

COMMENT MODELISER LA COMPLEXITE ET L'EMERGENCE EN ART

par *Andrée C. Ehresmann** et *Jean-Paul Vanbremeersch*

*Université de Picardie Jules Verne, ehres@u-picardie.fr

RESUME. L'émergence d'une œuvre d'art est l'expression d'une dynamique individu/société se développant dans le système sociétal d'un 'monde artistique' où coexistent et se développent des courants artistiques de multiples niveaux de complexité et temporalités, liés à des mouvements de pensée, des mouvements sociaux, culturels, scientifiques, technologiques. Ceux-ci s'intègrent dans la mémoire personnelle d'un artiste (son "noyau archétypal"), formant un objet complexe à multiples lectures, fruit de la résonance/confrontation avec ses mémoires (tant épisodiques que sémantiques et procédurales), qui 'mûrit' sous l'effet de boucles archétypales auto-entretenues. La réalisation d'une œuvre d'art repose sur cette dynamique interne. Une fois créée, l'œuvre pourra contribuer à l'émergence, au niveau sociétal, d'une nouvelle expression artistique par un processus de complexification des stimuli initiaux via le média représenté par l'artiste. Ce processus est analysé dans le cadre de nos "Systèmes Evolutifs à Mémoire", un modèle mathématique pour des systèmes complexes tels les systèmes cognitifs ou culturels.

0. Introduction

Cet article développe une conférence donnée dans le cadre du Colloque : "La Complexité dans les Arts et la Science" (Festival Agora, Centre Pompidou, Paris, Juin 2009). Une reproduction des différentes œuvres mentionnées pourra être trouvée dans l'animation de la conférence, à l'adresse :

<http://pagesperso-orange.fr/vbm-ehr/AGORA/00IRC.htm>

Notre but est d'analyser les problèmes suivants en cherchant à les modéliser:

- Complexité intrinsèque d'une œuvre d'art (partition de musique, tableau, sculpture, livre...) en tant que telle, évaluée en cherchant à la décomposer en éléments plus simples de nature matérielle (séparer les portées, les accords,...; décrire les objets qu'un tableau représente, leur couleur...), ou selon les sensations et émotions qu'elle provoque chez l'observateur.
- Complexité de la création (par le compositeur ou par l'interprète) d'une œuvre d'art tenant compte des interactions entre la sensibilité et l'expérience personnelle du créateur et le contexte artistique et social où elle va pouvoir émerger.
- Complexité de l'accueil de l'œuvre par les autres artistes, puis le public en général, et de ses répercussions pouvant éventuellement permettre à terme l'émergence d'un nouveau courant artistique.

Ces problèmes seront abordés dans le cadre des *Systèmes Evolutifs à Mémoire* (en anglais *Memory Evolutive System*), un modèle mathématique pour des systèmes complexes, basé sur la théorie des catégories, que nous développons depuis 25 ans, et pour lesquels nous renvoyons à notre livre (Ehresmann & Vanbremeersch, 2007). Ils seront illustrés par l'évolution de la peinture et de la sculpture au début du 20^e siècle, bien que notre modèle puisse aussi s'appliquer ailleurs.

Tout d'abord il faut préciser ce que nous entendons par complexité et émergence (les deux notions étant liées). Il existe de nombreuses définitions de la complexité d'un objet ou d'un système ; toutes dépendent du point de vue auquel on se place. Citons en quelques unes :

- Pour Weaver (1948), la complexité d'un système mesure le degré de difficulté de prédire les propriétés du système connaissant celles de ses parties. Il distingue une complexité "désordonnée" correspondant soit à un système purement aléatoire, soit si compliqué qu'on ne peut pas le décomposer ; et une complexité "ordonnée" où les interactions entre les différentes parties conduisent à une structure émergente.
- Simon (1969) relie complexité et hiérarchie : un objet d'un certain niveau de complexité est décomposable en plusieurs objets du niveau inférieur, chacun de ceux-ci étant lui-même décomposable en objets de niveau

inférieur, ainsi de suite, jusqu'à construire une 'ramification' (en arbre) de l'objet jusqu'au niveau inférieur de la hiérarchie.

- Kolmogoroff (1968) et Chaitin (1975) donnent une description algorithmique de la complexité d'un programme, à l'aide de la plus petite longueur des suites de bits le décrivant, celle-ci dépendant évidemment du langage algorithmique choisi. Cette notion a été utilisée en art (Casti, 2003).
- Les définitions plus inspirées par la physico-mathématique relient la complexité d'un système à la non-prédictibilité de son comportement : système dynamique non-linéaire avec forte dépendance des conditions initiales, avec bifurcations ou attracteur étrange, théorie du chaos, système dissipatif (Prigogine & Glansdorff, 1971), catastrophes (Thom, 1974), fractales (Mandelbrojt, 1975 ; pour des applications à l'art, cf. Taylor, 2003).

Dans tous les cas, la complexité est liée à l'idée d'un système analysé dans un contexte donné, à l'aide de décompositions multiples en composants plus élémentaires liés entre eux de manière spécifique, pouvant varier au cours du temps sans que le changement soit prédictible à long terme, avec émergence de nouvelles propriétés au niveau global du système relativement à ses composants. Toutes ces propriétés sont prises en compte dans notre modèle des Systèmes Evolutifs à Mémoire.

1. Complexité d'une œuvre d'art

A. Exemple : un tableau de Kandinsky

Pour analyser la complexité d'un tableau, nous pouvons déterminer les divers éléments qui le composent et la manière dont ils s'ajustent entre eux ; puis recommencer à décomposer de même chacun d'eux, et ainsi de suite pour obtenir après plusieurs étapes une ramification plus ou moins longue selon la complexité 'verticale' du tableau. Encore faut-il préciser ce que nous entendons par 'éléments' ce qui, surtout dans des oeuvres abstraites, sera plus ou moins difficile. Prenons l'exemple du tableau "*Composition VII*" de Kandinsky (1911) que l'auteur qualifie de l'œuvre "la plus complexe" qu'il ait produite.

La complexité relative à la couleur sera évaluée en prenant pour 'éléments' les parties du tableau relevant d'une certaine tonalité de couleurs et la manière dont elles s'ajustent entre elles. On peut aussi décomposer en régions où la densité est plus ou moins grande ; ainsi une diagonale divise le tableau en une zone plus dense et agitée (en haut) et une plus calme. Des motifs plus ou moins nets sont visibles, comme un cavalier en bas à droite ou un bateau en bas à gauche.

Si l'on pense à la conception et à la production matérielle du tableau, on pourra parler de complexité 'temporelle' puisqu'il a nécessité une trentaine d'études préalables dans lesquelles le tableau a progressivement pris forme.

D'un point de vue plus psychologique, le tableau admet plusieurs lectures (nous parlerons de complexité 'horizontale'). Ainsi des spécialistes y distinguent les thèmes (développés par Kandinsky dans d'autres toiles) du Déluge, du Jugement dernier et de la Résurrection. Sans compter la complexité des émotions évoquées par la résonance des différentes couleurs entre elles, à laquelle l'auteur était particulièrement attaché.

B. Complexité 'verticale'. Système hiérarchique (Ehresmann & Vanbremeersch, 1987)

Pour parler d'objet complexe, il faut pouvoir le 'comparer' à d'autres objets, donc partir d'un certain système formé d'objets, avec des relations ou liens entre eux de diverses natures, permettant de construire, à l'intérieur du système, des décompositions de l'objet considéré en éléments 'plus simples', tout en tenant compte de leurs positions respectives et interactions éventuelles. Pour cela, le système doit donc avoir une hiérarchie 'verticale' d'objets, de sorte qu'un objet d'un certain niveau soit obtenu 'de bas en haut' par assemblage d'objets de niveaux inférieurs respectant certains liens entre eux ; un objet complexe C de niveau n sera obtenu par itération d'un tel processus d'assemblage. Inversement donné l'objet C on pourra construire une ramification de cet objet par décompositions successives de ses éléments en éléments de plus en plus simples.

Un tel système hiérarchique sera modélisé à l'aide de la notion de *catégorie hiérarchique* que nous allons brièvement rappeler (cf. l'appendice pour plus de précisions). Le système formé des objets et des liens entre eux est représenté par une *catégorie S*, c'est-à-dire un (multi-)graphe orienté (avec éventuellement des flèches fermées) sur lequel on a une loi de composition associant à chaque chemin du graphe (= suite de flèches consécutives) de A vers B une unique flèche de A vers B, cette composition étant associative et chaque objet admettant une flèche 'identité'. Une décomposition d'un objet C de S est représentée par un pattern (ou diagramme) P formé d'une famille d'objets P_i et de certains liens (flèches dans S) distingués entre eux. On dira que C *recolle* (en anglais: *binds*) P si C est la *colimite* de P au sens des catégories. Ceci signifie qu'il existe un *lien collectif* formé de flèches f_i de chaque P_i vers C, commutant avec les liens distingués de P, et que C est l'objet 'optimal' pour cette propriété (i.e., si un autre objet A a la même propriété, il existe une unique flèche de C vers A). Ce qui importe ici n'est pas tant la définition exacte que l'idée générale de recollement : C a le même

comportement que le pattern dont les objets opèrent en synergie via leurs liens distingués. Elle entraîne que l'objet complexe C a des *propriétés émergentes* par rapport aux propriétés de ses composants P_i (que le modèle permet de distinguer), traduisant ainsi la notion de *réductionnisme émergent* (au sens de Bunge, 1979).

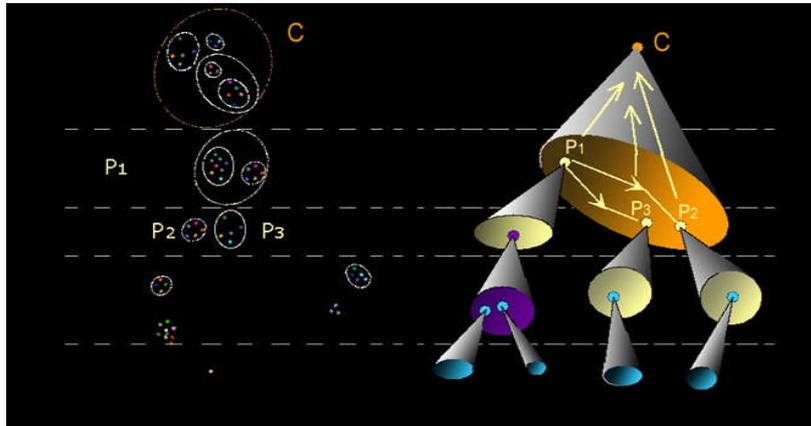


Figure 1 : A gauche, formation progressive d'un objet complexe C par recollement d'objets plus simples. A droite modèle catégorique de la ramification de C, déployée 'de haut en bas'.

La catégorie S est *hiérarchique* si ses objets sont répartis en niveaux 'de complexité' de sorte que tout objet C d'un niveau $n+1$ recolle au moins un pattern d'objets liés de niveau inférieur ou égal à n . Dans ce cas, C admet au moins une *ramification* jusqu'au niveau inférieur obtenue en prenant une décomposition P de C (donc C recolle P), puis une décomposition de chaque objet P_i de P et ainsi de suite jusqu'au niveau 0 (cf. Figure 1). On peut alors définir l'*ordre de complexité* (verticale) de C par la plus petite longueur d'une ramification de C dans S. Cet ordre, qui peut être strictement inférieur au niveau de C, est à rapprocher des définitions de la complexité algorithmique d'un programme.

C. Complexité 'temporelle'. Système hiérarchique évolutif (Ehresmann & Vanbremeersch, 1987)

Ci-dessus nous avons parlé de la complexité d'un objet dans un système 'statique', c'est-à-dire considéré dans un contexte particulier, à un instant donné. Nous voulons maintenant prendre en compte le changement au cours du temps, donc la dynamique du système.

Donnons comme exemple une peinture relativement simple que Picasso produit très rapidement dans le film de Clouzot "Le Mystère Picasso" (1958). Il commence par dessiner en quelques traits trois tiges de fleurs, qu'il englobe dans un poisson, ensuite transformé en poule par adjonction d'une tête et de pattes, puis la couleur commence par accentuer certains traits en leur conférant un sens différent, jusqu'à ce qu'elle recouvre une grande partie du dessin et fasse disparaître presque tous les détails ; et finalement apparaît une face de chat. Tout se fait comme s'il n'y avait pas de plan préétabli, mais des changements successifs au gré de la fantaisie de l'artiste ; en particulier la couleur est mise très rapidement, et le résultat final surgit sans qu'on ait pu le prévoir.

L'évolution des objets et du système au cours du temps est prise en compte dans la notion d'un *système évolutif hiérarchique* : c'est une suite de catégories hiérarchiques indexées par une *échelle de temps* (discret ou continu), avec foncteurs partiels '*transition*' entre elles, modélisant le changement entre 2 instants de cette échelle (un foncteur étant une application entre catégories respectant la composition et les identités). Généralement ce changement résulte de l'addition ou la suppression de certains composants, et de la formation de composants plus complexes par recollement de certains patterns de composants existants ; ceci est modélisé par le processus de *complexification* d'une catégorie par rapport à la procédure ayant ces objectifs. (Cf. Appendice.)

Nous dirons qu'un objet complexe C préserve son *identité complexe* s'il admet en t une décomposition Q qui conserve une certaine stabilité pendant un intervalle dt , signifiant que les états successifs de C recollent les états successifs de Q. Autrement dit, il y a changement des composants de C au cours du temps, mais il est progressif, et généralement non prévisible à long terme ; après une période assez grande il se peut même que tous les composants initiaux aient disparu.

Les systèmes dynamiques non-linéaires ou au bord du chaos sont de ce type.

D. Complexité 'horizontale'. Objets multiformes (Ehresmann & Vanbremeersch, 1996)

Si nous regardons un tableau cubiste comme le portrait de Dora Maar (1937) par Picasso, nous voyons apparaître une autre forme de complexité. Les cubistes ne se contentent pas de partir d'une ramification du

modèle qu'ils interprètent et de la reconstruire avec éventuel changement de certains de ses éléments en figures géométriques. Ils en construisent plusieurs correspondant à différents point de vue (ici figure vue de face et de profil), et ils les reproduisent simultanément en aplatissant les différents plans, les surfaces se coupant de manière plus ou moins aléatoire pour supprimer l'impression de profondeur. Ainsi le tableau a une double lecture. Déjà Cézanne avait structuré ses peintures en coupant la surface peinte en petites aires à multi facettes pour mettre en valeur la perspective plurielle donnée par la vision binoculaire, et il avait commencé à simplifier les formes naturelles en cylindres, sphères et cônes, ce qui transformait la façon traditionnelle de percevoir la perspective.

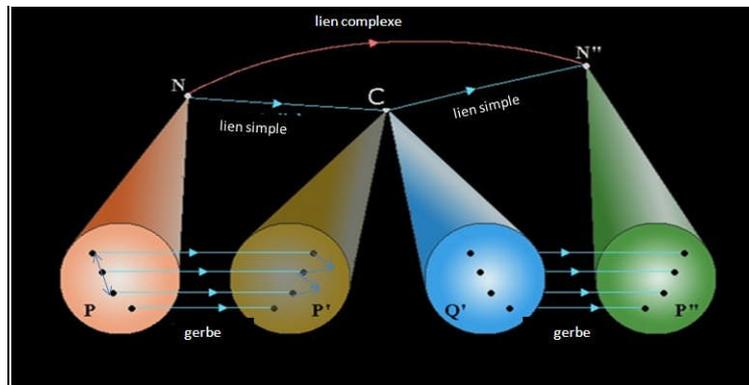


Figure 2. C est un objet multiforme recollant deux patterns P' et Q' non-interconnectés. Le composé d'un lien (P, P')-simple (recollant une gerbe de P vers P') et d'un lien (Q', P'')-simple est complexe.

Dans notre modèle, nous disons qu'un objet complexe C est *multiforme* s'il admet deux décompositions non-interconnectées qui en donnent deux lectures de nature différente (cf. Figure 2). L'existence de tels objets permet l'émergence de liens *complexes* qui relient les deux objets de niveau n par l'intermédiaire d'au moins un objet multiforme C qui intervient dans leur composition avec deux décompositions différentes de niveaux $< n$ (pour les définitions précises, cf. l'Appendice). Ces liens jouent un rôle essentiel dans le problème de l'émergence, en vertu du Théorème suivant (Ehresmann and Vanbreemsch, 1996) :

- Théorème. 1.** *Un objet de niveau > 2 dont toute ramification contient au moins un lien complexe est d'ordre de complexité > 1 .*
2. *L'existence d'objets multiformes (ou "Principe de multiplicité") caractérise la possibilité d'émergence d'objets d'ordre de complexité strictement croissant.*

Le principe de multiplicité (que nous avons introduit en 1996) nous a été suggéré par la propriété de dégénérescence introduite dans le système neuronal par Edelman en 1989, et qu'il met à la base de la complexité du cerveau et, plus tard (Edelman & Gally, 2001), à la base de la complexité d'un système biologique,

2. Création d'une œuvre d'art

Ci-dessus nous avons considéré la complexité d'une œuvre d'art existante. Maintenant nous allons étudier le processus de création par l'artiste d'une œuvre d'art, en tenant compte des interactions entre sa sensibilité, son expérience personnelle et le contexte dans lequel elle va émerger ; ensuite nous verrons comment l'œuvre peut se diffuser, et éventuellement participer à l'émergence d'un nouveau courant artistique.

Nous utiliserons de façon essentielle la notion de *Système Evolutif à Mémoire* que nous avons introduite en 1990 pour modéliser des systèmes naturels complexes auto-organisés. Ce sont des systèmes hiérarchiques évolutifs dont la dynamique est modulée par les interactions entre un réseau d'organes régulateurs internes plus ou moins compétitifs, les *corégulateurs*. Chaque corégulateur opère par étapes, selon sa propre échelle de temps et sa complexité : à chaque étape les informations qu'il peut recueillir forment son paysage, sur lequel une procédure admissible est choisie à l'aide la mémoire ; les commandes de la procédure sont envoyées à des effecteurs et le résultat est évalué à l'étape suivante. A un instant donné, les procédures des divers corégulateurs entrent en compétition et la procédure opératoire effectivement réalisée sur le système résulte d'un processus d'équilibration entre elles, avec *fracture* pour les corégulateurs dont la procédure n'a pas été retenue. (Pour plus de détails, cf. l'Appendice.).

A. Le modèle MENS (Ehresmann & Vanbreemeersch, 1999, 2007, 2009)

La conception et la réalisation d'un tableau par un artiste repose sur l'activation du système neural, mental et cognitif de l'artiste que nous avons modélisé par un système évolutif à mémoire appelé **MENS** (pour *Memory Evolutive Neural System* ; Figure 3). Nous ne rappellerons pas la construction (par complexifications successives) de **MENS** à partir du système évolutif des neurones et synapses (cf. Ehresmann & Vanbreemeersch, 2007, Part C). Disons seulement qu'un objet de **MENS**, appelé *catégorie-neurone*, ou simplement *cat-neurone*, représente un objet mental (au sens de Changeux, 1983) ; c'est un objet multiforme, construit par recollement des assemblées synchrones de (cat-)neurones dont l'activation évoque l'objet mental.

Les corégulateurs sont basés sur des zones cérébrales différenciées plus ou moins étendues (e.g. aires sensorielles, proprioceptives, motrices, associatives, ...) au sens que leurs cat-neurones ont des ramifications aboutissant dans cette zone. En particulier un rôle important est joué par les *corégulateurs évaluateurs* qui évaluent les états internes et émotionnels (basés sur des noyaux de l'hypothalamus et du système limbique).

La mémoire de **MENS** est divisée en mémoire *empirique* (perceptive et épisodique), *procédurale* (schémas sensori-moteurs, comportements, commandes d'effecteurs, diverses procédures et techniques,...) et *sémantique* (concepts classifiant des classes d'invariance d'objets mentaux). Celle-ci permet le développement, à partir de la naissance, d'une mémoire particulière, le *Noyau Archétypal* (en anglais Archetypal Core) **AC** qui intègre les principales expériences de la personne, tant sensorielles, corporelles, motrices avec leur arrière-plan émotionnel. Elle est basée sur le "noyau structural" du cerveau, zone dont nous avons supposé l'existence dès 1999 et qui a été mise en évidence par imagerie médicale seulement en 2008 (Hagmann *et al.*, 2008). Les objets mentaux archétypaux sont liés entre eux par de nombreux liens complexes particuliers, vite activés et qui ont la propriété de former des *boucles archétypales* qui auto-entretiennent leur activation pendant une longue période, ce qui permet de la diffuser et ainsi d'augmenter le domaine activé de **MENS**. Ainsi **AC** 'colore' tout le comportement de la personne, en lui imprimant une marque caractéristique du Soi.

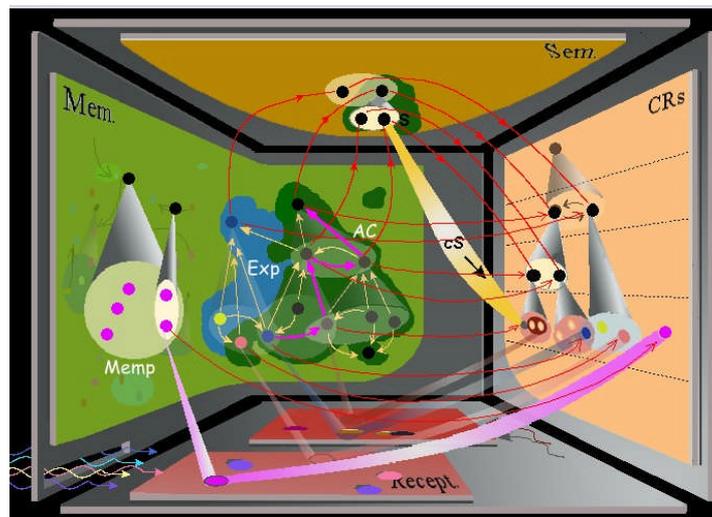


Figure 3. Activation de **MENS** par un processus conscient. **Mem** est la mémoire, **Sem** la mémoire sémantique, **AC** le noyau archétypal (avec boucles archétypales en rouge), **CRs** le réseau des corégulateurs.

Nous avons montré comment le noyau archétypal est à la base du développement de *processus conscients* (Ehresmann & Vanbreemeersch, 1999, 2009). Un tel processus débute par un événement subit (par exemple une 'fracture' ou un changement de procédure dans un corégulateur évaluateur de niveau élevé) qui augmente l'attention. Ceci se traduit par une large activation du cerveau, qui se communique à divers objets archétypaux, activant des boucles archétypales, formées de liens complexes, qui vont la maintenir un certain temps et la diffuser largement d'abord dans **AC**, puis plus largement, par activation de différentes instances de concepts archétypaux activés et de ramifications de ces concepts. Les corégulateurs supérieurs peuvent alors coopérer pour collectivement former un *paysage global* [à comparer au "théâtre" de Baars (1997), au "global working space" de Dehaene *et al.* (1998), ou au "dynamic core" de Edelman & Tononi (2000)]. Dans celui-ci, un processus de *rétrospection* (vers le passé) permet de chercher les causes ou effets de l'événement par comparaison avec des expériences antérieures, et un processus de *prospéction* (vers le futur) permet de choisir (par formation de paysages virtuels) une procédure à long terme en plusieurs étapes pour y répondre. (Pour plus de détails, cf. Ehresmann & Vanbreemeersch, 2009). La décision de réaliser un tableau sera un tel événement.

B. Conception d'un tableau

La réalisation d'un tableau par l'artiste A correspond au déroulement d'une suite d'étapes des corégulateurs moteurs de A, leurs procédures successives étant commandées par des procédures opératives choisies dans le paysage global de A, avec éventuellement des fractures à certaines étapes du processus. Plusieurs cas sont possibles :

- L'artiste peut opérer par essais-erreurs comme le fait Picasso dans le tableau fleurs/poule/chat évoqué plus haut (Section 1.C). Une première procédure est choisie sur son paysage global dont la réalisation conduira à une seconde avec éventuellement modification du sens, et ainsi de suite jusqu'à complétion de l'œuvre.
- Il peut avoir une idée nette de ce qu'il veut faire et initier de manière consciente dans son paysage global une procédure de longue durée (en plusieurs étapes), consistant à traduire cette idée sur sa toile. C'est ce que si passe lorsqu'il veut reproduire avec sa sensibilité un modèle (nature, nature morte, être vivant, peinture célèbre,...), et nous étudierons ce cas plus loin, sur les variations du tableau "*Les Ménines*" (Section 3.E).
- Un cas intermédiaire est celui où il part d'une idée générale plus ou moins précise, qu'il développe par essais-erreurs en une suite de procédures. Chaque procédure engendre la suivante, mais l'idée initiale reste sous-jacente, revenant par pics de conscience tout au long de la réalisation.

Nous allons étudier ce dernier cas en l'illustrant par la réalisation d'un tableau représentant une plage dans le film de Clouzot sur Picasso déjà cité.

Initialement, le peintre va déclencher une procédure à long terme, influencée par sa conception artistique (en liaison avec celle des artistes qu'il admire), ses opinions, croyances, expériences tant artistiques qu'émotionnelles et psychologiques. La concentration sur l'idée de peindre une plage augmente son attention et active les souvenirs factuels ou 'affectifs liés à la plage, à différents tableaux représentant une plage ou ayant une composition picturale adéquate, aux procédures possibles selon ses connaissances artistiques et techniques, éventuellement à une idéologie qu'il veut transmettre (comme une critique de la société de consommation par des pop-artistes). Ce pattern d'objets mentaux résonne plus ou moins fort avec des objets archétypaux qui, via des boucles archétypales, propagent l'activité à une large partie du système **MENS**. Celle-ci, en se diffusant via des liens complexes (avec balancement entre ramifications d'objets activés), recrute, consciemment ou non, un grand nombre de corégulateurs (sensoriels, moteurs, évaluateurs...) et active différentes procédures admissibles.

C. Réalisation du tableau

La réalisation du tableau se fait par étapes, avec la participation de ces différents corégulateurs. Dans chacune d'elles, un paysage global est formé ; le résultat déjà obtenu y est évalué en le comparant au résultat espéré, les modifications à apporter sont décidées en fonction des sensations et émotions que suscite la résonance interne des formes et couleurs, de l'expérience artistique du peintre et de ses connaissances techniques. Une fois une procédure opérative générale choisie, les commandes correspondantes sont envoyées aux corégulateurs moteurs effecteurs qui vont les exécuter en traçant certains traits ou couleurs sur la toile, tandis que la recherche est momentanément arrêtée (par inhibition des cat-neurones n'intervenant pas dans cette effectuation).

Dans les premières étapes, le peintre ébauche en quelques traits une plage avec différents petits motifs à peine indiqués, dont il ne restera qu'une partie de l'architecture dans le résultat final. Puis, par petites touches, l'ébauche est progressivement enrichie, les procédures successives consistant en le développement de certaines formes, ajout de couleur et de personnages, changement de taille de certains éléments. A chaque fois, la sélection des modifications à apporter semble s'imposer au peintre sans difficulté, de manière presque automatique, en respectant une certaine stabilité de la composition dans son ensemble.

Mais arrivé à un certain stade, on sent des hésitations, les modifications successives portées au tableau se contredisent (tel personnage grandit puis diminue ou même disparaît), les changements deviennent de plus en plus profonds et le peintre ne semble pas satisfait. Il y a une fracture pour les corégulateurs évaluateurs, ce qui augmente l'attention et déclenche un processus de rétrospection : le paysage global s'étend, permettant une analyse plus fine du problème par un retour interne à des étapes antérieures et à des niveaux inférieurs d'organisation. A un certain moment, le peintre reconnaît explicitement qu'il y a une fracture dans le paysage global, par manque d'une procédure se détachant des autres possibles.

Pour la réparer, il essaie un changement complet de stratégie, en faisant des essais sur des petits papiers collés sur certaines parties de la toile. Ce processus de prospection permet d'essayer 'virtuellement' diverses procédures qui ne seront pas poursuivies si elles ne conviennent pas. Ces essais mobilisent, via le des boucles archétypales, un grand nombre d'objets mentaux et ils sont poursuivis assez longtemps. Tout d'abord ils

n'arrivent pas à réparer la fracture : le tableau devient de plus en plus confus et sombre ; Picasso parle même de "drame". Cette situation conduit à de nouveaux essais.

Puis, tout à coup, sans que le spectateur ne comprenne pourquoi, la situation se décante. Picasso choisit une nouvelle procédure opérative à long terme. Il arrache tous les papiers, revenant au stade précédant la procédure de collage. Tout le travail de rétrospection et prospection tant conscient qu'inconscient fait auparavant doit avoir porté ses fruits, car, très rapidement il modifie quelques détails avant de dire qu'il s'agit bien d'un tableau et qu'il va prendre une nouvelle toile pour le mettre en forme.

Il recommence sur la nouvelle toile, mais sa procédure à long terme est maintenant bien définie et les étapes s'enchaînent rapidement, dominées par le travail des corégulateurs moteurs, sans plus de rétrospection ni prospection. Le tableau final reprend une partie des essais précédents, y compris certains des essais faits sur papier collé, mais en n'en gardant que l'idée générale réalisée de manière plus abstraite ; le peintre élimine tous les détails superflus, les personnages et motifs sont juste indiqués par quelques traits et de grands rectangles de couleur.

D. Devenir d'une œuvre

Une fois que l'artiste a achevé une œuvre, il l'évalue dans son paysage global par comparaison avec le résultat anticipé, mais aussi, via ses corégulateurs évaluateurs, par résonance avec ses objets archétypaux. Plusieurs cas sont possibles :

- S'il n'est pas satisfait de son travail, il pourra le détruire ou le garder pour lui-même, éventuellement avec l'idée de le reprendre plus tard. Il peut aussi le garder caché s'il y voit une manière nouvelle qu'il désire développer et exploiter dans d'autres œuvres avant de la faire connaître ; certains peintres ont ainsi conservé des toiles plusieurs années avant de les montrer.
- Le plus souvent, l'œuvre sera vue par d'autres personnes qui vont l'évaluer dans leur propre paysage global, en fonction de leurs goûts et expériences. Certaines la jugeront quelconque ; d'autres peuvent la rejeter si elle s'écarte trop de leur conception artistique ; d'autres la commenteront et pourront la faire connaître dans des cercles plus larges. Ici les critiques et les marchands d'art joueront un rôle important.
- Si l'œuvre a une vraie valeur, elle va prendre sa vie propre et, tôt ou tard, inspirera d'autres artistes en influençant, consciemment ou non, leur production ultérieure. En particulier, nous allons voir comment elle pourra participer à l'émergence d'un nouveau courant artistique ; ou encore se renouveler au cours des siècles en, suscitant des reproductions et variations plus ou moins fidèles, qui adaptent l'œuvre initiale aux problématiques de l'époque.

3. Evolution des conceptions artistiques

Nous nous plaçons maintenant au niveau sociétal.

A. Exemple : Emergence du cubisme

Au début du 20^e siècle, l'académisme n'a plus le rôle centralisateur qu'il jouait dans les arts au milieu du 19^e, le déclin de son pouvoir ayant débuté avec l'organisation du "Salon des refusés" (à l'initiative de Napoléon III en 1863) et la formation d'une pluralité d'écoles de peinture telles que les impressionnistes et les Nabis.

Le cubisme est un courant artistique qui se développe entre 1908 et 1914, en particulier sous l'effet de la collaboration entre Braque et Picasso ; pendant cette période, tous deux s'influencent tellement qu'il est parfois difficile de distinguer l'auteur de certaines de leurs œuvres. Un petit groupe d'artistes (dont le sculpteur Csaky dont nous parlerons plus loin) se réunit autour d'eux ; ils se rencontrent régulièrement, discutent de ce qu'ils font et s'inspirent mutuellement, Ils sont influencés par les œuvres et les recherches menées par des artistes qu'ils respectent, en particulier par la nouvelle conception picturale de l'espace et des formes qu'avait prônée Cézanne (sans être bien compris à son époque). Ils sont aussi influencés par la découverte de l'art primitif et des masques nègres, par des découvertes scientifiques ou techniques, par des référents culturels, sociaux ou politiques... Leurs œuvres vont acquérir un air de famille car ils utilisent des procédures analogues telles que la déconstruction des objets en fragments représentés sous forme de figures géométriques et l'aplatissement des plans, créant des objets multiformes à double lecture (e.g., visage de face et de profil). Leurs discussions sur leur manière de faire les conduisent progressivement à élaborer une théorie de ce nouveau courant, le *cubisme*.

Leurs œuvres sont remarquées et plus ou moins bien acceptées par d'autres artistes, puis par d'autres groupes de la société. Le nom même de cubisme est donné par dérision en référence au critique Vauxcelles qui écrit : "M. Braque est un jeune homme fort audacieux... Il méprise la forme, réduit tout, sites et figures et maisons, à des schémas géométriques, à des cubes". Au contraire leur effort est encouragé et matériellement soutenu par certains, tel le marchand d'art Kahnweiler qui sera le promoteur des cubistes Picasso, Braque, Grey

et Derain. Le public en général sera plus lent à accepter les changements de paradigme et un peu effrayé par les audaces de certaines œuvres, telles le remplacement de la perspective par une nouvelle structuration des plans, ou par les portraits cubistes peu réalistes, à plusieurs lectures.

B. Evolution d'un artiste. Exemple de Csaky

Les interactions entre artistes proches sont bien illustrées par l'œuvre du sculpteur Csaky qui, sous l'influence du groupe des cubistes, va passer du réalisme au cubisme vers 1912.

Joseph Csaky (1888-1971) est un sculpteur d'origine hongroise qui arrive à Paris en 1909 où il sera naturalisé Français en 1922. Ses premières œuvres étaient de facture réaliste. A Paris, il s'installe d'abord à La Ruche, une résidence pour artistes à Montparnasse, où il se lie avec d'autres artistes qui lui font rencontrer le groupe cubiste, en particulier Braque et Picasso. Les discussions au sein de ce groupe ont une forte influence sur son œuvre, comme nous pouvons le voir sur une série de 5 têtes faites entre 1911 et 1914 (reproduites dans le livre de Marcilhac, 2007, pages 27 et 32-33). Toutes représentent un homme vu de face (sans doute un auto-portrait), dans une même position générale. Mais si l'on décompose le visage en ses différentes parties, le changement est frappant. La "*Tête d'homme*" de 1911 est traitée de manière réaliste ; dans "*Portrait d'homme*" de 1913 on remarque diverses déformations caricaturales et un traitement plus géométrique de certaines parties, par exemple le nez et la chevelure. Enfin les trois "*Tête cubiste*" de 1914 sont nettement de style cubiste, la dernière étant particulièrement stylisée. Nous pouvons donc dire que sa représentation d'une tête a préservé son identité complexe au long des 4 ans, avec une même ramification mais dont les composants se sont modifiés progressivement. Csaky est ainsi passé du réalisme au cubisme, sous l'influence de son propre travail, mais aussi des rencontres et confrontations qu'il a pu avoir avec les autres cubistes.

Après une interruption due à la grande guerre (pendant laquelle il s'engagera dans l'Armée Française), Csaky aura moins de contacts avec les cubistes et, dans les années 1919-1927, il continuera dans sa propre voie, développant un cubisme de plus en plus géométrique, soutenu par le propriétaire de galerie Léonce Rozenberg. Plus tard son style évolue sous l'influence de l'époque qui s'éloigne du cubisme et, après 1929, sa dernière période est purement réaliste. (Tous ces renseignements sont extraits du livre de Marcilhac, 2007.)

C. La société comme Système Evolutif à Mémoire (Ehresmann & Vanbremeersch, 1990)

Nous allons modéliser l'émergence d'un nouveau courant artistique tel que le cubisme dans le système évolutif à mémoire **Soc** de la société où elle se développe (cf. Figure 4).

Parmi les composants de **Soc** nous avons au niveau 0 les membres de la société, aux niveaux supérieurs les groupes sociaux plus ou moins complexes qu'ils forment, les liens entre eux modélisant leurs interactions sociales. Il y aura aussi bien des petits groupes dont les membres sont très liés entre eux (familles, petits groupes ayant un intérêt commun), des réseaux sociaux, culturels ou professionnels; des groupes plus importants réunissant des groupes plus petits. Ainsi le groupe des peintres en France au début du 20^e siècle regroupait les groupes des peintres académiques, des impressionnistes, des fauvistes,... Un même individu (ou groupe) peut appartenir à plusieurs groupes plus importants. Individus et groupes changent progressivement au cours du temps, certains disparaissent, d'autres se créent, un groupe peut garder son identité complexe tout en voyant le nombre de ses membres se modifier en plus ou en moins, jusqu'au moment où il disparaîtra ou se fondra dans un groupe plus grand. Par exemple, entre 1900 et 1906, le groupe des impressionnistes se réduit tout en gardant une certaine identité complexe et le groupe des cubistes apparaît sous l'impulsion de Picasso et Braque.

La mémoire de **Soc** est un sous-système hiérarchique modélisant les connaissances et archives de la société ; elle est divisée en : mémoire *empirique* composée de documents matériels (écrits, objets fabriqués, œuvres artistiques,...) et de souvenirs d'événements collectifs (politiques, économiques, culturels, scientifiques, religieux,...) ; mémoire *procédurale* regroupant des procédures et règles reposant sur des connaissances de toute sorte (scientifiques, techniques, médicales, économiques, juridiques, politiques,...) ; mémoire *sémantique* où les différents composants sont classifiés en concepts de plus en plus abstraits (invariants perceptifs, symboles, valeurs, idéologies, courants de pensée,...) traduits par des mots du langage.

La dynamique de la société est régulée par la coopération/compétition entre différents groupes jouant le rôle de corégulateurs. Un tel groupe figure sous deux formes dans **Soc** : comme le sous-système corégulateur **G** formé par ses membres et leurs relations au sein du groupe ; et comme un composant **G** de **Soc** d'un niveau supérieur représentant le groupe en tant que tel (au sens que **G** 'recolle' **G** et que ses interactions avec d'autres groupes correspondent aux actions faites en commun par les membres de **G** opérant en synergie). A un instant donné, chaque corégulateur agit au travers de son paysage, en choisissant une procédure en fonction des informations plus ou moins partielles qu'il reçoit sur sa situation actuelle, les contraintes imposées par d'autres groupes et/ou l'environnement naturel, et le résultat d'expériences antérieures analogues qui ont été mémorisées. Plus le niveau du groupe est élevé, plus son action nécessite une chaîne de transmissions pour prendre une décision et la mettre en œuvre, par répercussion entre les niveaux. Lorsque les procédures choisies

par les différents corégulateurs sont conflictuelles, l'action globale résulte d'un processus d'équilibration entre ces procédures, où le poids des différents groupes interviendra dans le choix final.

D. Emergence de nouveaux courants dans le paysage artistique

Parmi les corégulateurs de **Soc** figurent des groupes liés à la production, à l'organisation et à la consommation de l'art, formés d'artistes, professeurs, critiques d'art, propriétaires de galeries, directeurs de musées, marchands d'art, mécènes, politiques, amateurs d'art... Dans le paysage d'un tel groupe G à un instant donné, nous distinguons une sous-catégorie PG, appelée *paysage artistique* de G, formée des informations reçues par G relatives à l'art : connaissances artistiques de ses membres (œuvres, techniques artistiques, écrits sur l'art, organisation du monde artistique,...), leurs opinions et sensibilités au sujet de l'art, leurs référents culturels, leur idéologie propre. A partir de ce paysage artistique, le groupe se fait une idée particulière de 'l'art d'aujourd'hui', modélisée par la formation d'un concept CG dans la mémoire sémantique, recollant ces diverses informations. Voyons comment ce concept, que nous appellerons la *conception artistique* du groupe, influence l'action de ses membres et évolue progressivement tout en gardant son identité complexe.

Prenons pour G un petit groupe d'artistes (par exemple les cubistes au début du 20^e siècle). Les membres A du groupe voient leurs œuvres mutuelles dès qu'elles sont créées, les analysent et les discutent. Si une œuvre N résonne assez avec leurs idées artistiques tout en y apportant une certaine nouveauté dans la manière ou la technique, ils cherchent quelles nouvelles procédures y sont utilisées et ils les mémorisent dans leur mémoire procédurale pour les utiliser dans leur travail ultérieur. Au fur et à mesure, leurs œuvres évoluent dans une même direction, créant une sorte de révolution artistique interne au groupe ; par exemple c'est ainsi que Csaky est passé du réalisme au cubisme (comme rappelé plus haut). Progressivement, le groupe va conceptualiser les idées sous-jacentes à ces nouvelles procédures et les réunir (ou 'recoller') en une théorie. Ainsi se crée un nouveau courant artistique qui émergera (par complexification) dans le paysage artistique du groupe et, une fois conceptualisé dans la mémoire sémantique, sera intégré à la conception artistique CG du groupe.

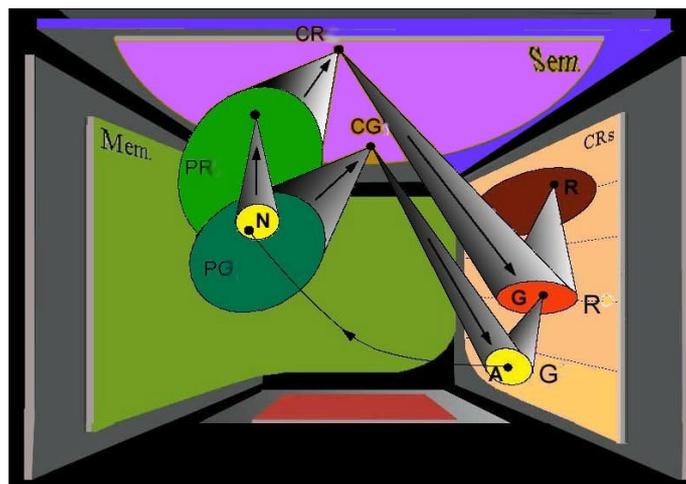


Figure 4. Le modèle **Soc**. PG est le paysage artistique du groupe G et CG sa conception artistique qui intègre les œuvres N de ses membres, formant un courant artistique s'intégrant plus tard au PR d'autres groupes R

Plus ou moins vite, les œuvres N du groupe relevant de ce courant seront distinguées par d'autres groupes R. Certains l'ignoreront tandis que d'autres le critiqueront s'il cause une fracture à leur propre paysage artistique ; pour d'autres enfin, il résonnera bien avec leurs idées actuelles et ils modifieront leur conception artistique CR pour l'y intégrer. Parmi ces groupes, les groupes de critiques et des diffuseurs d'art joueront un rôle d'intermédiaires auprès des groupes sociaux moins proches des artistes : les procédures des critiques feront connaître les œuvres de G en les jugeant en bien ou en mal ; celles des organisateurs et marchands d'art auront pour but de les diffuser et de les vendre. Sans un tel soutien, les artistes ne pourraient pas continuer leurs recherches à cause des difficultés matérielles qu'ils rencontreraient pour survivre.

Le jugement du monde artistique en général, puis de la société sur le nouveau courant artistique, résultera du 'jeu' entre les procédures de ses différents groupes. Il peut conduire à son intégration à la conception artistique de l'époque ; mais le courant peut ne pas se diffuser largement et/ou s'étioler par manque d'amateurs si sa valeur n'est pas assez grande, ou si elle est trop en avance sur son temps pour être comprise par assez de personnes ; dans ce dernier cas, la prospérité peut lui rendre raison, comme les cubistes l'ont fait pour les idées de Cézanne. Aujourd'hui avec la communication généralisée, il y a encore plus de groupes différents, chacun essayant de se faire connaître le plus largement possible et d'influencer les autres. Il s'ensuit qu'une conception artistique générale est plus difficile à se former, d'où un manque de lisibilité du paysage artistique global.

La conception artistique d'un groupe à une certaine époque influence la manière dont des œuvres antérieures sont relues, jugées, interprétées et éventuellement traduites de manière plus ou moins fidèle par de nouveaux artistes, cette influence se conjuguant avec le climat social, politique et culturel de l'époque. Nous allons en voir un exemple.

E. Variations sur "Les Ménines"

Walter Benjamin (1936) dit qu'une œuvre d'art se prolonge indéfiniment par la capacité d'engendrer d'autres œuvres. Un bon exemple est donné par le tableau de Vélasquez "Les Ménines" (1656) qui a inspiré de multiples variations au cours des siècles, son interprétation variant en fonction des problématiques de l'époque et illustrant bien l'évolution de la conception artistique de la société au cours des 3 derniers siècles.

Dans chaque cas, la réalisation d'une variation du tableau par un artiste résulte d'un même processus mental : l'auteur concentre son attention sur le tableau initial pris comme modèle pour en étudier la composition et l'atmosphère générale, activant ainsi de nombreuses boucles archétypales. Un processus de rétrospection dans son paysage global, contrôlé par des corégulateurs sensoriels, conduit à la construction interne d'une ramification du tableau. Ensuite, par un processus de prospection, l'artiste en choisit divers composants qui entrent en résonance avec ses objets archétypaux, et il les transforme (dans des paysages virtuels) en tenant compte de sa conception artistique, son expérience, ses préoccupations actuelles. La procédure opérative globale résultante consiste à regrouper ces composants modifiés en respectant plus ou moins les liens de la ramification primitive. Les commandes correspondantes sont alors réalisées par une suite d'étapes des corégulateurs moteurs.

Le tableau, commande de la Cour d'Espagne, est resté enfermé dans une partie privée de l'Alcazar pendant 100 ans, c'est seulement ensuite qu'il a frappé l'imagination d'autres artistes. Initialement on y voit une représentation historique de la hiérarchie monarchique, avec son réseau complexe de relations sociales et de rang, Dans le même esprit, au 18^e siècle il va inspirer Francisco de Goya qui, dans "*La familia de l'infant Lluís de Borbó*" (1783) en fait une transposition en l'adaptant à la situation troublée de la cour de l'époque.

Au siècle suivant, la conception artistique est plus orientée vers les problèmes de technique et de représentation du quotidien que vers les fresques historiques, et c'est surtout la composition matérielle du tableau qui inspirera les peintres. Degas en produit plusieurs variations, dont "*L'infante Marguerite*" (1860) où il transpose la technique picturale de Vélasquez. Whistler (1865) en donne une adaptation très libre, dans un cadre intimiste, ne retenant guère que le jeu avec le miroir.

Mais c'est Picasso qui, fasciné par ce tableau dès sa jeunesse, va lui donner une notoriété grandissante. Dès 1887 il en propose une variation libre. Il y reviendra dans sa maturité et, d'août à novembre 1957, en créera 44 variations (dont 10 du tableau entier et 14 de l'infante seule), le transcrivant dans une variété de styles dont il est familier. Toutes résultent d'une profonde étude du tableau dont il construit diverses ramifications, en gardant l'atmosphère générale, le volume de l'espace et la perspective, par une étude exhaustive de rythme, couleurs et mouvement, tout en modifiant complètement l'apparence des personnages devenus plus ou moins caricaturaux.

L'une de ses premières grandes variations est particulièrement élaborée. Elle part d'une ramification respectant la composition générale ainsi que tous les personnages, mais les différents composants sont modifiés de par leur style et par augmentation ou diminution de leur importance, tout en conservant leurs positions respectives. Le principal changement est la taille du peintre, devenu immense, traduisant ainsi l'idée que le rôle principal doit être attribué à l'artiste et non au pouvoir. Plus on va vers la droite, plus les personnages sont schématisés, de sorte que différentes écritures picturales sont réunies sur une même toile. Les couleurs aussi sont changées, presque uniformes tout en conservant plus ou moins les parties claires et obscures.

"*L'infante Marie Marguerite*" se réduit au portrait de l'infante, traité dans le style cubiste, très coloré, même le visage devenant multicolore ; toutefois Picasso conserve le jeu d'ombres et lumières de l'original via les hachures sombres sur la robe jaune. D'autres variations du tableau complet ou de certaines parties sont plus ou moins dépouillées, avec un graphisme presque enfantin, des personnages parfois informes et des couleurs souvent vives, annonçant ainsi le futur style tardif de Picasso.

Les variations de Picasso vont conduire Dali (toujours en compétition avec lui) à proposer l'année suivante ses propres variations, conçues en utilisant sa "méthode paranoïaque-critique, télédirigée par le nucléaire mystique" (1958) : par exemple, le tableau est vu de loin, un immense pinceau et une silhouette se détachant au premier plan ; ou l'infante est figurée derrière des grilles.

Après 1960, on assiste à une nouvelle interprétation du tableau qui s'intéresse plus à la structure générale de la composition qu'à sa signification narrative. De nombreux artistes sont subjugués par le jeu entre le peintre

qui figure lui-même dans le tableau, et le miroir où se reflètent le roi et la reine, de sorte qu'on ne sait plus qui observe quoi, comme le remarquera Foucault (1966).

Le pop-art va conduire à des variations parodiques ou/et ressortissant de motivations sociales ou politiques. Plusieurs artistes espagnols y introduisent une critique du régime franquiste. Il en est ainsi de la variation faite par l'équipe Cronica (1970) qui développe une esthétique figurative, explicitement engagée dans la critique de l'appareil d'Etat, avec refus de l'expressionnisme et une négation des impulsions ; ou par Toral (1973) qui conserve le cadre général mais en supprimant les personnages, remplacés par des valises qui évoquent l'exil.

Dans "*Las Meninas de Picasso*" (1973), Hamilton fait un hommage conjoint à Vélasquez et Picasso : il remplace le peintre par Picasso et les divers personnages rappellent des travaux de Picasso. D'autres artistes critiquent avec ironie le dogmatisme de l'art expressionniste et la marchandisation de l'art, comme Micheline Lo (1985) qui remplace les personnages par ceux de Hergé, l'Infante devenant Tintin. Dans "*Double éclairage sur Occident*" (1987) Braun-Vega adapte le tableau pour en faire une dénonciation de la condition des indigènes au Pérou, comme il l'explique lui-même (Braun-Vega, 2007). La nudité des indigènes contraste avec les vêtements apprêtés des 2 autres personnages ; le roi et la reine dans le miroir sont remplacés par le Pape Jean-Paul II tenant un journal relatant le procès Barbie et le Président Waldheim (dont le passé nazi n'a été révélé qu'après qu'il ait quitté la présidence des Nations Unies) pour illustrer l'hypocrisie de la société occidentale ; au contraire un tableau au mur représente Picasso, vu par l'auteur comme le 'bon' côté de la culture occidentale.

Au 21^e siècle, le tableau garde toute son actualité et suscite encore des variations multiples. Citons en particulier les représentations d'une énorme Infante par Botero et par Valdes font une critique de la consommation qui conduit à l'obésité.

Conclusion

Notre but était de montrer que les différents aspects sous lesquels intervient la complexité en Art :

- Pour une œuvre d'art considérée en tant que telle une fois terminée : complexité 'verticale' et 'horizontale' reposant sur les différentes manières de l'analyser et la décomposer ; complexité 'temporelle' liée au temps de sa gestation, puis de sa vie publique, en interaction avec d'autres œuvres antérieures ou postérieures.
- Pour l'artiste : complexité de la conception, puis de la production d'une œuvre d'art, par résonance entre son paysage artistique et son Soi profond (tel qu'il apparaît via son noyau archétypal), avec possibilité de fractures à surmonter.
- Pour la société : complexité du paysage artistique qui évolue par émergence de nouveaux courants artistiques, plus ou moins facilement acceptés.

Dans cet article, toutes ces complexités ont été étudiées dans le cadre de nos Systèmes Evolutifs à Mémoire et illustrées d'exemples en peinture et sculpture, avec leur évolution sous l'influence du cubisme. Une analyse analogue pourrait s'appliquer au cas d'autres arts, ou, plus généralement d'autres créations, telles que la recherche scientifique. Par exemple dans la recherche mathématique, la complexité d'un article peut être examinée sous diverses perspectives ; pour le chercheur, le résultat final intervient souvent après avoir surmonté une fracture de plus ou moins longue durée, la solution semblant jaillir de l'inconscient, au moment où il semble consciemment le plus éloigné ; pour la communauté mathématique, l'émergence et la diffusion de nouvelles théories peuvent être plus ou moins bien acceptées.

APPENDICE

Nous rappelons brièvement ici les principales notions mathématiques utilisées. Pour plus de détails, nous renvoyons à notre livre (Ehresmann & Vanbremeersch, 2007).

A. Catégorie hiérarchique

Un *graphe* (orienté) est formé d'un ensemble de *sommets* et d'un ensemble de *flèches* entre deux sommets. Une *catégorie* est un graphe sur lequel on a défini une *loi de composition* (partielle) associant à un couple de flèches consécutives : f de N vers N' et f' de N' vers N'' une flèche de N vers N'' dite leur *composé* ff' . Cette loi vérifie les axiomes: (i) Identités: A chaque sommet N est associée une flèche fermée 'identité' dont le composé avec une flèche de ou vers N est cette flèche; (ii) Associativité : pour 3 flèches consécutives, on a $(ff')f'' = f(f'f'')$. Il en résulte qu'à chaque chemin du graphe est associé un unique composé quelle que soit la façon dont le chemin est décomposé en ses flèches consécutives. Les sommets sont aussi appelés *objets* de la catégorie, les flèches *morphismes* ou, plus simplement, *liens*.

Un *pattern* P dans une catégorie est formé d'une famille d'objets P_i et de *liens distingués* entre eux. Un *lien collectif* de P vers un objet N de la catégorie est une famille de liens f_i de chaque P_i vers N compatible avec les

liens distingués, c'est-à-dire : si d est un lien distingué de P_i vers P_j on a $f_i = df_j$. On dit qu'un objet C de la catégorie est la *colimite* de P , ou *recolle* P , ou admet P pour *décomposition* s'il existe un lien collectif (k_i) de P vers C vérifiant la condition 'universelle': tout lien collectif (f_i) de P vers N se 'recolle' de manière unique en un lien f de C vers N tel que $f_i = kf$.

Une catégorie est *hiérarchique* si ses objets sont répartis en divers niveaux de complexité de sorte qu'un objet de niveau $n+1$ soit la colimite d'au moins un pattern dont les objets sont de niveaux $< n+1$.

Dans une catégorie hiérarchique on définit des *liens simples* entre objets N et C du niveau $n+1$ comme suit : un lien (P, P') -simple f de N vers C recolle une *gerbe* de liens 'compatibles' entre objets d'une décomposition P de N et d'une décomposition P' de C de niveaux inférieurs. Une *gerbe* de P vers P' est un ensemble maximal de liens entre composants de P et P' tel que : pour chaque P_i il existe au moins un lien de P_i vers un P'_j et s'il y en a plusieurs ils sont joints par un zig-zag de liens distingués de P' ; et le composé d'un lien de la gerbe avec un lien distingué de P (à gauche) ou de P' (à droite) est dans la gerbe. Un lien (P, P') -simple n'apporte pas de nouveauté au niveau n puisqu'il ne fait que 'recoller' à ce niveau les propriétés des composants de P et de P' existant déjà à leurs niveaux, traduits par les liens de la gerbe qu'il recolle.

Un objet C de la catégorie est dit *multiforme* s'il admet au moins deux décompositions P' et Q' de niveaux strictement inférieurs au niveau de C telles que l'identité de C ne soit ni (P', Q') -simple ni (Q', P') -simple ; elles sont alors dites *non-interconnectées*. Lorsqu'il existe de tels objets multiformes, on dit que la catégorie vérifie le *principe de multiplicité*. Dans ce cas il existe des liens, dits *complexes*, obtenus en composant un lien (P, P') -simple f de N vers C et un lien (Q', P'') -simple g de C vers N'' , où P' et Q' sont 2 décompositions non-interconnectées de C (cf. Figure 2). Un tel lien fg ne provient pas de propriétés 'locales' entre les composants P_i de N et P''_j de N'' ; mais il dépend de la structure entière des niveaux inférieurs (permettant que P' et Q' aient le même recollement C), donc traduit des propriétés 'globales' des niveaux inférieurs, non actualisées à ces niveaux et qui émergent au niveau n .

B. Système hiérarchique évolutif

Un *système évolutif* \mathbf{K} est formé de : une *échelle de temps* T modélisée par une partie finie ou non de la droite réelle ; pour chaque t de T une catégorie K_t *configuration* en t ; pour $t < t'$, une foncteur *transition* d'une sous-catégorie de K_t vers $K_{t'}$, ces foncteurs partiels étant assujettis à une propriété de transitivité. \mathbf{K} est un *système hiérarchique évolutif* si de plus les K_t sont hiérarchiques et les transitions préservent les niveaux.

Dans un tel système, les transitions sont souvent issues d'un processus de *complexification relativement à une procédure* (ou option) défini comme suit. Etant donné une catégorie K , une procédure (mixte) spécifie un ensemble d'objets de K 'à détruire', un graphe extérieur 'à absorber', un ensemble de patterns de K 'à recoller' (et un ensemble de patterns de K 'à classifier'). La *complexification* de K est une catégorie K' solution du problème universel: construire une catégorie K' dans laquelle les objectifs de cette procédure sont réalisés, en vérifiant de plus les conditions : si un pattern P 'à recoller' a déjà une colimite dans K , celle-ci sera conservée dans K' ; si deux patterns 'à recoller' sont interconnectés, ils auront la même colimite dans K . Nous avons donné une construction explicite de cette complexification, montrant le rôle essentiel qu'y jouent les liens complexes.

C. Système évolutif à mémoire

Un *système évolutif à mémoire* (en anglais *Memory Evolutive System*) est un système hiérarchique évolutif dans lequel on a distingué un sous-système évolutif, la *Mémoire Mem*, qui modélise la mémoire centrale, et un réseau de sous-systèmes évolutifs appelés *corégulateurs*. Dans la mémoire on distingue un sous-système appelé *mémoire procédurale Proc* ; un composant de **Proc**, appelé *procédure*, a des liens, ou *commandes* vers des *effecteurs*. Il peut aussi se former une *mémoire sémantique* ou les composants de *Mem* (ou *empreintes*) sont classifiés en classes d'invariance appelées *concepts*.

Chaque corégulateur a son propre niveau de complexité (celui auquel appartiennent ses composants ou 'agents'), son échelle de temps discrète selon laquelle il opère par étapes, et diverses procédures dites 'admissibles' liées à certains de ses agents ; un corégulateur peut avoir un nombre plus ou moins grand de procédures admissibles. Une étape du corégulateur débutant en t consiste en :

1. Formation du *paysage* actuel L_t du corégulateur qui rassemble les informations que le corégulateur peut recueillir à cet instant via les liens (ou 'perspectives') qu'il reçoit d'autres composants du système ou de l'environnement ;
2. Choix, à l'aide de ces informations, d'une procédure admissible pour y répondre de manière adéquate ;
3. Envoi des commandes de celle-ci à des corégulateurs effecteurs ; le paysage anticipé à l'étape ultérieure est modélisé par la complexification AL_t de L_t relativement à la procédure choisie.
4. Au début de l'étape suivante, évaluation du résultat obtenu par comparaison de AL_t au nouveau paysage $L_{t'}$ et mémorisation du résultat.

Dans les corégulateurs de niveaux inférieurs, le choix de procédure est automatique ; des corégulateurs plus élevés ont plusieurs procédures admissibles, et le choix repose sur la recherche dans la mémoire d'expériences antérieures analogues et sur un processus de sélection darwinienne en fonction des résultats qu'elles ont obtenus. Il y aura *fracture* pour le corégulateur s'il ne trouve pas de procédure ou si la procédure choisie n'a pas le résultat escompté ; ceci est possible car les procédures des différents corégulateurs à un instant donné peuvent être plus ou moins conflictuelles. La procédure opérative effectivement réalisée sur le système global résultera d'un processus d'équilibration entre leurs différentes procédures, ou *jeu des procédures*, qui peut éliminer ou modifier la procédure de certains corégulateurs. Ce jeu a une double flexibilité par passage entre différentes instances des concepts intervenant, puis entre différentes ramifications de ces instances.

Références

- Baars, B.J., 1997, *In the theatre of consciousness: The workspace of the mind*, Oxford University Press. Oxford.
- Benjamin, W., 1936, *L'œuvre d'art à l'époque de sa reproductibilité technique* (traduit de *Das Kunstwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbarkeit*, *Zeitschrift für Sozialforschung*).
- Braun-Vega, 2007, Parcours didactique, cinq tableaux de Braun-Vega, Online : <http://webetab.ac-bordeaux.fr/Pedagogie/Langues/Espagnol/secret/braun.pdf>
- Bunge, M., 1979, *Treatise on Basic Philosophy*, Vol. 4, Reidel, Dordrecht.
- Casti, J., 2003, Complexity and Aesthetics: Is good art "complex" art? in *Art and Complexity* (Ed. Casti & Karlqvist), Elsevier, 21-30.
- Chaitin, G. J., 1975, A Theory of Program Size Formally Identical to Information Theory, *J. ACM* 22, 329.
- Changeux, 1983, *L'homme neuronal*, Fayard, Paris.
- Dehaene, S., Kerszberg, M. and Changeux, J.-P., 1998, A neuronal model of a global workspace in effortful cognitive tasks, *Proc. Natl. Acad. Sc. USA* 95, 14529-14534.
- Edelman, G.M., 1989, *The remembered Present*, Basic Books, New York.
- Edelman, G.M. & Gally, J.A., 2001, Degeneracy and complexity in biological systems, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98, 13763-13768.
- Edelman, G. M. & Tononi, G., 2000, *Consciousness: How Matter Becomes Imagination*, Penguin, London.
- Ehresmann, A. & Vanbremeersch, J.-P., 1987, Hierarchical Evolutive Systems: A mathematical model for complex systems, *Bull. of Math. Bio.* 49 (1), 13-50.
- Ehresmann, A. & Vanbremeersch, J.-P., 1990, Hierarchical Evolutive Systems, *Proc. 8th International Conference of Cybernetics and Systems* (Ed. Manikopoulos), New York, Vol. 1, The NIJT Press, Newark, 320-327.
- Ehresmann, A. & Vanbremeersch, J.-P., 1996, Multiplicity Principle and emergence in MES, *Journal of Systems Analysis, Modelling, Simulation* 26, 81-117.
- Ehresmann, A. & Vanbremeersch, J.-P., 1999, Online URL: <http://perso.wanadoo.fr/vbm-ehr>
- Ehresmann, A. & Vanbremeersch, J.-P., 2007, *Memory Evolutive Systems: Hierarchy, Emergence, Cognition*, Elsevier.
- Ehresmann, A. & Vanbremeersch, J.-P., 2009, MENS, a mathematical model for cognitive systems, *Journal of Mind Theory*, 0-2, 129-180.
- Foucault, 1966, *Les mots et les choses*, Gallimard.
- Hagmann, P., Cammoun, L., Gigandet, X., Meuli, R., Honey, C.J., Van J. Wedeen and Sporns, O., 2008, Mapping the Structural Core of Human Cerebral Cortex, *PLoS Biology* 6, Issue 7, 1479-1493. Online: www.plosbiology.org
- Kandinsky, W., 1911, *Du Spirituel dans l'art et dans la peinture en particulier* (Traduit de l'allemand, Denoël, Gonthier, 1969).
- Kolmogoroff, A. N., 1968, Logical Basis for Information Theory and Probability Theory, *IEEE Trans. Info. Theor.* IT-14, 662.
- Mandelbrojt, B., 1975, *Les objets fractals, forme, hasard et dimension*, Flammarion, Paris.
- Marcilhac, F., 2007, *Joseph Csaky*, Les Editions de l'Amateur, Paris.
- Prigogine, I. and Glansdorff, P., 1971, *Structure, stabilité et fluctuations*, Masson, Paris.
- Simon, H., 1969. *The Sciences of the Artificial*. MIT Press, Cambridge, Mass.
- Taylor, R., 2003, Fractal Expressionism – Where Art meets Science, in *Art and Complexity* (Ed. Casti & Karlqvist), Elsevier, 117-144.
- Thom, R., 1974, *Modèles Mathématiques de la Morphogenèse*, Union Générale d'Édition, Coll. 10/18, Paris.
- Weaver W., 1948, Science et Complexité, *American Scientist* 36, 536.

*