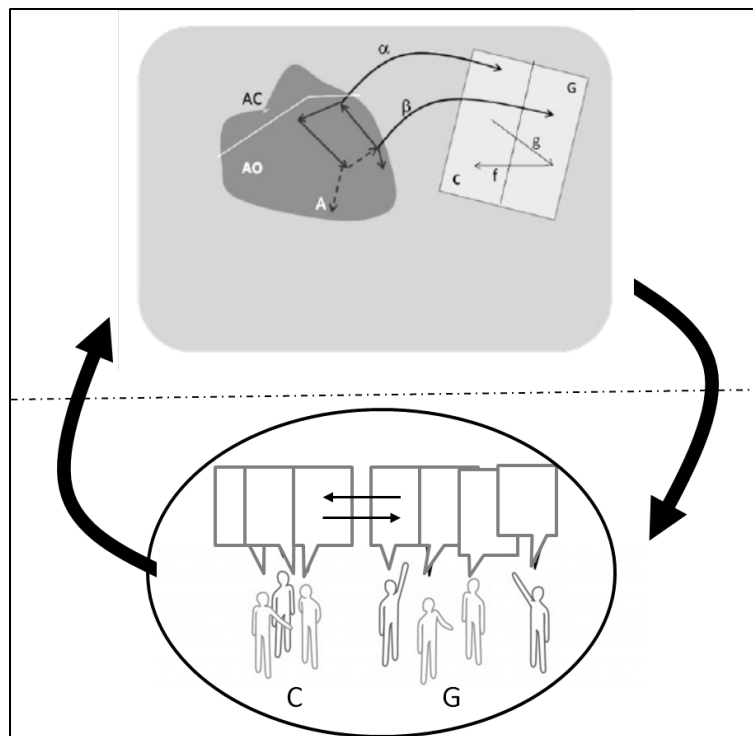


2.1.1 Formation d'un « pattern archétypal de conception »

A un certain moment t , on considère que les interactions entre les ingénieurs et les designers commencent à mobiliser leur attention de façon accrue. Ceci est modélisé, à droite de la Figure 8, par les liens f et g (flèche droite) qui formalisent les échanges d'informations entre C et G, et, à

gauche du diagramme, par la formation d'un pattern particulier dans la mémoire, nommé « pattern archétypal de conception », du fait de l'activation de nouveaux liens dans AC (flèches droites pointillées devenues pleines). Cela dit, à ce stade, les interactions entre les parties prenantes ne sont pas encore suffisantes pour « mélanger leurs imaginations » dans un espace de conception commun, les échanges entre eux demeurant encore largement « interindividuels », plutôt que « transindividuels » au sens du philosophe Gilbert Simondon (1989).

Figure 8 – Formation du « pattern archétypal de conception » AO

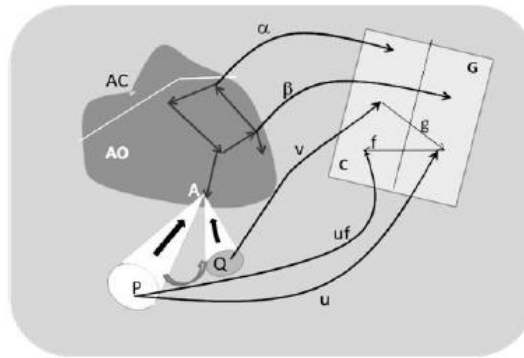


2.1.2 Exploration de différentes facettes d'un objet

Avec le temps, les échanges d'information peuvent conduire à des apprentissages réciproques plus élaborés entre les parties prenantes. Par exemple, on peut imaginer que la conversation débute par un échange de connaissances générales sur le projet de conception, puis évolue vers une discussion plus riche sur la manière de lui « donner sens », de travailler son propos signifiant. Ceci peut se modéliser comme suit : à gauche de la Figure 9, tous les liens existants sont maintenant activés (il n'y a plus de flèches droites en pointillées, mais uniquement des pleines), formant une « boucle archétypale » (carré) qui propage l'activation à deux décompositions P et Q d'un « même » objet A, représentant les évocations associées au concept initial.

Autrement dit, au début, l'équipe de designers, représentée par C, ne perçoit, dans son paysage local, que la décomposition Q (portant sur des connaissances générales) via le lien v (flèche courbe au centre), lui permettant d'exprimer sa vision à l'équipe d'ingénieurs, présentée par G, via le lien g . Puis, à mesure que G partage avec lui son information sur la décomposition P via le lien u (flèche courbe en bas), C se met progressivement à percevoir la décomposition (nouvelle pour lui) dans son paysage local via le nouveau lien uf (flèche courbe entre u et v).

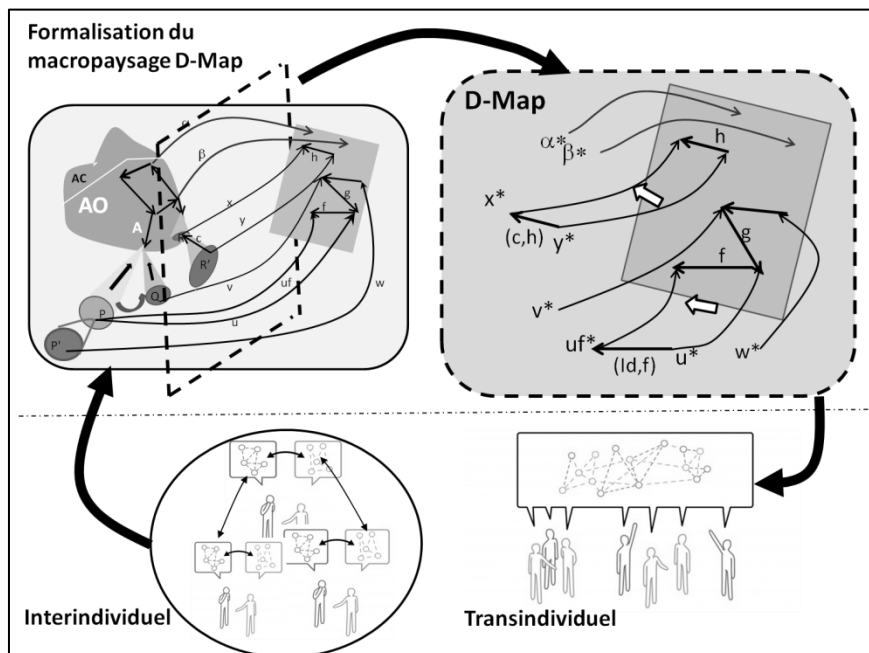
Figure 9 – Apprentissages réciproques et propagation activée par AO



2.1.3 Formation d'un « macropaysage » collectif de conception

Nous considérons maintenant le cas où, à un certain moment de la coopération entre acteurs la richesse des échanges rend possible le développement de relations « transindividuelles ». Cette possibilité vient du fait que chacune des parties prenantes accepte de se laisser « affecter », par ce que lui communique l'autre partie, à un niveau plus profond qu'un simple échange d'informations; des ressentis personnels, des évocations et des expériences lointaines peuvent être engagées de façon consciente ou non. Ce phénomène de genèse transindividuelle se modélise ainsi : comme le montre la Figure 10, l'exploration de la décomposition de P se prolonge à P' grâce aux liens actifs u et v , ainsi qu'à une nouvelle ramification RR' (au centre sur le diagramme de gauche). Le diagramme de droite représente le macropaysage D-Map. Sa construction ne peut être explicitée ici, mais l'œil, à gauche, suggère qu'elle s'opère comme une « vision en coupe » des objets et liens entre eux activés dans le diagramme de gauche. La distinction entre C et G n'est plus formalisée, la conception s'opérant dorénavant dans un espace commun qu'il est possible de considéré en tant que tel.

Figure 10 – Genèse « transindividuelle » et construction du macropaysage D-Map

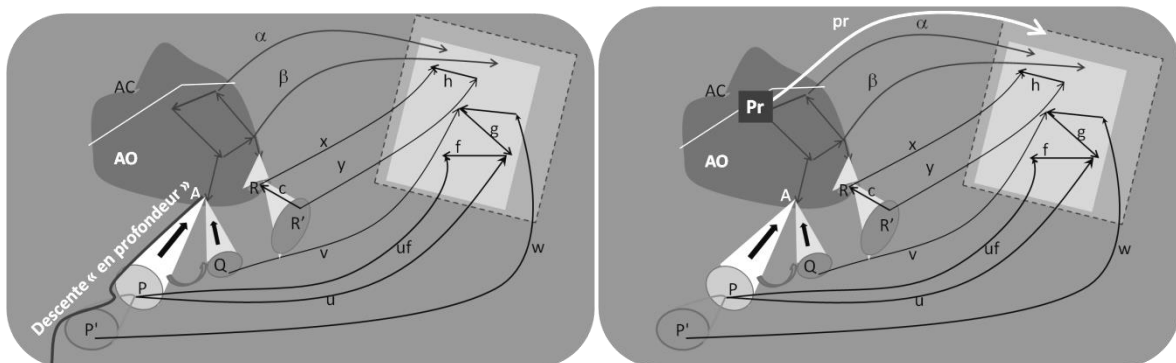


2.1.4 Rétrospection et prospection dans le macropaysage

A ce stade, les échanges entre les protagonistes ont été suffisamment riches et profonds pour activer des empreintes mémorielles complexes et variées (le *pattern archétypal*), conduisant à la formation d'un espace de pensée commun, où se mélangent les efforts d'imagination et de conception (le « macropaysage »). D-MES montre que ce type de macrostructure est une condition de l'émergence d'un nouvel objet signifiant, la formation de D-Map permettant à C et G d'activer et de partager des nouvelles ramifications dans le macropaysage, c'est-à-dire de nouvelles significations.

Le macropaysage permet de descendre « en profondeur » dans la mémoire accessible, c'est-à-dire de mobiliser des empreintes mémorielles de plus en plus proches des sensations. On appelle « rétrospection » l'opération canonique visant à analyser et étendre le D-Map, permettant de faire sens de la situation en mobilisant la sensibilité collective de façon accrue. Comme le montre le diagramme de gauche de la Figure 11, plus la descente est profonde, plus le D-Map s'étend (accroissement du carré en pointillé à droite sur le diagramme). Par ailleurs, on appelle « prospection » l'opération canonique visant à chercher et évaluer des (compositions de) procédures Pr dans le D-Map via le lien *pr* (flèche en blanc) en vue de transformer la situation de conception.

Figure 11 – Rétrospection et prospection dans le macropaysage D-Map



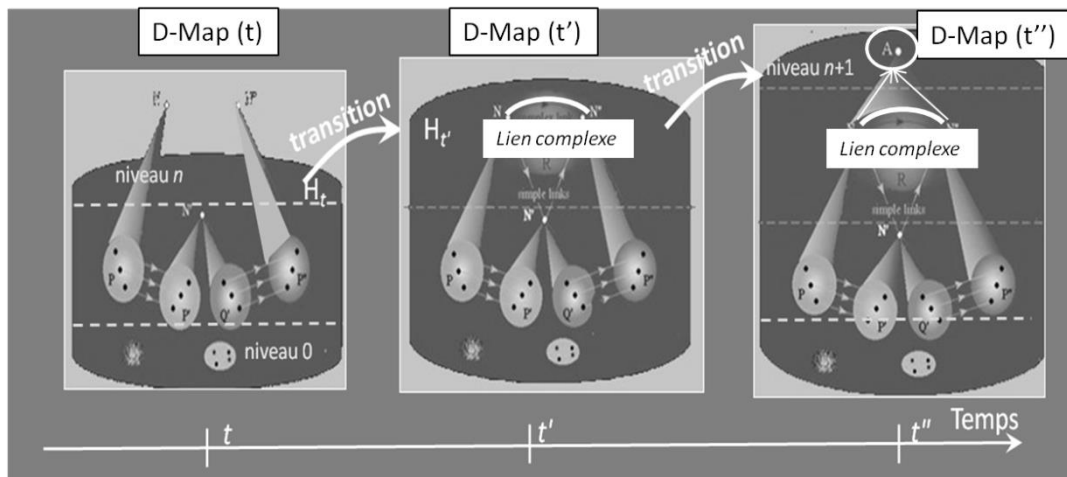
2.1.5 Invention collective et macropaysage

D'un point de vue philosophique, on peut refuser l'existence du macropaysage. Mais ne considérant alors que le niveau interindividuel des échanges entre concepteurs, cette vision conduit souvent à une forme de réductionnisme de la production collective globale, ne la formalisant qu'à partir de la *combinaison* d'actes individuels locaux distribués dans le temps et l'espace. Les MES tentent de dépasser ce réductionnisme « combinatoire ». Ainsi, le « Théorème de complexification itérée » (Ehresmann et Vanbremeersch, 2007) montre qu'« une double complexification avec des liens complexes ne se réduit pas à une seule complexification de la première catégorie ».

Dans le cas des D-MES, ce théorème rend compte de l'importance de la notion de « macropaysage » pour comprendre la genèse d'un objet nouveau, irréductible à la combinaison des actes locaux distribués dans le temps et l'espace. La Figure 12 illustre la genèse d'un nouvel objet A sur le diagramme D-Map (t''), impliquant une complexification itérée du D-Map entre t et t'' , non

déductible de la situation initiale D-Map (t). Ceci peut être rapproché de la notion de « créativité transformationnelle » au sens de Margareth Boden (2003)

Figure 12 – Complexification itérée de D-Map générant un objet « irréductible » A



3 Discussion

3.1.1 Une intégration des concepts fondamentaux issus des *design studies*

Si l'on considère l'invention collective en tant qu'elle met en jeu une activité de conception, il n'est pas inintéressant de regarder ce qu'en dit la littérature. Les *design studies* font partie de ces nouveaux corpus étudiant spécifiquement les activités de conception et d'invention, y compris en ingénierie, architecture et design. Ces dernières années, les notions de « situations de conception » et « d'activités de conception » sont devenues centrales (Reymen et al., 2006). Les situations de conception intègrent les objets, processus et contextes. Les activités de conception rappellent que les situations ne se transforment pas uniquement d'elles-mêmes, mais via les opérations de différents acteurs. Malgré des travaux sur la dynamique « évolutionnaire » (Dorst et Cross, 2001 ; Hybs et Gero, 1992) des processus de conception, la multiplicité est encore peu étudiée, de même que le lien entre individuel et collectif dans ces situations

Les travaux s'intéressant à la dynamique d'évolution d'un système ont tendance à prendre une perspective explicative externe ne rendant pas compte du « Jeu » des dynamiques internes, lié aux multiples temporalités et régimes d'expériences propres des acteurs du système étudié. Certaines approches comme celle des "*cognitive systems*" (Hutchins, 1995), des "*design team mental models*" (Badke-Schaub et al., 2007 ; Cannon-Bowers, Salas et Converse, 1993 ; Dong, Kleinsmann et Deken, 2013) ou des "*co-design processes*" (Sanders et Stappers, 2008) abordent ces questions à leur manière. Elles s'intéressent ainsi au caractère situé et distribué des processus collaboratifs de conception, intégrant le contenu cognitif, conatif, voire affectif des acteurs (Badke-Schaub et Eris, 2014). Cependant, elles ne modélisent pas les processus de transformation eux-mêmes, tenant peu compte du temps et du jeu des dynamiques.

Dans ce contexte, l'apport des D-MES (Béjean et Ehresmann, 2015) est de proposer une approche conceptuelle pour l'étude des processus d'invention collective. Définissant les notions de « *design situation* » et « *design activities* » de la littérature (Howard, Culley et Dekoninck, 2008 ; Reymen et al., 2006), les D-MES les articulent à la notion de « *design memory* », généralisant les travaux de John Gero sur la « *constructive memory* » en situation de conception, (Gero, 1999 ; Gero et Fujii, 2006 ; Gero et Smith, 2009 ; Smith et Gero, 2005), l'étendant aux processus affectifs et non-conscients (Badke-Schaub et Eris, 2014). La Figure 13 montre l'articulation dynamique de ces trois concepts.

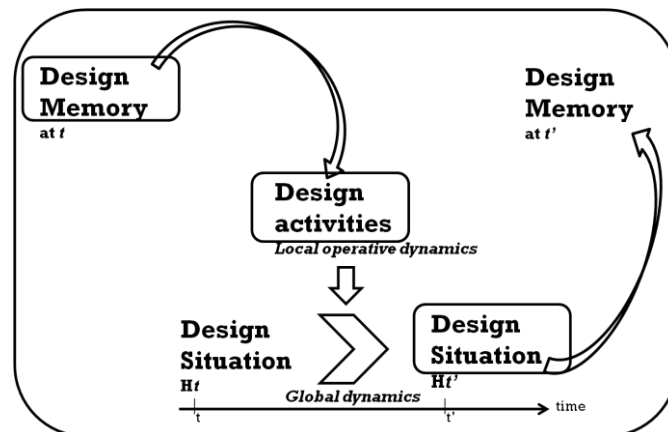


Figure 13 – Synthèse de l'approche intégrative D-MES

3.1.2 Objets archétypaux et objets frontières

Un aspect important du travail est de montrer le rôle du *pattern archétypal de conception*, formé d'empreintes particulières de la mémoire collective nommés « objets archétypaux ». Ce sont des composants de la mémoire d'ordre supérieur, intégrant des empreintes significatives de différentes modalités (conceptuelles, événementielles, procédurales, affectives, etc.), possédant de nombreuses « ramifications » (avec possibilité de balancements entre elles), pouvant être activées par des processus conscients ou non.

Dans le contexte conceptuel et méthodologique des D-MES, l'enrichissement des objets archétypaux est une condition de la genèse d'un commun signifiant pour les acteurs. Ces objets sont en effet à la base de la construction du macropaysage, cet espace de pensée commun dans lequel ont lieu les opérations canoniques de « rétrospection », « prospection » et « complexification ».

Un prolongement de ce travail est de discuter de l'intérêt de la notion d'objets archétypaux pour l'analyse des processus d'innovation, notamment à la confrontant à celle d' « objet frontière » (Star et Griesemer, 1989). Cette discussion, engagée dans des travaux ultérieurs (Ehresmann et al., 2018), mérite encore un approfondissement.

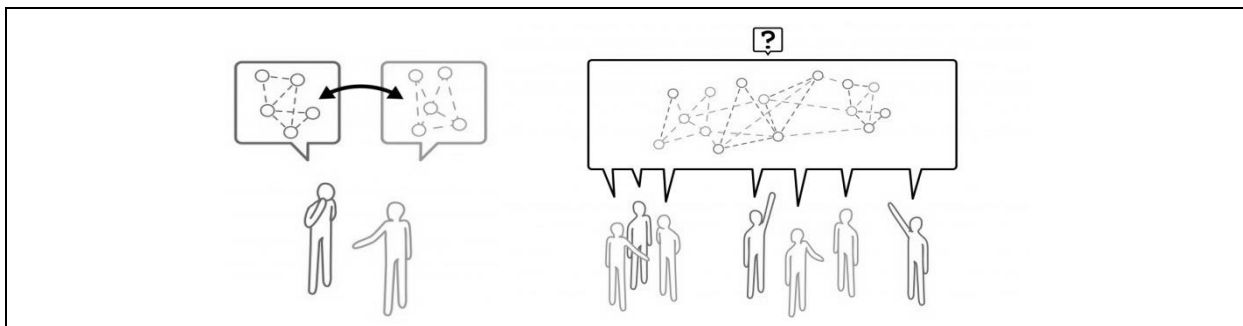
3.1.3 Une approche du « Jeu » d'acteurs hétérogènes en situation de conception

Les D-MES proposent d'aborder les interactions d'acteurs hétérogènes en situation de conception, via la notion de « Jeu des CRs ». Ainsi, grâce à la notion de « paysage local » d'un CR, les D-MES

formalisent le contenu phénoménologique de chacun des protagonistes de la situation de conception, tenant compte de leurs connaissances, sensibilités et rythmes propres. Les transformations successives que les interactions de ces protagonistes produisent sont, elles, abordées grâce à la notion de « système hiérarchique évolutif », permettant d'analyser la dynamique globale de formation d'objets et modes opératoires nouveaux, d'ordre de complexité croissant.

La contribution est ici de formaliser les opérations et structures sous-jacentes aux processus de conception et d'invention impliquant des acteurs hétérogènes, interagissant entre eux pour développer des objets et processus nouveaux en situation, tout en préservant leurs temporalités et expériences idiosyncratiques au fil du temps. De ce fait ils permettent de dépasser la vision « interindividuelle », pour intégrer une vision « transindividuelle » au sens de Simondon (1989) (cf. Figure 14), donnant un statut aux constructions communes (pattern archétypal de la mémoire et macropaysage) permettant les opérations d'invention collective.

Figure 14 – Passage d'une vision interindividuelle (à gauche) à une vision transindividuelle (à droite)



3.1.4 L'apport des catégories : une critique du Graphe-Réseau

Ces dernières décennies, la notion de « réseau » s'est imposée en sciences sociales. Par exemple, dans leurs travaux sur l'innovation et les réseaux sociotechniques, Callon et Latour (Akrich et al., 2013) mobilisent la notion de réseau de façon centrale pour élaborer une théorie du social fondé sur l'« acteur-réseau » (*Actor-Network Theory*). Dans cette perspective, la société est « plate » et l'analyse des institutions, des entreprises ou de tout autre groupe social en tant que groupe doit s'effacer devant la considération des séquences d'actions individuelles qui forment le vrai acteur. Outre les aspects idéologiques de cette posture, un point déterminant nous paraît être que ce développement théorique est sous-tendu d'une grammaire élémentaire héritée de la théorie des graphes, un graphe signifiant ici la donnée d'un ensemble de « sommets » et d'« arêtes » (ou d'arcs) entre eux, représentant respectivement les « actants » du réseau et les relations entre eux.

Or les graphes induisent une certaine pensée de la relation au sein de laquelle les échelles disparaissent de l'analyse. Nous l'avons évoqué plus haut, un graphe ne peut pas donner de statut interne aux liens qu'un groupe d'actants, en tant que tel, peut entretenir avec le système. Tout se passe comme si l'impossibilité mathématique d'un graphe à donner un statut théorique à une entité collective formée d'entités plus élémentaires appartenant au même réseau, se transforme en une

impossibilité, sinon idéologique, du moins théorique, à donner un statut à ces entités dans la discipline d'application concernée, ici la sociologie des réseaux sociotechniques.

Autrement dit, si la notion de réseau d'innovation peut contribuer à la compréhension des processus complexes d'interactions entre acteurs hétérogènes, un examen approfondi est nécessaire à son usage, car elle est presque toujours sous-tendue d'une grammaire élémentaire héritée de la théorie des graphes. L'influence de ce que l'on pourrait appeler la pensée du « graphe-réseau » s'illustre particulièrement dans la sociologie de l'innovation, mais elle concerne d'autres sciences sociales. Selon l'objectif de la recherche, cette orientation peut nuire à la compréhension des systèmes considérés. En utilisant des catégories, il est possible de raisonner de façon tout aussi rigoureuse et ancrée rationnellement, sans aboutir à un réductionnisme combinatoire.

4 Conclusion et ouverture

Les D-MES proposent une appréhension mathématisée des relations entre individuel et collectif dans les situations d'invention collective. Ayant déjà mentionné les différents apports de notre approche dans la section précédente, nous souhaitons, en conclusion, revenir brièvement sur l'esprit général de notre travail et sur les rapports entre les mathématiques et les SHS.

En effet, comme le rappelle Franck Varenne (2016), la formalisation en sciences sociales est souvent rattachée à la notion de « calcul », l'ambition étant généralement de rendre « calculables » les phénomènes étudiés. De la logique des sciences morales chez Leibniz, jusqu'à la formalisation d'une mathématique sociale à partir de Condorcet, l'idée est d'élaborer un « calcul des faits sociaux » sur le modèle des sciences expérimentales de l'époque. En dépit de quelques évolutions récentes, cette ambition reste dominante dans de nombreuses disciplines académiques. Or d'autres usages des mathématiques sont possibles, usages dans lesquels notre travail s'inscrit mieux.

Ainsi, là où l'usage d'un *calcul* suppose de se situer dans un champ d'expérience, ou un domaine, déjà constitué pour le quantifier, un autre usage peut se situer en amont de la genèse de ce champ d'expérience, ou domaine, en vue de l'étendre et l'enrichir. Bien que plus rare, cet usage en *compréhension* des mathématiques a jalonné l'histoire épistémologique des sciences humaines et sociales, en particulier dans sa période « structuraliste ». Un exemple connu est celui de l'usage de la Théorie des groupes par Claude Lévi-Strauss, la notion mathématique de « Groupe de Klein » ayant été au fondement du concept de « structure élémentaire de la parenté » chez l'ethnologue français.

Les MES s'inscrivent dans cet usage des mathématiques visant un accroissement de compréhension. En outre, plutôt que de rechercher les invariances d'un système en se plaçant à l'extérieur de ce dernier, les MES visent à *s'immerger* dans le déroulement du devenir en acte d'un système donné, dont la totalité n'est accessible à aucun acteur, pas même au modélisateur. C'est en ce sens qu'il ne s'agit pas de faire un « modèle » classique, mais d'explorer un champ de préoccupation selon une approche mathématisée. Ce type de *formalisation immersive* vise à produire une compréhension localisée, enrichie mais inachevée, appelant l'invention de notions nouvelles.

5 Références

- AKRICH M., AKRICH M., CALLON M., LATOUR B., STRUM S., 2013, *Sociologie de la traduction Textes fondateurs*, Presses des Mines, 401 p.
- BADKE-SCHAUB P., ERIS O., 2014, « A Theoretical Approach to Intuition in Design: Does Design Methodology Need to Account for Unconscious Processes? », dans CHAKRABARTI A., BLESSING L.T.M. (dirs.), *An Anthology of Theories and Models of Design SE - 17*, Springer London, p. 353-370.
- BADKE-SCHAUB P., NEUMANN A., LAUCHE K., MOHAMMED S., 2007, « Mental models in design teams: a valid approach to performance in design collaboration? », *CoDesign*, 3, 1, p. 5-20.
- BÉJEAN M., EHRESMANN A.C., 2015, « D-MES: Conceptualizing the Working Designers », *The International Journal of Design Management and Professional Practice*, 9, 4, p. 1-20.
- BODEN M.A., 2003, « The Creative Mind: Myths and Mechanisms »,.
- CANNON-BOWERS J.A., SALAS E., CONVERSE S., 1993, « Shared mental models in expert team decision making », dans CASTELLAN J.N.J. (dir.), *Individual and group decision making: current issues*, Hillsdale, New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers.
- DONG A., KLEINSMANN M.S., DEKEN F., 2013, « Investigating design cognition in the construction and enactment of team mental models », *Design Studies*, 34, 1, p. 1-33.
- DORST K., CROSS N., 2001, « Creativity in the design process: co-evolution of problem–solution », *Design Studies*, 22, 5, p. 425-437.
- EHRESMANN A.C., BEJEAN M., 2016, « Le “Jeu des perles de verre” revisité : tissage de dynamiques émergentes par la méthodologie MES », *Glass Bead*, Site O. Castalia: le jeu des fins et des moyens.
- EHRESMANN A.C., TUOMI I., MILLER R., BÉJEAN M., VANBREMEERSCH J.-P., 2018, « Towards a Formal Framework for Describing Collective Intelligence Knowledge Creation Processes that ‘use-the-future’ », dans *Transforming the future : anticipation in the 21st century.*, Routledge, UNESCO.
- EHRESMANN A.C., VANBREMEERSCH J., 1991, « Un modèle pour des systèmes évolutifs avec mémoire, basé sur la théorie des catégories », *Revue Internationale de Systémique*, 5, 1, p. 5-25.
- EHRESMANN A.C., VANBREMEERSCH J.-P., 2007, *Memory Evolutive Systems - Hierarchy, Emergence, Cognition*, Elsevier, Amsterdam (Studies in Multidisciplinarity), 1-259 p.
- EHRESMANN C., 1965, *Catégories et structures*, Dunod.
- EILENBERG S., LANE S. MAC, 1945, « General theory of natural equivalences », *Transactions of the American Mathematical Society*, 58, 2, p. 231-294.
- GERO J.S., 1999, « Recent Design Science Research: Constructive Memory in Design Thinking », *Architectural Science Review*, 42, 2, p. 97-99.
- GERO J.S., FUJII H., 2006, « A computational framework for concept formation for a situated design agent », 13, 2000, p. 361-368.

GERO J.S., SMITH G.J., 2009, « Context, situations, and design agents », *Knowledge-Based Systems*, 22, 8, p. 600-609.

GRAY E.M., TALL D.O., 1994, « Duality, Ambiguity and Flexibility: A Proceptual View of Simple Arithmetic », 26, 2.

HOWARD T.J., CULLEY S.J., DEKONINCK E., 2008, « Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature », *Design Studies*, 29, 2, p. 160-180.

HUTCHINS E., 1995, *Cognition in the Wild*, Cambridge, MA : MIT press.

HYBS I., GERO J.S., 1992, « An evolutionary process model of design », *Design Studies*, 13, 3, p. 273-290.

KAN D.M., 1958, « Adjoint Functors. », *Trans. Am. Math. Soc.*, 89, p. 294-329.

LANE S. MAC, 1971, *Categories for the working mathematician*, New-York, Springer-Verlag.

REYEMEN I.M.M.J., HAMMER D.K., KROES P. A., AKEN J.E., DORST C.H., BAX M.F.T., BASTEN T., 2006, « A domain-independent descriptive design model and its application to structured reflection on design processes », *Research in Engineering Design*, 16, 4, p. 147-173.

SANDERS E.B.-N., STAPPERS P.J., 2008, « Co-creation and the new landscapes of design », *Co-design*, 4, 1, p. 5-18.

SIMONDON G., 1989, *L'individuation psychique et collective*, Paris, Aubier.

SMITH G.J., GERO J.S., 2005, « What does an artificial design agent mean by being 'situated'? », *Design Studies*, 26, 5, p. 535-561.

STAR S.L., GRIESEMER J.R., 1989, « Institutional Ecology , "Translations" and Boundary Objects : Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-39. », *Social studies of science*, 19, 3, p. 387-420.

THOM R., 1988, *Esquisse d'une sémiophysique: Physique aristotélicienne et Théorie des Catastrophes*, Paris, InterEditions, 288 p.

VARENNE F., 2016, *Modéliser le social*, Paris, Dunod.