



HAL
open science

La géométrie de la vie : quand le dessin rencontre les sciences du vivant

Renaud Chabrier

► To cite this version:

Renaud Chabrier. La géométrie de la vie : quand le dessin rencontre les sciences du vivant. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Paris sciences et lettres, 2020. Français. <NNT : 2020UPSLT018>. <tel-03477432>

HAL Id: tel-03477432

<https://theses.hal.science/tel-03477432v1>

Submitted on 13 Dec 2021

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.



HAL Authorization



THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PSL

Préparée à l'Institut Curie

La géométrie de la vie :
Quand le dessin rencontre les sciences du vivant

The geometry of life:
When drawing meets life sciences

Soutenue par

Renaud CHABRIER

Le 27 novembre 2020

Ecole doctorale n° 474

**Frontières de l'Innovation en
Recherche et Éducation**

Spécialité

Frontières du vivant

Composition du jury :

Guillaume LECOINTRE Professeur, Muséum National d'Histoire Naturelle	<i>Président</i>
Anouk BARBEROUSSE Professeur, Sorbonne Université	<i>Rapporteur</i>
Frédéric FOL LEYMARIE Professeur, Goldsmith University	<i>Rapporteur</i>
Alain BERTHOZ Professeur, Collège de France	<i>Examineur</i>
Didier GEFFARD-KURYAMA Dessinateur scientifique, Muséum National d'Histoire Naturelle	<i>Examineur</i>
Dominique SCIAMMA Directeur, CY Ecole de Design	<i>Examineur</i>
Marie-Paule CANI Professeur, Ecole Polytechnique	<i>Co-directrice de thèse</i>
Carsten JANKE Directeur de Recherche, Institut Curie - CNRS	<i>Directeur de thèse</i>

A mon épouse Iris,
à Gaël,
et à mes parents.

Remerciements

Je remercie mes codirecteurs Marie-Paule Cani, Carsten Janke et François Jullien d'avoir accepté d'accompagner ce projet de recherche, sans peur de la distance qui séparait leurs domaines de travail respectifs.

Je remercie aussi Guillaume Lecointre, Anouk Barberousse, Frédéric Fol Leymarie, Alain Berthoz, Didier Geffard-Kuryama et Dominique Sciamma pour leurs précieux regard sur le résultat.

Merci aux Labex DCBiol, au Labex CellTisPhyBio / CellNScale et enfin à l'université Paris-Science-Lettre, à travers le programme «Aux Frontières des Labex», d'avoir accepté de financer cette thèse, ainsi que certains travaux préliminaires.

Les responsables de UMR 3348 de l'Institut Curie d'Orsay, puis du Laboratoire d'Informatique de l'École Polytechnique (LIX) ont ensuite eu la générosité d'accueillir un atelier de dessin expérimental dans leurs locaux.

Dans ces lieux, merci à tous les membres des équipes Janke et Geovic, et en particulier à Magda Magiera, Pooran Memari et Damien Rohmer qui ont su être à l'écoute des enjeux de ce travail.

Merci également au groupe de recherche «Formes du Mouvement» à l'École Nationale Supérieure des Arts Décoratifs, dont les discussions ont nourri ma réflexion sur les changements d'échelle.

Les rencontres ont été trop nombreuses pour toutes les citer: celles d'Henry de Lumley, de Seymour Simons et d'Angela Brew ont offert des pistes particulièrement utiles pour faire vivre ce travail.

Je remercie d'autre part le département Humanité et Sciences Sociales de l'École Polytechnique, la Training Unit de l'Institut Curie et l'Atelier d'iconographie scientifique du Muséum National d'Histoire Naturelle, qui ont permis de convertir une partie de ces recherches en démarche de formation.

Au cours de leurs stages ou de leur projets de recherche, Ameya Murukutla, Aurélie Faure de Peybere, Ipsa Jain, Pauline Olivier et Loïc Vital ont participé à certains des travaux qui sont évoqués dans les pages qui suivent.

En amont de cette thèse, Jean-Pierre Gasc, Matthieu Piel, Ana-Maria Lennon-Dumenil, et de nombreuses autres personnes se sont intéressées au renouveau du dessin dans les sciences du vivant depuis vingt ans. Je les remercie pour cet engagement.

Merci aussi à Pascal Minet, Clio Gavagni, Thierry Bertomeu, et à toutes les personnes impliquées dans les projets muséographiques qui ont fourni une base importante à cette étude.

Merci enfin à Marie-Christine Chabrier et Hélène Blanck pour les relectures finales, et à Iris Chabrier-Trinkler pour son soutien au cours des trois dernières années.

Abstract

After forty years of extensive developments in digital imaging, what are the challenges now of bringing drawing and life sciences together? An important revival of drawing in scientific transmission is currently taking place, in publishing, as well as in museography and in the field of animation. However, the great diversity of outputs and tools makes this phenomenon difficult to fully appreciate. Using papers and works created between 2016 and 2020, this thesis aims to introduce a number of concepts in order to understand what takes place in every attempt to “draw life”.

The first step consists in focusing on the “stroke”, while taking care not to reduce this resource purely to the representation of static forms. When taken together with inspiration from neuroscience, life sketches and animation make it possible to introduce the concept of “geometry without view-point”. This is a different geometric framework to central perspective: it determines precise angles of view but it does not constrain the whole composition to a unique point of view. This geometry captures the way compositions used in scientific drawing stimulate the viewer’s imagination. In order to transpose this phenomenon into the domain of computer graphics, I propose an algorithm for “turning around a stroke” (i.e. generating several views of a single stroke that has been made on paper), without the help of a virtual camera. This in turn suggests a connection between drawing and affine geometry, and a new meaning for the expression “vector drawing”.

The second concept I use is philosophical: it is the “Inoui” (the “unnoticed”), taken from the philosopher François Jullien, which I transpose into the domain of drawing. The “Inoui” allows us to become aware of a challenge that is very familiar to those who practice observational drawing: that of avoiding becoming bored by a representation that is too “flat” or “schematic”, which could ultimately obscure the richness of reality, while at the same time not letting your mind be overwhelmed by thoughts of a metaphysical “beyond”, that makes you forget what is in front of your eyes. The “geometry without view-point” appears necessary in order to access to the “unnoticed” spatiality of living bodies, since this last one relies on curves more than straight lines.

In the second part of this thesis, I use these concepts to analyse five “production experiments”. While not claiming to cover all fields of life sciences, they provide an overview through these different themes:

- anatomical drawing (morphing animation of Leonardo da Vinci drawings)
- early microbiology (fictional dialogue between Pasteur and Pouchet)
- immunity (experimental creation of a book for the general public)
- molecular biology (creation of a poster about tubulin)
- cell biology (visualisations across different scales)

Through this works, I show that “drawing life” is closely related to movement. Then, whether it is referred to as “animation” or “motion design”, movement allows a better understanding of the resources particular to drawing, 2D graphics and 3D imaging. I conclude with suggestions for re-integrating drawing in the training of future designers, architects, engineers or scientists.

An annex gathers several complementary publications on the possibility of creating a better balance between drawing by hand and using digital tools.

Résumé

Après quarante ans de développement des images numériques, quels sont les enjeux d'une rencontre entre le dessin et les sciences du vivant ? Les utilisations du dessin pour la transmission scientifique sont en plein renouveau, dans l'édition autant qu'en muséographie et dans le domaine de l'animation. Cependant la grande diversité des productions et des outils rend le phénomène difficile à appréhender. En rassemblant plusieurs articles et réalisations publiés entre 2016 et 2020, cette thèse introduit des concepts permettant de mieux cerner ce qui se joue dans chaque tentative pour « dessiner la vie ».

La première étape consiste à s'intéresser au « trait », en prenant garde de ne pas réduire cette ressource à la représentation de formes statiques. En s'inspirant de travaux initiés dans le domaine des neurosciences, le croquis sur le vif et l'animation permettent alors d'introduire le concept de « géométrie sans point de vue ». Il s'agit d'un cadre géométrique alternatif à la perspective centrale : il détermine des angles de vues précis sans pour autant ramener l'ensemble de la composition à un point de vue unique. Cette géométrie rend bien compte de la façon dont les compositions utilisées en dessin scientifique sollicitent l'imagination. Afin de porter cette réflexion dans le domaine de l'informatique graphique, je propose un algorithme permettant de « tourner autour d'un trait » (générer une série de vues d'un trait sous différents angles) sans faire appel à une caméra virtuelle. Ce travail suggère alors une connexion entre le dessin et la géométrie affine, ainsi qu'un nouveau sens pour la notion de « dessin vectoriel ».

Le second concept sur lequel je m'appuie est d'ordre philosophique : il s'agit de l'« inouï », que j'emprunte au philosophe François Jullien pour le porter dans le domaine du dessin. L'« inouï » permet de nommer un rapport au monde très familier pour les gens qui pratiquent le dessin d'observation : il s'agit à la fois d'échapper à l'ennui d'une représentation trop « plate » ou « schématique », qui recouvre et finit par cacher la richesse du réel, sans laisser pour autant la pensée se reporter dans un « au-delà » métaphysique, qui dépasse et fait oublier ce qui se trouve sous nos yeux. La « géométrie sans point de vue », qui repose sur les courbes plus que sur les lignes droites, apparaît alors comme une condition pour que le trait donne accès à la spatialité « inouïe » du vivant.

Dans la seconde partie de cette thèse, j'utilise ces concepts pour revenir sur cinq « expériences de réalisation » qui, sans prétendre couvrir tout le champ des sciences du vivant, en offrent une vision relativement large à travers ces différents thèmes :

- le dessin anatomique (animation par morphing de dessins de Léonard de Vinci)
- les débuts de la microbiologie (dialogue fictif entre Pasteur et Pouchet)
- l'immunité (création d'un livre expérimental pour tous publics)
- la biologie moléculaire (réalisation d'un poster sur la tubuline)
- la biologie cellulaire actuelle (visualisations dessinées à différentes échelles)

A travers ces travaux, je montre que l'enjeu de « dessiner la vie » est intimement lié au mouvement. Ce dernier, qu'on le nomme « animation » ou « motion design », permet alors une meilleure compréhension des ressources propres au dessin, au graphisme 2D et à l'imagerie 3D. Je conclurai en évoquant des pistes pour réintégrer le dessin dans la formation de jeunes designers, architectes, ingénieurs ou chercheurs.

En complément, une annexe regroupe plusieurs publications complémentaires, liées à la recherche d'un équilibre entre l'usage du dessin à la main et celui des outils numériques.

Table des matières

Introduction	page 9
Première partie :	
Une géométrie sans point de vue	page 23
<i>Chapitre 1 :</i>	
Du croquis au morphing : le rôle épistémologique du dessin.	page 25
<i>Chapitre 2 :</i>	
Tourner autour d'un trait	page 61
<i>Chapitre 3 :</i>	
Le dessin comme vecteur de transformation	page 85
Seconde partie : Les inouïs du vivant	page 97
<i>Chapitre 4 :</i>	
Vinci et le dessin anatomique : un retour aux sources	page 105
<i>Chapitre 5 :</i>	
Pasteur et Pouchet ou la double controverse	page 129
<i>Chapitre 6 :</i>	
L'aventure de Globule : rencontre avec une cellule immunitaire	page 141
<i>Chapitre 7 :</i>	
La tubuline: une molécule aux multiples visages	page 159
<i>Chapitre 8 :</i>	
La « 3D », la « 2D » et la ressource du dessin	page 183
Conclusion	page 207

Références	page 211
Annexes	
<i>Annexe 1 :</i> Pouvoir de représentation contre pouvoir absolu: le dessin scientifique confronté à la perspective	page 221
<i>Annexe 2 :</i> La pensée du trait	page 251
<i>Annexe 3 :</i> L'inouï à portée de crayon	page 263
<i>Annexe 3 :</i> L'inouï à portée de crayon	page 287
<i>Annexe 3 :</i> L'inouï à portée de crayon	page 295

Introduction

Le dessin à la main a-t-il un rôle à jouer vis-à-vis des sciences ? Vingt ans d'expérience dans le domaine du dessin, du cinéma d'animation scientifique et de la muséographie m'ont amené à formuler une « thèse » à ce propos. Je prends ici le mot « thèse » dans son sens original : celui d'une proposition que j'estime suffisamment importante pour la « poser », et l'offrir à la discussion. Cette thèse se résume assez simplement en ces termes : le dessin donne accès à une géométrie différente de celle qu'apporte la photographie, et cette géométrie est nécessaire pour accéder à la spatialité des corps vivants.

En dessin scientifique, cette spatialité concerne aussi bien le « fixe » que le « mobile » : elle peut concerner l'évocation d'une structure, autant que l'évolution d'un processus. Dans la pratique professionnelle en Art, Design ou Architecture, la spatialité est tout aussi fondamentale, sans que la notion d'espace soit très clairement identifiée pour autant. Il s'agit en tout cas d'un espace « sensible », à priori très différent de l'espace « abstrait » des mathématiciens. Le dessin se présente alors comme un outil privilégié pour explorer cet écart entre le monde des arts appliqués et le monde des mathématiques. Dès que la représentation de l'espace entre en jeu, le dessin fait en effet intervenir la géométrie. Et si une certaine adéquation entre le monde et sa représentation est recherchée, qu'il s'agisse de réaliser des croquis sous différents angles ou de dessiner en respectant certaines proportions, les concepts géométriques affleurent comme autant de point d'appui ou de brisants, selon la façon dont le dessinateur se comporte vis-à-vis d'eux.

Dans un manuel, un album ou un film, l'information spatiale donnée par les dessins devient accessible lorsqu'elle est mise en mouvement. Ce mouvement peut être invisible car il se joue dans l'imagination du lecteur ou du spectateur. Le texte joue alors un grand rôle pour induire certaines façons de voir. Le mouvement peut aussi être plus explicite, en faisant appel à l'animation. Dans tous les cas, il est important d'évoquer des transformations géométriques cohérentes avec la spatialité dont il est question, de telle façon que le public y voie non pas une distraction supplémentaire, mais la possibilité de renouveler son attention à la vie. De telles préoccupations jouent un rôle particulièrement important dans les documentaires diffusés à la télévision, dans les court-métrages diffusés sur internet, et dans les installations présentées dans les musées des sciences.

Malgré ces importants relais de diffusion, les principes géométriques sous-jacents à l'usage du dessin dans la transmission scientifique restent très flous, non seulement pour le grand public, mais aussi pour les commanditaires qui rédigent les appels d'offre. Ces principes relativement simples, souvent liés à l'éventail des transformations possibles en deux et en trois dimensions, ne sont ap-

paremment pas enseignés dans les formations scientifiques, ni dans les formations spécialisées en illustration ou en motion design. De plus, la conception des nouveaux logiciels de production ne tient plus compte de toute l'étendue des transformations utilisables pour animer un dessin réalisé à la main. L'intention de préparer une « thèse », cette fois au sens universitaire du terme, m'est venue lorsque j'ai réalisé que les concepts et les pratiques nécessaires pour représenter l'espace du vivant étaient si méconnus qu'un nouvel effort de clarification devenait indispensable.

1 - Le dessin : une recherche en amont des « arts » et des « sciences »

Dans les trente dernières années, plusieurs travaux de recherches impliquant le dessin à la main ont été menés. La plupart se sont appuyés sur les sciences cognitives, en faisant également appel aux sciences de l'éducation, à la philosophie et à l'informatique selon les cas. Sans chercher à en faire une liste exhaustive, je vais revenir sur certains d'entre eux, principalement en Angleterre et aux Etats-Unis tout d'abord, puis en France. En effet, les deux sphères culturelles n'ont pas développé leurs recherches sur le même rythme, mais elles permettent d'aboutir à la même constatation : en tant que pratique bien plus ancienne que les concepts d' « art » et de « science », le dessin constitue un lieu de rencontre privilégié pour des disciplines très différentes.

1.1 - La recherche sur le dessin dans le monde anglo-saxon

Le dessin a connu une certaine désaffection dans le monde artistique et scientifique au cours des années 70 et 80, mais l'émergence des sciences cognitives a ensuite ouvert de nouvelles façons de s'y intéresser. En comparaison de la France, le monde anglo-saxon a bénéficié d'une plus grande proximité entre les sciences cognitives et l'éducation. A partir des années 1990, la chercheuse Barbara Tversky en particulier s'est investie dans l'étude de la valeur pédagogique du dessin, en partant d'abord d'une recherche centrée sur les schémas et les conventions graphiques (Tversky 1995), pour aboutir à un intérêt plus général pour les croquis (Tversky 2002-1, 2009). Sur la lancée du projet Drawing and Cognition, plusieurs jeunes chercheuses, à la fois artistes et enseignantes, ont alors pu consacrer leur thèse au dessin au début des années 2010 (Brew 2015, Fava 2011, Kantrowitz 2011).

Angela Brew, Michelle Fava et Andrea Kantrowitz ont su entretenir cette dynamique en constituant le réseau « Thinking Through Drawing ». Ce dernier a permis de nouer un dialogue entre des approches très variées, depuis l'étude du mouvement des yeux au cours des séances de dessin (Brew 2011) jusqu'à l'usage de la philosophie pragmatique de Dewey dans les instructions données aux élèves (Simons 2011), en passant par la robotique (Tresset 2011) et l'entraînement des chirurgiens (Wright 2011). Tirant le bilan de ces rencontres, les organisatrices relevaient la nécessité de dépasser une opposition trompeuse entre les usages « artistiques » et « scientifiques » du dessin (Brew et al. 2013).

De façon plus diffuse, les ateliers animés dans le cadre du réseau « Thinking through drawing » ont également eu une influence sur la vogue de « facilitation graphique » tout au long des années 2010. Cette méthode consiste à développer une pensée en s'appuyant sur la dimension non-verbale du dessin. Elle s'est propagée dans les ateliers de « design thinking », dans les concerts, spectacles et conférences accompagnées par un « live sketching », et dans certains courts-métrages de « motion design ». Il serait très exagéré de dire que ces approches respectent toujours le temps nécessaire

pour vraiment intégrer une narration, mais elles ont contribué à redonner beaucoup de présence à « la main qui dessine » dans la culture populaire actuelle, y compris sur les réseaux sociaux.

1.2 - La recherche sur le dessin en France : entre cécité et innovation

En France, la recherche sur le dessin a eu plus de difficultés à se développer que dans le monde anglo-saxon. En science de l'éducation, le dessin d'enfant est souvent vu sous un angle psychanalytique, tandis qu'il ne constitue pas un axe fort de l'éducation artistique pour les adolescents. De plus, la possibilité de préparer une thèse en Art et Design est extrêmement récente. Il existe donc très peu de travaux de recherche s'intéressant aux processus du dessin à la main. Je vais donner quelques exemples qui, par la force des choses, peuvent aussi apparaître comme des efforts personnels.

En s'appuyant sur les sciences cognitives, un petit nombre de travaux ont pu être menés dans les années 2000, avant que leurs initiateurs ne s'orientent vers la pratique professionnelle. Alessandro Pignocchi a ainsi pu écrire une thèse sur les « Intentions du dessinateur » sous la direction de Roberto Casati (Pignocchi 2008), avant d'arrêter la recherche pour se tourner avec succès vers la réalisation de romans graphiques (Pignocchi 2019).

Mon propre travail de DEA, sous la direction de Kevin O'Regan, m'avait permis d'étudier l'attention visuelle à partir de scènes dessinées (Chabrier 1999). En utilisant les nouveaux outils numériques de l'époque pour introduire des transformations continues dans les dessins, j'avais pu mettre en évidence un nouveau phénomène de cécité attentionnelle, vis-à-vis des changements progressifs. Pour continuer à étudier ce type de transformation continue, j'ai ensuite menés des recherches sur le morphing entre 2002 et 2003, avant de développer l'animation par soustraction d'image entre 2003 et 2004, grâce à deux bourses successives du Laboratoire d'Imagerie Numérique (LIN) d'Angoulême. De tels travaux, aujourd'hui, prendraient naturellement la forme d'une thèse à l'interface du dessin, des neurosciences et de l'informatique graphique. Mais sur le moment, il n'existait pas de réseau adapté pour publier ces recherches, en France autant qu'à l'international : l'activité du LIN fut stoppée en 2004, et le projet Drawing and Cognition n'était pas encore lancé. Je me suis donc logiquement tourné vers des applications concrètes pour l'éducation, le spectacle et la muséographie.

Exactement au même moment, mais de l'autre côté de la France, la recherche en informatique graphique s'intéressait pourtant aussi à la question de « tourner autour d'un croquis ». A l'INRIA de Grenoble, David Bourguignon développait des méthodes pour visualiser des croquis dans l'espace, afin de faire des annotations sur des modèles 3D dans un contexte médical (Bourguignon, 2003). Ce travail dirigé par Marie-Paule Cani constitue dans les années 2000 l'un des rares exemples de thèse dédié en grande partie au dessin, en France, en tenant compte des moyens numériques modernes.

La thèse de David Bourguignon illustre très bien l'interdisciplinarité des recherches en dessin : les motivations pour étudier sa spatialité peuvent être liées à une application scientifique ou médicale, mais le processus pour élaborer de nouveaux outils passe souvent par des esquisses plus libres : paysages, arbres, oiseaux (Bourguignon 2001 et 2004). Il s'agit là d'un aspect fondamental que l'on retrouve souvent dans le dessin scientifique : une grande partie des ressources nécessaires pour le pratiquer, surtout si l'on s'adresse à un public élargi, se trouve en dehors du cadre habituellement donné par les sciences.

Les recherches menées en France, dans les années 2000, amènent donc aux mêmes conclusions que celles qui ont été poursuivies avec plus de constance dans le monde anglo-saxon : la rencontre entre le dessin et les sciences est plus que souhaitable, mais le dessin doit assumer une étrangeté qui ne s'accommode pas toujours des catégories universitaires existantes. Il ne se ramène en effet ni à un art, ni à une science, mais peut bénéficier aux deux s'il intervient suffisamment « en amont » pour participer à la pensée.

1.3 - La ressource du croquis

En revenant sur les travaux développés depuis vingt ans en relation avec le dessin, il est possible de relever deux partis-pris assez courants, qui ont pu mettre une limite à la portée de ces recherches. Le premier vient d'une mise à l'écart du dessin scientifique, l'autre d'un désintérêt pour l'animation.

En premier lieu, une séparation de principe entre dessin « artistique » et dessin « scientifique » est souvent faite. Comme le signale Alessandro Pignocchi dans sa thèse, cette distinction se justifie tout à fait si l'on compare les portraits dessinés par Giacometti, et les dessins d'oiseaux beaucoup plus neutres d'un manuel d'ornithologie pour le grand public. Il est toutefois nécessaire de rapporter les deux types de dessin à leur contexte de diffusion : le premier utilise une accumulation de traits pour se rapprocher d'aussi près qu'il peut de son sujet, en général un regard, sans se soucier de savoir si et comment le dessin va être reproduit. Le trait utilisé dans le second type de dessin, que l'on dit souvent « naturaliste », doit au contraire rester compréhensible par le lecteur après être passé par les filtres d'une impression de qualité moyenne et d'une réduction de format. On peut légitimement opposer les intentions des deux dessinateurs, en disant que l'un se situe dans une recherche « subjective », tandis que l'autre cherche à être « objectif ». Mais on peut aussi les rapprocher en considérant que tous les deux font l'effort de « donner accès » à une certaine partie du monde, en empruntant (avec plus ou moins de succès) des chemins qui ne se ressemblent pas.

Un grand nombre de dessins scientifiques produits au cours du 20^{ème} siècle ont ainsi dû s'adapter à des contraintes de publication peu compatibles avec la qualité habituelle des gravures au 19^{ème} siècle. En dessin scientifique, il peut donc exister des écarts considérables entre les modes de diffusion, qui eux-mêmes déterminent la richesse des textures utilisables et in fine influent fortement sur le trait. La dimension artistique de certains travaux sera indiscutable, tandis que d'autres apparaîtront froidement rationnels. Dans le travail que je présente ici, je m'efforce de rester en amont de ce type de séparation. Pour cela, je parle souvent du dessin au stade du croquis, avant qu'il ne soit « finalisé » d'une façon ou d'une autre : dans cet état peuvent alors émerger des principes de composition communs non seulement au dessin artistique et au dessin scientifique, mais aussi à l'art moderne et à la peinture chinoise.

1.4 -La ressource du mouvement.

Dans l'éducation, le désintérêt pour l'animation a été motivé par des doutes sur l'utilité réelle de cette dernière. L'animation est en effet surtout connue pour son pouvoir de distraction, et pour son utilisation massive dans l'industrie de l'« Entertainment ». Barbara Tversky a ainsi publié un article en collaboration avec l'INRIA intitulé « Animation, can it facilitate ? », en répondant par la négative (Tversky, 2002-2). Cependant, la question était liée à une catégorie d'animation particu-

lière, les schémas animés, qui sont devenus relativement faciles à produire avec les nouveaux outils numériques. Ces animations portent souvent, en effet, une information redondante par rapport au couplage d'un texte et d'un dessin fixe. Dans de tels cas, l'effort d'imagination fourni par un lecteur rend la présentation d'images statiques plus efficace. La présentation d'une animation, trop rapide et facile à oublier, n'aide effectivement pas à comprendre et mémoriser un phénomène.

Si l'animation pédagogique a été peu développée, les recherches sur l'interaction ont en revanche été extrêmement nombreuses dans les années 2000, en se focalisant principalement sur l'interaction avec un modèle numérique 3D. Les années 2010 ont ensuite vu la production de dispositifs interactifs se généraliser dans les contextes pédagogiques et muséographiques, en privilégiant plutôt l'approche « 2D » disponible à travers le logiciel Flash. De tels dispositifs interactifs intègrent alors des animations, mais ces dernières sont avant tout assujetties à l'action du joueur, du visiteur ou de l'internaute, selon le contexte. On peut ainsi relever, de façon générale, que l'intérêt de l'animation a été globalement nié par le secteur de l'édition, tandis que le secteur du multimédia l'a intégré sans s'y intéresser en détail.

Il est possible aujourd'hui de revenir sur l'animation en la considérant d'une autre façon, comme une extension naturelle du dessin. En pratique, la possibilité qu'un dessin se mette en mouvement est en effet perceptible dès les premières étapes d'un croquis. Ce potentiel de mouvement peut se concrétiser, si nécessaire, en faisant appel à des techniques d'animation bien choisies. L'animation s'avère alors extrêmement pertinente dans des contextes où les spectateurs disposent de toute leur attention, mais ne sont pas en situation d'étudier un manuel. Les grandes expositions scientifiques, qui se sont particulièrement développées en France à la Cité des Sciences dans les années 2010, ont montré l'efficacité de cette démarche pour aider le public à faire sens des représentations.

2 - La géométrie de la vie, sur le papier et sur l'écran

Le croquis et le mouvement apparaissent donc susceptibles de donner une plus grande extension à la pensée du dessin, en y intégrant mieux la portée scientifique et le potentiel de l'animation. Le croquis de corps en mouvement, qui ne par conséquent ne « posent » pas, apparaîtra tout du long de cette étude comme la pratique la plus simple pour mettre cette pensée en œuvre dans un carnet. Comme la pratique du croquis est totalement indépendante des techniques de création d'image numérique, elle nous permettra de mener tout d'abord une réflexion fondamentale sur la façon dont le dessin donne accès à la « géométrie de la vie ». J'emploie cette expression comme un raccourci pour désigner une géométrie accordée avec les corps vivants : elle ne peut donc pas se fonder uniquement sur des lignes droites, mais doit donner une grande importance aux courbures et aux textures.

Sur cette base, et dans un second temps, il sera alors possible de tenir compte de technologies plus nouvelles. Dans le contexte des productions, il est en effet difficile d'ignorer que le dessin est fortement concurrencé par deux autres façons de produire les images : les images de synthèse, souvent appelée « 3D », et les dessins dits « vectoriels », souvent appelés « 2D ». Ces outils ont bénéficié d'investissements et de développements considérables dans les années 2000 et 2010, mais le dessin n'a pas été en reste. Il a lui-même tiré parti de nouveaux outils pour l'impression et l'animation, permettant de gérer des textures plus riches, ce qui a eu pour effet de repositionner la matière du dessin sur le terrain du numérique. « 3D », « 2D » et « dessin » apparaissent aujourd'hui comme un triptyque de possibilités, dont il faut comprendre la complémentarité plutôt que d'essayer de remplacer l'un par l'autre.

Pour cela il est indispensable de mieux comprendre les contraintes géométriques que chacune de ces approches pose sur la représentation en général, et sur celle du vivant en particulier. Or la géométrie moderne repose avant tout sur les notions de transformation et d'invariant (Les invariants étant les aspects du monde qui ne changent pas lorsqu'on applique une certaine transformation). La notion de transformation, au sens mathématique, constitue alors une ressource précieuse car elle intègre aussi bien le « mouvement » que le « changement ». Comprendre la complémentarité entre les différentes ressources de représentation revient alors à se demander plus généralement quelles transformations sont accessibles en « 3D », en « 2D » et en dessin.

2.1 - Le dessin scientifique adopte-t-il un « point de vue » ?

Entre la « 2D » et la « 3D », trouver la place du dessin pose cependant un problème de vocabulaire géométrique évident. Si l'informatique graphique a développé de façon informelle le concept de « 2,5D », pour nommer des outils donnant un relief limité aux images, les travaux que j'ai menés sur le terrain, principalement en muséographie mais aussi dans l'édition, m'ont amené à comprendre que le problème pouvait être formulé autrement. En effet, si le dessin ne se trouve pas dans le plan de la « 2D », ni dans la perspective de la « 3D », ce n'est pas parce qu'il dégage plus de relief que l'un et moins que l'autre. C'est avant tout parce qu'il dégage une spatialité sans être assujéti pour autant à un « point de vue ». A partir de là, il était nécessaire d'articuler une réflexion plus aboutie que celle qui peut se développer au gré des appels d'offre.

Dans ce but, je me suis associé en 2014 au laboratoire de l'Ecole Nationale des Arts Décoratifs (Ensadlab). L'objectif était d'établir un premier lien avec l'univers récent de la recherche en Art et Design, avant de constituer les partenariats scientifiques complémentaires dans d'autres disciplines. Cette étape s'est conclue sous la forme d'une participation au colloque intitulé « Les images du pouvoir », à Lorient, dans laquelle je proposai de dégager le dessin scientifique d'un autre mode de représentation auquel on l'assimile souvent, la perspective centrale.

L'intervention a donné lieu en 2016 à la publication d'un chapitre intitulé « Pouvoir de représentation contre pouvoir absolu : le dessin scientifique confronté à la perspective ». Ce texte, donné en annexe, constitue le travail préparatoire de ma thèse. Il montre que le dessin scientifique n'est en général pas conçu pour coïncider avec un lieu et un instant d'observation particulier. Dès que plusieurs dessins sont rassemblés sur la même feuille pour composer leur spatialité, il n'est en effet plus possible de dire « où aurait été la caméra ». Cette liberté vis-à-vis d'un « point de vue » ouvre alors la possibilité de jouer avec plusieurs types d'indétermination liées à l'échelle, au temps ou encore à la texture.

2.2 - La spatialité du vivant

L'indétermination du dessin scientifique a été utilisée dans de nombreuses disciplines, mais elle semble jouer son rôle le plus important dans la représentation du vivant. Comparer plusieurs anatomies demande en effet de laisser l'imagination jouer avec les échelles. Créer un dessin qui ne se limite pas aux particularités d'un individu, mais qui donne aussi accès à tous les représentants d'une espèce, demande de rassembler dans chaque trait l'expérience de plusieurs visions. Enfin, apprendre à voir les formes suppose de graduer le dessin depuis l'esquisse jusqu'aux parties les plus

précises, en s'aidant des textures offertes par le frottement des outils sur le papier. Les enjeux liés à la représentation de l'espace dans les sciences du vivant constituent ainsi un angle privilégié pour comprendre ce qu'apporte le dessin à la main, par rapport à d'autres outils de représentation.

En 2016, au moment de choisir une direction pour approfondir ces recherches, je pouvais m'appuyer sur plusieurs expériences liées au monde des cellules : j'avais réalisé de nombreux dessins pour les chercheurs de l'Institut Curie au cours des années précédentes, et la Cité des Sciences m'avait donné l'occasion de réaliser un court-métrage sur le développement du cerveau. Ces réalisations indiquaient clairement la pertinence de la spatialité du dessin scientifique en biologie cellulaire et moléculaire, tout particulièrement pour aborder le mouvement des cellules, ainsi que le mouvement dans les cellules. Ce thème pouvait donc constituer un bon choix pour initier de nouveaux travaux, tout en construisant un discours plus général sur la représentation du vivant.

Trois rencontres ont alors décidé de la façon dont ce travail allait se poursuivre. Le biologiste Carsten Janke, l'informaticienne Marie-Paule Cani et le philosophe François Jullien ont chacun marqué leur intérêt pour ces recherches, si bien qu'une thèse a pu être officiellement commencée sous leur co-direction en novembre 2017. La biologie, l'informatique graphique et la philosophie allaient pouvoir se conjuguer de la façon suivante.

2.3 - Le rôle de la biologie

La biologie pose des problèmes fondamentaux : comment représenter une cellule ? Comment montrer une molécule ? Comment faire sentir les différentes échelles impliquées dans la vie d'un organisme ? Ces questions pouvaient apparaître techniques ou spécialisées il y a quelques années. Cependant la biodiversité et l'environnement sont aujourd'hui reconnus comme des enjeux majeurs par le grand public, et l'impact du monde microscopique sur les sociétés humaines ne fait plus de doute pour personne. La représentation de l'espace devient alors un enjeu central : sans elle, la biodiversité perd tout son relief, et les changements d'échelle deviennent trop symboliques pour être efficaces.

La biologie, en tant que discipline scientifique, offre cependant des ressources limitées pour représenter les phénomènes qu'elle étudie. Depuis les travaux d'Haeckel à la fin de 19^{ème} siècle, les sciences du vivant se sont assez peu investies sur le développement des outils de représentation, surtout lorsqu'ils s'adressent au grand public. Tandis que les disciplines liées à l'anatomie, la systématique et l'évolution ont pu maintenir et développer une expertise en dessin, en particulier au Muséum d'Histoire Naturelle, d'autres disciplines plus récentes se sont développées en ignorant largement cette ressource.

En biologie moléculaire, le principal effort de visualisation a porté sur les protéines, en utilisant les images de synthèse. Mais au-delà de cette échelle, les représentations utilisées par les chercheurs sont en général beaucoup plus schématiques et abstraites. Les chercheurs s'investissent en effet beaucoup dans l'« imagerie » (microscopie, scanner), tandis que les « visualisations » graphiques sont principalement réalisées à partir de formes simples et plates, dans le but d'abstraire et de symboliser au maximum l'explication de phénomènes complexes.

Cet aplatissement gêne souvent l'évocation de la spatialité des phénomènes, ce qui finit par poser de véritables problèmes dans la communication entre les chercheurs aussi bien que dans la conscience du grand public. Au contraire, le dessin peut s'appuyer sur la représentation de l'espace pour rendre accessible les univers microscopiques étudiés par les scientifiques. Dans le contexte de cette thèse, j'ai pu profiter de mon affiliation à l'Institut Curie pour réaliser un ensemble de dessins, d'animation et de projets de livre qui documentent la réflexion sur l'équilibrage des ressources de la « 3D », de la « 2D » et du dessin.

Ces réalisations viennent compléter un corpus de réalisations plus anciennes, de telle façon que l'ensemble apporte un éclairage plus général sur l'association du dessin et des sciences du vivant. Cependant il n'aurait pas été possible de nommer ce qui se joue dans ces rencontres, sans apporter de nouveaux concepts à l'aide de l'informatique graphique et de la philosophie.

2.4 - Le rôle de l'informatique graphique

L'informatique graphique est incontournable dans la pensée des représentations modernes qui plus est si l'on tient compte de l'animation et de l'interactivité. C'est cette discipline qui est à la source de la plupart des outils de visualisation utilisés aujourd'hui par les chercheurs (notamment en biologie), aussi bien que par le grand public (dans l'édition et dans les musées scientifiques). La majeure partie de l'informatique graphique est dédiée au développement des images de synthèse, c'est-à-dire de la « 3D », dans une logique de représentation qui s'écarte souvent de celle du dessin. Elle intègre également les recherches concentrées sur le graphisme « 2D ». Cependant, l'enjeu de la spatialité du dessin ne lui est pas étranger : la question d'interpréter « en 3D » une information donnée « en 2D » reste très présente dans le domaine, le plus souvent sous le nom de « sketch-based modeling ».

Marie-Paule Cani a dirigé plusieurs des travaux qui ont fait avancer ce domaine. Il était donc très intéressant, dans le cadre d'une recherche interdisciplinaire qui ne pouvait pas espérer faire une enquête complète sur le « sketch-based modeling », de pouvoir se rapporter à un ensemble de travaux cohérents et relativement représentatifs. Par ailleurs, l'informatique graphique entretient de nombreuses connexions avec d'autres disciplines scientifiques. Puisqu'elle se concentre souvent sur la création d'effets visuels efficaces, elle tient compte quand cela est possible de travaux liés à la perception des formes et aux neurosciences. Ces dernières ont pris une grande importance au cours de cette thèse, en me donnant les arguments nécessaires pour passer d'une « absence de point de vue », constatée dans la majorité des dessins scientifiques, au concept plus abouti d'une « géométrie sans point de vue ».

La grande qualité de l'informatique graphique, dans le cadre d'un travail en Art et Design, est son caractère appliqué : les concepts mathématiques et géométriques, aussi abstraits soient-ils, doivent in fine aboutir à un outil permettant de produire des images utilisables. Je me suis appuyé sur cette logique pour mettre mon discours sur la « spatialité du trait » à l'épreuve d'une implémentation, aussi limitée soit-elle au stade expérimental. J'ai donc développé un algorithme permettant de « tourner autour d'un trait », en partant de la texture capturée par une caméra.

Ces efforts pour expérimenter la notion de « géométrie sans point de vue » au niveau du trait ont été récompensés par la prise de conscience d'une connexion entre le dessin et la géométrie affine, en

cohérence avec les travaux de Tamar Flash (2007) mais avec une approche différente. Sur cette base, il est possible de proposer une façon véritablement nouvelle de voir le dessin : non plus comme une « image », mais comme un « vecteur » associé à une transformation.

2.5 - Le rôle de la philosophie

La philosophie de François Jullien a orienté mon travail très tôt, mais les recherches des trois dernières années ont pu bénéficier d'un tournant dans cette pensée, au moment même où il se produisait. Au cours des années 1990 et 2000, François Jullien a publié de nombreux livres permettant de nouer un dialogue entre pensée occidentale et pensée chinoise, en étudiant quels concepts occidentaux n'existaient pas ou étaient peu valorisés dans la pensée chinoise, et réciproquement. Les ouvrages « Eloge de la fadeur » ou « La grande image n'a pas de forme », par leur simple titre, montrent ainsi à quel point la valorisation de certaines notions en occident peut être remise en question par la pensée chinoise. Plutôt que relever des « Différences » entre deux civilisations, ce travail s'intéresse à l'« Entre » qui se trouve ouvert à l'occasion d'un « Ecart ». Mais plus récemment, François Jullien a fait évoluer cette réflexion : sachant qu'aucune des deux pensées occidentale ou chinoise, telles qu'elles se sont distinguées en se développant indépendamment l'une de l'autre, ne répond plus aux besoins du monde actuel, comment fonder une éthique à la hauteur des enjeux posés par la vie ? La pensée par écart peut alors être généralisée pour donner naissance à de nouveaux concepts.

Celui d'« inouï », développé dans le livre du même nom (Jullien, 2019), offre alors une ressource particulièrement importante pour comprendre la vie des chercheurs autant que celle des dessinateurs. La façon dont est présentée habituellement la recherche met habituellement en avant l'idée de « découverte ». On peut même dire, sans exagérer, qu'il s'agit d'une pression à la limite du vivable. Or les découvertes, en recherche, sont des événements exceptionnels. Est-ce à dire que le chercheur s'ennuie (ou se ronge), lorsqu'il ne découvre pas ? Il existe heureusement un autre rapport au réel, que François Jullien propose de nommer « inouï », et qui dépend d'un accès renouvelé à la richesse du monde, un « débordement qui n'est pas un dépassement ». Le quotidien et les motivations des chercheurs sont largement marqués par l'inouï, tant que leur travail n'est pas dénaturé par d'autres contraintes. Le dessin l'est peut-être plus encore, car il permet de partager les inouïs avec d'autres personnes.

Contrairement au concept de « géométrie sans point de vue », qui demandait d'abord à être construit, celui d'« inouï » pouvait être directement employé dans la partie du mémoire qui se concentre sur les sciences du vivant. D'autres concepts proposés par François Jullien y jouent également un rôle. De la même façon qu'en informatique graphique, je n'ai pas cherché à utiliser un plus large éventail de références philosophiques, dans la mesure où l'objectif était avant tout de développer un discours cohérent et fortement connecté à la pratique.

3 - Organisation du mémoire

Ce mémoire de thèse est composé d'une série de textes, d'articles et de réalisations, regroupés en deux parties. En plus de l'expérience du dessin, qui constitue la base commune de tout ce mémoire, la première partie se réfère principalement aux neurosciences et à l'informatique graphique, tandis que la seconde fait avant tout intervenir les sciences du vivant. La philosophie est diffuse dans l'ensemble du mémoire, la première partie faisant notamment intervenir le concept d' « Ecart », et la seconde celui d' « Inouï ».

Première partie : Une géométrie sans point de vue

Cette partie s'attache d'abord à établir la pertinence de la « géométrie sans point de vue » dans le croquis de corps vivants. Elle utilise ensuite ce concept pour s'intéresser à la spatialité du trait.

Chapitre 1 : Du croquis au morphing : le rôle épistémologique du dessin.

Le dessin a de tout évidence un rôle épistémologique, mais en quoi consiste-t-il ? Ce chapitre propose d'abord une introduction aux enjeux combinés du croquis et du mouvement, en interrogeant la relation entre le dessin et les transformations. L'idée que le cerveau utilise plusieurs géométries, nouvellement admise par les neuroscientifiques, autorise à penser que le rôle épistémologique du dessin est lié à une « géométrie sans point de vue ». Celle-ci joue un rôle important dans le dessin scientifique, mais elle se retrouve aussi bien dans le croquis que dans l'animation par « morphing ». Rédigé en anglais, ce chapitre s'adresse à un public scientifique général.

(Chapitre en anglais, en cours de publication dans « Space-time geometries for motion and perception in the brain and the arts », Lecture notes in morphogenesis, Springer, 2020)

Chapitre 2 : Tourner autour d'un trait

Ce chapitre tire les conséquences du chapitre 1, qui met en évidence une relation forte entre la géométrie sans point de vue et la spatialité du trait. Je propose alors une méthode originale pour « tourner autour d'un trait » en faisant intervenir la géométrie affine plutôt que la géométrie projective. Cette démarche vise avant tout à explorer une hypothèse, selon laquelle la spatialité du trait peut être interprétée à l'aide d'une combinaison d'écart et de soustractions. Ce chapitre est ciblé sur un public relativement familier avec l'informatique graphique, mais il n'utilise que des mathématiques élémentaires et il est accompagné de nombreuses illustrations qui en facilitent la lecture.

(Communication présentée en juillet 2020 durant les journées du Groupe de Travail du GDR IGRV en Modélisation Géométrique)

Chapitre 3 : Le dessin comme vecteur de transformation

Avant de conclure la première partie, ce court chapitre revient sur l'utilisation récurrente de la géométrie affine dans les travaux qui s'intéressent au trait. Je montre que si une image peut être considérée comme un point, dans un espace de grande dimension, alors le dessin peut être considéré comme un vecteur. Sans demander aucun concept mathématique avancé, cette

proposition met en avant la façon dont un dessin indique et oriente les possibilités de transformation. Elle résout ainsi de nombreuses contradictions quant au vocabulaire employé pour présenter les fonctions du dessin, et résume l'apport théorique de ce mémoire.

(Texte en préparation pour le colloque Dé-coïncidence: du théologique au politique, 4-5 décembre 2020)

Seconde partie : Les inouïs du vivant

La seconde partie du mémoire relate cinq rencontres entre le dessin et les sciences du vivant, en suivant un fil chronologique. Chaque chapitre commence donc par situer une question de représentation dans son contexte historique, avant de se concentrer sur « l'envers du décor » d'une production dans laquelle j'ai été engagé. Il s'agit donc, à chaque fois, d'un parallèle entre ce que le dessin pouvait apporter aux sciences du vivant autrefois, et la façon dont on peut l'utiliser aujourd'hui. Au cours de ces cinq chapitres interviennent progressivement des concepts, tels que la « géométrie sans point de vue », l'« inouï », le « contexte » ou encore la « variance », qui permettent de mieux faire apparaître l'utilité du dessin vis-à-vis des outils de représentation numériques couramment employés.

Chapitre 4 : Vinci et le dessin anatomique : un retour aux sources

Ce chapitre aborde brièvement la question fondamentale du dessin anatomique, avant de présenter les moyens disponibles pour le mettre en mouvement. Les dessins anatomiques de Léonard de Vinci apparaissent alors comme une base de réflexion fondamentale pour appréhender la spatialité du dessin scientifique, telle qu'elle a été mise en œuvre ensuite pendant plusieurs siècles.

(Chapitre en cours de publication dans les actes du colloque international : « Léonard de Vinci, Anatomiste. Pionnier de l'anatomie comparée, de la biomécanique, de la bionique et de la physiognomonie », CNRS édition, 2021)

Chapitre 5 : Pasteur et Pouchet ou la double controverse

Ce chapitre aborde une question de représentation plus abstraite qui prend beaucoup d'importance au 19^{ème} siècle, celle du monde microscopique. Pasteur et Pouchet s'opposent alors dans une controverse qui est devenu un passage obligé en philosophie des sciences, à la suite des travaux de Bruno Latour. En racontant comment j'ai pu écrire un dialogue pour un théâtre optique mettant en scène les deux personnages, ce chapitre se concentre avant tout sur le complémentaire fondamental du dessin, c'est-à-dire le langage.

(Théâtre optique présenté dans l'exposition Pasteur, l'expérimentateur », Cité des Sciences et de l'Industrie, décembre 2017 - août 2018)

Chapitre 6 : Rencontre avec les cellules immunitaires

A la fin du 19^{ème} siècle, l'exploration de l'immunité prolonge très vite la découverte des microbes. Des cellules immunitaires, mobiles sont alors mises en évidence par Metchnikov. Les cellules dendritiques, qui font le relais entre l'immunité innée et l'immunité acquise, intéressent aujourd'hui beaucoup les chercheurs. Ce chapitre raconte une tentative pour rendre ces re-

cherches accessibles à un large public, sous la forme d'un livre associant étroitement le langage et le dessin. Il ouvre par ailleurs une réflexion plus poussée sur le rôle des « inouïs » dans la transmission scientifique.

(Globule n°1 a été diffusé de façon expérimentale en 2018 et 2019, à 500 exemplaires respectivement en français et en anglais dans les milieux de la recherche et de l'éducation)

Chapitre 7 : La tubuline: une molécule aux multiples visages

La vision que les chercheurs se sont fait des molécules au 20^{ème} siècle, a été façonnée par la mécanique quantique, la biochimie et la biologie moléculaire. Ce chapitre se concentre sur la représentation des protéines, en rappelant qu'un conflit sur leur nature « statistique » ou « structurée », dans les années 30, a débouché sur la mise en évidence indiscutable de macromolécules très structurées (Morange 1993). Dans les années 1960, plusieurs chercheurs ont ensuite fait appel au dessin pour représenter la spatialité des liaisons atomiques et moléculaires

En explorant le rôle d'une molécule particulière impliquée dans le cytosquelette, la tubuline, les chercheurs montrent aujourd'hui que la partie « non structurée » d'une molécule peut aussi jouer un rôle décisif dans la vie de la cellule. Cette façon de prendre en compte plusieurs aspects du monde moléculaire à la fois pose des questions épistémologiques profondes, dont le dessin peut aider à faire prendre conscience. La réalisation de croquis sur le vif durant la conférence internationale organisée en 2016 pour les cinquante ans de la découverte de la tubuline, ainsi que la composition d'une affiche à posteriori m'ont permis d'expérimenter certaines de ces solutions.

(L'affiche présentée a été diffusée par la European Molecular Biology Organization auprès de la plupart des spécialistes de la discipline)

Chapitre 8 : La « 3D », la « 2D » et la ressource du trait

La biologie cellulaire, telle qu'elle apparaît aujourd'hui, est issue d'un profond renouveau. Au cours des années 1980, elle a intégré la biologie moléculaire, tout en montrant l'importance de structures largement méconnues auparavant, comme le cytosquelette et les compartiments, qui imposent de prendre en compte plusieurs échelles de travail. L'effort considérable qui était demandé aux chercheurs pour intégrer des informations aussi hétérogènes les a conduits à développer un type particulier d'illustrations simplifiées, utilisé notamment dans le manuel de référence *Molecular Biology of the Cell*.

Dans un second temps, les outils numériques de création d'images « 2D » se sont démocratisés, et ont conduit les chercheurs à multiplier les représentations schématiques, d'une façon plus ou moins bien contrôlée. Les visualisations « 3D », pour leur part, ont connu un grand succès, sans qu'émerge pour autant une maîtrise partagée de ce type d'outils.

La situation actuelle montre un phénoménal éclatement des représentations utilisées en biologie. Le dessin se trouve alors régulièrement en situation de le résoudre, quand il en a les moyens. Je présenterai différents cas d'étude qui se ramènent souvent à des questions relativement basiques de spatialité et d'échelle. Je montrerai alors comment la réalisation d'un court-métrage ou d'une séquence animée met en œuvre la nouvelle répartition des rôles entre « images de synthèse », « visualisation de données » et « dessin ».

Conclusion

Pour conclure, je reviendrai sur le rôle que le dessin est susceptible de jouer dans un futur proche. Les expériences de réalisation évoquées dans le mémoire montrent d'une part l'ampleur du besoin de dessin dans les sciences du vivant. D'autre part, les enjeux liés au dessin des corps vivants montrent l'intérêt de développer une culture géométrique plus complète, que les scientifiques et designers ont tout intérêt à se réapproprier. Réintégrer cette « géométrie de la vie » à différents niveaux de formation apparaît comme un chantier important pour les années à venir.

Références

Annexes

Ce mémoire est complété par cinq publications en annexe :

Annexe 1 :

« Pouvoir de représentation contre pouvoir absolu : le dessin scientifique confronté à la perspective » aborde le rôle de l'indétermination dans le dessin scientifique, en y montrant l'absence de « point de vue ».

(Article publié en 2016 dans les actes du colloque « Les images du pouvoir », Lorient, 2015)

Annexe 2 :

« La pensée du trait » rapproche le dessin scientifique et la peinture chinoise, dans la continuité d'une exposition de dessins présentée durant la Biennale d'Art Contemporain du Grand Taipei en 2016

(Article publié en 2017 dans la revue ArtPress 2 n° 46 : philosophie de François Jullien. Des concepts proposés à l'Art)

Annexe 3 :

« L'inouï à portée de crayon » aborde le rôle de l'inouï dans la pratique du dessin, au sens que François Jullien donne à ce concept.

(Article publié en 2020 dans Art et Concepts. Chantier Philosophique de François Jullien / Ateliers d'artistes, PUF)

Annexe 4:

« The comeback of hand drawing in modern life sciences »

(Article écrit avec Carsten Janke et publié en 2017 dans Nature Cell and Molecular Biology)

Annexe 5:

«Reconstructing cell migration at a glance»

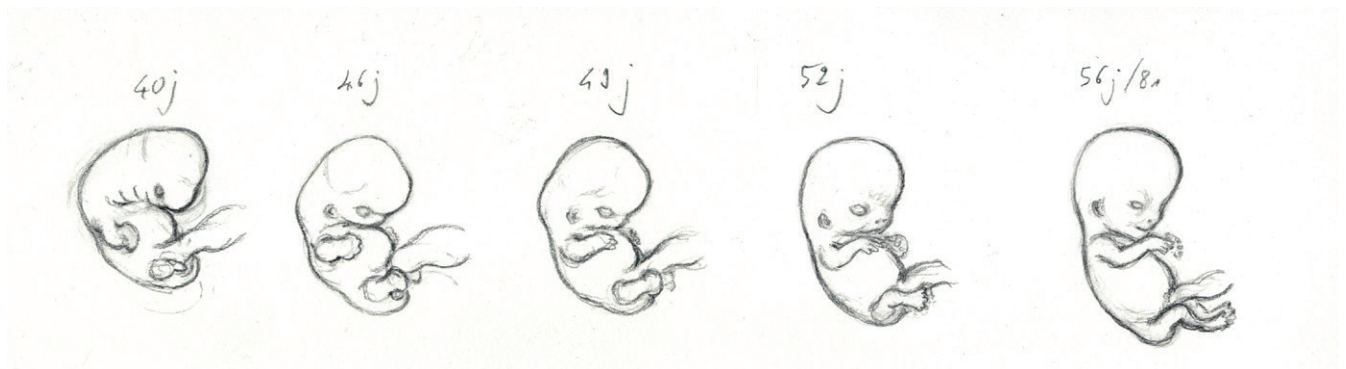
(Poster réalisé avec l'équipe de Matthieu Piel et publié en 2019 dans The Journal of Cell Science)

Première partie:

**UNE GÉOMÉTRIE
SANS POINT DE VUE**

Chapitre 1

Du croquis au morphing: le rôle épistémologique du dessin



Chapitre écrit et publié à la suite de la conférence
«Space-time Geometries and Movements in the Brain and in the Arts»
Institut des Etudes Avancées, Paris
2-3 juillet 2020

Publication n°1 :

Un chapitre en lien avec les neurosciences

Le dessin pose autant de questions à la géométrie qu'aux neurosciences. L'opportunité de renouer simultanément avec ces deux disciplines m'a été donnée par Alain Berthoz, Tamar Flash et Daniel Bennequin, quand ils m'ont invité à intervenir dans la conférence « Space-time representations and movements in the brain and in the art », en 2018. J'y présentai le fait que la spatialité des corps dessinés ne dépend en général pas de la perspective centrale, et je montrai comment cette propriété se déclinait dans un carnet de croquis aussi bien que dans l'animation par morphing.

A la suite de cette conférence, les organisateurs ont proposé d'écrire un chapitre. J'ai alors souhaité intégrer beaucoup plus solidement dans ma réflexion leur idée directrice : le cerveau n'utiliserait pas une seule, mais plusieurs géométries, c'est-à-dire plusieurs ensembles de transformations différents. L'écriture du chapitre « From Sketches to morphing : new geometric views on the epistemological role of drawing » a ainsi constitué l'étape théorique la plus décisive de cette thèse. Il fallait en effet passer du simple constat de l'« absence de point de vue » au concept plus étayé d'une « géométrie sans point de vue », qui ouvre la possibilité d'une réflexion sur les transformations du trait.

J'ai choisi d'ouvrir le mémoire de thèse par ce chapitre car il rappelle et prolonge une grande partie des idées introduites dans mon article préparatoire de 2016. Le travail d'écriture et de relecture en anglais a été l'occasion découvrir des différences culturelles inattendues entre les mondes anglo-saxon et francophone, en ce qui concerne la pensée du dessin. J'ai donc choisi de mettre en avant le concept de « trait » (stroke) plutôt que celui de « ligne » (line), parce qu'il est moins chargé de références esthétiques, et qu'il porte mieux les aspects gestuels et matériels indissociables du dessin à la main.



<https://www.paris-iaa.fr/en/events/space-time-geometries-and-movement-in-the-brain-and-in-the-arts-2>

From sketches to morphing: New geometric views on the epistemological role of drawing

In: Flash T & Berthoz A (eds) «Space-time geometries for motion and perception in the brain and the arts», Springer Series «Lecture notes in morphogenesis», 2020 (in press)

Abstract

Geometry, in the modern sense of the term, is based on the study of transformations. The diversity of those transformations has recently been used to understand the diversity of spatio-temporal representations in the brain. I argue that this new association between geometry and neuroscience can also change the way we consider drawing. The role of transformations is thus evaluated here in three differing examples, all involving the drawing of living bodies: drawing from the nude, drawing a sequence of movements, and life sketching. This analysis indicates that “strokes”, rather than “lines”, play a fundamental role when drawing living beings. On this basis then, it is possible to put aside the classical approach to dealing with spatial representations through “central” or “linear” perspective, and to highlight alternative principles of spatial composition such as drawing “without a point of view”. This attempt to connect drawing with modern geometry and neuroscience leads to a re-evaluation of the epistemological importance of digital animation tools, according to their geometrical premises. I will discuss in more detail the role of morphing-based animation, which is based primarily on texture transformations rather than virtual cameras. The development of such a complete approach to drawing, including all its static, moving and transformational aspects, will emerge as a vital step in addressing the new challenges raised by the representation of life in the twenty-first century.

Introduction

Geometry maintained an important relationship with drawing for more than two millennia. Then, over the course of the last two centuries, the connection was gradually severed: geometry with all its developments in physics became seemingly too abstract to be studied with the aid of drawing. Indeed, the strange and fascinating aspects of space-time at the scale of atoms or galaxies had little to do with the experience of life at human scale, where drawing practice is deeply rooted.

While these new scientific fields were being explored, major discoveries and innovations were altering the practice of drawing in the Western world: modern art questioned the use of central (i.e. linear) perspective, animated cartoons explicitly introduced movement into images, and new methods introduced by both biomechanics and modern dance modified the way artists were looking at bodies. The discovery of techniques distant in time such as rock paintings, as well as distant in space such as Chinese painting or Japanese prints, also highlighted a certain universality of drawing.

In these circumstances, it may seem logical that a new, more global understanding of the practice of drawing should emerge, in both an international and holistic sense, but this has not been the case. As the philosopher Philippe Grossos (2017) indicates, the interest in symbols has led, over a long period, to neglect of the qualities of movement and presence that are fundamental in rock

art. Similarly, the interest in central perspective as a symbol of power has greatly overshadowed the analysis of living bodies represented in the same scenes (Chabrier, 2016). Indeed, the majority of reference studies such as those of Leroi-Gourhan (1965) on cave art archaeology or Panofsky (1927) on the aesthetic philosophy of renaissance painting prefer to distinguish separate symbolic systems, rather than appreciating the quality of spatio-temporal representations of living bodies in various context.

However, in recent decades, both cognitive science and neuroscience began to explore how the brain deals with space and time. An important idea was introduced: we animals and humans use not only one single universal geometry, but a set of different geometries depending on the task (Bennequin et al. 2009). In this chapter, we will see that this idea opens up the possibility of reconnecting modern geometry with drawing, especially in the case of the representation of living bodies. In the first part of this text, I will present very simply the fundamental role of transformations in the relatively recent re-definition of geometry, then I will discuss the application of this approach in neuroscience. I will propose using drawing both as a means of accessing the different geometries used by the brain and as an effective training tool to make good use of them.

In the second part, we will go on to examine the practice of drawing living bodies by looking for what transformations they imply. We will examine three situations respectively: drawing from the nude, sequence drawing, and life sketching. Each time, I will introduce historical elements to show how these drawing practices have evolved since the late nineteenth century. This analysis in terms of transformations will highlight the fundamental role played by the spatiality of the stroke. I will propose viewing the stroke as an exemplary case of “simplicity”, a tool for managing in a simple way a complex problem such as the representation of living beings. Using the word “stroke”, instead of “line”, will be a key aspect of this text. Indeed, the word “line” has a precise mathematical meaning: a line has a null curvature, otherwise it is described as a “curve”. Furthermore, those concepts of line and curve create abstraction from materiality: they do not take into account what the lines and curves are made of. Unlike “line”, the word “stroke” is not used in mathematics: it relates to a combination of gestures and traces on paper, with limitless possibilities of both trajectories and material textures. Consequently, speaking of “strokes” instead of “lines” or “curves”, when a precise mathematical meaning is not what matters, prevents confusion between different levels of abstraction.

The third part will extend this reflection by examining the way in which several bodies, represented by means of the spatiality of the stroke, can be composed on the same sheet. I will highlight the existence of a geometry “without a point of view” whose use, highly developed in both the arts and the sciences, has been largely overshadowed by the attention paid to central perspective. I will present the technique of morphing-based animation, which can transform, in multiple ways, drawings created using a geometry without a point of view. Morphing will consequently be shown to be a natural extension of drawing, just as 3D computer graphics are a natural extension of both central perspective and photography. From sketching to morphing, this analysis in terms of transformations will emerge as a new overall framework for understanding the epistemological role of drawing. With the help of a philosophical reflection on the respective resources of Eastern and Western art, I will suggest the possibility of new collaborations between production, education and research.

Part 1: Multiple geometries in the drawer's brain

Geometry as a study of transformations

In the culture of non-mathematicians, the word “geometry” is generally used when speaking of distances and angles between various objects, or between different parts of the same object. The basic elements of geometry taught in school usually involve very static objects in two dimensions such as circles, lines, triangles or more complex polyhedrons. Consequently, the collective and popular understanding of the word “geometry” is still very close to the one expressed by Plato a long time ago: that this science is dedicated to the study of ideal, perfect and unchangeable forms.

In the mathematics community, however, the word “geometry” has taken on a very different meaning over the past 150 years. In 1872, Klein suggested replacing this study of static forms, inherited from Euclid, with another far more general discipline: the study of transformations allowing the passing from one “mathematical object” to the other. Some of those transformations are well known (displacements, also called translations, rotations...) while others are less familiar (affine transformations, perspective transformations...). The important concept is that each type of transformation allows us to associate or to differentiate among the objects that are studied: for example, two triangles presented one next to the other will be said to be equivalent for translation if a simple displacement makes the left one exactly cover the right one (or the opposite). With more complex transformations (rotation, change of scale, shearing...), mathematicians are able to create various classes of equivalence between the objects they are interested in, some of them being more intuitive than others. According to Klein's approach, then, a “geometry” is defined by what one can do with a certain kind of transformation; thus, there is not one, but many geometries.

Clearly, a deep epistemological gap lies between those two notions of geometry: one is “unique” and is based on unchangeable forms, the other is “multiple” and seeks possibilities for transformation. In the twentieth century, replacing the existing geometry with a more “modern” one in basic education was a fundamental challenge. However, despite the efforts of teachers to bring about this change (especially in France during the second half of the century), one must admit that the modern meaning of the word “geometry” was never adopted by the general public. Meanwhile, during the same period, the basic teaching of classical geometry progressively weakened, even in scientific and technical programs. One can remark that this double failure coincides with the neglect or even the rejection of the use of drawing in the teaching of mathematics, well before the more recent and radical change in representation practice due to digital tools. This separation between drawing and mathematics is partly due to the fact that drawing has long been seen as a “static” and “realist” representation tool in Western society. Thus, it seemed fundamentally incompatible with the development of a new concept of abstract transformation. Nonetheless, we can observe that a number of mathematicians make effective use of handmade drawings when explaining their research to a wider audience, such as Patrick Popescu-Pampu when he addresses the relationship between topology and geometry (2018; see also **Online resource [b]**).

The brain can use multiple types of transformations

Whatever the discussion of the teaching of “geometries” in education may be, we can observe that a perfectly normal brain without special mathematical training uses at least three geometries. They

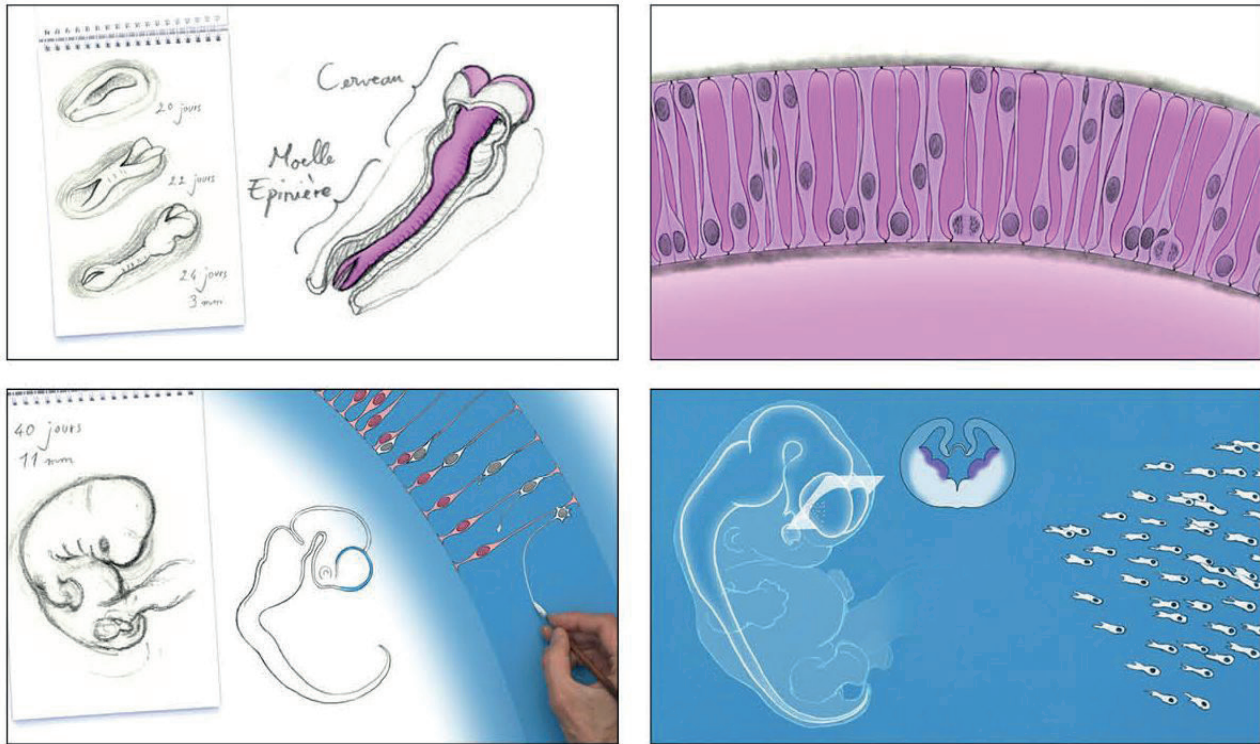


Figure 1: Showing transformations of the brain with transformations of drawings.

Images from “Birth of a brain”, directed and drawn by R. Chabrier for the “Brain” exhibition at Cité des Sciences et de l’Industrie, 2014.

are based respectively on simple displacement (translation), scale change, and rotation. These three “basic” transformations allow us to judge that several forms are not only alike, but alike in different ways and at different levels. Today, such transformations are widely used in modern animation and motion design, since animation software makes them very accessible. Before the widespread use of digital tools, however, artists like Norman McLaren showed the expressive richness of animations rigorously limited to a few transformations of this kind in short movies like “Vertical Lines” (1960). Similarly, psychologists have used very basic animations, such as moving triangles, in order to study the tendency for humans to assign a personality to moving objects (Heider, Simmel, 1944; White et al., 2011). Clearly, the conceptual facility of displacement, rotation and (small) scale change has allowed a natural connection between animation and cognitive psychology, both before and after the introduction of digital technologies: animated stimuli played an important part in the study of how the brain deals with transformations.

Owing to a long philosophical tradition going back to Aristotle, movement is generally considered to be a secondary attribute of form: you create a form, and then you can move it. However, the practice of animation enables a conceptual reversal, very similar to the one that we just discussed in mathematics. Indeed, in an animated sequence, it often appears that forms exist for the viewer mainly through their movement. Another way to describe this is to say that the forms presented to the audience remain invisible (or rather, neglected) if they are not carried by a work of transformation, which reveals them and orients the way they are perceived.

Transformation are present everywhere in animation. “Simple” parameters of position, size and rotation can be considered as fundamental transformations, especially in the context of documentary films. They are intended to be used with subtlety, in order to induce various evolutions in the imagination of the audience: indeed, a simple zoom on an image, centered on the right place with the right dynamics, can alter the intelligibility of a sequence. The short film “Birth of a Brain” (**Figure 1** and **Movie [1]**) is a good example. It aims to make brain development accessible to a wide audience by showing the richness of the associated spatiotemporal phenomena. A wide range of transformations are used in this film, including morphing, which we will discuss later. Many of them are based on the basic operations that we have just described.

While those very simple (but very efficient) examples do not challenge the geometric world we are familiar with, it appears that other more unexpected geometries also coexist in the brain. This idea has been developed from studies of “simple” curved movements in tracing tasks, and studies of trajectories in locomotion tasks. Bennequin, Fuchs, Berthoz and Flash (2009) found that such movements could be transformed one into the other according to a number of specific geometric rules. Bennequin and Berthoz (2017) also proposed extending this approach to more complex movements like prehension, with more advanced mathematical tools. Henceforth, the “objects” that those researchers are interested in are no longer static forms, possibly animated, like squares or triangles. Those objects are in fact defined in time and space: they can be in motion, and the geometries concerned can even be used to represent forces.

The rigorous expression of these last mathematical ideas is very abstract, and somewhat inaccessible even with a scientific background, such as the “geometries without points” of Elie Cartan (Ivey T, Landsberg, 2003). Moreover, those concepts are applied to neuroscientific observations, which can also be difficult to understand. In addition, animation techniques that use more complex trans-

formations than displacement, rotation and scale change require a distinct professional training, incompatible with a scientific career. Thus, the connection between animation and science has become quite strained. But if the brain indeed works this way at the functional level, we can infer several consequences.

Drawing as a way to access to the diversity of geometries

First, it should be possible to detect the influence of those multiple geometries in many human activities, and perhaps find examples that are easier to understand, to experiment with, or to sense, than their mathematical expression. Drawing makes a very good candidate for this investigation, because it can change both “three-dimensional reality” and “abstract thinking”, into fascinating fields for geometrical explorations. Escher’s etchings already provide well-known examples of this fact in imaginary worlds, but further on we will see that interesting geometrical challenges can be found in the reality in front of us, as soon as we pay attention to the spatiality of living beings.

Second, it may be necessary to assume the geometrical richness of human activities, in order to better evaluate the benefit that the brain derives from their practice. In particular, many manual activities related to “arts and crafts” like woodworking or modelling, are better appreciated today for their balancing function. In contrast with “pure” digital practices, they involve gesture, in which trajectories and forces are closely embedded. Adopting Daniel Bennequin’s proposition, we can consider those actions to be necessarily related to more complex geometries than the Euclidian one, integrating forces in particular.

Once again, drawing can play here an interesting role of mediation between the concrete and the abstract. Indeed, while aiming at the work of representation prior to production, fabrication or construction, the materiality of the paper and the tools (pen, charcoal, black stone, brush...) implies a play of forces between thrust, traction and friction, which must be partially integrated in planning a gesture.

While the proposition of Berthoz, Flash and Bennequin initiates a new way of considering spatiotemporal representations in the brain, it also encourages a change in the way we consider the activities that generate those representations, which can lead in turn to a fundamental reevaluation of manual craft. If we follow the logic of the authors, initially proposed by Klein, the key lies in the possibilities of transformation. Consequently, we will now take a look at drawing in this way, focusing, at first, on sketching living beings, then on composition, and finally on morphing-based animation, in order to understand which geometries arise from those practices.

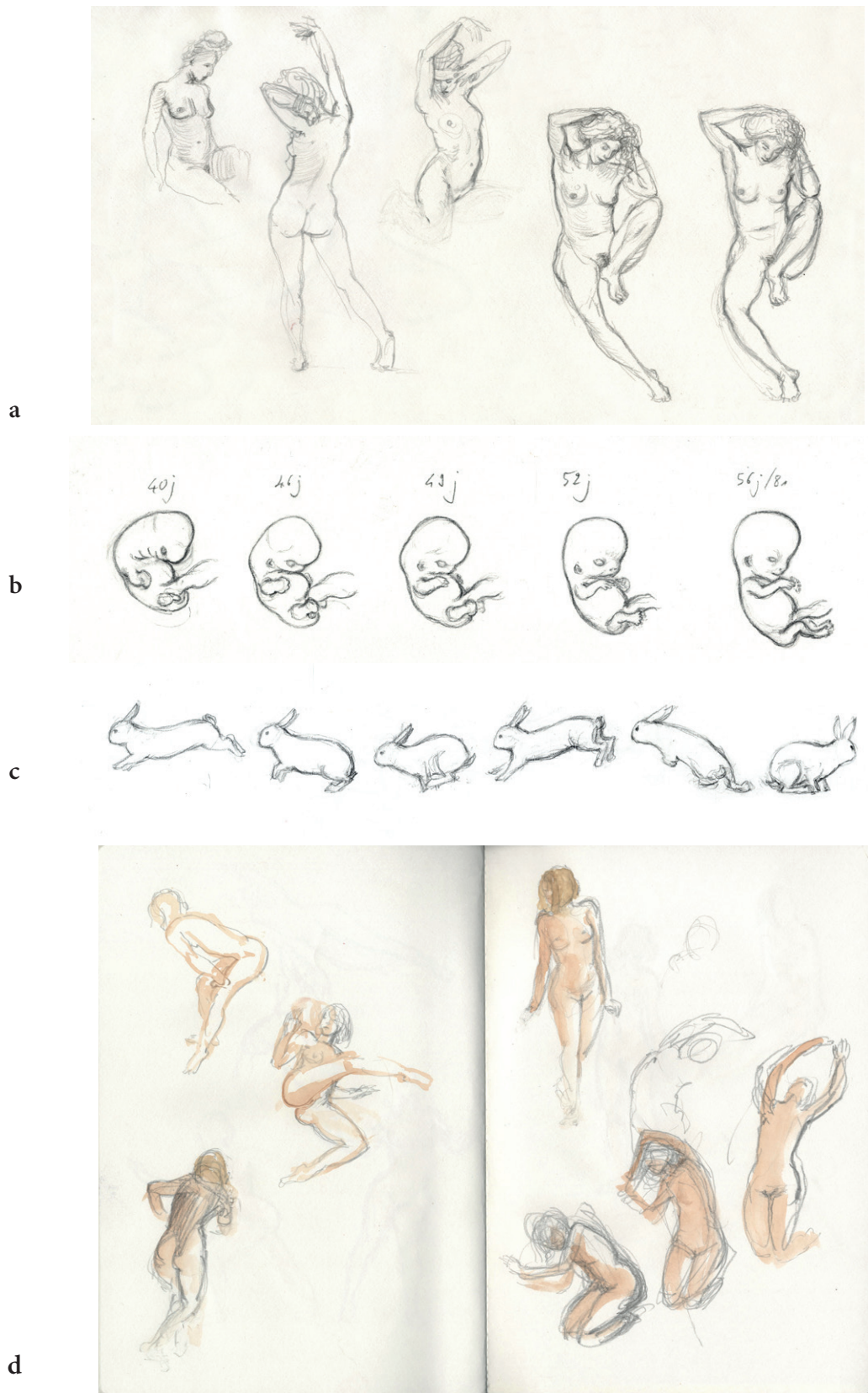


Figure 2: Various ways of drawing involve different attitudes towards transformations in general, and body movements in particular. Drawings by R. Chabrier.

a: Drawing from the nude asks the real model to suspend his/her transformations for a few minutes.

b, c: Sequence drawing develops the transformations of an imaginary body in an ordered, analytical way.

d: Life sketches let the model or subject free to transform itself, and use this information for free composition.

Part 2: Drawing living beings, from transformations to strokes

Fundamentally, drawing is a temporal process. It simply cannot be idealized as an instant event. This clearly distinguishes it from photography, which is generally based on extremely rapid shooting. As soon as one tries to draw living beings that can move and change, the time taken by the act of drawing opens the door to many transformations, as much in the subject drawn as in the draftsman himself. However, these transformations will appear very differently depending on the contexts in which the drawing is practiced. I will now review drawing from the nude, drawing in sequence, and life sketching. As we will see, those three approaches to representing life through drawing are related to different epistemological backgrounds, that may hide or highlight the way transformations are involved. Thus the main purpose of this section is to clarify this situation. It will become clear that the concept of “stroke” provides a more accurate basis than the usual concept of “line”, if we are interested in thinking about drawing in terms of transformations.

Suspending transformations: drawing from the nude

The nude illustrates well the temporality of drawing. A session usually lasts three hours, during which the model adopts poses of different durations (2, 5, 10, 20, 30 or 45 min ...). During each pose, the models focus on suspending the transformation of their body, in order to let themselves be drawn. But throughout these three hours, many other transformations occur in both the draftsmen and the models: the postures are relaxed or refined, the breathing is stabilized, time takes on a different density, the hand adapts to the attrition and sharpening of the tool, the drawing itself evolves. These are “invisible” transformations that are well known to trained draftsmen and models, but are at the same time difficult to describe and analyse.

Once the session is over, the spatial presence of the model, translated by the drawing, remains on the sheet of paper. This presence can also be interpreted in terms of transformations: the drawing suggests what would happen if one started to turn the drawn body around, or if this drawn body started to move. However, this way of seeing requires some training, and some sensitivity to the anticipatory processes involved in the brain. In the example that I give (**Figure 2a**), it can be seen that my drawing evolves as the session progresses. In addition, the first relatively short poses may suggest a movement of the model, whereas a longer pose, drawn from two different angles, gives an idea of the model’s spatiality through a turning movement of the viewer, if one passes the eye from one drawing to another.

In general, for cultural reasons that are deeply rooted in Western society, drawings produced from the nude are rarely interpreted in terms of transformation. Rather, they are considered as “still images” fixing the presence of the model on the paper. This stillness was indeed deliberately sought in academic drawing in the eighteenth and especially in the nineteenth century, treating living bodies as marble sculptures. As evoked by Pierre Bourdieu (2013) in his sociological study of the pioneers of modern art, the organization of life drawing workshops in France in the nineteenth century imposed a very strict hierarchy amongst the students, using geometrical constraints: on the one hand, they were asked to draw by rigorously obeying the laws of central perspective, and on the other, only the highest-ranked students were permitted to choose their “point of view”. From the 1860s, Manet and subsequent modern artists began to reject this form of drawing, since they

considered it both fixed and constraining.

Today, therefore, for both cognitive and historical reasons, the existence of a strong geometric relationship between a drawing and a “still” model can easily lead to confusion. Firstly, it leads to the idea that the drawing “is” the thing it represents. This confusion related to identity is similar to what happens with photography, especially when it comes to very fine greyscale works with pencil. Secondly, the apparently direct link between the drawing and the model encourages the idea that the drawer, stroke by stroke or line by line, reproduces only “what he sees”. This interpretation does not sufficiently emphasize the process of transformation that must be gone through in order to find the coherence of a set of strokes, and it inhibits the imagination of possible transformations from the drawing as it is made. In fact, drawing from the nude can be connected to and practiced with a richer understanding of geometry, but in order to understand how, we might first consider other ways to draw life, further from the academic world.

Developing transformations: sequence drawing

Sequence drawing consists of drawing several steps in a process: most of the time, the steps are close together, in order to make the evolution more evident (especially if the sequence is not displayed as a movie, but printed on paper). Consequently, as opposed to drawing from the nude, sequence drawing is explicitly connected to transformations. For example, a sequence can show the development of the embryo, or a running rabbit (**Figure 2b** and **2c**). In the first case, modifications of the drawn body are particularly important. This corresponds to the meaning we usually give to the word “transformation”. However, we must remember once again that in mathematics this word also refers to modifications that do not affect the whole body shape and proportions; simple translations, changes of orientation and articulations of the limbs, that is to say everything we usually call “movement” or “motion”, can also be seen as different types of transformations.

These two drawing sequences are extracted respectively from a scientific film for the general public (“Birth of a brain”, Movie [1]), and from projections accompanying a musical comedy (“Snow White” directed by Guy Grimbert, Bobino Theater, Paris, 2013). Although they have been produced in order to be shown in totally different contexts, they have much in common. Critically, neither faithfully reproduces a “model” existing in reality; whether it is the embryo or the rabbit given as an example, they are created by drawing inspiration from several sources at once.

From an historical point of view, it is interesting to note that these two types of drawing “in sequence”, for either scientific or entertainment purposes, were initially developed during the same period: Haeckel popularized the depiction of embryonic development through his famous drawings in 1874, while Emile Reynaud met success with his first animated cartoons in 1877, thanks to his praxinoscope. However, despite the fact that scientific drawing and animated drawing generated a common and simultaneous interest in transformations, creating a relationship between the two disciplines was not straightforward at the time. Indeed, the idea of drawing the sequential development of a transformation was not received in the same way in the entertainment industry and in life sciences. Imagination was highly valued for entertainment. Conversely, Haeckel was criticized for introducing imaginary aspects into the sequential development of his drawings.

To understand this difference, it is helpful to go back to the historical and epistemological study of the notion of “Objectivity”, conducted by Lorraine Dalton and Peter Galison and published in

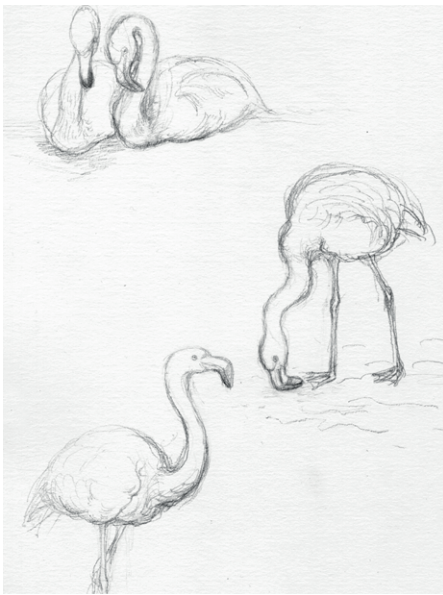
the book of the same name (2007). In particular, the authors describe how contemporary scientists reproached Haeckel for being overly guided by what he knew, or what he thought he knew, instead of recording correctly what he saw. In general, from the end of the nineteenth century, many scientists actively tried to reject any personal interpretation. Indeed, they were increasingly interested in phenomena that were not easily perceived by the human eye, and they realized that drawing from direct visual observation could transmit many interpretation errors, such as overlooking the diversity found in snowflakes or perceiving a non-existent symmetry in falling droplets. This led those scientists to reject drawing in favour of photography, in order to attain “mechanical objectivity”. Still images, in the literal photographic sense, became the main means of studying movement in science.

Hence, there was an early divergence between the art of animation and the sciences of movement, or transformations in general. Animation movie directors wanted their draftsmen to move everything that they could move, and let their imagination run free. Conversely, most scientists wanted to eliminate, as much as possible, human imagination from any visual information created. Animation continued to rely on manual craft to a large extent, while scientists began to value images obtained with automatic and mechanical recording tools. Ultimately, for many scientists in mathematics or physics (but also later in biology), the preference was to have no image at all, since images could interfere with essential concepts.

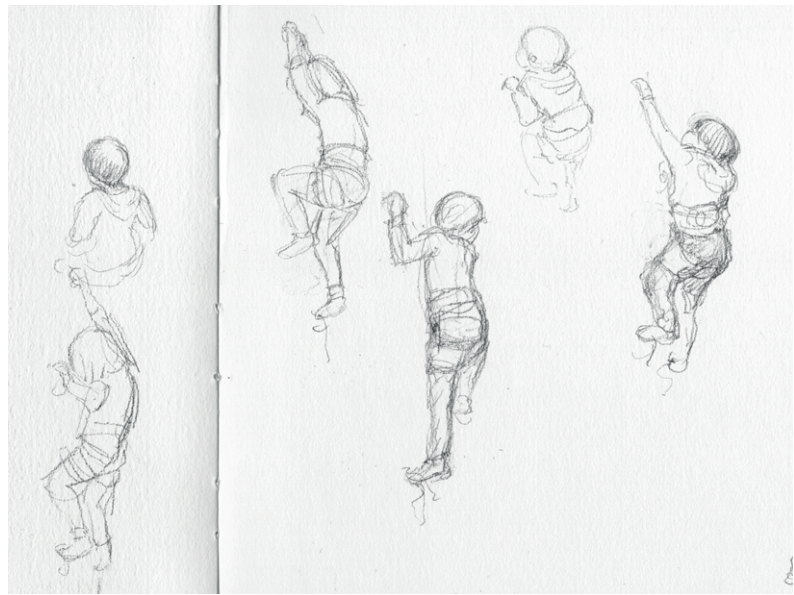
However, as distant as their practice could be during the course of the twentieth century, animation and science shared a common concern for an aspect of transformations that I have not addressed until this point: invariance. Invariants are aspects or properties of objects that remain unchanged by transformation. In mathematics, Klein’s new way of studying geometries was based on such invariants, which were considered as characteristics of the various kinds of transformations. In an animated fiction movie, invariance is also an important issue: some transformations might affect the very identity of a character, while others will allow you to believe in its integrity from one frame to the other. For example, if we consider again figures 2b and 2c, those transformations are intuitively related to the same embryo or the same rabbit.

Such an assumed invariance of a character, in a sequence of drawing that shows a movement broken down into a few steps, suggests that this transformation is in fact continuous. In mathematics, this would mean that analytical tools can be used. But in drawing, too, the realization of such sequences requires a strong “analytical” component: in order to ensure that the views are correctly linked to each other, the eye of the draftsman constantly compares, differentiates and regulates the steps. Very often, in order to support his strokes, the draftsman (or the animator) uses simple trajectories or volumes whose transformations are easier to control. This realization process, which can be very conceptual, brings us closer to the idea that the draftsman draws “what he knows” much more than “what he sees”.

In reviewing the cases of drawing from the nude and drawing movement sequences, my purpose was, first, to present two different approaches for drawing living bodies, and second, to show the reasons why one can so easily be reduced to “a pure perceptual product”, while the other can most often be interpreted as “a pure conceptual product”. As Seymour Simmons has shown in his historical study of drawing instructions (2011), both these ways of considering the practice of drawing have a clear philosophical background. They are closely associated, respectively, with the “realist” and “rationalist” schools of thought, which competed with each other during the nineteenth cen-



a



b

Figure 3: Life sketches, in the case of animals or children, highlight the relationship between transformations and composition. Drawings by R. Chabrier.

a: Different drawings of the same flamingo at different times can also be interpreted as different flamingos within the space.

b: The composition of several individual sketches generates a spatial representation at a larger scale. A unique point of view cannot be identified in such a composition.

tury and still remain influential; in British and American culture, for example, scientific drawing is still associated with the realism of Ruskin, with an emphasis on perception, while in France the importance of rationalism led to the early decline of drawing in many scientific fields, in favour of conceptual schematics.

According to Seymour Simons, both perceptual and conceptual approaches to drawing tend to neglect the haptic dimension of this practice, and more modern approaches to drawing can be related to “pragmatism”. Typically, in the drawing instructions provided by Kimon Nicolaides (1941), the gestures of the draftsman can be easily identified, and the strokes produce not only the shape of the bodies, but also aspects that are more difficult to see such as energy or action lines running inside the body. In the following section, I will present a slightly different approach to drawing, similar in the sense that it cannot be reduced to “what I see” or “what I know”, but different in the sense that it will not focus on gesture expressivity. Rather, in examining life sketches we will be largely concerned with the relation between strokes and transformations.

Getting inspiration from transformations: life sketches

Life sketching simply consists of drawing living beings that do not pose. It may be as well to sketch animals, as to work with a model in motion (**Figure 2d**), as Rodin experimented with from the 1880s. In such cases, all transformations are possible (let us repeat that we use “transformations” in the broad sense of the term, including very simple “movements”). This freedom, left to the subject, offers a great wealth of information on body structure, and it often reveals forms more clearly than the static observation of a motionless body. However, this information, by nature, is accessible only during the time of movement, or change. It has to be stabilized and completed with other information, in the brain. This situation forces the draftsman to acknowledge that the drawing action is located largely outside the strict limits of the visual world.

Suppose for example that I find myself in front of a group of flamingos in a zoo (**Figure 3a**). I start to draw a bird with its head down, but it then raises its neck. In order to go on, I have to use my short-term memory as well as my anatomical knowledge. More precisely, I have to fit this anatomical knowledge with what the flamingo does: this can be considered as a transformation. I also have an interest in taking into account the “embodiment”, which allows me to evaluate the animal’s balance by appealing to my own postural sensations. Once again, it is a kind of transformation from one body to the other. In parallel, I must keep in mind that the real bird, although it has moved, continues to be a reference with which my drawing can remain coherent in one way or another. Through all those transformations, a vast combination of information and representations (visual, haptic, proprioceptive ...) can be mobilized. At each stage of the drawing, all these processes lead to a simple stroke.

Thus the psychological foundation of the stroke represents a rich epistemological issue. In life sketching, the stroke is evidently not the result of a planned action with reference to a single fixed model, whether located “in front of the draftsman” or “in his mind”. On the contrary, transformations seem to be involved in the production of the stroke at all levels of abstraction that the brain allows. Consequently, the stroke can integrate and transmit a wide range of information. In this way, it can be considered a case of “simplicity”: a tool that makes it possible to handle great complexity in a simple way, without reducing this complexity to the point where oversimplification introduces new problems (Berthoz, 2009).

Indeed, a stroke is always simple, compared to the reality, and compared to the neural processes that motivate it. Simultaneously, the effective stroke in a sketch task is never so simple as to be reduced to a two-dimensional “graphic object”. In the case of life sketching, it is particularly inappropriate to ignore the spatiality of life: flat sketches lose the connection with reality, and very quickly become boring. Therefore, the stroke that synthesizes this wealth of information must also have a spatial value. This is obtained in many ways: not only by the path of the tool on the surface of the sheet of paper, but also, more precisely, by the variations of curvature, thickness and texture along this path. Those textures, which involve spatial frequencies, also reinforce the possibilities of connections between multiple strokes. Those relationships have a temporal dimension, since it takes a certain amount of time to appreciate each texture. All these factors depend on the force and friction applied in the contact between the tool and the sheet. They bring to the stroke additional dimensions allowing the observer’s brain to make a relatively clear qualitative distinction between a flat “graphic object”, which can be easily identified and isolated, and a “stroke”, which generates space and time, and which binds to other strokes in specific ways.

Intermediate conclusion: the geometries of strokes

I have highlighted the concept of “stroke” (in French, “le trait”) through the case of life sketches. However, one can observe that strokes are also involved in drawing from the nude or drawing in sequences. This community of means is evident when drawings are kept as sketches rather than being developed into “finished” images. In figures 2&3, I have purposefully chosen examples of this kind. If strokes are deeply related to transformations, as I have attempted to demonstrate, it follows that the geometries of strokes have a fundamental role in drawing.

However, this idea is quite novel in Western culture. A general preference for “finished” and “clean” images, rather than sketches, may explain why the concept of strokes was not greatly developed until recently. The variety of tools (charcoal, pen, pencil, black chalk, blood, wash, not to mention the different engraving techniques) was probably also confusing, since each technique has its specificities when it comes to generating space from a set of strokes, as evidenced by the drawing treatises of the nineteenth century (Fraipont, 1897). In any case, the standard concept associated with drawing has not been “stroke” but “line”. This vocabulary had huge consequences for the place of drawing in modern society, because it led to the development of a flawed relationship between drawing by hand and mathematics. Indeed, a “line” is by default considered a “straight line”. Of course, a line can be curved. But being curved, according to this logic, is only a secondary attribute.

Conversely, using this idea of “stroke”, one can develop an alternative concept where curvature is fundamental. This creates a natural connection with the immense developments achieved in mathematics since Klein. Hence, in her work on the analysis of human arm movement, Tamar Flash uses the moving frame, an analysis tool developed by Elie Cartan, in order to show that equiaffine geometry is more relevant than Euclidian geometry for understanding human tracing gestures (Flash & Handzel 2007). This sentence might of course mean nothing, without further explanation, for a non-mathematician reader, but Tamar Flash’s further conclusions make a great deal of sense to people who practice drawing; in the affine geometry that she associates with strokes, the most natural connection between a departure and an arrival is not a straight line. This is exactly

what happens when we draw living bodies (as opposed to drawing classical or modern architecture): if we have a clear feeling of what we draw, of how the pen starts and of how it ends, our hand simply doesn't take a straight path. Moreover, Tamar Flash defines an affine distance all along this path; she shows that the preferred curves, in human gesture, maximise this distance. Once again, this appears very consistent with the actual experience of drawing: draftsmen tend not to rely on such a feeling as minimizing a distance, using "dry" and straight segments of lines. On the contrary, appropriate strokes provide something more like a subtle nourishing feeling, related to some kind of generosity from which we can benefit, wherever it comes from.

Independently of this very new scientific means of access to the geometries of strokes, this concept already has a rich history outside of Western culture. Chinese painting (which is more precisely translated as "drawing with a brush" according to Fong, 2003) relied essentially on brush and ink for many centuries, perhaps making it easier to consider the concept of stroke (**Figure 9**). Shitao, one of the most famous Chinese painters, even wrote a treatise where the concept of stroke plays a major role (Shitao, 1710). Of course, accessing this information in translation from the original language brings its risks, but many of those issues have now been addressed, particularly by the philosopher François Jullien. Considering the importance given to transformations in ancient China (Jullien, 2009), this culture is worth considering here. Since the Chinese concept of stroke has now been made more accessible, what can we learn from it?

Two important aspects of strokes, addressed by Shitao, are worth highlighting here. The first is the importance given to the "empty wrist", when strokes are produced. This may give the impression that freedom of movement is completely embedded within strokes, but we must take care not to interpret this too quickly as "complete freedom in an Euclidian space": in the next part, we will see that simple composition processes in sketching suggest other kinds of spaces, with other kinds of freedom. A second important aspect of drawing with a brush, according to Shitao, is the distinction between "brush" and "ink" as two components of strokes. Both of them are equally important, and they act in a complementary way: "spirit dimension" is given to the ink by the movement of the brush, and ink provides "animation" to the brush by the use of different levels of darkness (Jullien, 2003). While remaining very cautious when it comes to adapting such ancient Chinese concepts in the present, this association between "brush" and "ink" can help us to escape from very deeply rooted habits when we address questions related to strokes, drawing and representation in general. Indeed, we are used to thinking in terms of "form" and "texture", and to considering that the latter is a secondary attribute to the first. Typically, in computer graphics, abstract surfaces will be defined first, followed by textures. In the next section, when I introduce the animation technique of morphing, I will show that a more balanced relationship is possible.

Part 3: The geometries of drawing

The first part of this chapter outlined how various transformations, as defined in modern mathematics, could be integrated into the way the brain works. The second part questioned how different transformations of the aspect of living bodies could be taken into account in the practice of drawing. This reflection led us to considering the geometries of strokes. This final part will address

the possibility of transforming the drawings themselves, and consequently accessing some of the geometries of drawing in a more general fashion.

In the first instance, I will stress the notion of composition, in the process of life sketching. I will infer the possibility of using a geometry “without” a point of view. This geometry will be mainly characterized by animation techniques such as “recomposition”, “travelling” or “scale change”, in an attempt to adapt the logic of mathematics to the domain of scientific drawing and film-making. Then I will suggest that a more advanced animation technique, known as “morphing” might provide us with deeper insight into the geometries of drawing.

From one body to the other: composition with space

Sketching living beings is a very ancient activity. For millennia, millions of draftsmen have been sharing a very simple problem: that of how to compose several views of living bodies on the same surface. Life sketching is a good example of this situation. Suppose, for example, that you are sketching in the presence of a living, moving subject. Say, a group of young children during a climbing lesson (**Figure 3b**). In such a context, it is helpful not to draw too big, since your memory does not necessarily allow you to develop a full page drawing. Furthermore, you don’t want to use up too much paper on quick sketches. Consequently, it seems logical to draw one action here, and another action there, on the same page. Let’s consider what happens when you draw first one child, and then what happens when you draw a second one (which may be the same child, in another situation)

In order to sketch children, you must certainly draw quickly, but speed alone will never be enough. The moment your pen touches the paper, you can be sure that what you just saw will have changed. So, you must use complementary strategies. Instead of beginning hurriedly, you can refine the way you look, in order to memorize aspects that will help you go on drawing what you wanted, when it is no longer visible. A knowledge of functional anatomy is very valuable in such cases: it allows you to feel how the body organizes itself in space, in relation to the physical surfaces on which forces are produced. Generally speaking, any consciousness of the structure of what you draw, whether it is a child or a mountain, will help you a great deal. Before the first stroke has even been drawn on the paper, it can be backed up by a whole spatio-temporal understanding of the situation, which can guide the following sequence of strokes, resulting in the drawing of one child, doing a certain action, on the paper.

Then, you can go on and make a second drawing. At this precise moment, a very interesting and fundamental aspect of drawing emerges: the second drawing can be made in relation to the first. More precisely, the spatio-temporal understanding that I just described can be used to find an interesting place for the second, not only in relation to the frame of an empty page, but also in relation to the first drawing. Then the third drawing can be made in relation to the former two, and so on.

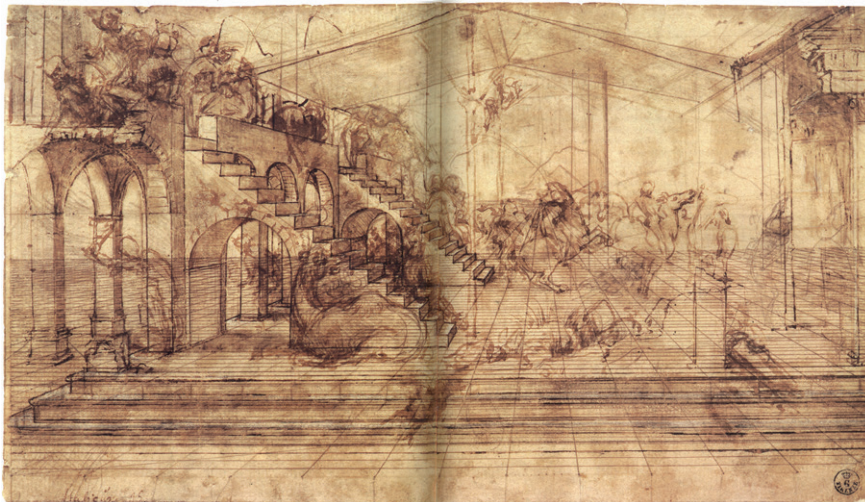
In general, whether the draftsman is working from a fixed model, from a moving model, or from his imagination, the process we have just described is always possible: it simply adapts to different durations. This composition work seems simple, maybe even trivial. However, it is far more than what today we would call a “graphic composition” in two dimensions, because the drawings, like the strokes they are made of, are not “flat graphic objects”. Each of them generates its own spatiality, and this spatiality can be connected to the spatialities of the others. Thus, in order to find a proper place for each new drawing on the page, one has to evaluate the spatiality involved in the former



a



b



d



c

Figure 4: Geometry without a point of view has been extensively used in both occidental and oriental art, typically for the study of living beings.

a: Leonardo da Vinci, movement study with men at work, 1506-1508.

b: Hieronymus Bosch, various figures study, mid-16th century.

c: Katsushika Hokusai, Manga vol.9, 1819.

Geometry with a point of view, i.e. linear perspective, has been used alongside by Renaissance artists for other composition purposes.

d: Leonardo da Vinci, linear perspective study for The Adoration of the Magi, 1481.

ones, and make choices in order to adapt the new drawing to its context. All this mental effort relies on the capacity of our brains to imagine transformations. Now we will look at how this composition process might be used to characterize an unexpected geometry in the brain, with a direct application in the epistemology of representations.

Geometries with or without a point of view

The compositions of life sketches described above highlight a very interesting characteristic, which has so far gone largely unremarked: although the compositions have a highly developed spatiality, they do not use a “point of view”. Indeed, in such compositions, it is impossible to say that the “observer” was “here”. It is certainly possible to say from which direction each body was “represented” or “viewed”. But it is simply not possible to use this information to define a particular point or place from which the entire scene has been viewed. In a similar way, this type of drawing clearly escapes the notion of “instant”, since it does not represent an action taken at a particular moment: it opens up instead a range of possible temporal interpretations. Compared to the geometry “with” a point of view, as will be further evidenced, the geometry without a point of view prevents the image from being identified with what a viewer can see from a particular place, at a precise moment.

Such a geometry has been extensively used historically. Cave art, in the grotte Chauvet or in the grotte de Lascaux, shows this kind of composition. Much later, Chinese painters mastered this absence of point of view. Interestingly, this may perhaps be linked to the fact that the verb “to be” does not exist in the Chinese language. Indeed, in Western philosophy and aesthetics, the verb “to be” plays a central role in the unending quest for “identity” and “essence”, with unbroken reference back to Aristotle. The epistemologist Alfred Korzybski characterized this use of “is”, in the form of an identification between two concepts, when we say “something is something else”. He showed that this way of speaking tends to induce confusion between levels of abstraction (Korzybski, 1933). In our case, the identification of a painting with the particular object that it represents, or with the point of view that it uses in time and space, is strongly related to a philosophy built around the verb “to be”. This might simply have no meaning in the Chinese cultural context, before the end of nineteenth century.

The nineteenth century was an extremely rich period of cultural exchange between East and West, whether welcome or not. While China was discovering some of the new constraints of Western civilizations, including central perspective, Japanese artists like Hokusai produced renowned collections of woodcuts, where compositions are clearly based on a geometry without a point of view (**Figure 4c**). Such woodcuts became an important influence on Western modern artists such as Monet or Rodin, who were beginning to break free from the established academic rules.

¹ The reader with a background in mathematics might think, with reason, that what I am describing here is simply linear perspective with a point of view at infinity, or parallel perspective. This kind of perspective is largely used to produce very neutral representations of space in an engineering context. By introducing a “geometry without a point of view” my intention is to stress the composition freedom it provides and to stay close to the experience of drawing, rather than to identify this process with a special case of central perspective. Indeed, fundamental aspects of drawing tend to be discarded when the idea of “point of view at infinity” is introduced, especially texture, which is strongly related to proximity.

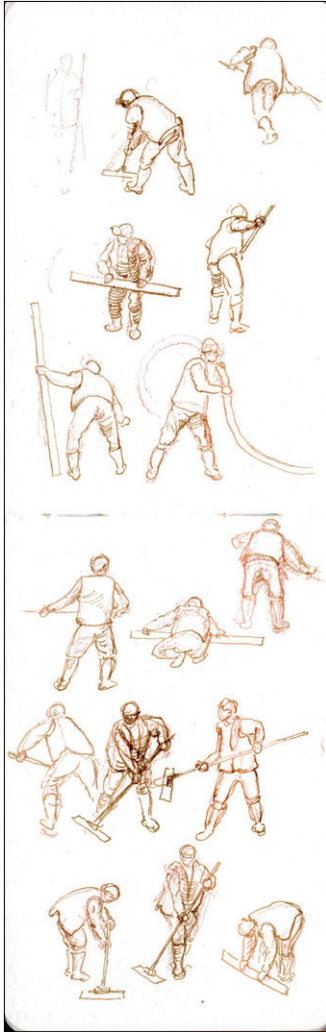


Figure 5: Compositions without a point of view can be easily recomposed, while maintaining or enhancing their spatiality. Drawing by R. Chabrier.

However, geometry without a point of view was not unknown to Western art at all. In fact, Leonardo da Vinci shows a thorough practice of it when he works on cats, horses or workmen (**Figure 4a**). The drawings and paintings of Hieronymus Bosch are evidently based on a similar process (**Figure 4b**). In this type of drawing, the direct observation of successive moments is often combined with imaginary developments on the same subject. To appreciate them properly, we must pay attention to all the possibilities of spatial and temporal combination between bodies. Depending on whether he attributes the different sketches to a single body seen at different times, or to several bodies that coexist, the spectator's gaze can appreciate the passage from one posture to another, or alternatively, he can travel in a common space.

As we have seen, a geometry is defined by a set of possible transformations. Geometry "without a point of view"¹ offers considerable possibilities for recomposition by simple displacement of the represented bodies: a double-page of one of my own sketchbooks can be recomposed in another format (**Figure 5**). This last transformation does not allow any random reorganization, however: one must be careful to maintain a sufficient dialogue between the spaces occupied by the characters. It is also possible to move your gaze onto the composition, to bring it closer or move it further away, to focus or expand, without losing the spatiality it offers. All these observations would of course be trivial if we were interpreting the composition in a two-dimensional space: they become interesting if we adopt a spatial interpretation of the drawing.

A great paradox, as far as Renaissance artists are concerned, is that they are often considered as discoverers and promoters of "the" central perspective, while they were actually mastering both techniques: using a point of view, or not. Indeed, geometry "without" a point of view can be compared to geometry "with" a point of view when comparing two drawings by Leonardo da Vinci (**Figure 4a** and **4d**). In the first case, as we have already seen, the space is structured by the relation between the horse bodies. In the second case, the space is primarily structured by a grid. In this instance, we can say that bodies do not structure space: they are placed, in the second stage, "in" a well-defined three-dimensional space that pre-existed them.

It can be noted, in the drawing with the grid, that the lines converge in depth towards a vanishing point. The existence of the latter is due to the laws of projection of a scene on a plane, from a particular point of view. Opposite the vanishing point is thus a privileged "place" for the draftsman and the spectator, which is simply the place that provides the best illusion of space (similarly, there was once a specific place for the king in theatres of the eighteenth century, which determined the design of the scenography). According to their place relative to this privileged observer, the representations of the different visible objects will then undergo specific deformations. Thus, in theory, objects drawn in the context of a central perspective cannot simply be relocated elsewhere: we must apply a new perspective transformation to adapt them to their new place. Similarly, if we want to pan above the picture: we should be able to update the entire transformation in order to maintain the illusion of depth in the context of central perspective.

Consequently, operations such as "recomposition" and "travelling" are more complex if a point of view is introduced into the geometry. The increase in complexity is even greater when it comes to "scale change". This has huge consequences for the range of transformations that the brain can interpret, when it processes an image. In a previous study, I demonstrated that the absence of central perspective was fundamental in scientific drawing, since this geometry would limit the required

imagination (Chabrier, 2016). Since the present study is dedicated to space-time representations, I will focus here on the issue of animating drawing: in this case, the imagination of transformations in the brain has to be converted into methods and algorithms, in order to produce an animation that provokes the same effects (recompositions, travelling, scale change, or more complex phenomenon) in the brains of as many people as possible.

Transforming drawings: from compositing to morphing animation

Animated movies can use many different media: drawings but also clay, paper cuts, and so on. Here, I will focus on animated movies which are mainly based on drawings (or paintings) that were initially made on a physical background. In this instance, the animation consists of transforming those drawings. Consequently, knowing if those transformations are related to a geometry with or without point of view is essential, since this will alter the effect of the animation in the viewer's brain.

As we have already seen, the absence of point of view appears natural in scientific drawing. Thus, in animated scientific movies based on drawing, many transformations can take advantage of this absence. The film “Birth of a Brain” (**Movie [1]**) can be considered as a demonstration of those possibilities: drawings are composed and recomposed, the spectator's gaze travels across the compositions, and important scale changes occur without inducing confusion or an excessive vertigo sensation. In practice, all those transformations are produced today in the context of “compositing” software. This word gives name to an important category of production tools, which offer the possibility of manipulating multi-layer images and altering those layers with special effects and transformations. Such software gives concrete access to the fundamental operations that we began to distinguish in a geometry without a point of view: animating a form along a trajectory, zooming inside a composition, and so on. Another important feature is the possibility of making layers appear or disappear, by controlling their opacity and the way their textures are mixed. Consequently, both movement and texture can have equal importance in the context of compositing software, if used properly.

In “Birth of a Brain”, in addition to these basic operations, other more complex transformations have been used. At certain times, cells are moving or differentiating, so the movie has to show significant transformations of their structures. At other times, it is necessary to turn the embryo around and slightly change the view. In order to address such transformations related to changes in the aspect of living forms, we have two complementary possibilities. The first is to draw a sequence of drawings and to display it at the appropriate frame rate. This is the strategy in traditional animation, which is a natural extension of the sequence drawing that we described earlier. The second possibility is to compute intermediate images between drawings, using a technique called morphing. I will briefly describe these two options in the context of “Birth of a Brain”, before analysing morphing in more detail.

“Birth of a Brain” uses traditional animation for a few very brief actions, for example when a microglial cell phagocytises a dead neuron. In this case, displaying several drawings from a sequence, one after the other, produces an obvious appearance of motion. However, an image sequence can be used with different timing. The display of the sequence of embryo drawings (**Figure 2b**) is spanned throughout the movie, using cross-fades for transition between one step and another: here, we rely

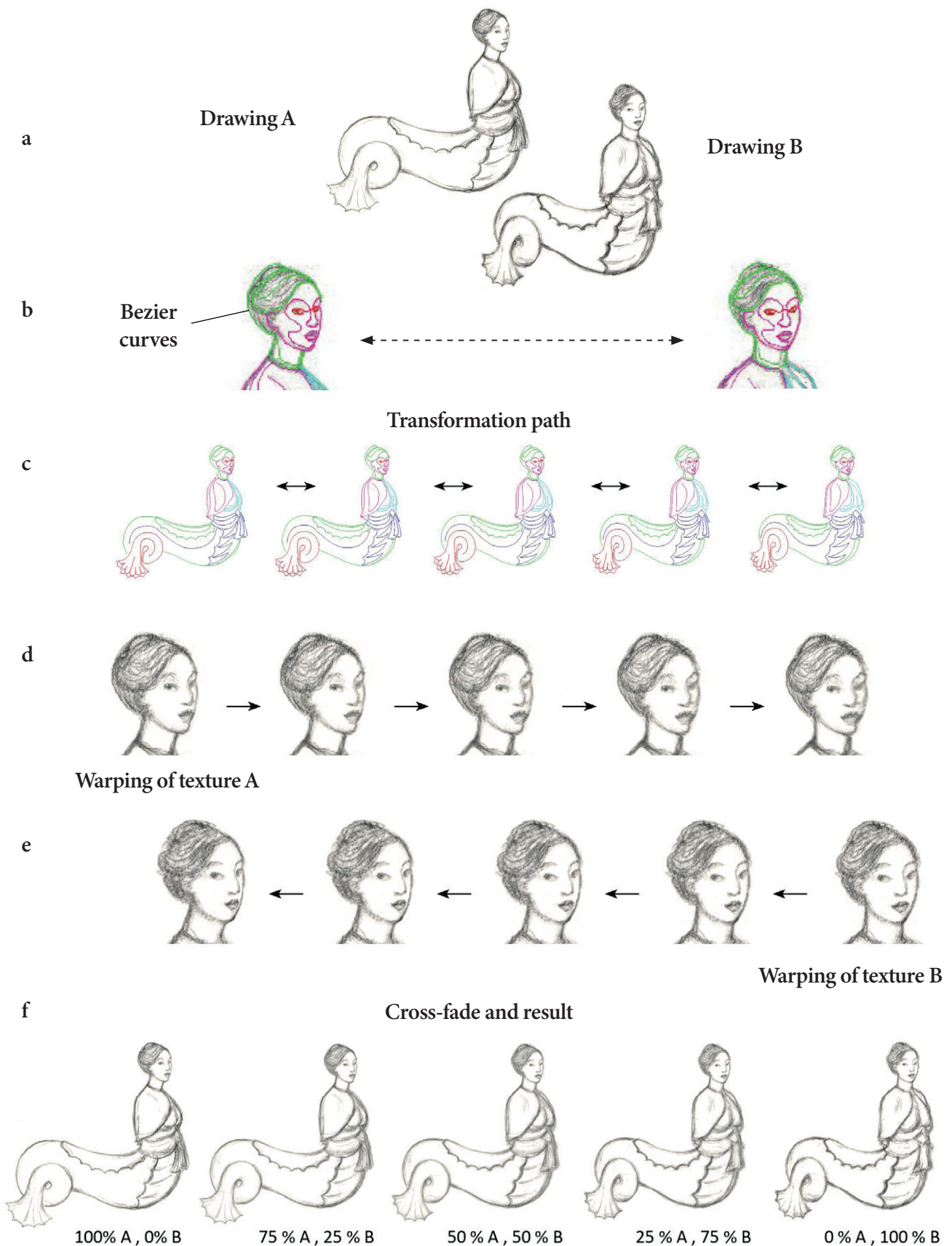


Figure 6: Step-by-step description of morphing between two drawings: in this case, Bezier curves allow fine control of the transformation of strokes. a: A draftsman creates 2 drawings. b: The animator specifies corresponding curves on the 2 drawings. c: A transformation path is computed on the basis of interpolation between those curves. d: The drawing A is transformed (warped). e: The drawing B is transformed (warped). f: Finally, a transformation from animated texture A to animated texture B is computed (Cross fade).

on the more long-term memory of the spectator to induce the concept of a slow, progressive transformation. In any case, fast or slow, the feeling of transformation induced by such image sequences cannot be entirely continuous or fluid: if displayed at a slow rate, one feels each different step, and if displayed fast, one feels a vibration of strokes. This vibration, by the way, is not a defect: it can give a sense of energy to animated drawings.

However, in certain cases, transforming the drawings in a continuous way, without vibration, can prove very useful. This is one of the main purposes of morphing-based animation. With this technique, an interpolation between two consecutive drawings in a sequence can be computed, in order to produce a fluid transition. This opens up new possibilities for guiding the attention of the audience along a scientific narrative. For example, in the early stages of embryo development, in “Birth of a Brain”, the body of stem cells moves up and down while they divide. With conventional animation techniques, such repeated movement would cause a lot of visual distraction, and make the narration difficult. Morphing animation helps by creating a fluid movement for a whole population of cells, without over-burdening the attention of the audience.

Morphing can also be used to create transitions between two views of a body. In that case, the resulting animation is a turning movement. This operation can be very important in scientific transmission, since the most efficient view for exploring an object is often slightly different to the most efficient view for explaining a more detailed structure or process related to it. Providing such a transition between two views to an audience can be critical when explaining the early stages of the embryo, because most spectators will not know where to direct their attention. In that case, a slight turning movement, coordinated with pan and zoom, can be essential in order to orient properly the attention of the viewer. The fluidity of morphing is very important here, because it drives the attention far more efficiently than a simple cut transition between two images, due to the optic flow induced by continuous texture transformations.

Inside morphing: warping and cross-fade

Technically speaking, morphing appears to be a way of calculating intermediate images between two images. In practice, it breaks down into two operations: the first is an image distortion, called “warping” and the other is a cross-fade. Interestingly, warping was invented in the 1980s during the rise of digital animation (Heckbert, 1989) while crossfade was already being used by Daguerre in 1822. Before he invented his photography technique, he had the idea to paint the two sides of a canvas and to mix both images by illuminating the back. Strictly speaking, morphing cannot be reduced to either old or new technology: it uses an interesting combination of the two.

In order to understand how warping and cross-fade are combined, consider for example (**Figure 6a**) two drawings of a mermaid inspired by a vintage merry-go-round, seen from a slightly different angles. From these two views, we will create a slow turning drawing². First, using appropriate software, we will define deformation constraints on each of the two drawings, in the form of Bézier curves as shown in colour (**Figure 6b**). Each of these curves is two-dimensional, so the curves on one drawing include no information about depth a priori. However, those curves can be animated:

² This merry-go-round can be seen in the Musée des Arts Forains in Paris. In the late nineteenth century, adults could take a ride on it for the simple pleasure of feeling the world turn slowly.

coaxial circles, as in Fig. 520, and then filling into the new system,

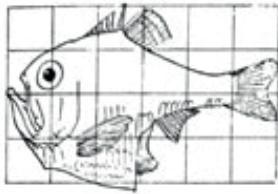


Fig. 517. *Argyropelecus Olfersi*.

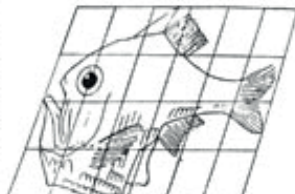


Fig. 518. *Sternoptyx diaphana*.

space by space and point by point, our former diagram of *Scarus*, we obtain a very good outline of an allied fish, belonging to a neighbouring family, of the genus *Pomacanthus*. This case is all the more interesting, because upon the body of our *Pomacanthus* there are striking colour bands, which correspond in direction very closely



Fig. 519. *Scarus* sp.



Fig. 520. *Pomacanthus*.

to the lines of our new curved ordinates. In like manner, the still more bizarre outlines of other fishes of the same family of Chaetodonts will be found to correspond to very slight modifications of similar

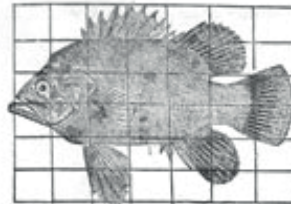


Fig. 521. *Polyprion*.

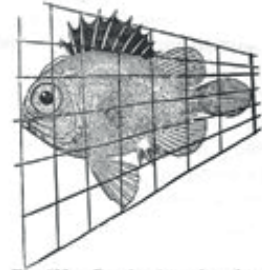


Fig. 522. *Pseudopriacanthus altus*.

of triangular, or radial, coordinates for the rectangular ones in which we had inscribed *Polyprion*. The very curious fish *Antigonia capros*, an oceanic relative of our own boar-fish, conforms closely to the peculiar deformation represented in Fig. 524.

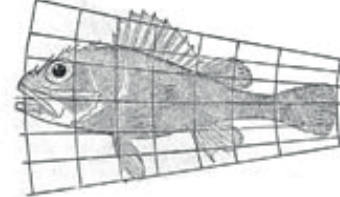


Fig. 523. *Scorpaena* sp.

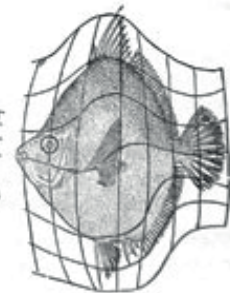


Fig. 524. *Antigonia capros*.

Figure 7: The principle of morphing anticipated by D'Arcy Thompson in his book «On growth and form» (1917). In practice, controlling morphing with such a grid allows insufficient control of the transformation of strokes.

we thus specify how the curve associated to the left cheek in drawing A must be transformed to go to land on the left cheek in drawing B. While this transformation occurs in the plane, it integrates some information about space, since the transformation of the curve, while we turn the object around, depends on the depth. The set of all these curves allows us to define a global planar transformation of the image (**Figure 6c**) which brings all the aspects represented in the drawing A to the place which corresponds to them (more or less precisely) in drawing B. We thus obtain two sequences of images: one which distorts drawing A in order to put it in the position of drawing B, and the other doing the opposite (**Figure 6d** and **6e**).

However, half-way through the respective transformation (warping) of A and B, the textures of the strokes begin to lose their adaptation to the space they should suggest. To compensate for this problem, we have to make a crossfade between the two sequences: while A is deformed, its texture is gradually replaced by that of B, so that at the end of the transformation the strokes of B have taken the place of those of A, with the correct texture for this angle of view. The whole of this transformation induces the sensation that the drawing turns like a rigid object, according to a vertical axis (**Figure 6f**; see **Online resource [a]** for an animated visualization).

However, all mathematical operations have been performed in the two-dimensional plane, where ordinarily only rotations with an axis perpendicular to the plane are permitted. By introducing a well-controlled non-linear deformation (i.e. warping) and a change of texture (i.e. cross-fade), the morphing thus makes it possible to evoke tri-dimensional transformations of drawings.

What does morphing enable access to?

In the above example, I showed that morphing could produce a visualization of rigid movements in three dimensions, using two drawings. Keeping in mind that drawings are made of strokes, we can try to establish if the concept associated with stroke in China, as we saw at the end of the previous section, could be used in that situation. I, personally, am tempted to say that both “brush” and “stroke” are taken into account in that technical process, thanks to the association of curve movements and texture changes. This might indicate that morphing can be considered not only as a special effect, but may give access to fundamental aspects of space-time geometries in the brain. We will consider here the kind of imagination that morphing gives access to, and progressively turn to more geometric aspects of the control of deformation, which may have an interesting scientific significance.

To begin with, morphing gives access to metamorphosis. This concept has a long history, from poetry to science. In his famous book “On Growth and Forms” (1917), long before digital imaging existed, D’Arcy Thompson demonstrated the possibility of geometric transformations between the bodies of two species. Planar transformations between the side view of various fishes or animal skulls, visualized through a grid, allowed him to question evolution and development (**Figure 7**). The scientific concept had limited scientific success, but the concept of transforming one image into another remained. As we just saw, it was realized in the 1980s with morphing, largely outside of any scientific endeavour. A typical example would be the film “Willow”, in which the viewer could watch a tiger turning into a woman. Because of the difficulty of controlling transformations precisely, morphing and warping were usually associated with transformations defying physical reality: significantly, one of the first software packages specifically for creating these effects was named “Elastic Reality”.

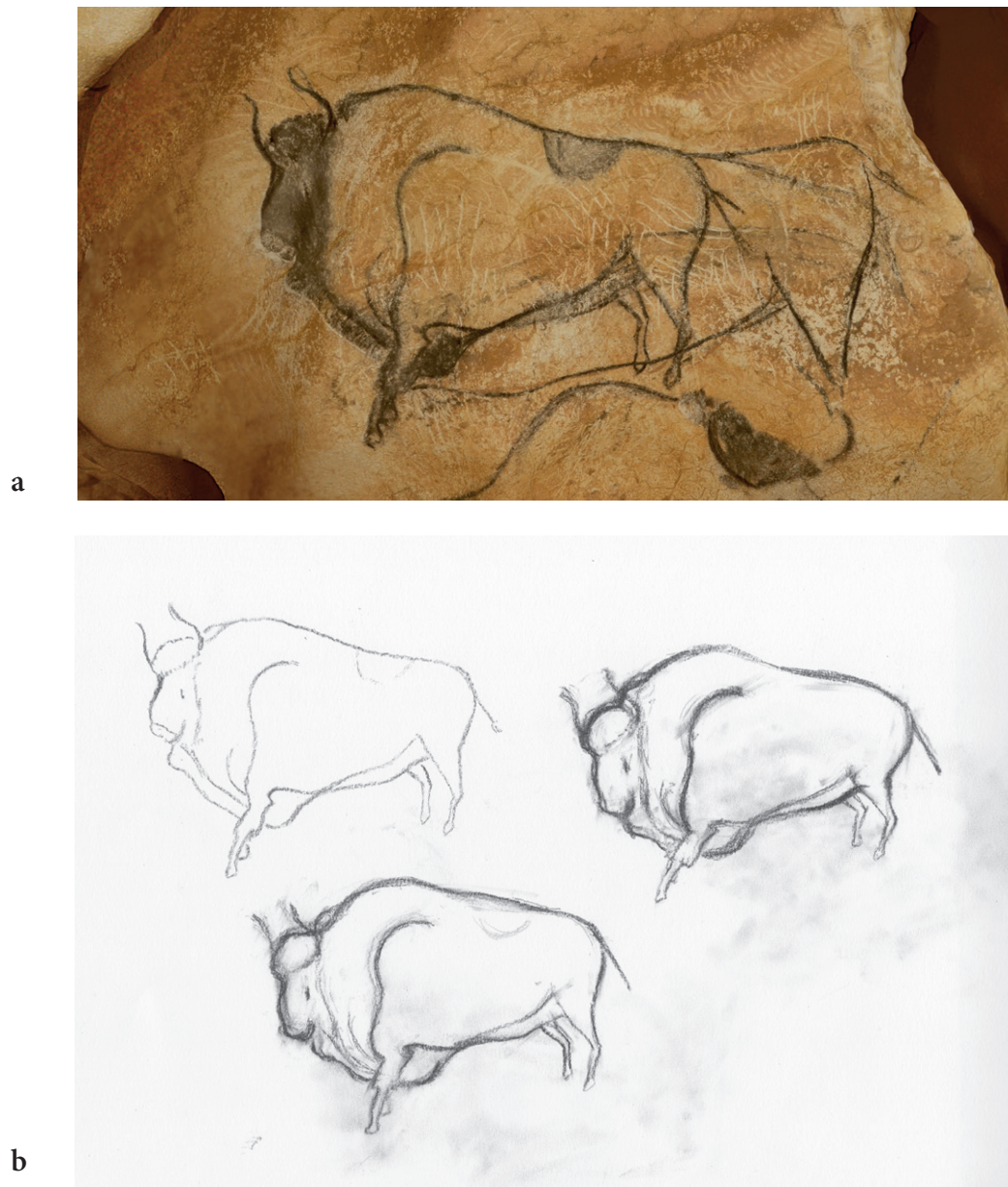


Figure 8: Raw material for an animation of cave drawings with warping and morphing. Photography Marc Azéma, drawing R. Chabrier.

a: The (planar) texture of the image can be transformed in such a manner that the animation remains coherent with the spatiality of the representation.

b: Working on the computer is not sufficient: new drawings on paper, with real strokes, are often mandatory to specify this transformation correctly. Note that this association of three figures generates a composition without a point of view.

In addition, in line with the work that I was able to carry out between 2000 and 2016, morphing can be used to visualize and control other kinds of changes in the form and structure of a body: rotations, articulations, rigid movement, and of course deformation when necessary. Ultimately, according to my experience of film-making, a multi-layered approach in morphing appears to be the most complex transformation in the compositing repertoire. Without it, it is very difficult to find any coherence in the disparate set of so-called “2D” animation techniques. Conversely, since the concept of morphing is closely related to drawing, it allows us to better integrate hand-made drawings in the context of fluid digital animation, from paper to screen. This approach gives access not only to spectacular metamorphosis, but to a subtler kind of imagination, based on the propensity of the drawings to be transformed by the imagination of their viewers.

Before the advent of morphing, there was no standard technique for visualizing what we imagine when we assess the possible transformations of a drawing. Depending on the animation approach, either the movement or the textures had to be greatly simplified, despite the fact that both contribute strongly to the spatiality of the stroke. With the use of morphing, during the 2010s, it was possible for me to animate Leonardo da Vinci’s drawings (**Movie [2]**), as well as the drawings from the Chauvet cave (**Movie [3]**), while respecting the texture and geometry of the original strokes. These animations are not intended to develop a story that goes beyond the intention of the original artists. They simply seek to make visible a propensity of the drawing to be transformed in a certain way. But for this to happen, the animation process must not distort the geometry of the drawing. In particular, strokes with a spatial value must not be treated as lines or areas in a flat frontal plane.

A remarkable aspect of morphing is that it forces the animator to become much more aware of the transformations he uses. Indeed, rotations in three dimensions raise perceptual problems, depending on the way they are projected on a plane: a rotational movement whose axis is in the plane of the image will result in a linear trajectory of textural elements, as in the case of the mermaid. Alternatively, a rotational movement whose axis is perpendicular to the plane will move the texture of the image along a circular trajectory around a point of rotation. Those two particular types of spatial rotations are quite easy to specify from inside the projection plane, but general cases are more puzzling. If we show a head rising from a three-quarter view, for instance, the axis of this rotation (in space) will be neither in the image plane nor perpendicular to it. In such cases, if we want to animate the texture of the image according to this rotation, it will be necessary to specify a combination of rectilinear trajectories and circular trajectories. The morphing animation has to deal with this difficulty of specifying the appropriate transformations while staying in a plane. In practice, for example if we want to animate cave art like in **Movie [3]**, specifying the transformation is often impossible without hand-made reference sketches on paper (**Figure 8**).

In 3D synthetic images, this kind of problem does not arise: the animator has three parameters of rotation in space to control the movement of the objects he manipulates. Morphing therefore introduces a difficulty, due to the fact that it uses coordination between transformations “in the plane” and texture changes. Here we can observe that the brain largely uses a system in the form of maps, which appears more adapted to planar deformations than to tri-dimensional transformations. An appreciation of the specific difficulty of morphing could therefore strengthen the idea that within the brain, taking into account rotations in space requires a more heterogeneous process than what one might imagine.

Finally, we should bear in mind that the morphing of drawings does not use a camera, and conse-

quently does not necessarily use a point of view. We have seen above that geometry without a point of view was based on the possible relations between the drawings, without any need to explicitly structure the space with a three-dimensional grid. Similarly, the morphing technique that I described is based on the use of curved lines to specify the transformation between drawings, without using a “deformation grid”. It should be noted that a morphing action can be specified with an explicit grid (as in the images of D’Arcy Thompson), but in practice this approach turns out to be far too imprecise. Consequently, the effectiveness of Bézier curved lines in specifying the transformation of the main strokes in a drawing might make sense. As Tamar Flash (2007) remarked, Bézier curves are parabola, and such parabola seem to be used by the brain to generate tracing movements, because of their curvature properties in equi-affine geometry. Thus, morphing animation could have an epistemological role in addition to its applications in film making: it could also highlight the role of curvature in the representation of space in the brain.

Redefining the epistemological role of drawing: a work in progress

Since drawing began to be replaced by photography, its epistemological role has not been clear. The digital revolution introduced even more tools, seemingly enabling the same tasks of representation as drawing, but without the constraints of materiality or lengthy practical training. But during the last decade, through a number of publications, workshops, movies and exhibitions, it has become evident that drawing gives access to a form of knowledge, or concentration, that could not be achieved through other media. In this new context where animated images are at least as important as static ones, redefining the epistemological role of drawing seems necessary.

Such a task can be expressed more simply: what does drawing give access to? In this text, I focused on how drawing could provide access to various geometries of living beings. As I have demonstrated, thinking in terms of transformations, thanks to the model provided by modern geometry, makes it easier to compare a number of drawing practices, with different historical and epistemological backgrounds. The concept of stroke seems a mandatory means to unify them. But if we want to think and investigate further, in order to grant to the concept of stroke the importance it deserves, differential geometry as well as Chinese painting treatises appear to be required. Acting as a bridge between such distant domains, in terms of space, time and logic, might be one of the major epistemological roles of drawing.

This role is more than that of an academic pastime, since today the representation of life raises important issues. As far as geometry is concerned, we currently live in a paradox: while projective geometry is no longer taught to anyone apart from specialists in mathematics and computer graphics, central perspective and flat projection have never been so present in the images and films that are available to the public. By reducing the world of representations to a dialectic between “2D” and “3D”, it is likely that we have lost in the sciences, arts and architecture, an important aspect of our ability to take into account the spatiality and diversity of living beings in our representations. Since the aspects of life that are not properly represented tend to be neglected in a world dominated by images, this may have contributed to a serious lack of awareness of environmental problems in recent decades. On this basis, emphasising a geometry without a point of view, where curvature plays a major role, seems necessary if we want to re-develop the ability to represent the spatiality of life in an accessible way.

Designing appropriate training that integrates the practice of drawing might be the beginning of a solution for re-developing access to this spatiality. For three years now, I have been running an experimental course for engineering students at the Ecole Polytechnique (Palaiseau) entitled “Drawing and Animation for Scientific Transmission”, where the basics of representation are addressed simultaneously through drawing and animation. Short courses for researchers in cell biology and biophysics have also been successfully tested at Institut Curie, as well as a re-introduction of drawing by hand at different levels of scientific transmission (Chabrier, Janke, 2017). Similarly, the scientific iconography department of the National Museum of Natural History recently established, under the direction of Didier Geffard-Kuriyama, a doctoral module in scientific drawing that had not existed for twenty years. Thus an interesting dynamic seems to be emerging in France in the scientific field. In addition, interest in drawing today cuts across the arts as well as design, architecture, medicine and other disciplines. In the United States and the UK, the Thinking through Drawing network, initiated by Andrea Kantrowitz, Angela Brew and Michelle Fava (2011), leads meetings, workshops and interdisciplinary debates that testify to the vivacity of the field.

As far as I know, the way in which a stroke produces a sensation of space, and the way in which several strokes cooperate to construct a spatial representation has not yet been modelled more widely. Today, several approaches seem to be converging towards a better understanding of this phenomenon using scientific methods: one can quote again the works of Viviani and Flash (1995), which introduced a power law in the neuronal planning of trajectories by connecting curvature and tangential velocity, and the subsequent advances when a more extensive connection with geometry was made (Flash, Handzel, 2007; Bennequin et al., 2009). Creative robotic research currently aims at reproducing the process and the structure of the stroke in a more complete way, with a goal of developing drawing robots (Tresset, Fol Leymarie, 2013; Gülzow et al., 2018). In this field, it is worth noting that the team of Frederic Fol Leymarie at Goldsmiths, University of London works alongside on the modelization of calligraphy (Berio et al. 2017), and on life sciences problems involving 3D representations, such as the visualisation of folding and docking of proteins (Tod et al. 2015).

In general, modern scientific drawers have to use 3D information. Hence, even though they can be distant, the worlds of drawing and computer-assisted projective geometry (i.e 3D), are no longer separated: in fact, they are complementary, and a large amount of time can be devoted to mixing the two types of information. In computer graphics, attempts to create a more direct link between planar representation and 3D also exist. The “sketch-based modelling” approach consists of interpreting as 3D information diagrams or drawings made in two dimensions. Several specific cases have been approached in this way, for example the spatial interpretation of blood vessel schematics (Palombi et al. 2011), notably by postulating that ellipses can be interpreted as sections of vessels. Currently, at Ecole Polytechnique, I am working with Marie-Paule Cani’s team on a broader spatial interpretation, from strokes on paper to their display on an autostereoscopic screen.

Given these activities in various complementary fields, a “true” modelization of strokes may appear as possible in short term. Indeed, modelling a phenomenon is often considered a positive step for scientists. In artistic practice, however, nothing is more dangerous than thinking about the stroke through modelization. In my experience, the drawer always runs the risk of focusing his attention on an aspect of the stroke that could have been important yesterday, but which is no longer relevant today. If we want to develop robust research on the spatio-temporality of the stroke,



Figure 9: The epistemological role of drawing appears to be related to the “stroke”. This concept has been developed primarily in Chinese civilization, on the basis of painting (or drawing) with brush and ink. The stroke was noticeably used for painting landscapes which do not use a point of view. Shitao, lake Cao, 1695.

in terms of transformations, we must therefore rely on a safeguard that prevents the concept from closing up and becoming sterile. The mere practice of drawing in real life, on real paper, provides such a safeguard. But once again, it is a Chinese concept which seems to best account for how the world can be connected to the stroke (and how the wealth of associated geometries in the brain can harmonize, if we can risk using such modern ideas). This is the “Oneness of brush stroke”, also translated as “Unique brush stroke”, expressed by the painter Shitao at the beginning of his treatise (1710, translation by Coleman, 1978):

“The principle of oneness of strokes is such that from non-method method originates; from one method, all methods harmonize [...] With regards to the delicate arrangement of mountains, streams, and human figures, or the natural characteristics of birds, animals, grass, and trees, or the proportions of ponds, pavilions, towers, and terraces, if one’s mind cannot deeply penetrate into their reality and subtly express their appearance, one has not yet understood the fundamental meaning of the oneness of strokes.”

With or without a brush, the whole treatise of Shitao can still be read today as an invitation to access the diversity and the dynamics of the world through the use of strokes. Although this citation should not be interpreted without its historic and Taoist context, it seems a rather clear warning of the risks of reducing the stroke too quickly to one or other of its applications. Methods and rules can be useful, but non-method is really at the core of drawing, especially in the daily use of a sketchbook.

Conclusion

The main goal of this text was to introduce a new, more effective and relevant vocabulary, in order to understand the epistemological role of drawing. Thanks to the work done by mathematicians, the word “transformation” now signifies an extremely powerful and general concept that covers events related to both movements and changes. If we use this concept of transformation in the context of drawing, we find that it is closely associated to the concept of “stroke”.

“Stroke” provides an excellent alternative to the word “line” in many situations. Thanks to its use in the field of Chinese painting, it embraces the materiality, the spatiality and the temporality that develop in drawing, and especially in the sketch. Using the word “line” often results in implicitly reducing the stroke to a graphic object in two dimensions. Where possible, I suggest reserving “line” and “curve” for more explicitly abstract and/or mathematical uses, since in such contexts those concepts are far more clearly defined.

Finally, the word “texture” puts a necessary emphasis on some of the dimensions of the stroke that are currently the most neglected because of the dematerialization of tools for design and creativity. Animation approaches such as morphing can be used to make the role of textures in the representation of space more evident.

Thus, using more adapted concepts, we have seen that it is possible to shed light on a geometry without point of view, which has not previously been fully described. It appears to have constituted a fundamental basis for the drawing of living beings since the very origins of this practice. The characteristics of this geometry in terms of composition, recomposition and movements also allows us

to understand better how to develop the potential of modern drawing approaches, for scientific or non-scientific purpose. In animation, museography or design, an important challenge today is to complete and balance the extensive development of tools and images based on flat projection and central perspective with a geometry that does not rely on a unique point of view. This geometry is easy to access thanks to drawing, and its maintenance may be equally important for the human brain. Its re-development might create the opportunity for a new association between mathematics, drawing and neurosciences.

Acknowledgments

This work received support from PSL Research University and from the grants ANR-11-LA-BX-0038 and ANR-10-IDEX-0001-02.

I would like to thank Tamar Flash, Alain Berthoz and Daniel Bennequin for their kind invitation and their patience.

I also thank Emma Neave and Seymour Simmons for their help with writing in English.

Finally, thank you to the models of the life drawing workshop of La Grande Chaumière and to the many people involved in producing the films and morphing animations mentioned in the text.

Methods

The morphing animations were mainly created with the Combustion compositing software and the associated Re:Flex morphing plugin.

Movie references

[1] Birth of a brain (2016): <https://vimeo.com/183004485>

[2] Leonardo da Vinci – Motion Picture (2013): <https://vimeo.com/84689530>

[3] Cave art animation studies (2011-2016): <https://vimeo.com/171478742>

Online resource

[a] Chabrier, R (2014) Le Morphing, l'art de transformer les images:
<https://images.math.cnrs.fr/Le-Morphing.html>

[b] Popescu-Pampu, P (2016) De la Topographie à la Géométrie:
<https://images.math.cnrs.fr/De-la-topographie-a-la-geometrie-I.html>

References

- Bennequin D, Fuchs R, Berthoz A, Flash T (2009) Movement timing and invariance arise from several geometries. *PLoS Computational Biology*
- Bennequin D, Berthoz A (2017) Several geometries for movement generation. In: Laumond JP, Mansard N, Lasserre JB (eds) *Geometric and Numerical Foundations of Movements*, STAR Series 117, Springer, Heidelberg
- Berio D, Calinon S, Fol Leymarie F (2017) Generating Calligraphic Trajectories with Model Predictive Control. In : *Graphics Interface 2017*, Edmonton, Canada
- Berthoz A (2009) *La simplicité*. Odile Jacob, Paris
- Bourdieu P (2013) *Manet, une révolution symbolique*. Raisons d'agir, Seuil, Paris
- Chabrier R (2016) Pouvoir de représentation contre pouvoir absolu : le dessin scientifique confronté à la perspective. In : Mariannick Guennec, Véfa Lucas (eds) *Les images du pouvoir*, Univ. Brest, HCTI/UBS, Lorient
- Chabrier R (2017) La pensée du trait. In : Philosophie de François Jullien. Des concepts proposés à l'art, Art Press 2 n°46, Paris
- Chabrier R, Janke C (2017) The comeback of hand drawing in modern life sciences. *Nature Review Molecular Cell Biology* 19, 137–138
- Coleman E J (1978) *Philosophy of painting by Shih-T'ao*. Mouton, The Hague
- D'Arcy Thompson (1917) *On growth and form*. Reedition
- Daston L, Galison P (2007) *Objectivity*. Zone Books, New York
- Flash T, Handzel A (2007) Affine differential geometry analysis of human arm movements. *Biological Cybernetics*, 96:577–601
- Fong W C (2003) Why Chinese Painting is History. *The Art Bulletin*, 85:2, 258-280
- Fraipont G (1897) *L'art d'utiliser ses connaissances en dessin*. H. Laurens, Paris
- Grossos P (2017) *Signe et forme: Philosophie de l'art et art paléolithique*. Les Editions du Cerf, Paris
- Gülzow J, Grayver L, Deussen O (2018) Self-Improving Robotic Brushstroke Replication. *Arts* 7:84
- Heckbert P S (1989) *Fundamentals of Texture Mapping and Image Warping*, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, University of California
- Heider F, Simmel M (1944) An Experimental Study of Apparent Behavior. *The American Journal of Psychology*, Vol. 57, No. 2, pp. 243-259
- Ivey T, Landsberg JM (2003) *Cartan for beginners: differential geometry via moving frames and exterior differential systems*. American Mathematical Society, Providence
- Jullien F (2003) *La grande image n'a pas de forme, ou du non-objet dans la peinture*, Seuil, Paris. English edition (2009) *The great image has no form, or on the nonobject through painting* (Trad:

Todd J M). University of Chicago Press

Jullien F (2009) *Les transformations silencieuses*. Grasset, Paris. English edition (2011) *The silent Transformations* (Trad : Fijalkowski K, Richardson, M). Seagull Books, Calcutta

Kantrowitz A, Brew A, Fava M (eds) (2011) *Thinking through drawing: practice into knowledge*, Teachers College, Columbia University, New York

Korzybski A (1933) *Science and Sanity: An Introduction to Non-Aristotelian Systems and General Semantics*, Institute of General Semantics (1994) 5th edition

Klein F (1872) *Vergleichende Betrachtungen über neuerer geometrische Forschungen*. Deichert

Leroy-Gourhan A (1965) *Préhistoire de l'art occidental*. Mazenod, Paris

MacLaren N (1960) *Vertical lines* (short movie). Office National du Film Canadien

Nicolaidis K (1941). *The Natural Way to Draw*. Houghton Mifflin, Boston

Palombi O, Pihuit A, Cani M P (2011) 3D Modeling of branching vessels from anatomical sketches: towards a new interactive teaching of anatomy. *Proc. of Surgical and Radiologic Anatomy*

Panofsky E (1927) *Perspective as a symbolic form*. Reedition Zone Books (1991) New York

Popescu-Pampu, P (2018) *De la topographie à la géométrie*. In : Patrick Picouet (ed) *La carte invente le monde*. Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Asq

Simmons S (2011) *Philosophical dimensions of drawing instructions*. In: Kantrowitz A, Brew A, Fava M (eds) *Thinking through drawing : practice into knowledge*, Teachers College, Columbia University, New York

Shitao (1710) *Les propos sur la peinture du moine Citrouille-amère*. Edition française : Hermann (1984) (Trad : Ryckmans P), Paris

Todd S et al. (2015) *FoldSynth: interactive 2D/3D visualisation platform for molecular strands*. In *Proceedings of the Eurographics Workshop on Visual Computing for Biology and Medicine (VCBM)* 41-50.

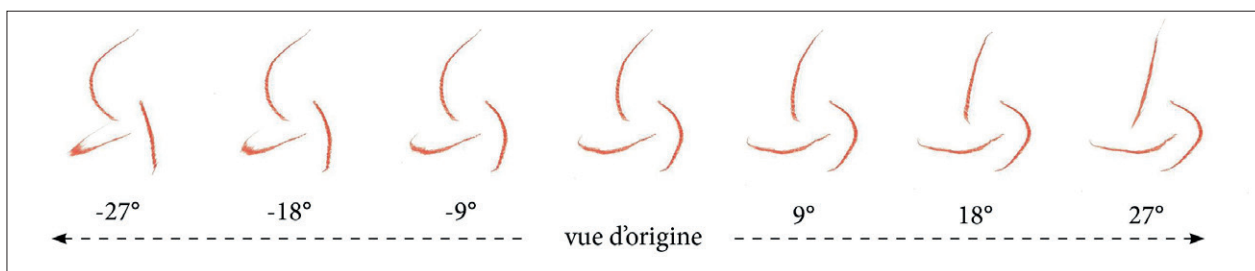
Tresset P, Fol Leymarie F (2013) *Portrait drawing by Paul the robot*. *Computers and Graphics*, Vol. 37, No. 5

Viviani P, Flash T. (1995) *Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony: Converging approaches to movement planning*. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21: 32–53

White S J, Coniston D, Rogers R, Frith U (2011) *Developing the Frith-Happé animations: a quick and objective test of theory of mind for adults with autism*. *Autism Research* 4: 149-154

Chapitre 2

Tourner autour d'un trait



Présentation sous forme de vidéo pré-enregistrée,
donnée à l'occasion des journées d'étude en ligne du
Groupe de Travail en Modélisation Géométrique

2-3 juillet 2020

<https://gtmg2020.sciencesconf.org/>

Publication n°2 :

Une communication en informatique graphique

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes intéressés à la démarche qui consiste à dessiner « sans point de vue », et nous avons vu qu'elle peut être développée en référence à un cadre mathématique plus précis, pour en arriver au concept d'une « géométrie sans point de vue ». Il s'avère que cette géométrie est liée à l'usage du « trait ». Est-il possible de prolonger cette mathématisation de façon à effectuer des opérations numériques sur le trait, en s'attachant cependant à ne pas réduire ce dernier à un « objet graphique » ?

La réponse, positive, est en partie connue grâce à de nombreux travaux menés en-dehors des laboratoires, dans des studios d'animation. L'animation par morphing montre ainsi qu'il est possible de « tourner autour d'un dessin ». Sur cette base, l'enjeu de la spatialité du dessin peut être épuré jusqu'à une question plus fondamentale : comment « tourner autour d'un trait » ? Cependant, pour mener à bien de tels travaux et leur donner une forme communicable, il était nécessaire de sortir du studio et de se rapprocher des chercheurs concernés.

En intégrant l'équipe Geovic du Laboratoire d'Informatique de l'Ecole Polytechnique (LIX, IP Paris), et en y reconstituant un atelier doté du matériel nécessaire pour pratiquer l'animation (table à dessin, scanner, banc de reproduction...), j'ai pu me familiariser avec un univers de recherche extrêmement dynamique, rythmé par les grandes conférences annuelles comme Eurographics ou Siggraph, et d'autres plus intimes comme Expressive. Essentiellement focalisés sur le numérique, les chercheurs de ce domaine n'en sont pas moins sensibles au dessin et à l'animation.

La communication qui suit a été présentée lors des journées du «Groupe de travail français en modélisation géométrique» du GRD IG-RV (Informatique Graphique, Réalité virtuelle et Visualisation Scientifique). Elle constitue une première tentative pour aborder la question du trait dans cet espace de dialogue, en même temps qu'une étape importante dans mes travaux pour connecter le dessin, les mathématiques et les neurosciences.

La présentation ayant eu lieu en ligne pendant la crise du Covid-19, elle a été diffusée sous forme d'une vidéo pré-enregistrée disponible à l'adresse suivante :

<https://vimeo.com/444562806/d9db8bd0aa>

Résumé / Abstract

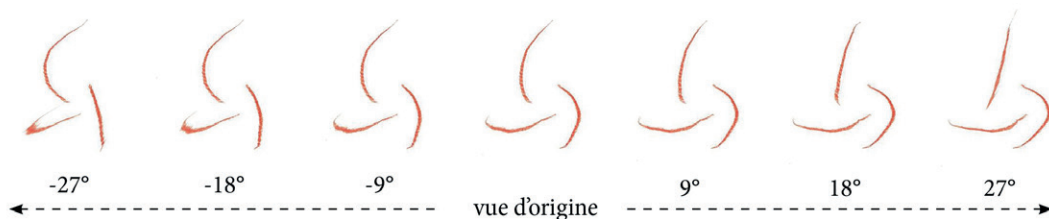
Un dessin est constitué de traits, tracés le plus souvent à la surface d'une feuille de papier. Cependant ces traits ne sont pas « plats » : bien avant que les images de synthèse ne s'imposent, le dessin a été massivement utilisé pour ses capacités de représentation spatiale. L'opération qui consiste à interpréter l'espace d'un trait est cependant mal comprise, encore aujourd'hui. En informatique graphique, l'approche du sketch-based modeling a permis d'expérimenter le passage du dessin à la 3D dans plusieurs cas d'application importants comme l'architecture et l'anatomie (Olivier et al. 2019, Palombi et al. 2011), en général à partir d'une tablette graphique. Ma présentation proposera une piste pour reprendre la question à partir du papier.

Un croisement de réflexions issus de plusieurs disciplines m'aidera d'abord à préciser quel type de spatialité est en jeu ici. Depuis la Renaissance, deux façons de composer l'espace dans les dessins se sont en effet distinguées : il est possible d'utiliser une géométrie liée à un « point de vue », habituellement appelée « perspective centrale » ; il est aussi possible d'utiliser une géométrie « sans point de vue », moins connue mais incontournable pour la représentation des corps vivants, aussi bien en biologie qu'en art oriental. A la fin du XXème siècle, ces deux approches de la représentation de l'espace ont trouvé une concrétisation numérique, pour l'une dans les images de synthèse, et pour l'autre dans l'animation par morphing de textures (Chabrier 2020).

Or de nombreuses études de neurosciences indiquent que le cerveau utilise plusieurs géométries dans son fonctionnement normal, y compris pour la perception d'une même scène visuelle. Si l'on s'intéresse aux traits (le plus souvent courbes) qui permettent de dessiner le vivant, il paraît donc légitime de s'écarter légèrement de la géométrie euclidienne, dont l'efficacité se concentre sur les lignes et les angles droits, afin d'utiliser la géométrie affine et les propriétés des coniques (Flash & Handzel 2007). Enfin, le fait que le cerveau soit largement organisé sous forme de « cartes » suggère que des transformations planes y trouvent plus naturellement place que des transformations proprement tridimensionnelles.

En suivant cette logique, je décrirai alors l'élaboration d'un outil semi-automatique permettant de :

- capturer des images (ou textures) de traits à la volée, à l'aide d'une caméra associée à une méthode basique de soustraction d'images.
- interpréter le plan tangent d'un trait, grâce à l'aide d'un opérateur basé sur une propriété simple des ellipses, mais pouvant s'appliquer indifféremment à toute texture.
- déduire de ce plan tangent des vues sous d'autres angles (pour un affichage stéréoscopique, ou pour une rotation libre autour du dessin comme dans l'image ci-dessous), à travers une succession de transformations dans le plan.



En conclusion, j'évoquerai les applications de ce travail, qui reste pour le moment minimal et abstrait, et j'indiquerai brièvement l'éclairage qu'il porte sur le rôle actuel du dessin, après les deux révolutions de l'art moderne et du numérique.



a

b

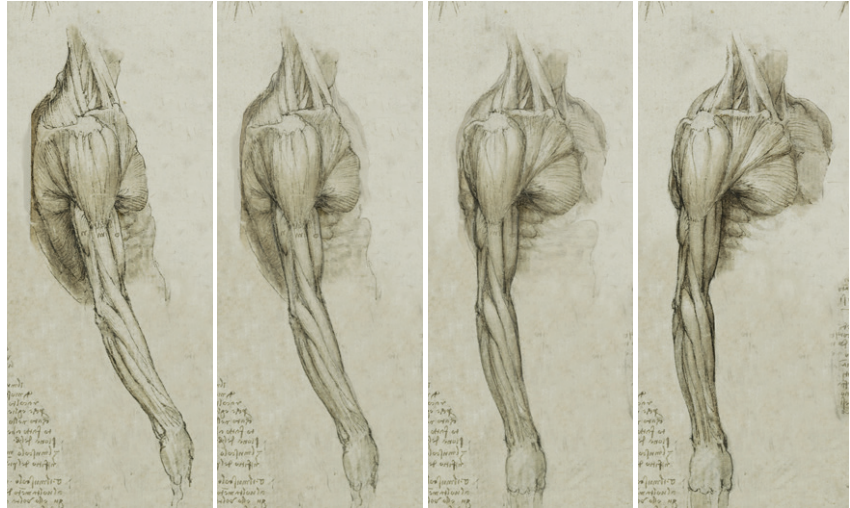


Figure 1:

L'animation par morphing permet de faire «tourner des dessins»

a: Mouvement de tête d'un cerf; grotte de Lascaux, vers 18000 ans AP; anim. Chabrier R, prod. Parc de l'Ariège, 2015

b: Etude de l'anatomie du bras; dessin de Leonard de Vinci, vers 1509; anim. Chabrier R, 2019

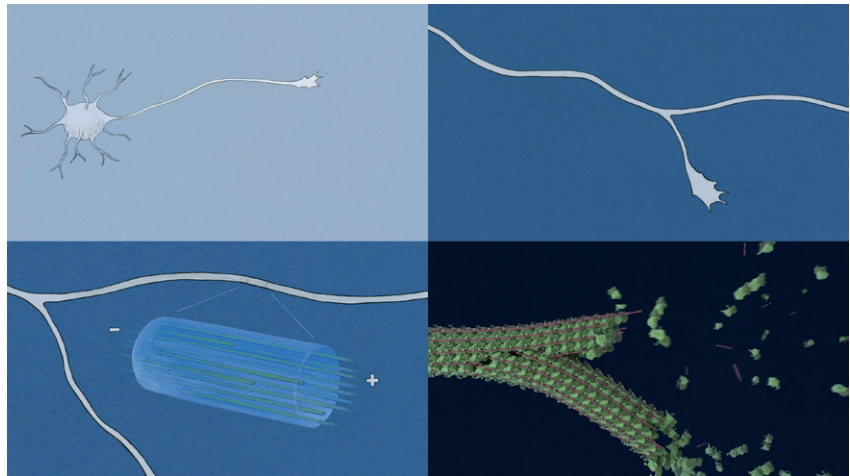
Figure 2:

Dessin et images de synthèse sont complémentaires

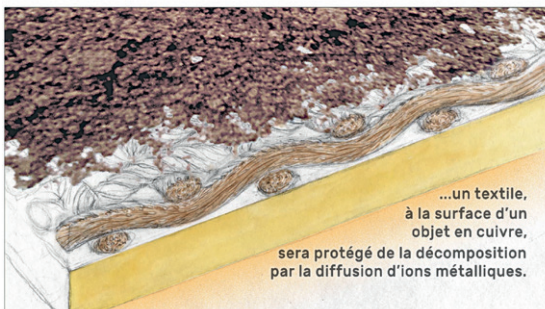
a: Ils peuvent être utilisés pour montrer des échelles différentes (*Microtubule branching in neurons*, Mizuki N, animation Chabrier R, Kawska A, 2018)

b, c : Le dessin est efficace pour expliquer des processus, mais il est plus facile de «tourner autour» des objets 3D (*A la découverte des fibres minéralisées*, réal. Arène C, Chabrier R, prod. Nova Pista/Ipanema 2020)

a



b



c



Texte de la présentation

Bonjour, je suis Renaud Chabrier, et je termine actuellement une thèse en Art et Design co-dirigée par Marie-Paule Cani, au sein de l'équipe Geovic à l'École Polytechnique. Mon travail se situe à l'interface entre le dessin sur papier et l'animation numérique, avec une ouverture vers les neurosciences et la philosophie.

L'objectif de cette présentation est de construire une méthode pour arriver au résultat suivant : étant donné un trait A, tracé à l'origine sur une feuille de papier, comment calculer une vue satisfaisante sous un autre angles B ? Je vais d'abord aborder le problème de plus haut niveau qui consiste à « tourner autour d'un dessin » en utilisant des exemples de warping et de morphing. Je passerai ensuite à la question plus basique, mais aussi plus ouverte, de savoir comment « tourner autour d'un trait ». Je proposerai alors une méthode possible pour le faire, en s'inspirant de la logique du morphing et de la géométrie affine. Une brève conclusion replacera ce travail dans le contexte des relations entre l'art et la géométrie.

Première partie : tourner autour d'un dessin

Le dessin a été utilisé très tôt pour ses capacités de représentation spatiale, tout particulièrement celle des êtres vivants. L'animation par warping ou morphing permet de mettre en évidence cette spatialité, même sur des dessins anciens comme ce cerf de Lascaux. Pour le faire correctement, il est nécessaire de pouvoir évoquer des rotations rigides de certaines parties du corps, même si le morphing est plutôt connu pour ses capacités de déformation élastiques. (**figure 1a**).

En utilisant cette technique pour animer les dessins de grands artiste de la Renaissance comme Léonard de Vinci, on réalise à quelle point leur trait indique précisément l'espace qu'ils souhaitent évoquer. Cette maîtrise a eu un rôle déterminant dans le développement des sciences, car le dessin devenait alors un outil réellement fiable pour transmettre une information spatiale de façon durable, même lorsque les formes sont courbes et mobiles. (**figure 1b**)

Aujourd'hui, le dessin est toujours utilisé pour la transmission des sciences, avec un rôle complémentaire de celui des images de synthèse. En biologie, par exemple, il peut être très utile de représenter l'échelle des neurones en dessin et l'échelle des molécules en images de synthèse (**figure 2a**). En archéologie également, le dessin est efficace pour évoquer le contexte et les hypothèses, tandis que les images de synthèse permettent de se rattacher aux données scientifiques actuelles (**figure 2 b et c**). Cependant, s'il est facile de tourner autour d'un modèle 3D, tourner autour d'un dessin reste une possibilité très méconnue. En production, cette situation complique fortement le couplage des deux univers graphiques dans une même narration.

Depuis le début des années 2000, j'ai pu étudier en pratique sous quelles conditions un morphing entre deux dessins génère la sensation d'une rotation rigide dans l'espace (**figure 3**). Pour effectuer un morphing de ce type, des contraintes de déformation doivent être correctement placées à la main, souvent sous la forme de courbes de Bézières. On calcule séparément les déformations des deux images A et B (ce qu'on appelle le warping), puis on calcule une transition entre les deux grâce à un fondu enchaîné. On obtient alors le morphing proprement dit. L'originalité du morphing vient

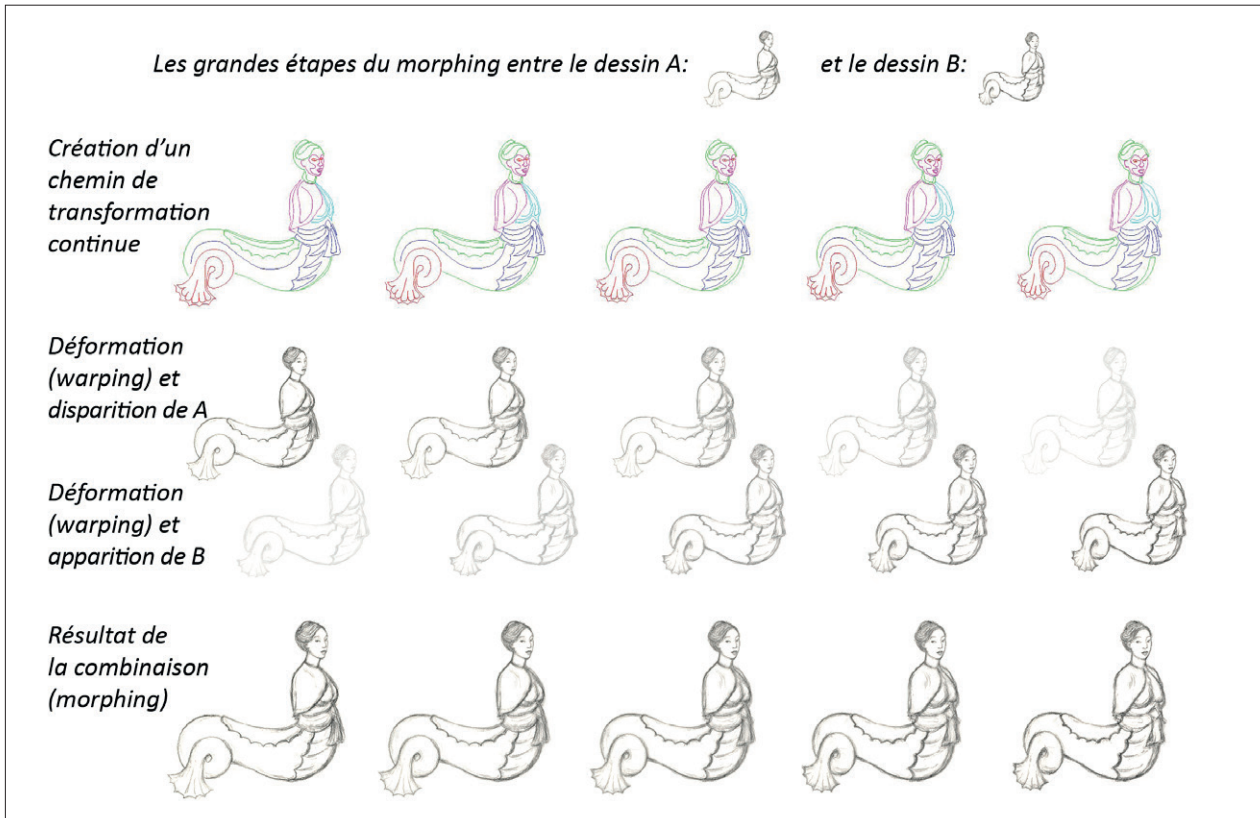


Figure 3: Le morphing est une combinaison de transformations «dans le plan», qui peut générer la perception d'un mouvement «dans l'espace». *Le morphing ou l'art de transformer les images*, Chabier R, images.math.cnrs.fr, 2014.



Figure 4: Les courbures des traits «dans le plan» suggèrent aussi bien des courbures «dans l'espace». Jacques Callot, un «Balli», vers 1620

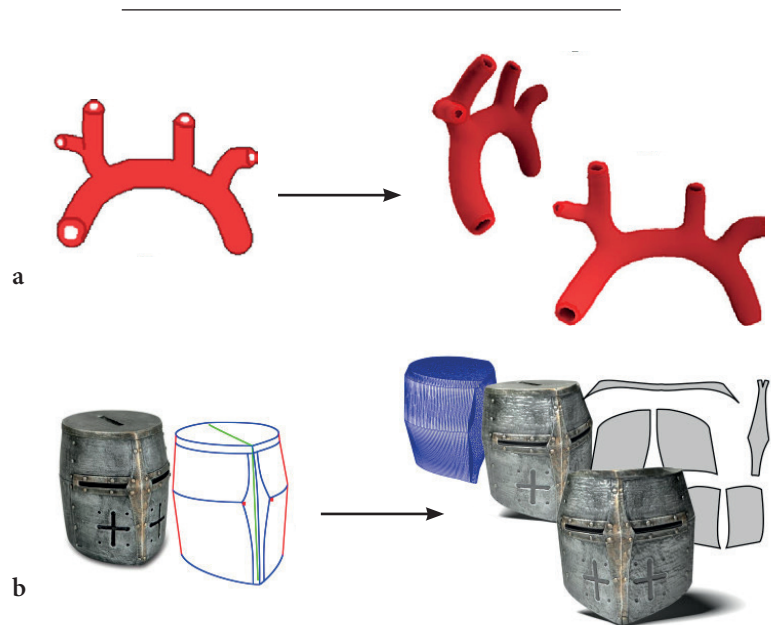


Figure 5: Le sketch-based modeling permet de créer un modèle 3D d'après une vue unique en schéma ou photo, en s'aidant d'hypothèses sur l'interprétation spatiale des lignes de contour.

a: Spatialisation de schémas de vaisseaux sanguins (Palombi et al. 2010)

b: Interprétation spatiale à l'aide de surfaces développables (Fondevilla et al. 2017)

du fait qu'il ne repose pas sur l'usage d'une caméra virtuelle : toutes les transformations sont effectuées dans le plan, et le plus souvent hors du cadre de la géométrie projective.

Dans cette démarche, la spécification des transformations de l'image n'est pas automatique. Ceci n'est d'ailleurs pas un problème en soi, sachant que l'industrie de l'animation demande de toute façon énormément de travail à la main, y compris en 3D. Mais si l'on veut animer un dessin qui compte plusieurs centaines de traits, il est rare de pouvoir traiter ces traits individuellement à la main. Le warping et le morphing agissent donc sur la texture des images de façon assez globale, excepté aux endroits où des contraintes explicites ont été posées. Il serait donc intéressant de savoir si au niveau de chaque trait, et pas seulement au niveau des traits principaux, une interprétation plus automatique de la spatialité serait possible.

Deuxième partie : tourner autour d'un trait

Lorsque l'on s'intéresse de près aux traits qui composent un dessin, on découvre souvent qu'ils ne sont pas plats (**figure 4**). Leurs courbures dans le plan suggèrent aussi bien des courbures dans l'espace. Or durant les 10 dernières années, le problème d'interpréter en trois dimensions une information donnée en deux dimensions a donné lieu à de nombreuses recherches en sketch-based modeling.

Ces approches supposent souvent que le type d'objet représenté est connu, ce qui permet de faire des hypothèses complémentaires : par exemple, si l'objet est un vaisseau sanguin, un tracé d'ellipse (dans le plan) peut être interprété comme une section circulaire du vaisseau (Pihuit et al. 2010, **figure 5a**). Si l'objet est un bâtiment, un tracé sur le sol peut être interprété comme la base d'un mur vertical, l'aspect de croquis permettant par ailleurs d'introduire une certaine indétermination (Olivier et al. 2019). Enfin, si l'objet est connu pour être symétrique, et les surfaces pour être développables dans un plan, un ensemble de lignes courbes peut suffire à spécifier très largement la structure spatiale de l'objet, dans une logique qui étend les possibilités du dessin technique (Fondavilla et al. 2017, **figure 5b**)

Ces trois applications utilisent des contours pour décrire les formes. Dans d'autres cas, les formes et les mouvements peuvent aussi être spécifiés « de l'intérieur » grâce à des surfaces implicites basées sur un squelette, ou encore grâce à des lignes d'action. Il existe donc une très grande variété de solutions, mais à ma connaissance le but est presque toujours de déduire une forme à partir d'un tracé, plus que de spatialiser le tracé lui-même. L'étude de David Bourguignon et al. (2001) s'attaque à ce dernier objectif en distinguant deux types de traits, qui ne subissent pas la même transformation lors d'un changement de point de vue: les traits «libres» sont associés à un plan de l'espace défini par l'utilisateur, tandis que les traits de contours subissent une transformation beaucoup plus élaborée. Dans la méthode que je vais mettre en place, nous allons en priorité nous intéresser à la spatialité des traits «libres», en cherchant avant tout comment ils peuvent indiquer eux-mêmes le plan dans lequel ils se déploient localement, en l'absence d'hypothèse sur ce qu'ils représentent.

Dans toutes les études précédentes, le tracé est par ailleurs réalisé à la souris ou sur une tablette graphique. L'information bidimensionnelle en entrée se présente donc sous la forme de trajectoires échantillonnées ou de splines en deux dimensions. En majorité, ces techniques travaillent donc à un niveau d'abstraction différent de celui du dessin sur papier, dans lequel la matière du trait joue un rôle beaucoup plus important. Ici, je vais donc prendre en entrée des traits sur papier.

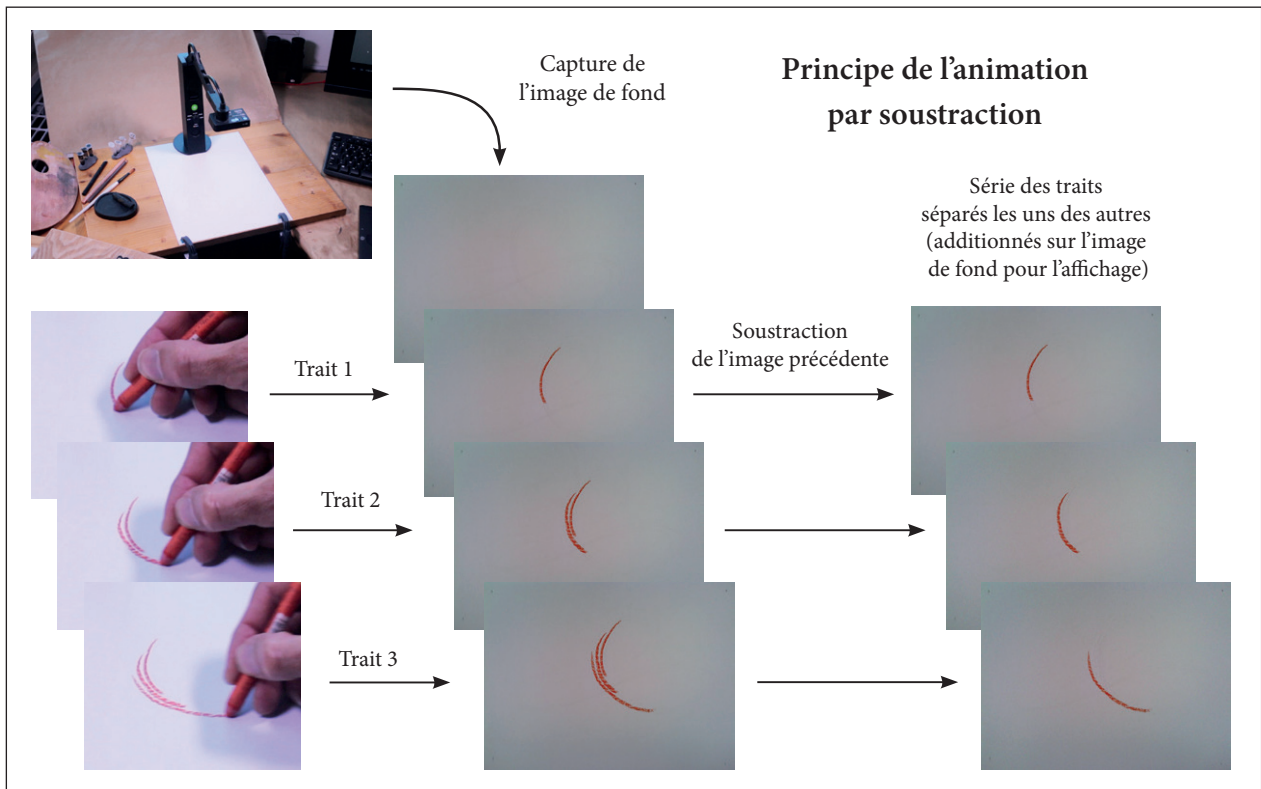
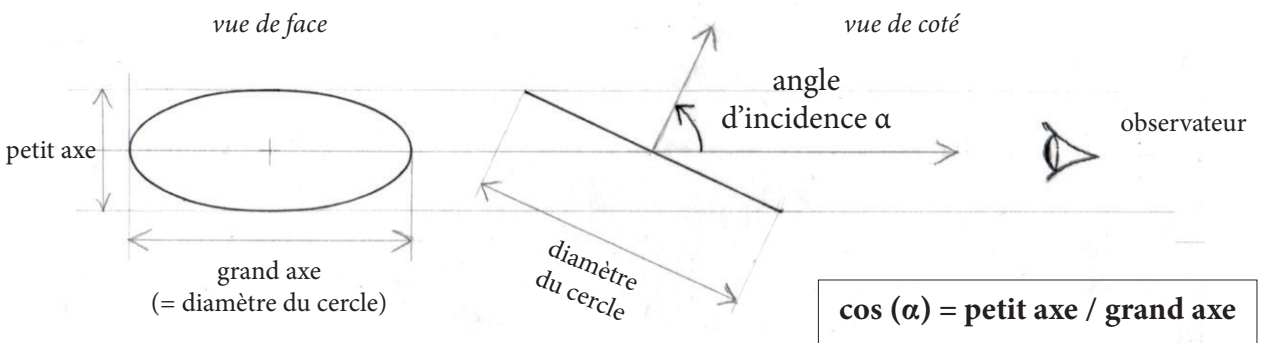


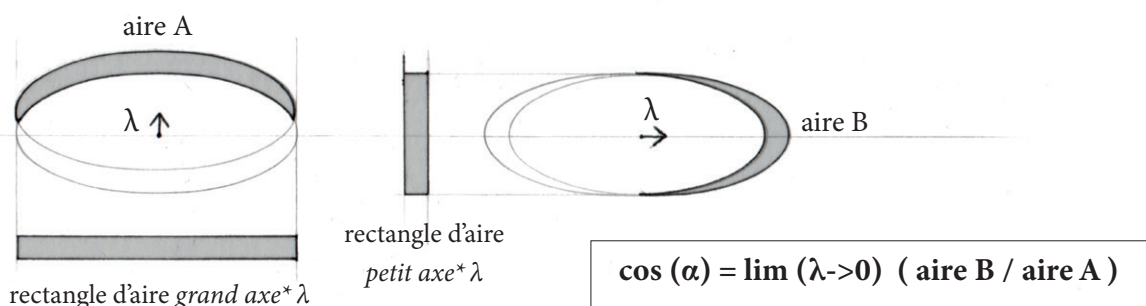
Figure 6: L'animation par soustraction permet d'acquérir et de séparer les traits qui s'accroissent sur une feuille. L'animation qui en résulte peut être présentée en boucle et actualisée à chaque trait. Chabrier R, dispositif inventé en résine artistique au Laboratoire d'Imagerie Numérique, Angoulême, 2003.

Figure 7: Un cercle vu de biais apparaît comme une ellipse. Inversement, celle-ci permet de connaître l'angle d'incidence sur le cercle de deux façons, en mesurant des distances ou des aires.

a: $\cos(\alpha)$ est donnée par le rapport du petit axe et du grand axe.



b: $\cos(\alpha)$ peut aussi être évalué par le rapport des aires A et B qui résultent d'un décalage horizontal et vertical de l'ellipse sur une longueur λ . Quand λ est suffisamment petit, ces surfaces se rapprochent de deux rectangles d'aire *petit axe* * λ et *grand axe* * λ , donc leur rapport se rapproche de *petit axe* / *grand axe* = $\cos(\alpha)$.



La méthode va consister en trois étapes :

- Acquérir un trait avec une caméra
- Interpréter un plan tangent à partir de la texture de ce trait
- Déduire de ce plan tangent des vues sous d'autres angles

Etape 1: acquérir un trait

Pour l'acquisition des traits, il existe une solution simple que je développe depuis 2003. Il faut d'abord placer une feuille sous une caméra, puis prendre une première image. On trace un premier trait, puis on capture à nouveau une image, et on effectue une soustraction avec l'image précédente. De cette façon, quel que soit le fond, on extrait uniquement la partie de l'image qui a changé, c'est-à-dire le trait.

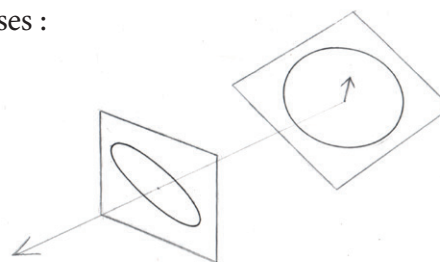
On trace alors un deuxième trait, qui peut être séparé du premier en soustrayant la dernière image capturée avec l'image précédente, et ainsi de suite (**figure 6**). Dans l'exemple que je montre, les traits développent un mouvement au fur et à mesure qu'ils s'accumulent sous la caméra. Cette animation est visualisée en temps réel, c'est-à-dire qu'elle est actualisée à chaque nouveau trait, en additionnant le résultat de la soustraction avec une image de fond constante.

J'ai beaucoup utilisé ce dispositif dans le cadre d'ateliers d'initiation au mouvement (Chabrier, 2008), aussi bien que pour réaliser des animations plus élaborées. Ici, il va simplement nous servir à séparer les traits qui s'accumulent sur une feuille de papier, et à les traiter un à la fois¹.

Etape 2: Interpréter un plan tangent

La deuxième étape consiste maintenant à évaluer un plan de l'espace, d'après le trait que nous venons d'isoler. Nous allons nous concentrer sur des traits très simples, qui peuvent être vus comme des courbes planes, voire de courtes portions d'hélice. En effet, lorsque les traits utilisés en dessin montrent des changements d'orientation brusques ou des inversions de courbures, ces événements correspondent souvent à des pauses dans le geste (Brew, 2016). On peut alors considérer ces traits complexes comme une combinaison de traits plus simples. Nous allons donc chercher la solution la moins fautive possible pour associer un trait simple avec un plan de l'espace, que nous appellerons le plan tangent. Pour cela nous allons nous servir d'une propriété de base des ellipses :

Une ellipse (dans le plan) peut aussi être considérée comme un cercle (dans l'espace), celui-ci étant vu de biais.



Ce que j'appellerai « angle d'incidence » est alors l'angle alpha entre la direction de projection et la normale au cercle (**figure 7a**). Cet angle peut être connu exactement en faisant le rapport des longueurs du petit axe et du grand axe.

Mais il y a une autre façon de connaître ce rapport, en mesurant des aires (**figure 7b**). Si l'on décale l'ellipse d'une longueur lambda respectivement dans la direction du petit axe et du grand axe, la différence avec la position initiale dégage deux aires dont le rapport se rapproche du cosinus de l'angle d'incidence, lorsque lambda est petit.

¹ Il est possible de faire passer un trait par-dessus un autre sans que la soustraction ne fasse apparaître un trou, si le trait précédent n'a pas « bouché » les valeurs de noir (dans le cas d'un trait en noir sur blanc). Telles que je l'ai présentée, la méthode est surtout utile pour des études d'animation simples ou esquissées. Une méthode avec recadrage a été développée pour gérer des animations plus complexes.

Textures initiales:



Aire A dégagée par un décalage vertical:



Aire B dégagée par un décalage horizontal:



Figure 8: Une opération d'«écart-soustraction» peut être effectuée sur n'importe quelle texture.

N.B: ici on ne visualise que la partie positive de la différence, c'est à dire un seul bord

Si l'on travaille en niveau de gris, la soustraction d'un pixel blanc (255) par rapport à un noir (0) donne -255, qui n'est pas affichable. De même, une soustraction par canaux de couleurs peut donner une valeur RVB telle que (100, -20, -230). Une visualisation simultanée des valeurs positives et négative peut en revanche être effectuée sur un fond gris.

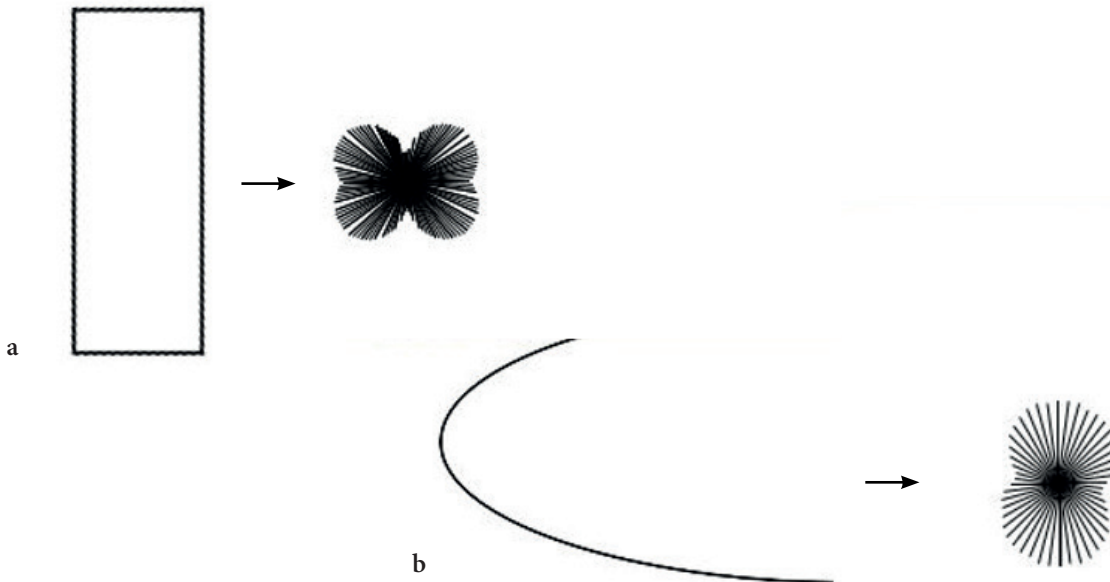


Figure 9: La mesure d'«écart-soustraction» à 360° montrent une direction de minimum sans ambiguïté dans le cas des ellipses et fragment d'ellipses, contrairement aux formes anguleuses.

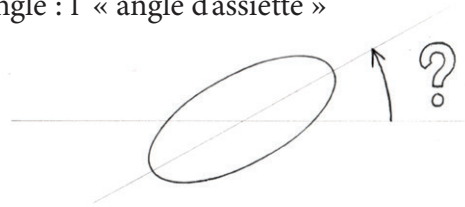
a: Les mesures d'écart-soustraction à 360° sur un rectangle montrent 4 minima (soit deux directions)

b: mesure d'écart-soustraction à 360° sur un fragment d'ellipse montrent 2 minima (soit une direction)

Cette méthode a l'avantage de pouvoir s'appliquer à toute texture, indépendamment de ce qu'elle représente: des formes pleines, des formes vides, mais aussi des matières sur lesquelles il est plus difficile de savoir exactement quelle longueur caractéristique mesurer.

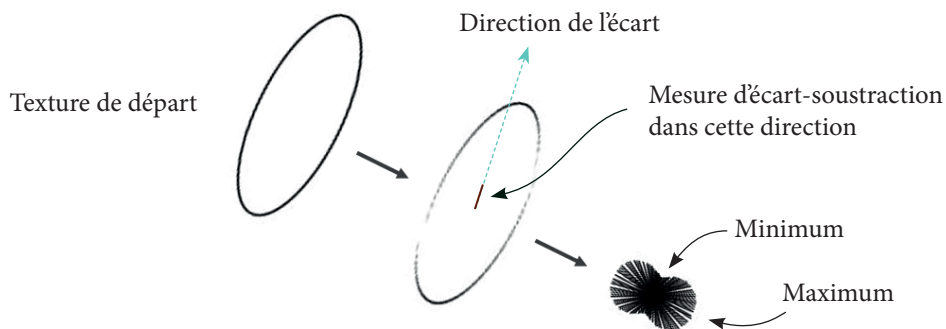
Quelle que soit la texture, on peut toujours la décaler d'une distance λ dans une certaine direction, et faire la soustraction avec la texture d'origine (**figure 8**). Les «pixels» de cette soustraction ont des valeurs relatives: le résultat n'est donc pas affichable «tel quel»¹. Quoiqu'il en soit, le nombre de pixels supérieur à un certain seuil, en valeur absolue, nous donnera une mesure de l'aire. On peut aussi choisir de faire la somme des pixels positifs, ou tenir compte des parties positives et négatives de la différence séparément. Quel que soit le détail de la méthode choisie, j'appellerai cette opération une mesure d'« Ecart-Soustraction ».

Mais pour appliquer cette méthode de calcul de l'angle d'incidence, il faut déjà savoir dans quelle direction faire les deux mesures dont nous voulons calculer le rapport. Autrement dit, nous avons besoin de connaître un autre angle : l'« angle d'assiette »



Le plus simple serait de l'évaluer grâce à une moyenne des gradients sur l'image. Ceci nous donnerait la direction du maximum de variation, c'est-à-dire celle du petit axe, dont on peut déduire le grand.

Cependant, si l'on répète les mesures d'« Ecart-Soustraction » à 360° sur une image d'ellipse, et que l'on affiche ces mesures sous la forme d'une roue, en fonction de chaque direction de déplacement, on constate que le minimum est mieux marqué que le maximum:



Ce minimum donne une évaluation de la direction du grand axe (voir pseudo-code page suivante), de façon plus robuste qu'avec un gradient, même si cela demande aussi plus de calculs. Ceci est particulièrement intéressant sur des incidences faibles, quand l'ellipse se rapproche d'un cercle.

Cet étranglement des mesures d'écart-soustraction dans la direction du grand axe, avec seulement deux minima symétriques, semble être caractéristique des formes ellipsoïdale ou étirées. Les formes angulaires, comme les rectangles, triangles ou losanges présentent plus que deux minima. (**figure 9a**)

Nous disposons donc maintenant d'un opérateur qui permet d'associer un angle d'assiette et un angle d'incidence à n'importe quelle texture. Cette proposition aura évidemment d'autant plus de sens que la texture se rapprochera d'un dessin d'ellipse, mais nous pouvons espérer qu'elle donnera également des résultats intéressants sur des formes courbes simples, c'est-à-dire sur des traits. (**figure 9b**)

¹ Je reviendrai sur dans la partie suivante sur le fait que le résultat de la soustraction n'est pas une image.

Algorithme 1

Evaluation d'un plan tangent par la méthode « Ecart-Soustraction »

```
// Parametre de longueur de l'écart (quelques pixels)
int λ = 3;

// Mesure de l'écart dans différentes directions, sur 360°
float[] mesureEcart = new float[ nombreMesures];
// En pratique, on prend nombreMesure = 24
for (int k = 0; k < nombreMesures; k++)
{
    // Calcul d'une "image" décallée de la longueur λ dans la direction β
    β = 2*PI / k;
    image2 = translate( image, λ, β );

    // Soustraction pour obtenir le vecteur-image v = (image2 - image1)
    int[] v = new int[N]; // Attention: les valeurs de v sont relatives
    for (int i = 0; i < nombrePixels; i++) {
        v[i] = image2.pixels[i] - image1.pixels[i]; }
    }

    // On mesure la magnitude de v en additionnant ses valeur positives
    mesureEcart[k] = 0;
    for (int i = 0; i < nombrePixels; i++) {
        if ( v[i] > 0 ) {
            mesureEcart[k] = mes mesureEcart[k] + v[i];
            // Le tableau mesureEcart stocke 24 résultat
        }
    }
}

// L'indice de la valeur minimum de mesureEcart[] donne
// l' « assiette » du plan tangent
angleAssiette = indiceDuMinimum ( mesuresEcart ) * 2PI / nombreMesures;

// Le rapport entre les valeurs maximales et minimale de mesureEcart donne
// l' « incidence » du plan tangent
angleIncidence = acos ( min( mesuresEcart ) / max (mesuresEcart) )

// On calcule le centre de masse de l'image du trait
(xCentre, yCentre) = calculeCentreMasse ( image1 )

// On calcule les 3 paramètres de l'équation de la ligne focale ax + by + c = 0
// en supposant qu'elle passe par le centre de masse du trait
a = -sin(angleAssiette);
b = cos(angleAssiette);
```

Sous forme d'algorithme, la méthode se présente alors ainsi :

On se donne un paramètre d'écart λ , qui doit être le plus petit possible mais assez grand pour que la pixellisation des formes n'affecte pas les résultats

Puis on remplit un tableau avec 24 mesures réparties sur 360° . Pour chaque direction:

on calcule une image décalée de λ pixels par rapport à l'image d'origine, dans la direction courante.

on effectue la soustraction entre cette image et l'image d'origine. (On peut penser au résultat de cette soustraction entre deux images comme à un vecteur-image)

On mesure l'«aire» dégagée par l'opération d'écart-soustraction (Que l'on peut aussi voir comme la magnitude du vecteur-image obtenu). Il y a plusieurs façons possibles pour le faire : ici, j'ai simplement choisi de faire la somme des pixels positifs.

Une fois que le tableau de mesures est rempli, l'indice de sa valeur minimale donne l'« assiette » du plan tangent (en sachant que l'échantillonnage sur 24 angles que j'utilise est un peu grossier et qu'un raffinement de la recherche du minimum est possible).

L'« incidence » du plan tangent, quant à elle, est donnée par le rapport entre les valeurs minimales et maximales du tableau.

On fait ensuite deux autres mesures qui joueront un rôle important. D'abord on évalue les coordonnées du centre de masse de l'image du trait.

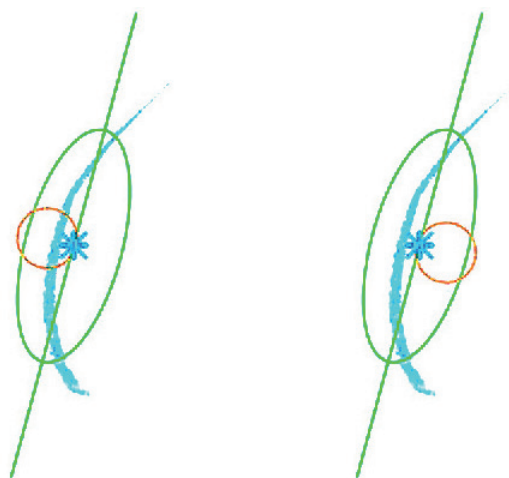
Puis on calcule l'équation d'une droite du plan qui passe par ce centre, dans la direction de l'assiette. Pour une ellipse, cette droite recouvre donc le grand axe.

A ce stade, nous pouvons commencer à visualiser le plan tangent, en affichant une ellipse « équivalente au trait » d'après la méthode que nous avons mis en place. Mais nous n'avons calculé que 2 paramètres, l'« assiette » et l'« incidence ». Nous allons devoir en déterminer deux autres.

Le troisième paramètre revient à lever une ambiguïté sur le signe de l'angle d'incidence. Dans mon interface, je visualise ce signe grâce à une boule qui indique quel côté du plan est visible. Si le signe n'est pas celui souhaité, on peut le changer:



Texture de départ
(trait capturé sur le papier,
séparé du fond, et appliqué sur fond noir)



Le plan défini par l'ellipse équivalente présente une ambiguïté:
il peut se présenter de deux côtés
(image en luminosité inversée pour faciliter
l'impression sur fond blanc)

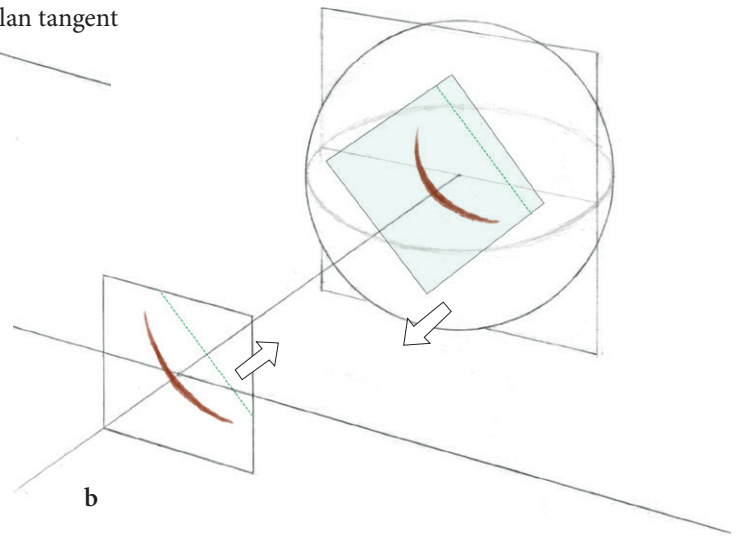
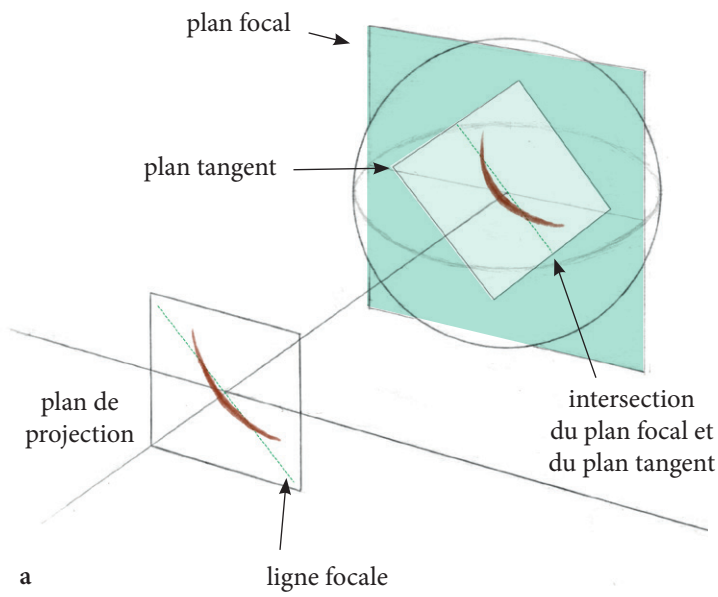


Figure 10: Ajustement de la profondeur du plan tangent.

a: le plan focal et le plan tangent s'intersectent selon une droite. La projection parallèle de cette droite sur le plan de projection donne la ligne focale.

b: Si le plan tangent est déplacé vers l'observateur, la ligne focale se déplace également.

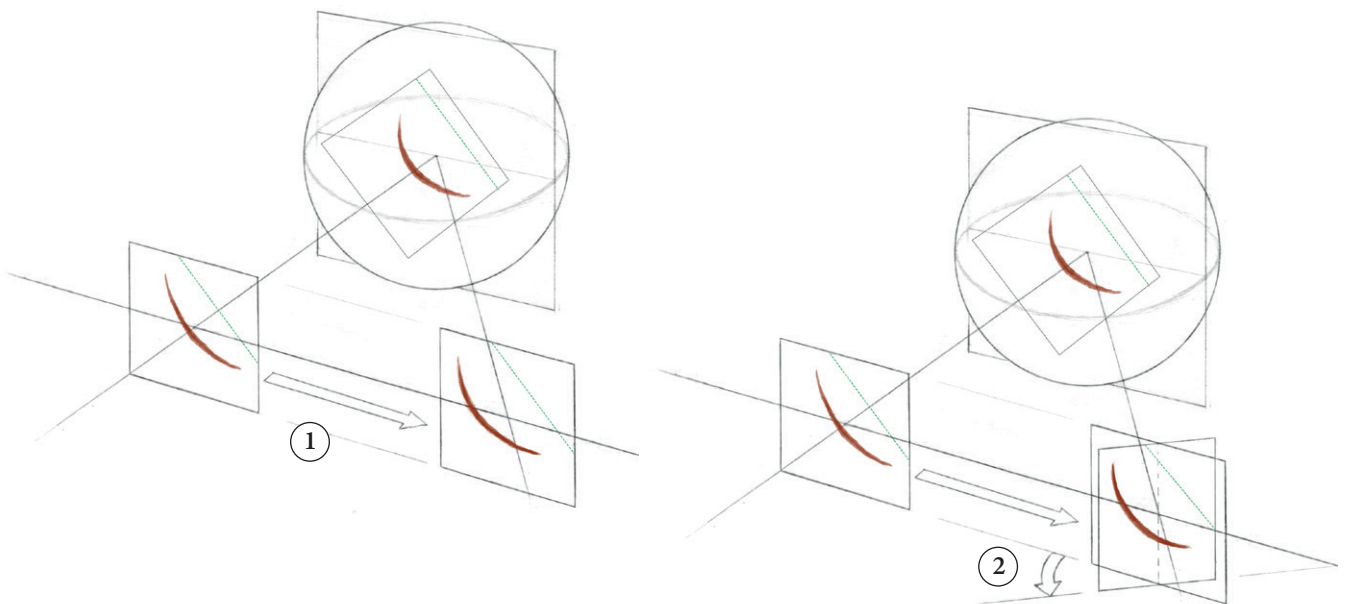


Figure 11: Le calcul d'une vue du trait sous un nouvel angle se fait en deux étapes

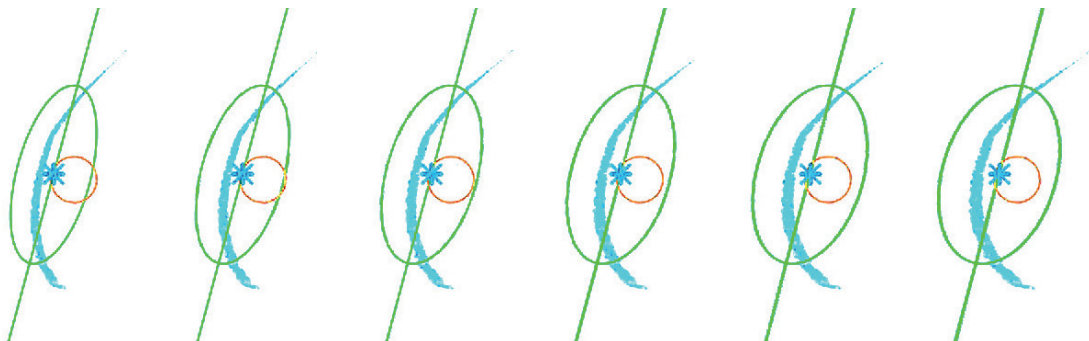
Étape 1: Décentrement (glissement horizontal des pixels en fonction de leur distance à la ligne focale)

Étape 2: Recentrement (mise à l'échelle dans l'axe horizontal)

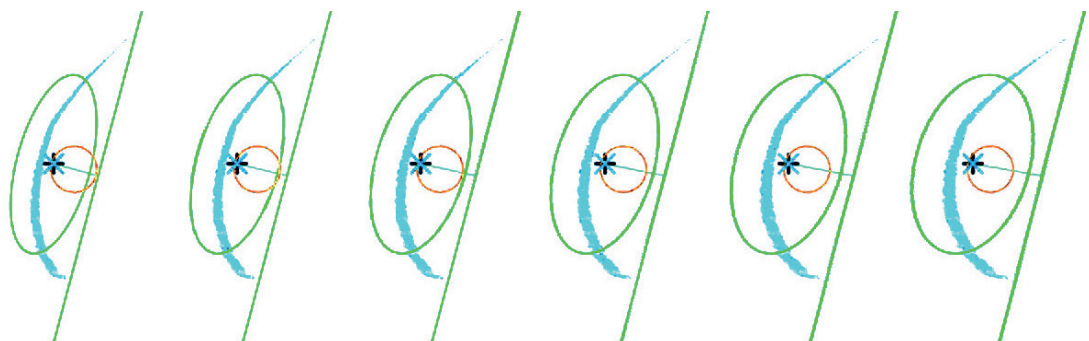
Le quatrième paramètre est lié la profondeur du trait par rapport à un plan de référence, parallèle au plan de la vue initiale, et que je surligne ici en vert (**figure 10a**). C'est sur ce plan, que j'appelle le plan focal, que l'on positionne par défaut le centre de masse du trait.

L'intersection entre le plan tangent et le plan focal est une droite de l'espace. Elle se projette sur le plan de l'image de départ en une droite que j'appelle « ligne focale » (**figure 10b**). Cette ligne se confond pour l'instant avec le grand axe de l'ellipse équivalente au trait, et c'est donc la droite dont nous avons calculé l'équation à la fin de l'algorithme précédent.

Si l'on anticipe sur la suite et que l'on tourne légèrement autour du trait dans le plan horizontal, on voit que les parties situées en avant et en arrière du plan focal (c'est à dire d'un coté et de l'autre de la ligne focale) glissent horizontalement.



Mais on peut choisir d'avancer le plan tangent vers nous, ce qui augmente la distance entre la ligne focale et le centre de masse. L'amplitude du déplacement du trait est alors plus grande.



Pour définir la profondeur du plan tangent, une solution simple consiste donc à changer la distance entre la ligne focale et le centre de masse.

Munis des quatre paramètres nécessaires pour définir un plan dans un espace à 3 dimensions, nous pouvons enfin calculer de nouvelles vues du trait. Nous allons seulement considérer des *projections parallèles* depuis l'espace sur le plan de visualisation, et nous tournerons autour du trait *en restant dans le plan horizontal*. La transformation de l'image se fera en deux étape (**figure 11**).

Tout d'abord, nous pouvons effectuer un *décentrement* à partir de l'image de départ. Ce glissement est parallèle au plan focal, et la projection de ce dernier reste donc invariante. Par conséquent, la ligne focale est également invariante. En fonction de leur distance par rapport à la ligne focale, les autres point l'image vont glisser horizontalement. Comme son nom l'indique, le décentrement fait sortir le spectateur de l'axe de l'objet qu'il regarde. Pour se *recentrer* vers l'objet, en projection parallèle, il suffit cependant d'effectuer une mise à l'échelle horizontale.

Algorithme 2

Calcul d'une nouvelle vue sous l'angle δ

Pour chaque pixels (x_3, y_3) de l'image d'arrivée {

// Décompression horizontale

$x_2 = x_3 / \cos(\delta)$;

$y_2 = y_3$;

// Décentrement inverse

distance((x_2, y_2) , ligne focale) = $a*x + b*y + c$;

$x_1 = x_2 - (\text{facteurDecentrement} / \text{distance})$;

$y_1 = y_2$;

// Affectation de la valeur de pixels

valeur(x_3, y_3) = valeur(x_1, y_1);

}

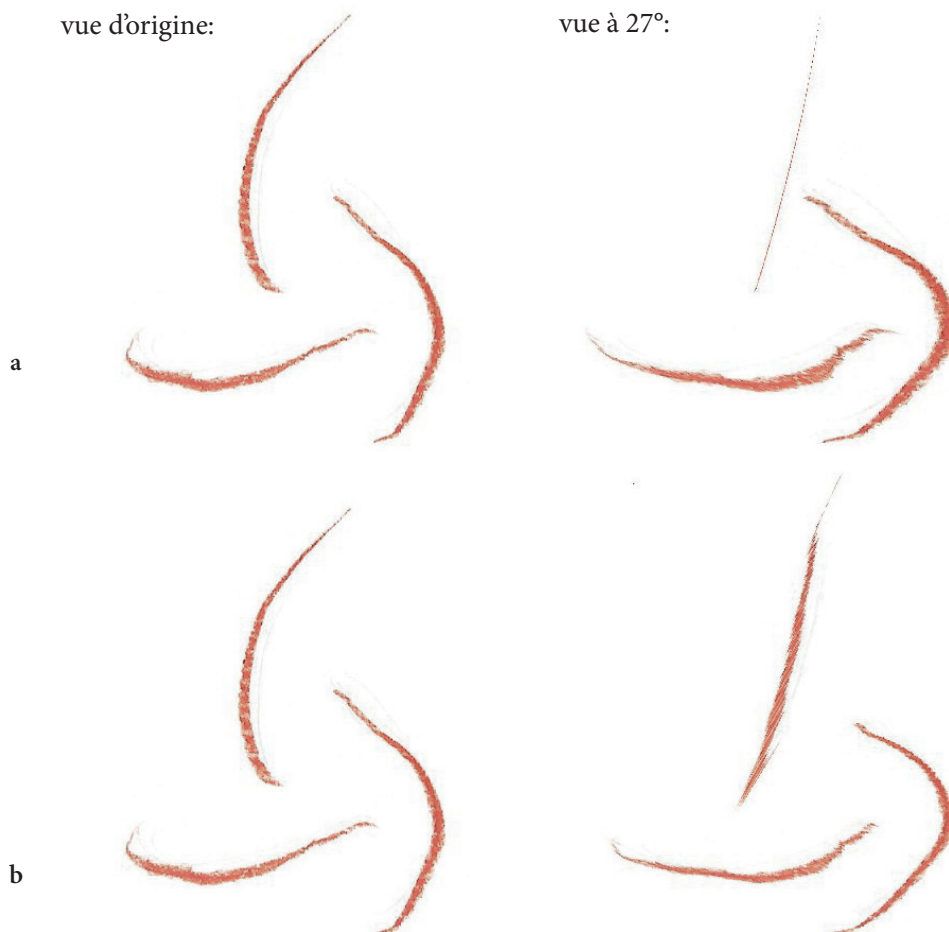


Figure 12: Confondre le trait avec son plan tangent ne suffit pas

a: application littérale de l'algorithme 2: l'épaisseur des traits varie fortement selon l'angle de vue sur le plan tangent

b: utilisation du perfectionnement 1: l'algorithme 2 sert à déplacer le «squelette» des traits, mais leur épaisseur est préservée

Nous avons donc besoin de faire *deux transformations affines* du plan de l'image pour rendre compte d'*une rotation* dans l'espace autour du trait, en supposant que ce dernier «habite» dans le plan tangent que nous avons estimé. En pratique, il faut effectuer ces deux transformations à l'envers, afin de ne pas avoir de pixels vides dans l'image d'arrivée. L'algorithme revient donc à décompresser l'image horizontalement, puis à effectuer le décentrement inverse dont je ne détaille pas le calcul, mais qui est facilité par le fait que la ligne focale est invariante.

Si plusieurs traits doivent être vus en même temps, l'algorithme de calcul des nouvelles vues s'applique individuellement à chaque trait. En effet, chacun définit un plan tangent particulier, par conséquent chacun doit subir une transformation différentes des autres. L'intérêt de ce jeu est surtout de voir comment le changement d'angle de vue sur l'ensemble permet d'apprécier les relations spatiales entre les différents traits.

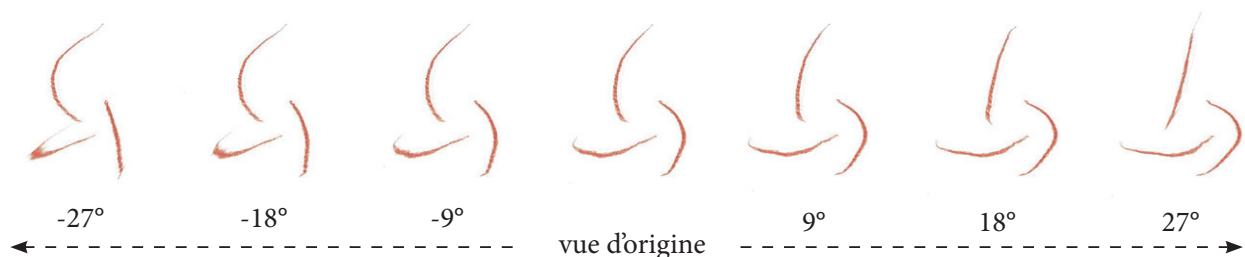


Pour le moment, cette méthode pour obtenir les nouvelles vues ne fait cependant rien de plus ce que l'on aurait pu faire avec des plans 3D munis de texture 2D, et une caméra virtuelle réglée en projection parallèle. Elle revient à considérer que les traits sont totalement aplatis sur leur plan tangent dans l'espace. Par conséquent les traits s'affinent ou s'épaississent selon que l'on voit le plan de côté ou de face, comme on peut le voir ci-dessus, d'où la nécessité d'introduire un perfectionnement.

Perfectionnement 1 : préserver l'épaisseur

Ce comportement ne correspond pas forcément à ce que l'on attend du trait. J'ai donc introduit une variante qui consiste à découper l'image du trait en bandes. Les centres de masse de chaque bande forment un squelette, dont on va s'assurer qu'il se situe dans le plan tangent. Mais au lieu d'appliquer la transformation à toute la texture du trait, on fait plutôt glisser les bandes dans le plan de l'image pour amener leur centre dans la position spécifiée.

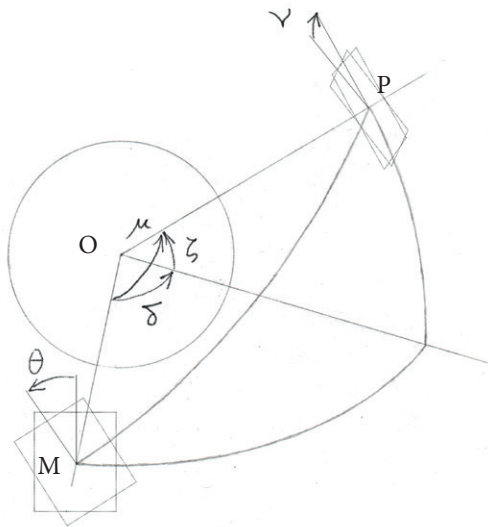
Ceci a pour effet de mieux préserver l'épaisseur, comme on le voit en comparant les deux versions (voir gros plan **figure 12**, et ci-dessous). La visualisation des images en stéréoscopie est également plus cohérente, ce que je ne peux pas montrer ici



² En pratique, il faut comme toujours calculer ce glissement de bande à partir de l'image d'arrivée en remontant vers l'image de départ, de façon à ne pas avoir de pixels vide dans l'image d'arrivée. 77

Perfectionnement 2 : angle de vue arbitraire

Un deuxième perfectionnement consiste à calculer des rotations autrement que dans le plan horizontal. Une position arbitraire sur la sphère, donnée par les angles delta et zeta, définit un nouveau plan passant par le centre et par la position initiale de l'image. En tournant alors l'image d'un angle Theta, on peut se ramener à la situation précédente d'une rotation horizontale d'angle Mu, à condition de redresser ensuite l'image d'arrivée d'un autre angle Nu.



$$\theta = \arctan(\tan(\zeta) \cdot \sqrt{1 + \tan(\delta)^2} / \tan(\delta))$$

$$\mu = \arctan(\sqrt{\tan(\delta)^2 + \tan(\zeta)^2} \cdot (1 + \tan(\delta)^2))$$

$$\nu = \arccos(\sin(\theta) \cdot \sin(\zeta) \cdot \sin(\delta) + \cos(\theta) \cdot \cos(\zeta))$$

Il devient alors possible de tourner autour des traits, de façon comparable à ce que l'on ferait avec des images de synthèse.



Discussion

La méthode d' Ecart-Soustraction, appliquée à des traits simples, semble donner une spatialisation cohérente avec une interprétation intuitive de ces traits. Cette affirmation demanderait bien entendu à être validée dans une démarche de psychologie expérimentale rigoureuse, ce qui serait d'autant plus intéressant que la spatilisation du trait peut être montrée en relief. Un partenariat avec une équipe de sciences cognitives compétente serait donc ici souhaitable.

En termes d'informatique graphique et de dessin, la question qui se pose est celle d'une extension de cette méthode à des ensembles de traits plus complexes. Plusieurs enjeux se présentent alors:

1 - Profondeur et orientation du plan tangent:

Ces deux paramètres doivent actuellement être ajustés par l'utilisateur à chaque trait. Or la profondeur d'un trait, relativement aux autres, est souvent indiquée dans un dessin par son contraste: un trait plus pâle part plus facilement vers le lointain. Cette variation constitue d'ailleurs l'un des principes de la perspective selon Léonard de Vinci (Chabrier 2021). Il serait donc possible de la prendre en compte pour ajuster la profondeur proposée.

D'autre part, dans le cas d'une série de traits proches les uns des autres, l'orientation du plan tangent peut souvent être déduite du trait précédent. Là, encore, il s'agit d'une amélioration relativement facile à intégrer.

En parallèle, il serait possible de constituer une base d'apprentissage à partir d'un ensemble de traits simples, de façon à faire apparaître, le cas échéant, certaines régularités sur la façon dont l'orientation du plan tangent est interprétée.

2 - Squelette, point d'inflexion et connection entre deux plans.

Dans le perfectionnement n°1, destiné à rendre l'épaisseur apparente du trait constante au cours d'un changement d'angle de vue, j'ai introduit l'utilisation d'un squelette. Le calcul de ce dernier est facilité par le fait que les mesures d'Ecart-Soustraction indiquent un «sens de lecture» du trait dans la plus grande longueur. Il existe cependant déjà des méthodes pour détecter un squelette sur des «traits» plus complexes, dotés de points d'inflexion. Il est alors envisageable de les utiliser de la façon suivante:

- détecter un squelette sur lequel on définit une distance d'arc (arc-length)
- détecter les points d'inflexions pour segmenter le «trait»
- déterminer les plans tangent de ces traits-composant
- calculer le déplacement de chaque «bande» du trait comme une interpolation entre les déplacements donnés par deux plans successifs. En connectant les deux plans, le trait adoptera donc une torsion.

On peut noter que la segmentation du trait au niveau des points d'inflexion a été proposée par Flash & Handzel (2007), dans une publication qui propose plus généralement d'utiliser la géométrie affine et la notion de courbure associée pour analyser les trajectoire de tracé.

3 - Groupement des traits

Il est fréquent que des traits soient groupés pour évoquer une surface ou une forme (**figure 4**). Intuitivement, leur proximité induit une interprétation spatiale différente de celle des traits isolés. comme cela serait nécessaire dans l'exemple ci-dessous:



L'image centrale est l'image d'origine. Sur l'image de gauche, on voit que la zone centrale des traits «enveloppe» un espace de façon satisfaisante. Sur l'image de droite, on voit en revanche que les extrémités des traits devraient se rapprocher plus les unes des autres, au lieu de partir en éventail.

Il est serait possible ici d'appliquer la méthode des Ecart-Soustractions à plusieurs niveaux de groupement: d'abord au niveau de chaque trait simple, puis en «fusionnant» les parties de traits les plus proches avec une dilatation-érosion. De cette façon, une interpolation entre plusieurs «influences» de profondeurs pourrait être effectuée, en sorte par exemple de mieux connecter entre elles les extrémités d'une série de hachure, tout en laissant le milieu plus libre de développer sa spatialité locale.

4 - Ramifications et multiplication

En l'état actuel, la méthode permet de créer rapidement des structures ramifiées comme dans l'exemple ci-dessous:



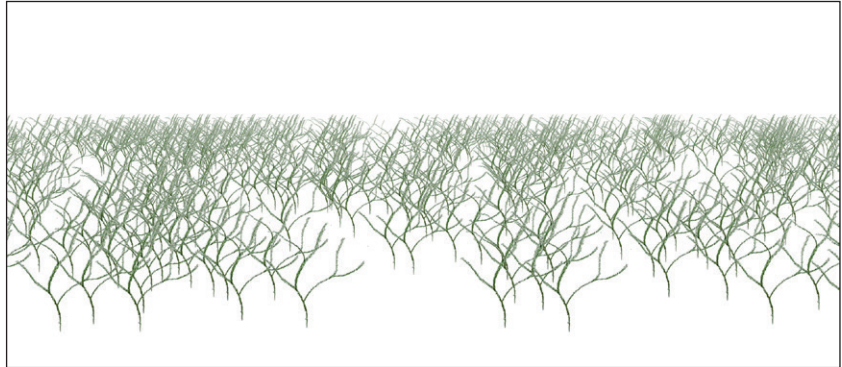
vue d'origine

Ce «petit arbre» peut être vu sous plusieurs angles, ce qui présente un intérêt pour la génération de paysages. En effet il est souvent utile, en animation scientifique comme en spectacle, de pouvoir générer une texture qui défile sous les yeux du spectateur: il peut s'agir aussi bien d'une forêt, générée à partir de quelques arbres, que de la surface extérieure d'une bactérie, générée à l'aide d'un dessin de peptidoglycan.

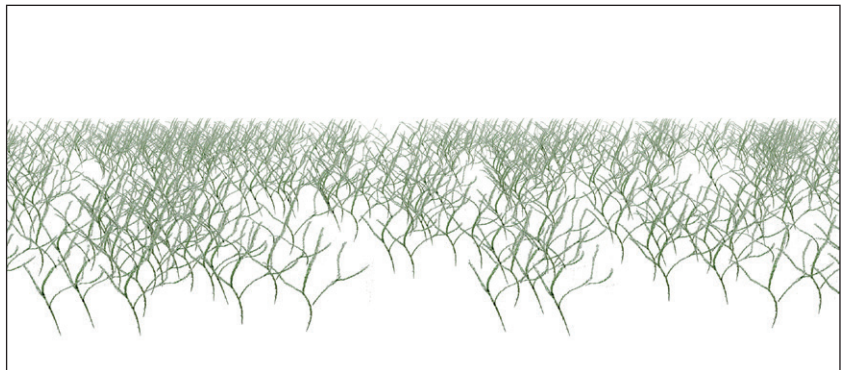
Si l'on se limite au seul «petit arbre» dessiné ci-dessus, le paysage en (a) laisse apparaître un clo-

nage évident (Remarque: ce type de paysage est normalement présenté en mouvement, d'où l'effet de perspective un peu limité ici en version imprimée). En (b), on utilise 5 angles différents et l'effet de répétition à l'identique est déjà atténué. En (c), on ajoute une autre source de variance en jouant sur la taille. L'image (d) montre le rendu usuel pour travailler avec ce type de paysage minimal, en projection ou sur écran.

(a)
Répétition d'un dessin à l'identique:



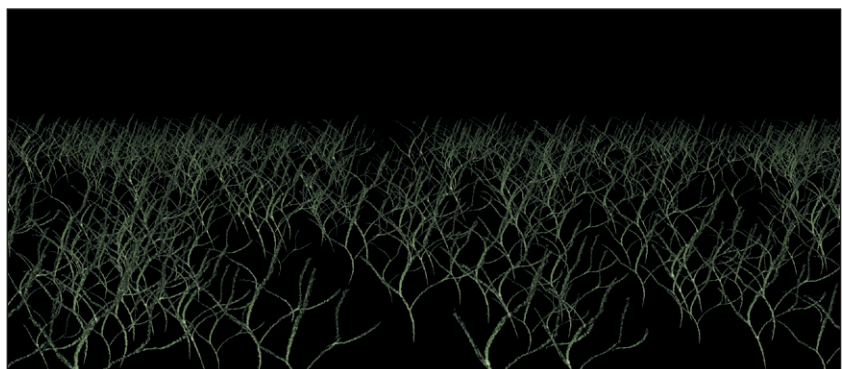
(b)
Répétition d'un dessin sous 5 angles différents:



(c)
Ajout d'une variation de taille:



(d)
Rendu sur fond noir:



Conclusion et perspectives

Pour conclure cette présentation, j'aimerais maintenant rapprocher le fait de tourner autour d'un dessin et celui de tourner autour d'un trait. Dans les deux cas, nous avons vu qu'il était possible d'évoquer l'espace à partir de la texture, en utilisant en priorité des transformations planes. En art, si l'on parvient à dégager un espace, il devient rapidement un espace de composition. Or il existe historiquement deux grands types de compositions qui structurent les relations entre l'art et la géométrie.

En premier lieu, la perspective centrale, basée sur la géométrie projective, est bien sûr la plus connue. A partir de la Renaissance, elle a connu de grand succès dans la représentation de l'architecture classique, ou plus généralement des formes anguleuses de grandes dimensions.

Cependant il est aussi possible de composer l'espace sans privilégier un « point de vue » particulier. Ce type de composition est incontournable pour la représentation des corps vivants, aussi bien en biologie qu'en art oriental, et plus généralement dans l'entraînement des artistes. Dans un chapitre récent (Chabrier 2020), j'ai proposé de parler de ce type de composition comme relevant d'une « géométrie sans point de vue », car il n'est effectivement pas possible de dire où devrait se situer idéalement le spectateur.

Si l'on s'intéresse aux relations entre les traits, le plus souvent courbes, qui permettent de dessiner le vivant, il y a donc de fortes raisons pour privilégier une géométrie « sans point de vue », quitte à chercher ensuite des couplages avec la géométrie projective.

C'est ce que j'ai tenté de faire dans cette étude. Mais il ne faut pas s'étonner si le résultat débouche aussi sur des créations plus abstraites que représentatives, car la redécouverte d'une géométrie sans point de vue a été l'un des moteurs de l'art moderne au début du XX^{ème} siècle. Le peintre Franz Kupka, qui a fait le passage du représentatif à l'abstrait sans jamais oublier l'espace, sera alors peut-être le meilleur guide pour prolonger ce travail.

Remerciements

Je remercie l'équipe Geovic à Polytechnique ainsi que l'équipe Janke à l'institut Curie pour l'accueil qu'ils ont fait à mon atelier de recherche, et je vous remercie pour votre attention.

This work received support from PSL Research University and from the grants ANR-11-LA-BX-0038 and ANR-10-IDEX-0001-02.

Bibliographie

Bourguignon D, Cani M P, Drettakix G (2001) Drawing for illustration and annotation in 3D. In Proceedings of the Eurographics conference 20:3, 114-122

Chabrier R, Piel M (2008) Inventer un mouvement, à partir de quoi ? In : Toulouse I, Danétis D

(eds), Eurêka, le moment de l'invention. Un dialogue entre art et science, coll. Arts 8, L'Harmattan, Paris

Chabrier R (2020) From sketches to morphing: new geometric views on the epistemological role of drawing. In : Flash T, Berthoz A (eds) Space-time geometries for motion and perception in the brain and the arts, Lecture notes in morphogenesis, Springer, Heidelberg (in press)

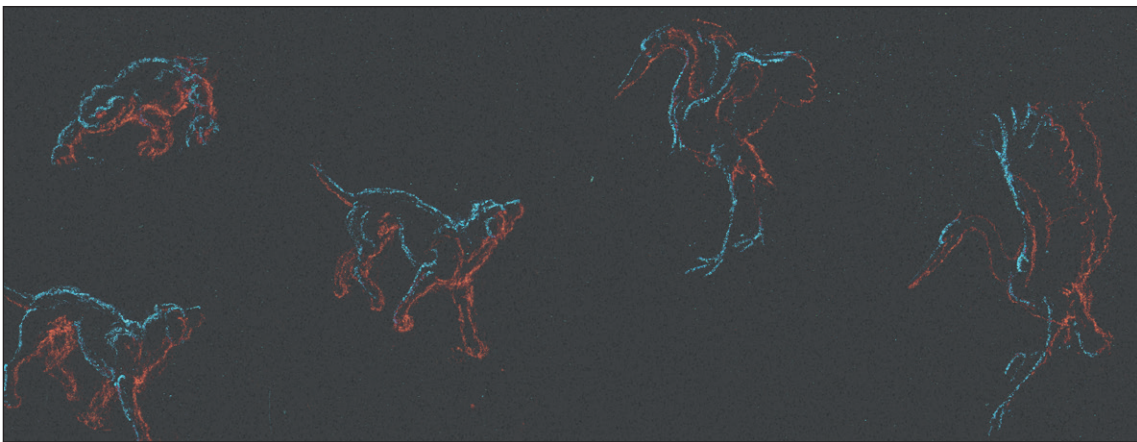
Fondevilla A, Bousseau A, Rohmer D, Hahmann S, Cani M P (2017) Patterns from Photograph: Reverse-Engineering Developable Products, Computer & Graphics 66, 4-13

Olivier P, Chabrier R, Rohmer D, de Thoisy E, Cani M P (2019) Nested Explorative Maps: A new 3D canvas for conceptual design in architecture. Computers and Graphics, Elsevier, Special Section on SMI 2019, pp.203-213.

Palombi O, Pihuit A, Cani M P (2011) 3D Modeling of branching vessels from anatomical sketches: towards a new interactive teaching of anatomy. Proc. of Surgical and Radiologic Anatomy

Chapitre 3

Le dessin
comme vecteur
de transformation



Essai de dé-coïncidence entre le dessin et l'image

Publication n°3 (en cours de préparation) :

A l'interface entre mathématiques, philosophie et neurosciences

La relation entre mathématiques et philosophie s'est beaucoup appuyée sur la géométrie. Elle a été entretenue par les philosophes grecs contemporains de la géométrie d'Euclide, puis plus tard par les philosophes des lumières dont certains, comme Pascal, avaient une connaissance poussée de l'utilisation des coniques. La nouvelle forme prise par la géométrie dans le contexte numérique semble en revanche avoir peu retenu l'attention de la philosophie. Cette situation semble sur le point de changer, l'importance prise par les représentations visuelles obligeant à s'interroger un peu plus sur leur effet, et sur la façon dont elles sont produites.

Ce texte constitue une tentative pour penser le dessin en le détachant de la notion d'«image». Il constitue un point de départ, autant qu'une direction, pour m'adresser à un public qui n'a pas de formation particulière en dessin, mais qui peut bénéficier d'un raisonnement dans lequel un minimum de géométrie et de références aux neurosciences interviennent. Il s'adresse aussi à des dessinateurs expérimentés qui peuvent avoir relevé, comme moi, certaines incohérences étranges dans les noms que nous donnons à nos outils. Le texte complet, en cours de préparation, sera présenté le 4 décembre 2020 durant le colloque «Décoïncidence, du théologique au politique» organisé par François Jullien.



Figure 1: Le trait est fondamentalement ambiguü : il peut intégrer des information de lumière, de structure spatiale, ou encore de mouvement.

A gauche: Léonard de Vinci, vers 1483

A droite, Chu Ta 17ème siècle

Le dessin comme vecteur de transformation

Consciemment ou non, le dessin est associé dans la culture occidentale à l'idée de « contour ». L'un des principaux promoteurs de cette association fut le peintre Alberti : dans son influent traité de peinture publié en 1435, il prescrit de tracer le contour des surfaces avant de les peindre. La peinture, selon lui, avait alors pour but de fixer le mieux possible l'objet dans une perspective, au point qu'il devenait possible de remplacer la vision d'une scène réelle par celle d'un tableau. Cette volonté de « coïncidence » entre le monde et la représentation, comme François Jullien propose de la nommer, connut un grand succès. Elle souleva également une quantité de question sur la relation entre l'art et l'illusion. Puis l'art moderne remit cette philosophie esthétique en question, avant que le cubisme ne la fasse voler en éclat. Plus généralement, ce qui caractérise la pensée moderne à partir de la fin du 19^{ème} siècle, est l'abandon de tout espoir d'adéquation parfaite et définitive entre le monde et sa modélisation, en art comme en sciences (Jullien, 2017). Mais dans l'imaginaire collectif, le dessin n'a pas été associé à cette révolution. Il resté confusément lié à ce vieil espoir de pouvoir « saisir » et « fixer » les choses, surtout chez les personnes qui ne le pratiquent pas ou peu. En intégrant le cinéma d'animation à la pensée du dessin, il est déjà possible de montrer que ce dernier n'est pas nécessairement « fixé sur la feuille », et qu'il peut au contraire se transformer. Cependant il faut aller plus loin, car le potentiel de transformation du dessin existe déjà avant qu'aucun processus technique ne le développe de façon évidente. Je vais proposer ici une idée de nature à dégager radicalement le concept de « dessin » de celui de « fixité ». Il s'agit de remarquer que si une image peut être considérée comme un point dans un espace de très grande dimension, alors le dessin peut être considéré un vecteur associé à cet espace, avec tout ce que cela sous-entend en terme de potentiel de transformation.

Pour en arriver à cette idée, je reviendrai d'abord sur le chemin qui m'a conduit à étudier la spatialité du trait à travers la méthode d'Ecart-Soustraction. Je discuterai ensuite de l'importance de l'opération de soustraction dans la perception du mouvement. Puis j'aborderai la perception des formes, en utilisant l'expérience du dessin pour mieux faire apparaître ce qui se joue certainement aussi dans l'expérience commune, mais de façon moins consciente. Je montrerai que la capacité des dessinateurs à faire œuvre de leur perception des formes repose sur leur capacité à choisir des écarts, qui ouvrent la possibilité du trait. Par le biais du mouvement comme par celui de la forme, nous verrons alors intervenir la géométrie affine. Dans cette géométrie, un vecteur est défini comme la soustraction entre deux points. Il suffira alors d'appliquer cette définition dans l'espace des images pour s'autoriser à penser le dessin comme un vecteur, susceptible de définir une transformation.

Considérer ainsi le dessin comme un « vecteur de transformation » plutôt que comme une « image » permet de corriger sur le fond l'erreur d'Alberti, ainsi que ses conséquences actuelles dont on verra qu'elles sont loin d'être négligeables pour la transmission scientifique. Ce court chapitre de transition ainsi fera le lien entre la réflexion générale sur la géométrie du dessin qui se conclut ici, et l'étude plus focalisée sur son rôle dans les sciences du vivant qui commencera ensuite.

L'existence du trait : une question de courbure

Dans de précédents travaux, j'ai montré que le dessin scientifique échappait le plus souvent à la fixité de la perspective centrale, et que cette « géométrie sans point de vue » était active aussi bien dans les peintures rupestres que dans les carnets de croquis moderne (Chabrier 2016, 2020-1). Ce chemin m'a conduit à m'intéresser de plus près au « trait », et à la façon dont il peut nous donner une information spatiale (Chabrier, 2017, 2020-2). Il s'agissait donc de mieux comprendre comment le trait dé-coïncide d'avec le papier, et génère la sensation d'être vu non pas « à plat », mais sous un certain angle. En termes plus philosophiques empruntés à François Jullien, cette question est celle de l'existence du trait : comment le trait « ex-iste », c'est-à-dire comment il « se tient hors » de la trame du papier.

Il est nécessaire ici de distinguer l'existence des traits « droits » de celle des traits « courbes » . Dans le premier cas, il est difficile d'évaluer la spatialité d'un trait droit unique : ce sont les angles entre différents traits, leur parallélisme ou leur convergence qui permettent d'évaluer leur configuration spatiale. Ainsi, l'esquisse d'un immeuble simple demande au moins 7 traits rectilignes, en éludant sa base. En revanche, si un trait présente une courbure perceptible, comme c'est presque toujours le cas lorsque le dessin s'intéresse à des corps vivants, il peut déjà prendre une valeur spatiale, avant d'être mis en relation avec les autres. L'esquisse peut ainsi reposer parfois sur un seul trait, ou se jouer entièrement sur deux ou trois changements de courbure , avant d'être complétée par d'autres traits qui rendront la forme plus identifiable dans le détail, mais pas nécessairement plus vivante. Pour revenir à une formulation philosophique : si les traits droits existent en relation les uns aux autres, un trait courbe existe d'abord seul, ce qui lui permet de rencontrer les autres.

Evaluer un angle de vue : la méthode d'Ecart-Soustraction

D'où vient cette existence du trait, qui semble liée à la géométrie autant qu'à la perception ? Mon hypothèse de travail, développée dans le chapitre précédent, repose sur une règle simple qui met en relation les ellipses et les cercles. Une ellipse du plan peut en effet être considérée comme un cercle de l'espace, vu de biais. Par conséquent, un « fragment d'ellipse » (similaire à un trait) peut lui aussi être interprété comme un fragment de cercle. De façon générale, une courbure vue dans le plan peut donc être reliée à une autre courbure, dans l'espace, et les objets mathématiques qui portent le mieux ce raisonnement sont les ellipses. J'en ai déduit une méthode pour évaluer, à partir d'un trait sur la papier, l'angle sous lequel il peut être vu dans l'espace.

L'analyse des courbures est loin d'être nouvelle en mathématique ; de même, les sciences cognitives se sont déjà beaucoup intéressées à la perception de l'espace. La nouveauté de ma proposition réside dans le fait que je ne considère pas d'entrée de jeu le trait comme un objet « analysable », analogue à une courbe mathématique. Pour obtenir l'information dont j'ai besoin, à savoir l'angle sous lequel ce trait est vu, je propose une méthode par « Ecart-Soustraction » : en décalant simplement la texture du trait dans une direction, je fais exister un écart avec la texture du trait originale. La soustraction entre les deux textures donne la possibilité de mesurer cette écart comme une surface. Un rapport entre deux mesures de surface, issue de deux écarts dans deux directions particulières, nous donne alors l'angle de vue recherché. Je renvoie au chapitre précédent pour plus de détails sur cette méthode et ses applications. Ici je souhaite d'abord insister sur l'intérêt théorique de l'opération d'Ecart-Soustraction, en montrant comment elle se situe à l'interface entre la géométrie et la vision.

Le rôle de la soustraction dans la perception du mouvement

La soustraction entre deux images est une notion de traitement d'image, qui se présente également comme une opération fondamentale dans la perception du mouvement. Pour en présenter l'enjeu, le plus simple est de se ramener à la « détection de mouvement » en faisant appel aux

caméras de surveillance. Imaginez une caméra qui s'ennuie face à une scène ou il ne se passe rien. Visuellement, la scène peut par ailleurs être assez complexe, montrant par exemple une rue avec des magasins, et elle peut changer progressivement, en fonction de la lumière du jour. Si une personne rentre soudain dans le champ de la caméra, sa présence pourra rester difficile à interpréter dans l'image elle-même. Cependant, il est possible de visualiser l'information différemment, en se rappelant qu'à chaque pixel d'une image correspond une valeur de luminosité (pour simplifier, nous allons considérer une image en niveaux de gris). Pour chaque pixel, on peut donc effectuer une soustraction entre sa valeur à un instant, et sa valeur à l'instant précédent. C'est ce qu'on appelle une « soustraction d'image ». Si rien ne se passe devant la caméra, le résultat de la soustraction est nul pour tous les pixels et l'image reste noire, quelle que soit la complexité de la scène. En revanche, si quelque chose change, ce changement pourra immédiatement être « extrait du fond » et détecté.

On peut remarquer que la soustraction peut donner des pixels aussi bien positifs que négatifs, et qu'un écran ne sait pas afficher une luminosité négative. C'est donc le plus souvent une « valeur absolue » qui sera affichée en blanc sur fond noir. On peut aussi décider de remplacer le noir, qui montre l'absence de changement, par un gris. Les valeurs négatives peuvent alors ressortir en noir sur gris, et les valeurs positives en blanc sur gris. L'image obtenue lorsqu'un corps se déplace montre alors une similitude frappante avec les premières étapes d'un dessin sur papier teinté, lorsque l'on dessine le côté éclairé avec une craie blanche, et l'ombre avec une pierre noire ou une sanguine. Cette similitude pose question : est-ce vraiment bien la lumière que l'on dessine, ou quelque chose qui serait de l'ordre du mouvement ? Ou encore, peut-être, les deux à la fois ? L'apparition de « traits » au cours de la soustraction montre que cette opération fournit plus d'information que la simple détection de mouvement. Cette dernière apporte la conscience que « quelque chose bouge à cet endroit ». Mais une perception plus avancée de « ce qui bouge », en termes de forme, est également ouverte.



Figure 2: «Hors du papier», dessin issu de la réalisation d'un film d'animation par soustraction, R. Chabrier, 2004

En pratique, j'ai beaucoup utilisé la soustraction en tant qu'outil d'animation : elle permet d'extraitre les dessins successifs que l'on trace sur une même feuille, de façon à en faire une séquence animée. Sur un papier teinté, là encore, le dessin qui se développe sur la feuille peut ressembler beaucoup à ce que montrerait une détection de mouvement (voir **figure 2**). Dans la vision humaine, la perception du mouvement est bien entendu plus complexe que ces opérations basiques de traitement d'image, mais le principe reste apparemment valide : une partie de notre cortex visuel est « aveugle » à ce qui ne change pas et ne fait sens que du mouvement. Il effectue donc une forme de soustraction, cette dernière étant utilisée par ailleurs dans les rétines artificielles. Il est très aventureux de prétendre s'imaginer ce que fait réellement notre cerveau lorsque nous percevons quelque chose, mais le traitement d'image nous permet de dire sans trop de risque que le mouvement des corps s'y manifeste sous une forme proche de celle du trait.

Percevoir les formes : une question d'écart.

Si la détection du mouvement par le cerveau semble reposer sur des principes relativement simples, la perception des formes reste plus difficile à appréhender. Il y a plusieurs façons d'appréhender une forme, en impliquant le mouvement de différentes manières. « Tourner autour » d'une forme, comme le font les sculpteurs, nous ramène comme nous venons de le voir à l'émergence de « traits », grâce à un écart entre différentes vues qui se succèdent. La vision binoculaire, qui implique d'évaluer l'écart entre deux « images », joue également un grand rôle dans la perception des formes. La perception du relief proprement dite est alors issue à la fois de cette différence entre les informations que reçoivent les deux yeux, et de la convergence de ces derniers. Si l'on simule grossièrement la partie « visuelle » de ce processus sur un ordinateur, en soustrayant entre elles les images de deux caméras focalisées sur le même objet, on voit alors encore une fois apparaître des « traits ».

Cependant, notre capacité à voir les formes statiques pose toujours question. Un signal constant finit en général par ne plus être détecté par nos organes sensoriels. Si une scène bouge vraiment peu, et que cette situation statique se prolonge, elle « désapparaît ». Le mouvement des yeux s'avère alors nécessaire pour entretenir la simple capacité de « voir » (Yarbus 1965). Cependant il s'agit là de saccades oculaires, au cours desquelles le regard se déplace de façon abrupte d'une zone à une autre. Cette opération permet de « redécouvrir » plusieurs fois de suite la même scène, ou le même objet, tout en laissant dans l'ombre de nombreux aspects qui se trouvent pourtant « sous les yeux » (Rensink et al. 1997, Chabrier 1999). Mais au bout de quelques cycles, quoiqu'il arrive, le regard se lasse. Comment la conscience d'une forme peut-elle être maintenue sur une plus longue durée ?

Les dessinateurs ont une pratique particulièrement poussée de cette situation, qu'ils peuvent en effet prolonger nettement plus longtemps que la moyenne. Quand ils se trouvent face à un modèle, face un paysage, ou même face à la mémoire d'une présence, ils savent en général utiliser le trait pour dessiner sans se lasser (Chabrier 2020-1, voir Annexe 3). Ils accèdent alors à un regard qu'on qualifie dans les milieux artistiques de « regard global », avec certaines raisons. En effet leur regard doit éviter de se fixer de façon rigide sur un point précis et unique, depuis lequel l'ensemble de la scène risquerait de se déliter. Leur dessin ne peut pas non plus changer d'avis au fur et à mesure que leur regard saute de place en place, sous peine de ne jamais trouver sa cohérence. Le « regard global » échappe à la localisation, unique ou multiple, mais par là même il est difficile à décrire : il s'agit typiquement d'une compétence que chacun doit trouver « pour soi », à force de travail. Cependant, pour aider les élèves, beaucoup d'enseignants en dessin insistent dans leur cours sur la nécessité de « faire un choix ». Que cela signifie-t-il ?

Au seuil d'un dessin : le choix d'un écart

Dans la culture occidentale, « faire un choix » se traduit souvent par « faire un choix de lumière ». L'ambiance lumineuse des anciens ateliers est d'ailleurs propice à cette recherche, et il faut avoir tenté de travailler dans un laboratoire moderne pour comprendre à quel point cette lumière est précieuse. Cependant les premières étapes d'un dessin intéressant ressemblent rarement à un travail d'éclairage sur un objet. Ces traits, plus simples que ce qu'un résultat « fini » laisse apparaître, pourraient aussi bien être inspirés par un léger éclairage latéral que par un léger mouvement, ou un léger relief. Le trait intègre donc une ambiguïté fondamentale (voir **figure 1**). Cette dernière est souvent masquée à première vue, dans le dessin occidental, lorsqu'un travail de hachures régulière souligne l'ombre et la lumière, et ouvre la porte à une comparaison avec la photographie. La peinture chinoise, moins obsédée par l'opposition entre lumière et ombre, ne cherche pas à camoufler l'ambiguïté du trait : c'est la raison pour laquelle elle le met bien plus en valeur. Mais dans les deux cas, le « choix » qui donne naissance au trait ne se réduit pas à un choix de lumière. C'est donc plus généralement le choix d'un écart qui ouvre la possibilité du trait.

Cet écart peut tout à fait être dû à une lumière, par exemple celle de fin d'après-midi, qui fait apparaître les formes d'une façon qui n'avait pas été vue auparavant. François Jullien a proposé une métaphore pour nommer ce phénomène en le détachant de sa dimension trop visuelle : tôt le matin, ou dans la lumière de fin d'après-midi, le monde apparaît souvent d'une façon qui n'avait pas été entendue, c'est-à-dire qui était restée « in-ouïe ». L'accès à l'inouï est donc donné par un écart, qui n'est pas obligatoirement une lumière : il peut aussi être généré par le mouvement, ou par une combinaison des deux comme souvent dans une salle de spectacle. Enfin l'écart n'est pas nécessairement offert en spectacle par les circonstances, naturelles ou artificielles, dans lesquelles un corps peut être perçu : il peut aussi être « choisi ». Là commence, tout particulièrement, le travail du dessinateur.

La méthode des Ecart-Soustractions, utilisée pour « tourner autour d'un trait », peut nous aider à comprendre comment. Elle repose en effet sur l'idée de créer un écart entre une texture et elle-même, en choisissant une direction et une amplitude de déplacement. Ceci revient à simuler un mouvement de la texture. La soustraction entre la « texture initiale » et la « texture volontairement déplacée » génère donc le même type de résultat que lors de la détection de mouvement, telle que nous avons vue plus haut : celui-ci prend l'aspect d'un ensemble de « traits » positifs et négatifs.

Cette idée de choisir une « direction de lecture » pour interpréter ce qui se trouve dans le champ visuel correspond à une sensation bien réelle en dessin : « voir » un objet en pensant simplement à des directions différentes génère des envies de trait différentes, organisées selon des plans différents. Mais toutes les directions ne se valent pas vis-à-vis d'un thème de travail donné. De même que la lumière peut faire apparaître ou au contraire écraser les formes, certains écarts donnent un meilleur accès à l'inouï de la spatialité que d'autres. Entre la lumière, le mouvement et les écarts que lui-même peut apparemment induire, le dessinateur a donc l'embarras du choix : beaucoup d'écart peuvent être envisagés, la plupart n'ont pas vocation à être choisis.

Il est tout à fait possible de tenir un dessin « au seuil » de ce choix : les peintres chinois ont su valoriser ces œuvres qui laissent sentir un potentiel en se gardant de l'accomplir, comme le montre François Jullien dans « Eloge de la fadeur » (1991). Lorsque le dessin doit s'engager plus loin, qu'elle soit rapide ou murie, la décision doit surtout être franche. L'idéal est alors de compléter le dessin « d'un seul coup ». Là encore, la peinture chinoise a excellé dans cette démarche, grâce à la capacité des peintres-lettrés à intégrer le monde avant de se lancer dans l'enchaînement des traits.

La tradition occidentale du dessin est moins radicale, et plus tâtonnante. Le dessin y a souvent deux vies, la première restant dans l'obscurité. C'est souvent dans un deuxième temps, lorsque le dessin est « fait », que le dessinateur a le sentiment d'y voir clair. Alors il peut « achever » (c'est-à-dire,

bien souvent, « tuer ») son dessin en traçant les contours. On peut noter ici à quel point Hergé, le dessinateur de Tintin, détestait le moment de l'encre : il s'agissait d'un passage nécessaire pour donner une deuxième vie au dessin sous forme imprimée, mais il n'en était pas moins violent. Intéressons-nous par conséquent au dessin avant que ne se pose la question de le « mettre au propre ».

Pour commencer, le dessinateur doit toujours faire un choix. Mais il peut rarement espérer se tenir à sa décision tout le long du dessin. S'il rentre dans un jeu de matière plus ou moins incontrôlé, comme poussent à le faire la sanguine, le fusain et les outils qui « frottent » sur le papier, il est même presque sûr de se perdre en cours de route, et de faire une partie du travail « à l'aveugle » et « dans le brouillard ». L'important est donc que son « choix » soit suffisamment clair pour qu'il sache le reconnaître, lorsque le dessin le fait apparaître à nouveau de façon lisible. Il s'opère alors une re-coïncidence momentanée avec la vision initiale. A ce moment, ajouter de nouveaux traits n'est plus nécessaire.

Le rôle de la soustraction en géométrie affine

Si la notion de « contour » pose problème, c'est qu'elle a été considérablement utilisée dans un discours qui passait sous silence l'aspect le plus vivant du dessin. Ce dernier apparaît au contraire en utilisant le concept d'« écart », proposé par François Jullien. J'ai tenté de donner sens à ce concept dans le contexte du dessin, en montrant qu'il est lié (entre autres) à la lumière, au mouvement, et enfin à des choix de direction de lecture plus difficiles à nommer, mais qui peuvent apparemment être simulés numériquement. Il est difficile de dire, à ce stade, si le concept d'écart permet de mieux s'imaginer le processus neuronal utilisé par un dessinateur lorsqu'il ou elle apprécie une forme. Mais en tout état de cause, la soustraction semble jouer un rôle important dans la génération du trait. Or il se trouve que la soustraction joue aussi un rôle fondamental dans une géométrie particulière, la géométrie affine.

La géométrie affine est mal connue aujourd'hui du grand public et même de la plupart des scientifiques, en dehors de quelques spécialités liées aux mathématiques et à l'informatique graphique. Cette géométrie repose pourtant sur des transformations que nous expérimentons tous les jours. Elle intègre les transformations de la géométrie euclidienne, qui préservent les angles et les distances, en y ajoutant d'autres transformations en « cisaillement ». La géométrie affine ne préserve donc pas les angles, mais elle préserve le parallélisme. La géométrie projective, pour sa part, intègre la géométrie affine en ajoutant d'autres transformations. Ces dernières ne conservent pas les droites parallèles et donnent naissance à des « points de fuite ».

La géométrie affine se situe donc « entre » la géométrie euclidienne et la géométrie projective. Cette remarque est importante car une erreur très courante consiste à associer la géométrie euclidienne à l'espace en 2 dimensions, et la géométrie projective à l'espace en 3 dimensions. Ceci s'explique par la façon dont on illustre le plus souvent les transformations euclidiennes et perspectives, respectivement : par la rotation d'un carré dans le plan, dans le premier cas, et par une image très « spatiale » montrant un quadrillage avec des lignes convergeant vers un point de fuite, dans le second. Or on peut définir des transformations perspectives dans le plan, et des transformations euclidiennes dans l'espace. De même, les transformations affines existent en « 2D » comme en « 3D ». On voit ici à quel point les expressions « 2D » et « 3D » sont problématiques, lorsqu'elles sont associées à tort à deux groupes de transformations, et qu'elles en font oublier un troisième.

La méthode des Ecart-Soustraction, telle que j'ai utilisée dans le chapitre précédent pour « tourner autour d'un trait », se situe dans le cadre de la géométrie affine : elle utilise des transformations affines de l'espace (projection parallèle), des transformations affines du plan (« glissement horizontal » dû au décentrement), et enfin des transformations euclidiennes du plan (rotation). Les ellipses, sur lesquelles je construis mon raisonnement, jouent un rôle particulièrement important dans cette

géométrie. Avec les autres « coniques » paraboles et hyperboles, ce sont les objets « invariant » vis-à-vis des transformations affines : la transformation d'une conique donne une autre conique. Enfin, l'idée de mesurer des aires s'inscrit également dans ce cadre : « In the plane, affine geometry is the « geometry of area » just as Euclidian geometry is the geometry of distance » (Calabi et al., 1996).

Mon usage de la géométrie affine se limite à des manipulations très simples qui nous apprend cependant quelque chose sur le trait. Dans les lignes qui précèdent, j'ai montré que la soustraction entre deux images légèrement « écartées » faisait apparaître des « traits ». Je maintiens ces derniers guillemets pour ne pas confondre les « traits » ainsi obtenus avec les traits sur le papier, mais il me semble plausible qu'un dessin réel puisse être lié à un processus d'écart et de soustractions plus ou moins complexe, effectué par le cerveau.

Pour étudier la génération de tracés par une main humaine, Tamar Flash et Amir Handzel sont allés beaucoup plus loin en utilisant la géométrie affine différentielle (Flash & Handzel, 2007). Ils ont pu montrer que les trajectoires de tracé adoptaient une « courbure affine » constante, qui leur faisait prendre la forme d'une parabole. Étudié de deux façons très différentes, dans un cadre lié à l'animation et dans un cadre lié aux neurosciences et à la robotique, le trait semble donc nous ramener avec insistance à la géométrie affine.

Dans ces conditions, il peut être intéressant de lire au moins les premières lignes qui servent à définir cette géométrie. On apprend tout d'abord qu'un espace affine se constitue à partir d'un ensemble de points, qui forment un espace d'une certaine dimension. On muni alors cet ensemble d'une opération de soustraction. À partir de deux points A et B, la soustraction B-A définit alors un « vecteur » v . Les objets à partir desquels travaille la géométrie affine ne sont alors pas des points, mais des « éléments affines » qui rassemblent un point et un vecteur dans un couple (A, v) .

Le sens du travail de Tamar Flash sur les tracés apparaît alors plus clairement. Il s'agit, une nouvelle fois, d'une différence de fond entre l'univers des droites et l'univers des courbes. Le fait de considérer des couples de points et de vecteurs, plutôt que des points isolés, change la notion même de « départ » et d'« arrivée ». Au lieu de considérer le tracé comme le plus court chemin d'un point à un autre, ce qui générerait des segments de droite, Tamar Flash montre alors que les tracés spontanément adoptés par les humains maximisent la « distance affine » d'un élément affine à un autre, ce qui génère dans le cas général une parabole.

La notion de vecteur, obtenue par soustraction entre deux points, est fondamentale en géométrie affine. Si par ailleurs la géométrie affine est liée au trait et par conséquent au dessin, existe-t-il un moyen de rapprocher plus directement les notions de « vecteur » et de « dessin » ? Les opérations numériques sur les images vont ici nous servir comme un relais de raisonnement, sur un sujet qui touche aussi bien les mathématiques et la perception.

Nous avons vu que dans les espaces affines, les vecteurs étaient obtenus par une soustraction entre deux points. On peut alors remarquer qu'une image numérique peut facilement être vue comme un point dans un espace de grande dimension : une image en couleurs rouge-vert-bleu de 1200 par 1600 pixels est ainsi représentée par un point dans un espace de dimension $3 \times 1200 \times 1600$. Dans ces conditions, on peut donc légitimement dire la soustraction entre deux images constitue un vecteur, dans un espace de grande dimension lui aussi. Mais nous avons vu que la soustraction de deux images légèrement « écartées » (par la lumière, le mouvement d'un corps, le choix d'un décalage...) fait apparaître des « traits », très similaires à un dessin. Ceci ouvre la porte à une idée aussi inattendue qu'évidente : et si le dessin était fondamentalement « vectoriel » ?

Le dessin en tant que vecteur de transformation

La notion de vecteur mène directement à celle de transformation : dans le cas le plus simple, celui d'un plan en deux dimensions, la transformation définie par un vecteur consiste juste en un déplacement. En associant la notion d'« image » à celle de point et la notion de « dessin » à celle de vecteur, il devient donc possible de nommer une fonction du dessin qui se trouve être aussi fondamentale que mal comprise : celle d'évoquer une forme en indiquant comment elle peut se transformer.

En étudiant le morphing entre deux dessins au début des années 2000, j'ai été frappé par le fait que certains traits pouvaient rentrer en contradiction avec la transformation que j'étais en train de mettre en place. L'incohérence d'une joue trop appuyée, ou de hachures mal orientées, devenait manifeste dans le mouvement. Si l'on considère les traits comme autant de vecteurs, et le dessin comme la combinaison de l'ensemble (une somme de vecteurs donne toujours un vecteur), ce phénomène devient tout à fait logique. De même, le morphing montre une sensibilité surprenante à la façon dont les traits sont transformés. Il y a parfois très peu de différence entre un morphing qui donnera une sensation de « déformation », et un morphing qui donnera une sensation de « rotation dans l'espace ». Ceci s'explique assez facilement si la perception de la déformation d'ensemble repose sur une cohérence plus locale entre la spatialité des traits et la façon dont ils se trouvent transformés.

Les travaux sur le morphing m'ont certainement sensibilisé à la géométrie affine, telle qu'elle est employée naturellement par notre cerveau, puisque c'est l'année suivante que j'ai entrepris d'utiliser la soustraction comme outil d'animation. Ignorant totalement les bases de la géométrie moderne, en dépit de mes études pourtant chargées en mathématique, je ne savais alors pas comment mettre en valeur l'usage de la soustraction. A tel point que je n'ai pas su nommer, ni par conséquent diffuser le premier court métrage produit par ce biais (référence de film [5]). « Hors du papier », mon intuition initiale, semble pourtant bien aujourd'hui le nom de ce film, puisque c'est l'ex-istence du dessin (« se tenir hors ») qui s'y manifeste de façon nouvelle.

Même si je ne peux le formuler correctement qu'aujourd'hui, mon travail repose donc depuis longtemps sur les transformations portées par le dessin, d'une façon qui utilise la géométrie affine de façon assez évidente. Ceci ne concerne cependant que l'expérience d'une personne. Est-il possible de faire apparaître l'aspect « vectoriel » du dessin au-delà de cette pratique particulière ?

Le malentendu du « dessin vectoriel »

Tenter d'étendre le concept de vecteur dans le domaine du dessin paraîtra peut-être naturel, compte tenu de mon argumentation, à certaines personnes. D'autres remarqueront avec raison que le concept est déjà pris. Il faut en effet tenir compte ici d'un outil de création d'image étroitement associé à l'univers de la « 2D », et qui a pour nom « dessin vectoriel ».

Le « dessin vectoriel » consiste à utiliser des formes géométriques simples (cercles, ellipses, carrés, rectangles, etc.) ou plus complexes (courbes de Béziérs) pour créer des illustrations. Chaque forme, à l'origine, est purement abstraite : elle peut cependant être visualisée en déterminant un contour, d'une certaine épaisseur et d'une certaine couleur, et un remplissage, d'une certaine couleur. Dans les années 1990, le « dessin vectoriel » a connu un succès croissant malgré ces moyens somme toute très limités. Il a ainsi contribué à l'informatisation de toute une discipline, l'architecture, en donnant la possibilité de dessiner les plans sur écran. Il a aussi fortement influencé la pensée des managers, la quasi-totalité des boîtes et des flèches utilisées dans les présentations étant désormais réalisée en « dessin vectoriel ».

La raison la plus souvent invoquée pour expliquer le succès du « dessin vectoriel » est liée au problème de la pixellisation. Si on agrandit une photo numérique, ses pixels apparaissent sous la

forme de grands carrés. Le « dessin vectoriel », à l'inverse, permet d'adapter la résolution du dessin à n'importe quelle échelle. En effet, la forme de l'illustration est définie par une équation continue, et le rendu peut donc être calculé en fonction de la résolution demandée par la taille de l'illustration sur le support de diffusion, qu'il s'agisse d'un écran ou d'une affiche imprimée. Le dessin vectoriel apparaît donc toujours « parfaitement lisse ».

Cet outil a été généralisé sans aucune précaution, créant un problème épistémologique qui me semble avoir été négligé. Le fait de pouvoir accompagner une idée confuse par une illustration parfaitement nette a manifestement désorganisé le travail de design dans de nombreuses filières. Dans les faits, une grande partie des usagers du « dessin vectoriel » ne sont pas concernés par ses possibilités en terme de gestion des résolutions. Il s'agit simplement pour eux de la solution la plus simple pour générer une image « propre », et par là même, acceptable dans une présentation. Cet usage nie par conséquent la notion même de « dessin », puisqu'il se focalise exclusivement et sans précaution sur ce qui est le plus susceptible de tuer ce dernier : le tracé d'un contour d'épaisseur constante.

Le « dessin vectoriel » est mieux utilisé lorsque des questions de résolution se posent réellement, soit qu'il s'agisse de traiter un dessin pour un type d'impression particulier, soit qu'une animation demande un fort changement d'échelle, comme c'est souvent le cas dans les animations de cartes. Les années 2000 ont vu apparaître de nouveaux usages : il est devenu possible de « vectoriser » un dessin en respectant mieux la dynamique de son trait, tandis que la visualisation de données s'est largement fondée sur la génération automatique de tracés « vectoriels ». Dans les interfaces graphiques des logiciels d'animation, les objets graphiques tels que les courbes de Béziérs sont par ailleurs indispensables. S'il n'y a aucune raison de renier ces applications, on peut en revanche mettre en doute la pertinence du qualificatif « vectoriel ». Pourquoi employer ce mot, qui a un sens précis, pour dire que des illustrations sont « multi-échelle » ? Il existe en fait un qualificatif vraiment ajusté à la nature des objets graphiques qui sont mise en œuvre : il s'agit de formes « paramétriques ». Leur efficacité vient du fait qu'elles ne sont pas définies par une texture, mais par un ensemble beaucoup plus réduit de paramètres, grâce auquel le rendu de la forme peut être facilement recalculé en fonction des besoins.

Puisqu'un examen des usages du « dessin vectoriel » révèle que les mots « dessin » ou « vectoriel » y sont inappropriés, il serait souhaitable de proposer une autre expression. « Illustration paramétrique » me semble correspondre beaucoup mieux à cet outil : le mot « illustration », au sens de « donner du lustre », correspond tout à fait à l'usage réel qui est fait du « dessin vectoriel » dans le secteur du marketing, aussi bien que dans beaucoup de présentations scientifiques. Simultanément, le mot « illustration » a une histoire suffisamment riche pour résister à ce rapprochement gênant mais nécessaire, et il peut alors renvoyer à des usages plus constructifs. Le mot « paramétrique », pour sa part, nomme exactement le type de forme que cet outil permet de manipuler : si tout un chacun peut les utiliser, c'est parce qu'elles ne dépendent que de quelques paramètres ajustables avec une souris. Si elles offrent aussi de vraie possibilité en affichage multi-échelle et en visualisation de données, c'est encore une fois grâce à leur nature paramétrique.

La notion de « dessin vectoriel » est donc fondée sur un malentendu. Ce qu'on appelle « dessin vectoriel » serait bien mieux nommé « illustration paramétrique ». Si le mot « illustration » ne convient pas à certaines application, l'idée peut se décliner en « graphisme paramétrique » ou « formes (2D ou 3D) paramétriques ». Dans tous les cas, le champ sémantique peut se libérer pour reconnaître le caractère « vectoriel » du dessin. Mais l'expression de « dessin vectoriel » n'en est pas sauvée pour autant. Elle apparaît surtout comme une tautologie, dans la mesure où le dessin semble bien être fondamentalement vectoriel.

Il reste toutefois une interrogation sur l'origine de cette expression. Comment les ingénieurs informatiques qui ont développés les outils de graphisme paramétrique en sont-ils arrivés à les qua-

lifier de « vectoriel » ? S'agit-il d'une intuition du lien entre le dessin et les transformations ? Il faut se ramener ici dans les années 50. Les premiers dessins vectoriels (« vector graphics » en anglais) n'étaient pas destinés à se présenter sous forme d'image fixe : il s'agissait de formes servant à visualiser les avions détectés par un radar. Sur l'écran circulaire, de telles formes ne sont jamais fixes : elles sont déplacées à chaque balayage, et entre chaque balayage un doute subsiste sur la position de l'avion. A l'origine, on peut donc voir une raison pour laquelle ces formes ont pu être associées à l'idée de « vecteur » : elles ne portaient pas ou peu d'information sur la forme réelle de l'objet, mais sur son déplacement d'un écho à l'autre. Cette raison a ensuite disparu lorsque l'outil a quitté le domaine du mouvement et de l'indétermination, pour se mettre à servir un idéal de netteté parfaite.

Conclusion

En montrant l'existence d'une « géométrie sans point de vue » et en essayant d'en tirer les conséquences pour comprendre la spatialité du trait, j'en suis arrivé dans cette partie à relever le rôle de la géométrie affine dans le dessin. Ce chemin nous amène penser le « dessin » d'une façon bien distincte de l'« image » : si l'image peut être considérée comme un point, alors le dessin peut être considéré comme un vecteur. Cette réflexion demande à être développée en se nourrissant comme nous l'avons vu d'une forte connection avec les mathématiques et les neurosciences.

Pour conclure cette partie, j'insisterai surtout sur l'importance d'un tel changement, au sein même de la pratique du dessin. Avant de chercher à faire le moindre calcul, et surtout avant de penser au cerveau, ce qui est en général une très mauvaise idée lorsque l'on dessine, la première question qui se pose est la suivante : est-ce que cette façon de penser m'aide à dessiner ? Il faut certainement une formation mathématique un peu avancée pour parvenir à voir le dessin comme un « vecteur dans un espace de très grande dimension », et en tirer parti. Mais l'expression « vecteur de transformation » que je propose semble avoir une valeur opérationnelle plus intéressante et plus accessible. L'idée que le trait ne cerne pas une forme, mais indique une transformation possible, semble particulièrement fertile. Il ne s'agit jamais de grandes transformations, seulement d'« écarts ». Pour le dessinateur, ces écarts ouvrent la possibilité du trait. Ensuite, ces traits génèrent eux-mêmes des écarts dans le regard de celui ou celle qui apprécie le dessin. A ses yeux, le dessin peut alors exister et « prendre vie ».

Il reste tout à fait possible, et ceci n'est pas contradictoire, d'utiliser le dessin pour contrôler ou interdire certaines transformations. Un trait dynamique, qui s'affine au début et à la fin, ne constitue pas un vecteur du même ordre qu'un trait de contour d'épaisseur plus constante, qui va induire dans toutes les directions une certaine limite quant à la variation possible du corps dessiné. Les deux types de traits sont légitimes en dessin scientifique, car ils correspondent à des besoins différents. S'adresser à un public élargi ou établir le type d'une nouvelle espèce ne constituent pas le même enjeu. Dans la partie qui va commencer, je vais retracer des rencontres entre dessin et sciences qui s'étalent sur plusieurs siècles et qui n'ont par conséquent pas les mêmes motivations. Ce qu'elles ont en commun, c'est avant tout l'enjeu d'accéder à un « inouï ».

Seconde partie:
L'INOÛ DU VIVANT



a



b

Figure 4: Durant la renaissance, les artistes ont développé des géométries «avec» et «sans» point de vue.

Les études de corps vivants s'accordent bien avec l'absence de point de vue, tandis l'architecture classique se prête à la perspective centrale. Plus tard, l'absence de point de vue sera largement utilisée dans le dessin scientifique.

a: Leonardo da Vinci, étude de chat, vers 1513

b: Attribué à Piero della Francesca, 1480

Introduction de la deuxième partie

Nous allons maintenant pouvoir examiner, à travers une série de cas d'étude, comment le dessin rencontre les sciences du vivant. Ces dernières ont une histoire de plusieurs siècles, et les enjeux de représentation ne sont pas les mêmes lorsque l'on évoque les débuts de l'anatomie comparée ou la synthèse des protéines. J'ai donc choisi de présenter les productions qui vont suivre dans l'ordre chronologique des thèmes scientifiques qu'elles abordent. Le dessin anatomique et le langage seront au centre des prochains chapitres, tandis que les suivants feront apparaître des enjeux beaucoup plus récents, liés à la synthèse d'image « 3D » et au graphisme « 2D ».

De Léonard de Vinci à la biologie moléculaire, nous serons aidés dans ce voyage par plusieurs concepts. Je vais d'abord revenir sur la « géométrie sans point de vue », et j'introduirai ensuite l'« inoui », proposé par François Jullien.

1 – La géométrie sans point de vue

Le dessin offre un accès privilégié à une représentation de l'espace dégagée de la notion de « point de vue » (**figure 1**, voir aussi Annexe 1, page 230). Ces possibilités de composition « sans point de vue » s'accordent remarquablement bien avec l'imagination scientifique, en image fixe autant qu'en image animée. Elles s'accordent également avec un autre niveau d'indétermination, qui se joue non pas sur la perspective mais sur la texture des traits. Sur des exemples récents, nous allons maintenant pouvoir constater comment cette logique peut être mise en œuvre dans la transmission des sciences du vivant, aussi bien à destination du grand public qu'entre chercheurs.

L'absence de point de vue peut être développée sous la forme d'un concept plus abouti, celui d'une « géométrie sans point de vue » compatible avec les concepts mathématiques modernes, ainsi qu'avec les préoccupations actuelles en neurosciences (voir Chapitre 1). Dans la première partie, cette avancée m'a encouragé à mettre de côté les enjeux habituels de représentation tels qu'ils se posent dans le dessin scientifique, afin d'aller plus loin dans l'intimité du dessin en précisant le concept de « trait ». La capacité du dessin à rendre compte de la spatialité du vivant dépend en effet d'une capacité plus abstraite, celle qui permet au trait d'évoquer l'espace.

Cependant, le concept de « trait » ne peut être abordé de façon frontale : réduire le trait à l'état d'objet graphique a pour effet de l'« aplatir ». Cette opération conceptuelle déstabilise, fausse ou

annule la spatialité du trait. Lorsque nous aborderons l'évolution récente des représentations en biologie cellulaire, nous verrons que des schématisations excessives (autrement dit : un usage mal maîtrisé du dessin « vectoriel » 2D) peuvent effectivement perturber toute la chaîne de transmission d'information scientifique en sciences du vivant. Nous verrons également que l'efficacité de la « géométrie sans point de vue » peut être gênée ou même anéantie par les méthodes standards de composition graphique utilisées aujourd'hui, lorsque les logiciels conduisent trop facilement à enfermer les dessins dans des « boîtes ».

Le fait de dessiner « à la main, sur papier », loin d'être une volonté passéiste, repose donc simplement sur le souci de disposer d'un outil de représentation fiable pour représenter l'espace, ce que le numérique ne permet pas toujours. Pour aborder le trait sans dénaturer sa spatialité, il apparaît donc nécessaire de formuler une question qui ne fait pas disparaître la matérialité de l'enjeu : « Comment un trait à la surface d'une feuille de papier peut-il transmettre une information spatiale ? ». J'ai emprunté deux biais, autrement dit deux approches pour étudier cette question fondamentale, posée depuis longtemps par l'existence du dessin. La première approche a pris la forme d'un algorithme (voir Chapitre 2), la seconde celle de textes écrits à l'invitation de François Jullien (voir Annexe 2 et 3).

Dans le premier cas, la simple volonté de chercher une méthode de calcul pour « tourner autour d'un trait » a débouché sur le constat inattendu d'une forte relation entre le dessin et la géométrie affine (voir Chapitre 3). Pourquoi ce domaine mathématique ne semblait-il pas devoir intervenir, à première vue, dans cette thèse ? Parce que les transformations de la géométrie affine ne conservent pas les distances, contrairement aux transformations euclidiennes comme la translation ou la rotation. Or le respect des proportions constitue l'une des sources de l'efficacité du dessin scientifique. Plus que cela : le respect des proportions induit une éthique de documentation, et détermine en grande part la durabilité des créations. L'intervention probable de la géométrie affine dans le dessin des formes vivantes (c'est-à-dire, dans leur perception autant que dans leur représentation) ne signifie donc pas que les mesures de distances auxquelles nous sommes habitués dans le cadre de la géométrie euclidienne deviennent invalides ou secondaires. Au contraire, ceci laisse plutôt entendre que l'appréciation de distances tridimensionnelles à travers la représentation graphique « plane » de corps vivants repose sur des compétences complexes et largement inconscientes, faisant vraisemblablement intervenir des « mappings » entre différentes surfaces corticales. Dès lors, il n'y a pas lieu d'être surpris si ces compétences demandent un entraînement particulier, qui demanderait à être réactivé dans les formations d'ingénieurs, de médecins et de scientifiques.

Pour aborder le trait, il est également possible d'utiliser une démarche plus philosophique. Si la pensée chinoise affleurerait régulièrement au cours de la première partie de ce mémoire, sans jamais devenir un sujet principal, j'ai mis en annexe un texte dont l'objectif assumé était cette fois un véritable parallèle entre la peinture chinoise et le dessin scientifique. Dans « La pensée du trait », publié en 2017 dans Art Press (voir Annexe 2), je montre que des propos comme ceux du peintre et lettré chinois Guo Xi permettent de mieux saisir l'attitude du dessinateur scientifique, lorsqu'il s'attache à ne pas réduire son dessin à celui d'un individu particulier. De même que Guo Xi peignait dans le même mouvement « cette montagne, ainsi que beaucoup d'autres montagnes », il est possible aujourd'hui de dessiner « cette cellule, ainsi que beaucoup d'autres cellules ». Dans les pages qui suivent, j'avancerai plus loin en cherchant la notion de « paysage » dans les réalisations que je vais

présenter. Cette notion est connue pour son importance dans la peinture chinoise, sous une forme parfaitement cohérente avec la notion de « géométrie sans point de vue ». Elle pourrait aujourd’hui guider le développement de nouvelles approches techniques et artistiques, en garantissant une certaine efficacité pour la transmission scientifique vis-à-vis du grand public

2 – L’inouï

Le texte « L’inouï à portée de crayon », publié en 2020 aux Presses Universitaires de France (voir Annexe 3), m’a ensuite permis de lier le dessin avec le concept d’ « Inouï », tel que François Jullien l’a récemment développé (Jullien 2019). Dans cette acceptation, l’ Inouï correspond à un rapport au réel qui s’extraît de l’ennui, sans faire basculer l’attention dans un « au-delà » du réel. François Jullien en parle comme d’un « débordement qui n’est pas un dépassement ». Le dessin constitue un outil privilégié pour sentir l’importance de l’Inouï: il permet en effet d’entretenir l’attention sur un phénomène qui se trouve sous nos yeux, sans la saturer, ni la détourner vers autre chose. Dessiner des plantes au printemps, comme le raconte Viollet-leDuc (1873) dans son traité de dessin en forme de conte initiatique, ou faire des croquis dans de passants dans la rue constituent ainsi deux façon d’y accéder (**Figure 2a et 2b** extraites des Annexes 3 et 2). La recherche scientifique est tout autant liée à l’ Inouï : une série d’images de microscopie, parfaitement ennuyeuse pour la plupart des gens, peut au contraire « parler » au chercheur qui les a produites. Il ne s’agit pas ici d’une « découverte », qui est un phénomène beaucoup plus rare, mais d’un accès intime à la réalité, dont on peut même dire qu’il rend ce métier vivable.

Le concept d’Inouï est donc particulièrement efficace pour penser les représentations utilisées dans les sciences du vivant, puisqu’il se trouve du côté du dessin aussi bien que des sciences, et sous une forme très concrète : comment éviter l’ennui généré par des schémas trop simple ? Comment à l’inverse ne pas se laisser submerger par les données visuelles trop riches issues de la photographie et de la microscopie ? Et enfin, comment ne pas se perdre dans l’au-delà « ultra-réaliste » des images de synthèse et de la réalité virtuelle, quand cette déconnection d’avec la réalité première n’est pas



Figure 2: deux façons de ne pas se lasser
a: Bourgeons de Fougère par Viollet-le-Duc, 1873
b: Croquis de rue, R. Chabrier, 2017

souhaitable ? La recherche de cet équilibre traverse toutes les réalisations qui vont suivre. A vrai dire, elle est si fondamentale dans ce domaine que l'Inouï permet de formuler l'efficacité du dessin vis-à-vis des sciences du vivant en une ligne :

Le dessin permet de donner accès à l'inouï du vivant, à travers des représentations fiables.

J'utilise ici le mot « fiable » pour désigner le fait que le dessin garde une certaine honnêteté par rapport à la façon dont il est produit : il n'est pas nécessaire d'être versé dans le détail des outils infographiques pour savoir qu'il s'agit d'une réalisation humaine, à prendre comme telle. L'enjeu d'une rencontre entre le dessin et les sciences, celles qui s'intéressent au vivant tout particulièrement, est considérablement plus lisible si on le formule de cette manière. A partir de cette proposition, toutes les notions que je viens d'aborder (la géométrie sans point de vue, la spatialité du trait, la texture issue du papier, l'éthique des proportions...) se déclinent comme autant de ressources opérationnelles pour travailler dans ce simple but : donner accès à un inouï.

Une des difficultés majeures du dessin scientifique actuel apparaît alors avec d'autant plus de contraste : à quel inouï faut-il donner accès ? Depuis l'époque de Darwin, Pasteur et Koch, les études et les découvertes se sont multipliées d'une façon réellement vertigineuse. Chez les biologistes, la richesse et la complexité des phénomènes a engendré un éclatement de spécialités et de sous-spécialités, toutes plus intéressantes les unes que les autres, mais extrêmement difficiles à embrasser de façon générale. Si bien qu'une commande de dessin, en science du vivant, répond avant tout aux intérêts d'un secteur scientifique très étroit : le fait qu'une réalisation soit utilisable dans un autre contexte que la commande initiale, ou que plusieurs réalisations soient liées les unes aux autres, dépend uniquement de l'investissement personnel du dessinateur.

Cette situation pose un véritable problème éthique au dessinateur/designer : à quoi bon assurer l'accessibilité d'un inouï, si le public auquel il faut s'adresser est constitué de spécialistes déjà initiés ? Dans ce cas, des symboles graphiques semblent souvent suffire. Cependant, la caricature d'une science décomposée en une multitude de « silos » ne suffit pas à rendre compte de la réalité du terrain. En pratique, une multitude d'occasions (poster, article de review, conférences...) se présentent aux chercheurs pour s'adresser à des « spécialistes d'une spécialité légèrement différente ». Autrement dit, il existe un écart entre les inouïs qui leur sont familiers, et il est possible de s'appuyer sur l'un pour rendre l'autre accessible : concrètement, il peut s'agir de représenter deux échelles différentes en faisant sentir la transition de l'une à l'autre, ou de mettre en scène deux types d'organelles de la cellule en respectant leurs proportions respectives. Dans mon expérience, à chaque fois que le dessin s'attache ainsi à faire dialoguer deux inouïs à travers leur écart, il parvient à mettre en place du « commun ». En d'autres termes, le même dessin peut être utilisé pour s'adresser à un public nettement plus large que celui qui était prévu au départ.

3 – Principe et organisation de la seconde partie

Je vais donc organiser cette seconde partie en m'appuyant sur plusieurs « aventures de réalisation », dont l'intention initiale était le plus souvent de donner accès à un inouï lié à une discipline, mais qui en fait revenaient chaque fois à faire jouer l'écart entre plusieurs inouïs. Toutes ces réalisations correspondent à un effort pour concevoir les projets en assumant cette portée plus large que l'intérêt immédiat des commanditaires : soit que les réalisations puissent être utilisées aussi pour

une ouverture vers le grand public ; soit qu'elles constituent une base de dialogue et de réflexion, et pas seulement un outil d'illustration subalterne ; soit enfin qu'elles puissent tout simplement jouer correctement leur rôle pendant plusieurs années, sous réserve d'ajustements mineurs.

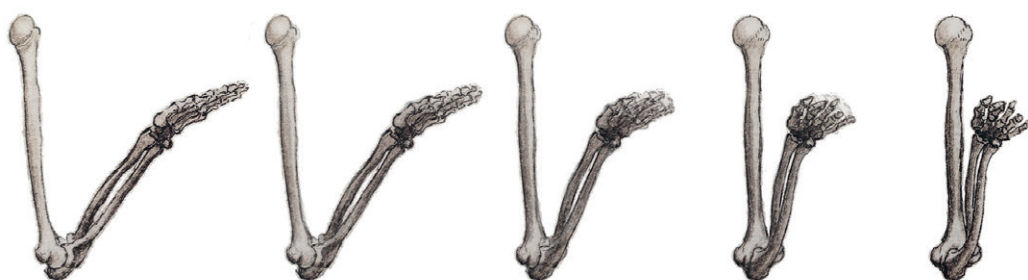
Presque toutes ces expériences correspondent à des publications ou à des créations effectivement diffusées entre 2017 et 2020 : dans le cas d'articles, je présenterai directement le texte publié après une brève introduction, dans d'autres cas je présenterai les images en les associant avec un texte plus développé. Bien que ces travaux n'embrassent pas, très loin de là, l'ensemble des sciences du vivant, il est possible de les présenter dans un ordre qui retrace une certaine histoire des relations entre dessin et sciences.

Je commencerai donc par une étude liée aux dessins anatomiques de Léonard de Vinci. Puis j'aborderai les enjeux posés par la biologie cellulaire naissante à travers un dialogue de théâtre optique écrit pour l'exposition « Pasteur » à la cité des Sciences. Après quoi j'aborderai les sciences de l'immunité et du mouvement des cellules, à travers la réalisation d'un livre expérimental pour tout public. Un quatrième texte abordera la biologie moléculaire à travers les enjeux de représentation liés à une molécule du cytosquelette, la tubuline. Enfin, le dernier chapitre abordera la biologie cellulaire moderne et présentera une nouvelle répartition des rôles entre « images de synthèse », « visualisation de données » et « dessin ».

A partir du deuxième chapitre, l'introduction historique prendra de plus en plus d'importance : les dessins et les images qui peuvent être produits aujourd'hui en biologie cellulaire et moléculaire gagnent à être reliés à la façon dont ce domaine s'est constituée. N'étant pas historien de profession, je ne citerai dans l'ensemble que des faits relativement faciles à documenter. Je m'appuierai tout particulièrement sur les travaux de Michel Morange (1993) pour l'histoire de la biologie moléculaire.

Chapitre 4

Vinci et le dessin anatomique: un retour aux sources



Chapitre basé sur une publication
dans les actes du colloque international :

« Léonard de Vinci, Anatomiste. Pionnier de l'anatomie comparée, de la bioméca-
nique, de la bionique et de la physiognomonie »

11-12 octobre 2019, Amboise

Dessin de Leonard de Vinci

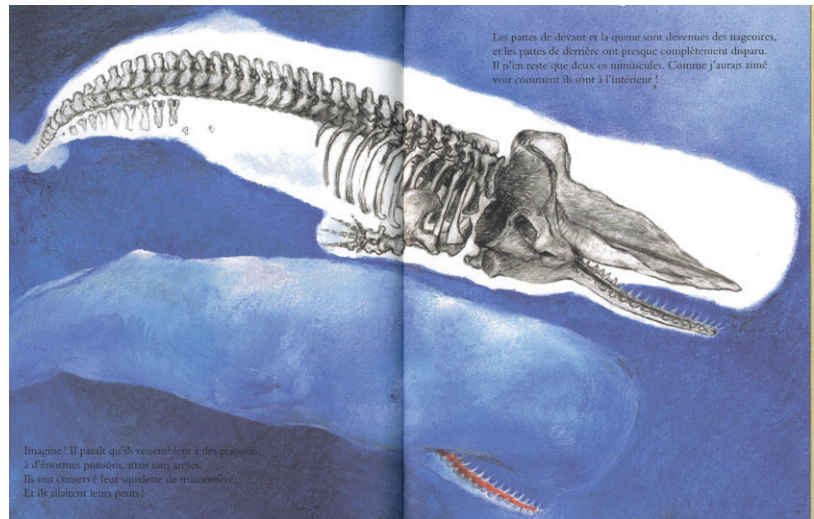
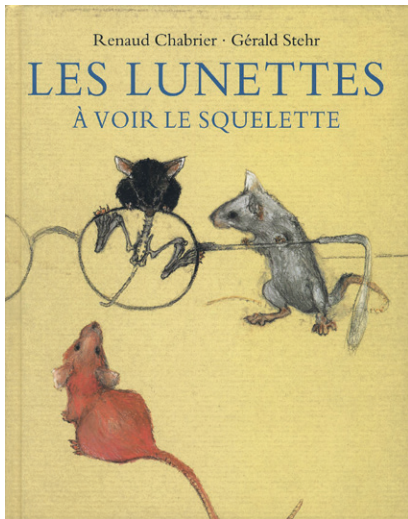


Figure 1: Le livre «les lunettes à voir le squelette» a été conçu en grande partie au Muséum d'Histoire Naturelle (R. Chabrier, G. Stehr, l'Ecole des Loisirs, 2002)



Figure 2: L'animation par morphing permet de mettre en mouvement les dessins anatomiques
 Animation de grand rhinolophe pour le muséum de Bourges (R. Chabrier, 2008)
 Animation de cachalot pour le Muséum de Lille (R. Chabrier, 2007)

Publication n°4 :

**Communication d'une expérience de réalisation
dans une conférence sur Léonard de Vinci,
pour un public d'archéologues, de chirurgiens et d'historiens de l'art.**

Depuis le 16ème siècle, l'anatomie comparée est l'une des disciplines scientifiques qui s'appuie le plus sur le dessin. Il faut avoir pris le temps de dessiner un squelette pour saisir à quel point on le découvre et on le mémorise au fur et à mesure qu'on le trace : aucune méthode ne peut remplacer ce processus. Une fois le dessin effectué, il peut être mis en rapport avec l'anatomie d'autres corps vivants, et servir dans de très nombreux contextes allant de la biomécanique à la théorie de l'évolution, de la découverte du corps à l'école primaire jusqu'à la prévention des risques en danse contemporaine.

Mon premier album pour enfants « les lunettes à voir le squelette » (Chabrier & Stehr 2002) en est un bon exemple (figure 1). Ce livre était réalisé avec l'appui de Jean Pierre Gasc, spécialiste de l'anatomie en mouvement, qui me donnait accès aux collections d'anatomie comparée du Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN). Par la suite, le livre a été longtemps vendu dans les librairies du MNHN, et il est aujourd'hui largement utilisé dans l'Education Nationale. Cependant, il s'est toujours agit d'une initiative privée entre mon co-auteur Gérald Stehr, moi et l'éditeur l'Ecole des Loisirs.

Le MNHN dispose pour sa part d'une cellule d'iconographie scientifique de plusieurs membres permanents formés avant tout au dessin, et qui répondent à une large gamme de besoins exprimés par les chercheurs, allant du schéma jusqu'aux visualisations 3D obtenues par CT-Scan. Mais lorsqu'il s'agit de s'adresser directement au grand public, il est rare que les dessinateurs impliqués travaillent dans ce type de cadre institutionnel, même si le projet implique un partenariat étroit avec les chercheurs.

Convaincu de l'importance de l'anatomie comparée, je me suis rendu compte en 2000 que l'animation par morphing permettait de rendre bien plus accessible la spatialité des dessins anatomiques. Une application immédiate consistait à proposer des animations de ce type dans les Musées d'Histoire Naturelles de différentes villes, ce que j'ai fait aux Muséums de Lille et de Bourges (figure 2), puis dans le cadre d'une série de courts-métrages dédiés à l'évolution, produite par le CNRS Image en partenariat avec le MNHN. En 2008, l'ensemble de ces réalisations permettait déjà de définir comment l'animation pourrait contribuer au réaménagement de lieux tels que la galerie d'anatomie comparée du MNHN à Paris, par exemple. L'animation de dessin anatomique s'avéra constituer une excellente base pour aborder la mise en mouvement des dessins de façon plus générale : quelques années plus tard, cette voie me conduisait à animer des œuvres rupestres de la grotte Chauvet, ainsi que des dessins de Léonard de Vinci.

En 2018, dix ans après avoir mis l'anatomie de côté, je participais à la retraite de l'équipe d'informatique graphique de Marie-Paule Cani. Nous étions invités à Tautavel par Henry de Lumley, ancien directeur du MNHN, pour discuter des nouveaux outils pour l'analyse de données et la visualisation d'hypothèse en archéologie. Prenant connaissance des possibilités of-

fertes par le morphing, il me proposa une invitation dans un colloque qu'il organisait en octobre 2019, à l'occasion des 500 ans de la mort de Léonard de Vinci, et plus précisément axé sur le thème : « Léonard de Vinci, pionnier de l'anatomie comparée ». C'était un triple cadeau que M. de Lumley faisait à mes recherches : non seulement il m'offrait l'occasion de revenir enfin sur les animations anatomiques, mais il me permettait de le faire à la source, en me basant sur l'un des dessinateurs les plus sensibles à l'inouï des corps vivants qui ait jamais existé. Qui plus est, Henry de Lumley me suggérait de travailler sur le mouvement de pronation/supination, autrement dit sur un mouvement étroitement lié à la notion de spirale, ce qui permettait de mettre en valeur le sujet sous un angle géométrique.

L'article qui va suivre peut donc être considéré comme le renouvellement d'une très ancienne rencontre entre le dessin et les sciences du vivant. S'il donne une place importante à la technique du morphing, c'est qu'elle permet de créer la transition d'un inouï à un autre : d'un bras, vu sous un certain angle, au même bras, vu sous un autre angle. A l'époque de Léonard de Vinci, géométrie et philosophie n'étaient pas très éloignées l'une de l'autre : quand il s'agit du vivant, il en est toujours de même aujourd'hui.

Un dessin en mouvement

In : Actes du colloque international : « Léonard de Vinci, Anatomiste. Pionnier de l'anatomie comparée, de la biomécanique, de la bionique et de la physiognomonie », CNRS édition, 2021

Résumé

Le dessin de Léonard de Vinci est habité par le mouvement : celui qui se manifeste dans les êtres vivants en général, mais aussi celui du dessinateur, qui peut librement tourner autour du sujet qui l'intéresse. Cette nouvelle liberté de représentation, particulièrement présente dans les études anatomiques, a eu un impact décisif sur le développement du dessin technique et scientifique. Aujourd'hui, la possibilité de mettre les dessins originaux en mouvement s'applique de plusieurs manières : dans un contexte de production liée à une exposition sur Léonard de Vinci, dans une étude plus spécialisée de la spatialité de ses dessins anatomiques, et enfin dans le cadre d'une réflexion plus générale sur la représentation de l'espace. Ces travaux éclairent d'une nouvelle manière les ressources offertes par le dessin, en mettant en avant les possibilités de transformations du trait.

Introduction

Le dessin a connu une évolution décisive durant la Renaissance. Durant les siècles précédents, les peintres et dessinateurs du monde occidental se trouvaient encore largement embarrassés par des problèmes de représentation de la profondeur sur une surface plane. Puis, en deux siècles, l'usage du trait s'est raffiné au point de pouvoir représenter n'importe quelle forme sous n'importe quel angle. Les dessins anatomiques de Léonard de Vinci reposent ainsi sur une capacité inédite à représenter des organisations spatiales insoupçonnées.

Pour développer cette vision étonnamment claire des structures anatomiques, il était nécessaire que son dessin puisse discerner de nombreux changements d'orientations dans les courbes des os, des muscles et des tissus en général. Par la suite, ce type de compétence a permis le développement du dessin scientifique, quoique Léonard de Vinci ne puisse pas être présenté comme l'unique fondateur de cette discipline, ses carnets ayant été largement oubliés après sa mort. L'intérêt de son travail dépasse en fait le cadre des causalités historiques : plus généralement, il nous offre des clés pour comprendre comment le dessin contribue à rendre le monde plus accessible.

Le dessin connaît en effet une situation paradoxale, au moment même où les musées célèbrent les 500 ans de la naissance de Léonard de Vinci. On le plébiscite pour la créativité qu'il apporte, mais on le pratique de moins en moins sérieusement, surtout dans les filières scientifiques et techniques. De l'architecture à la biologie cellulaire, les pertes de compétence en terme de représentation, d'imagination et de conception spatiale commencent à être sensibles (Chabrier & Janke, 2017). Dans ce contexte, Léonard de Vinci peut apparaître à l'inverse comme un modèle de virtuosité inatteignable, ce qui est contre-productif pour les jeunes et les étudiants. Or il est possible de présenter sa démarche d'une autre manière, en révélant le mouvement ou, plus généralement, les transformations qui se trouvent intégrés dans ses dessins. C'est cette dernière approche que je vais décliner dans cette communication.

Dans une première partie, je rendrai compte d'une production qui m'a conduit à animer un ensemble significatif de dessins de Léonard de Vinci, et qui reste apparemment à l'heure actuelle l'expérience la plus aboutie dans le domaine. J'introduirai à cette occasion quelques notions sur l'animation par métamorphose de dessins, aussi appelée « morphing », et je discernerai les principales catégories de transformation qu'il est possible de mettre en œuvre sur des dessins anciens.

Deux nouvelles expériences d'animation d'un bras seront présentées dans la seconde partie, dans le but de préciser le rôle du mouvement dans les dessins anatomiques de Léonard de Vinci. L'animation par métamorphose de dessins, couplé à un dispositif de diffusion d'images en relief, nous permettra de mieux distinguer le mouvement des corps représentés et le mouvement du regard du dessinateur.

Dans une troisième partie de discussion, nous aborderons le dialogue qui s'établit entre les deux types des mouvements au cours de la composition d'un dessin, tout particulièrement dans le dessin scientifique. J'évoquerai plus en détail les études de la pronation/supination par Léonard de Vinci, puis je les associerai à l'intérêt particulier qu'il portait aux mouvements en spirale. La « perspective de Léonard de Vinci », telle qu'il la décrit lui-même dans ses carnets, nous offrira alors une piste précieuse pour mieux comprendre la valeur spatiale du trait.

Partie 1

Animer les dessins de Léonard : les besoins d'une exposition, les conclusions d'une réalisation

En 2012, une grande exposition temporaire intitulée « Léonard de Vinci, projet, dessins machines » a été organisée à la Cité des Sciences et de l'Industrie à Paris, avant d'être montrée dans plusieurs villes autour du monde. Cette exposition ne montrait pas d'œuvres originales. Elle reposait au contraire sur une large panoplie de maquettes, sur des reproductions de dessins en grandes dimensions et sur des dispositifs audiovisuels ou interactifs, sans oublier une importante scénographie (**Figure 1a**). Certaines reconstitutions de machines, empruntées au musée de Milan et datant de la redécouverte de Léonard de Vinci au XIX^{ème} siècle, avaient déjà une valeur historique ; d'autres maquettes plus petites avaient été construites pour l'occasion, afin que les visiteurs puissent comprendre les dispositifs en les manipulant. Parfaitement cohérente avec l'état d'esprit des musées scientifiques modernes, cette présentation de Léonard et de son ingénierie faisait la part belle à l'action. Le commissaire Eric Lapie avait alors souhaité conclure le parcours de façon plus contemplative, grâce à une grande installation multi-écran qui mettrait en évidence l'importance du mouvement dans le regard de Léonard en montrant des animations directement issues de ses dessins. Restait alors à trouver une équipe capable d'animer les dessins de Léonard sans les trahir.

Transformer les dessins, une opération délicate

Mettre en mouvement des dessins anciens implique les transformer, d'une façon ou d'une autre. Parmi toutes les transformations possibles, il faut donc en trouver une qui ne dénaturera ni la matière de l'image, ni la représentation qu'elle évoque. Aujourd'hui, les dessins peuvent être manipulés de plusieurs façons, le plus souvent sous forme d'images numérique. Il est possible, par exemple, de

plaquer la texture des dessins sur des surfaces tridimensionnelles bien choisies (par exemple, une forme de pot pour le dessin d'un pot). De tels objets virtuels peuvent alors être animés dans un logiciel d'images de synthèse standard. Séduisante au premier abord, cette méthode laisse en fait très vite sentir un volume exogène au dessin d'origine. Une autre méthode consiste à découper le dessin en plusieurs parties, qui seront articulées comme une marionnette de papier : ce procédé « bidimensionnel », très efficace dans certaines réalisations, produit toutefois des animations bien trop naïves pour la qualité spatiale des dessins de Léonard. Une troisième alternative aurait simplement consisté à dessiner tous les intervalles du mouvement, selon les méthodes traditionnelles d'animation image par image. Outre le fait que les compétences et le budget pour une telle réalisation étaient introuvables, la demande ne justifiait pas un tel travail. En effet, il ne s'agissait pas de développer toute une histoire à partir des dessins de Léonard, mais plutôt de rendre visible leur potentiel de mouvement... et rien d'autre.

En 2011, je venais de terminer la mise au point d'une approche particulière de l'animation qui répondait à ce besoin, et qui me permis de gagner cet appel d'offre. Dix ans auparavant, j'avais remarqué que le « warping » et le « morphing », deux algorithmes de transformation d'image apparus à la fin des années 80, étaient restés très sous-utilisés en animation : ils avaient rencontré un bref succès populaire, en tant qu'effet spéciaux permettant de visualiser des déformations et des métamorphoses spectaculaires, puis étaient repassés dans l'ombre. J'ai alors entrepris de contrôler

a



b



Figure 1 : Animer les dessins de Léonard de Vinci dans un contexte d'exposition

a : Vues générale de l'exposition « Léonard de Vinci, projet, dessins, machine » montrée à la Cité des Sciences à Paris en 2012, puis à Munich, Sao Paulo et Londres (Scénographie et photo: Franck Fortecoëf).

b : Le court-métrage « Léonard de Vinci, le mouvement » montré durant la Biennale d'Art Contemporain du Grand Taïpei à Taïwan en 2016.

les déformations de l'image de façon plus fine grâce à une panoplie d'outils que n'utilisent pas les infographistes en général : des croquis préparatoires sur papier, des connaissances en danse et en anatomie fonctionnelles, quelques considérations géométriques sur les rotations dans l'espace, et enfin des logiciels à l'ergonomie plus appropriée. De cette façon, j'avais progressivement pu animer de façon convaincante mes propres dessins anatomiques, aussi bien que des peintures rupestres ou des fresques de Pompéi dans le cadre de différents documentaires scientifiques. Cette démarche permettait à la fois de préserver la texture de l'image d'origine et de gérer des mouvements dans la profondeur. Animer les dessins de Léonard de Vinci, avec tout ce qu'ils impliquent de richesse et de subtilité dans la représentation spatiale, représentait donc une étape décisive pour valider cette démarche et en tirer des enseignements.

Six minutes d'animation, trois grand types de transformation

Huit ans plus tard, la majeure partie de cette expérience d'animation se trouve rassemblée dans un court métrage, plus facile à apprécier hors du contexte de l'exposition initiale (**Figure 1b**). Pour chaque dessin, l'animation se limite à développer un mouvement suggéré et rendu possible par le dessin lui-même, c'est-à-dire sa propension à se transformer. Je n'en dirai pas plus sur l'aspect poétique de ce travail, une vision du film en ligne [1] étant bien plus appropriée qu'un texte pour cela. Ici, en introduisant quelques notions techniques indispensables, je vais en priorité développer la question qui se trouve à l'origine de chaque animation : « Comment ce dessin peut-il se transformer ? ».

Chaque type d'objet représenté (corps, machine, élément naturel...) suggère évidemment des réponses différentes, en référence à notre connaissance intuitive du monde physique et biologique. Cependant, il est possible de placer la discussion sur un plan plus général, en se préoccupant avant tout des opérations de transformation que nous pouvons mener sur le dessin, indépendamment de ce qu'il représente en particulier.

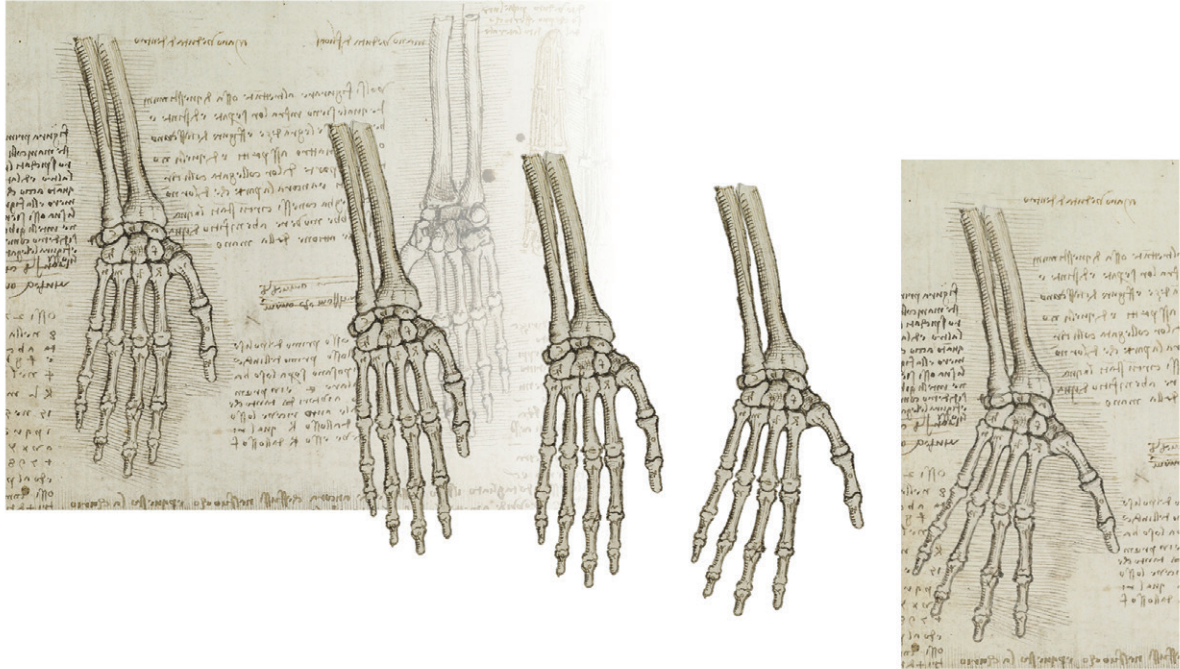
Une première opération, préliminaire et commune à toute les animations, consiste à détacher différents plans (fond, torse, bras, tête...) de façon à gérer plus facilement les recouvrements. Les « parties cachées » qui vont être découvertes au cours du mouvement, et qui n'ont pas été dessinées par Vinci, sont alors complétées dans chaque plan de l'image. De nombreux logiciels de traitement d'image, d'animation et de compositing sont conçus sur la base d'un tel travail en « calques » ou en « couches », dont l'importance est souvent sous-estimée. En effet, à partir du moment où une image est composée de plusieurs couches, il ne s'agit plus d'une image « en deux dimensions ». Contrairement à ce que pourrait suggérer le terme « animation 2D » souvent utilisé, un potentiel de mouvement en profondeur est donc intégré dans la préparation des images, avant toute mise en mouvement.

La suite du processus dépend alors de ce que Léonard a souhaité montrer.

1 - dans certains cas, l'animation se ramène à la déformation (ou « *Warping* ») d'un dessin unique, par exemple lors de l'extension d'une main (**Figure 2a**) ou lorsqu'un personnage s'étire (**Figure 3a**). Le dessin d'origine n'est pas nécessairement un point de départ : il peut s'avérer préférable d'en faire une arrivée, ou un passage dans le cours du mouvement.

2 - dans d'autre cas, Léonard a dessiné plusieurs étapes d'une action, et il est naturel d'en profiter pour les enchaîner de façon continue (**Figure 3c**). La déformation des images s'accompagne donc

a



b



Figure 2 : Préparation des images et animations simples en plusieurs couches

a : La main du dessin original (à gauche) est séparée du fond. Les os peuvent être articulés dans le plan de l'image pour créer un mouvement d'extension. Cette animation peut alors être ramené sur le fond, dont on a complété les parties cachées dans le dessin d'origine.

b : Le même principe permet d'animer plusieurs couches afin d'évoquer la profondeur, comme dans le mouvement de cette main vue de côté. Ici, l'animation de chaque couche reste simple : elle ne repose que sur le déplacement et la rotation de formes bi-dimensionnelles rigides, dans le plan de l'image.



Figure 3 : Animation par déformation et métamorphose

a : La déformation (ou warping) d'une image permet d'animer des mouvements complexes, tels que les mouvement organiques. Dans cet exemple, l'image d'origine est à droite.

b : Courbes utilisées pour déformer l'image : on peut observer un point d'articulation affiché au niveau de l'épaule (Logiciel utilisé: plugin ReFlex de RE:Vision intégré au logiciel de compositing Combustion 4 de Discreet/Autodesk).

c : La métamorphose (ou morphing) entre deux images est obtenue en ajoutant un fondu enchainé à la déformation. Cette méthode permet d'animer (à droite) une transition entre les deux étapes d'un mouvement dessinées par Léonard de Vinci (à gauche). Les deux dessins originaux ont été séparés, préparés en plusieurs couches (bras, jambes, torses...). Ces couches ont été métarmorphosées séparément les unes des autres puis recomposées.

cette fois d'un changement de texture, afin de passer d'un dessin à un autre. C'est ce type de transformation, plus radical que le précédent, que l'on nomme « Morphing en deux dimensions », et que j'appellerai de préférence ici « métamorphose de dessins ».

3 - enfin, certaines images peuvent être animées de façon cyclique, sans passer par une succession d'étapes demandant des dessins différents : certaines machines à roue, découlements ou de nuages en spirale offrent cette possibilité (figures 8a et 8b). Il s'agit alors d'un cas particulier de transformation par morphing, au cours de laquelle la texture du dessin original s'enchaîne avec elle-même.

Apparemment, ces trois cas suffisent à couvrir tout ce qu'il est possible de faire en animant des dessins anciens ou contemporains. Seule l'étude d'un corpus relativement complet et varié (plus de 20 dessins ou feuilles de carnet) pouvait offrir cette vision globale de la question.

Il s'avère alors que l'anatomie joue un grand rôle dans le contrôle de ces transformations. Bien entendu, elle est sous-jacente dans la plupart des animations de corps vivants. Elle s'y manifeste cependant d'une façon très abstraite en apparence, et en tout cas très différente de ce que l'on voit dans les livres d'anatomie médicale. Cette dimension anatomique se joue notamment sur le choix des points à partir desquels les contraintes de déformation imposées à l'image vont s'articuler entre elles (Figure 3b). Il s'agira, par exemple, de spécifier un ensemble de centres de rotations correspondant à l'épaule ou au coude. Ces centres ne sont le plus souvent marqués par rien de particulier dans l'image. Seul le mouvement permet de les faire sentir, avec une sensibilité étonnante. La moindre erreur se traduit en effet très vite par une sensation de distorsion ou de désarticulation.

Cette exigence dans le contrôle des transformations, tout particulièrement lorsqu'elles s'appliquent à un mouvement organique, permet d'expliquer les très bons résultats obtenus par l'animation par morphing lorsque les moyens nécessaires ont pu être investis. Par exemple, mon atelier a pu animer différentes peintures rupestres de la grotte Chauvet [2], ainsi que la fresque « Les effets du bon gouvernement » d'Ambrogio Lorenzetti à Sienne [3]. Un projet comparable pourrait-il être mené en se focalisant sur les dessins anatomiques ? J'ai mené une étude préliminaire, afin d'estimer quel pourrait être le sens d'un tel travail.

Partie 2

Application à l'anatomie

A travers ses dessins anatomiques, Léonard de Vinci s'impose comme un précurseur de l'anatomie fonctionnelle et de la biomécanique. Curieusement, cette partie de son œuvre est considérablement moins connue que son travail d'ingénierie ou de peinture : afin de la rendre accessible au grand public, la production d'un long-métrage ou d'une grande exposition serait donc tout à fait justifiée. Consacrée à l'anatomie de Vinci, ou à l'anatomie en général, une telle réalisation permettrait de revaloriser cette discipline dont l'importance reste méconnue. Dès lors, à titre exploratoire, il est important de se demander comment l'animation pourrait contribuer à un tel projet.

L'anatomie de Léonard de Vinci : un regard en mouvement

Si l'anatomie de Léonard de Vinci retient avec raison l'attention des médecins, des chercheurs et parfois des ingénieurs, elle ne correspond pas à ce que l'on appelle le plus souvent « anatomie artis-

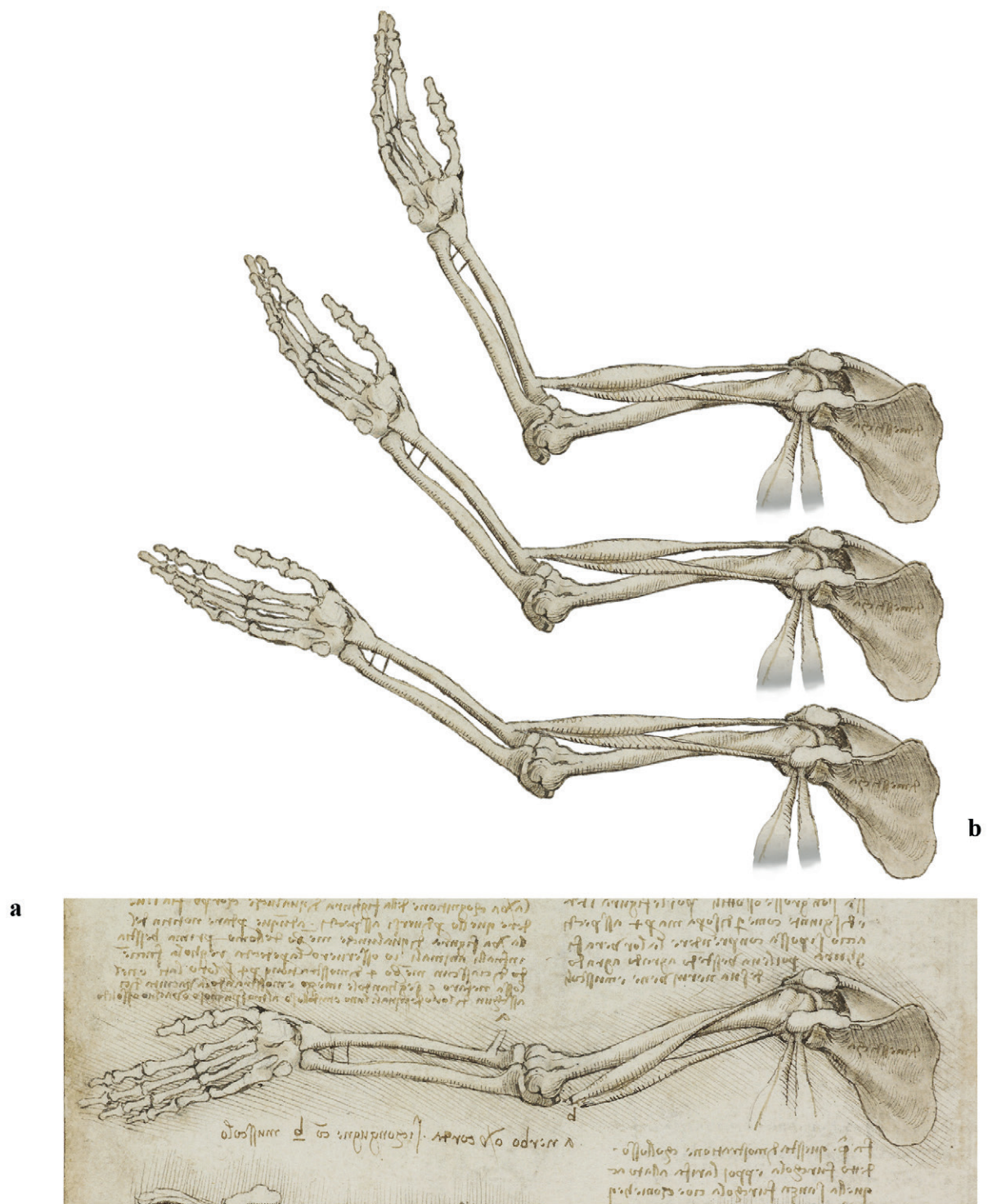


Figure 4 : Animation de la flexion du bras avec biceps

a : Sur le dessin original de Léonard de Vinci, le tendon du biceps est coupé pour mieux faire apparaître l'articulation du coude.

b : En « réparant » le tendon, la flexion du bras peut être animée. Elle impose de combiner l'articulation de formes rigides (squelette) avec une transformation plus élastique (muscle). (L'animation générée compte 450 images)

tique ». Dans cette dernière discipline, développée notamment par Michel-Ange à la même époque, l'artiste s'intéresse surtout aux muscles superficiels. Leur étude permet au dessinateur de modeler les corps de façon plus sculpturale, tandis que des connaissances générales sur l'architecture du squelette l'aident à construire des personnages qui « tiennent debout ».

L'approche de Léonard de Vinci n'est pas guidée par les mêmes enjeux. Tout d'abord il s'engage beaucoup plus loin dans la description anatomique, menant lui-même les dissections. Il s'intéresse alors à des muscles profonds ou à des organes apparemment sans aucune influence sur l'apparence extérieure des corps. Pourtant, cette plongée dans le fonctionnement interne du corps ne l'empêche pas de maintenir une attention permanente aux forces et aux mouvements qui se trouvent mis en jeu dans le contexte d'un corps vivant. Même si leur formulation scientifique est encore floue à l'époque, ces « forces » dont il cherche l'origine et la logique ont vocation à se déployer dans le monde externe, si bien que le mouvement, porté le trait, affleure dans tous ses dessins. C'est pourquoi il est quasiment naturel de voir bouger une main dessinée par Vinci... même si elle se trouve à l'état de squelette (**Figure 2a et 2b**).

Cette sensibilité de Vinci pour le mouvement, telle qu'elle se présente dans ses études anatomiques, est cependant de deux ordres. D'une part, elle concerne le mouvement potentiellement généré par les os, les muscles et les divers autres organes concernés. Par exemple, le squelette d'un bras pourrait s'articuler, à supposer qu'on lui raccorde son biceps (**Figure 4a**). D'autre part, cette sensibilité concerne aussi le mouvement de Vinci lui-même. En effet, une dissection n'est pas un spectacle dans lequel le spectateur reste assis à sa place. Il est nécessaire de se déplacer, de changer d'angle de vue, et de manipuler autant que possible les structures étudiées pour mieux les appréhender. Léonard a ainsi éprouvé le besoin de dessiner un même bras, replié en position de pronation, sous deux angles différents correspondant presque à une « vue de face » et une « vue de côté » (**figure 5a**).

La propension au mouvement, dans les dessins anatomiques de Vinci, réveille donc dans notre regard deux sortes d'anticipation : ce qui se passerait si l'objet dessiné se mettait à bouger de lui-même, et ce qui se passerait si en tant qu'observateur je me mettais à bouger autour de cet objet. Dans les deux cas, le dessin se transformerait, et la plupart du temps ces deux transformations ne seraient pas les mêmes. A vrai dire, cette alternative est universellement présente dans les représentations spatiales, mais Vinci la rend particulièrement évidente dans ses dessins anatomiques, et tous particulièrement dans sa célèbre étude de l'épaule et du bras en quatre étapes (**figure 6a**).

Première expérience d'animation : contracter un biceps

Un travail d'animation sur ces dessins consiste donc à prolonger soit l'une, soit l'autre possibilité de transformation, afin d'induire un mouvement du corps ou un mouvement du regard, ou encore les deux à la fois. Commençons par le cas le plus familier, celui où le corps dessiné bouge de lui-même. Vinci a dessiné un squelette de bras doté d'un biceps, en coupant le tendon de ce dernier au niveau de l'avant-bras (**Figure 4a**). Ce dessin est intéressant à animer pour des raisons de narration scientifique : dans l'introduction d'un film ou d'une exposition, cette animation permettrait de poser les bases du jeu des os, des muscles et des tendons sur un cas simple.

J'ai donc choisi de « réparer » le tendon pour animer la flexion du bras, avant de montrer éventuellement ce qui se passe si l'on coupe le tendon. Il ne s'agit pas d'un mouvement très complexe, mais il

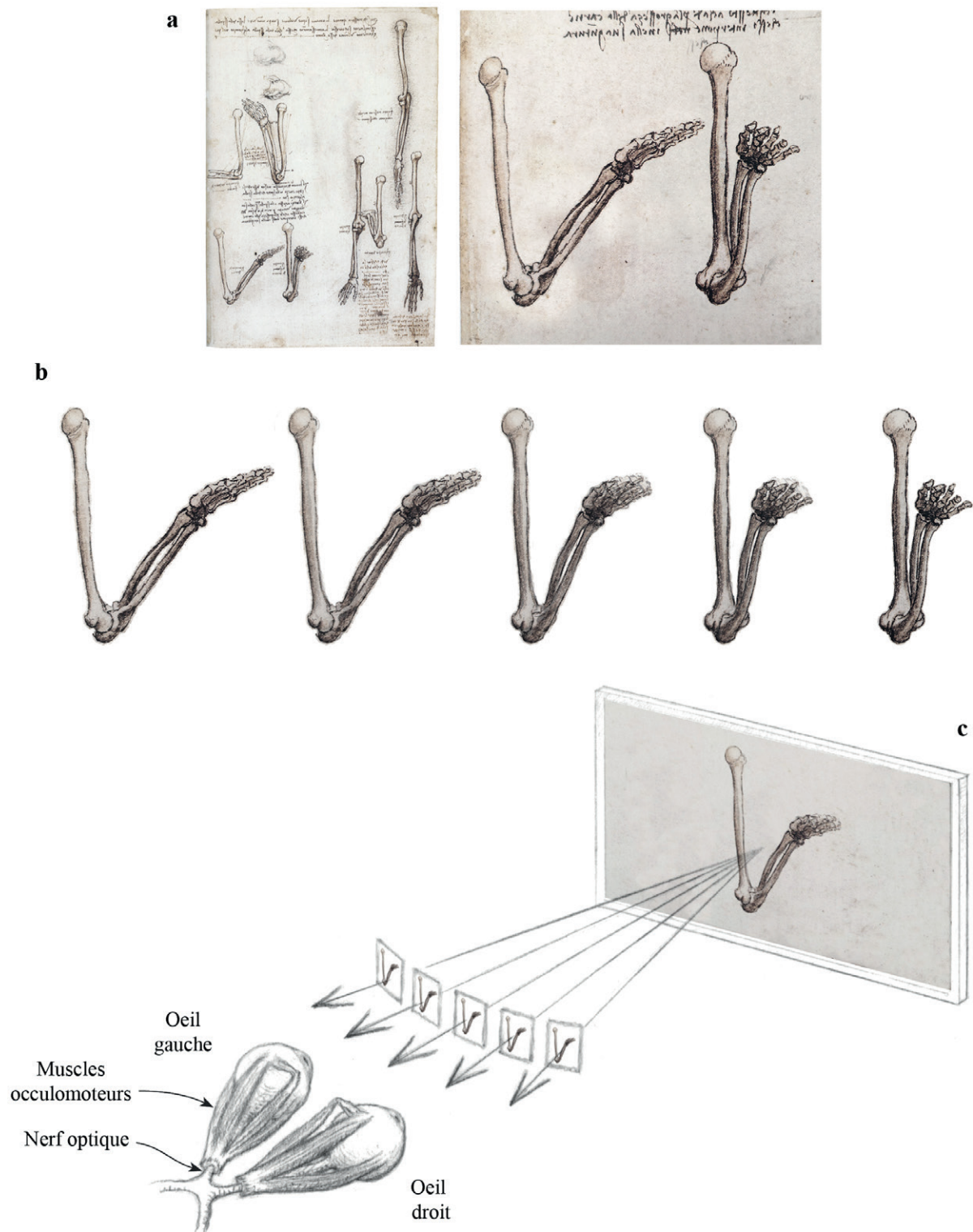


Figure 5 : Mouvement du regard et vision en relief

a : Notes de Léonard de Vinci et détail du bras plié en position de pronation, vu sous deux angles écartés de 70° environ

b : Métamorphose entre les deux vues du même bras (l'animation générée compte 50 images).

c : Affichage de 5 images consécutives de la série via un écran autostéréoscopique. Le procédé Alioscopy utilise des microlentilles qui permettent d'offrir aux yeux 5 images différentes. Les informations de la rétine et des muscles oculomoteurs permettent de percevoir le dessin en relief.

pose tout de même quelques enjeux fondamentaux pour l'animation de dessins anatomiques : les os doivent être relativement rigides, et s'articuler à partir de centres de rotation, tandis qu'au contraire les muscles ne doivent pas conserver leur forme, puisqu'ils se contractent et se détendent. L'animation doit donc pouvoir combiner ces deux types de transformations sans introduire de confusion, ce qui est plus difficile qu'il n'y paraît (Il faut se rappeler que le logiciel utilisé est susceptible de transformer n'importe quelle partie de l'image de n'importe quelle manière : par défaut, il ne fait donc pas de différence entre les os et les muscles)

Sur la base d'une telle animation, il est possible grâce à elle d'isoler la contraction du biceps, l'un des très rares muscles connus de tous dans le grand public. Ceci ouvre un accès à la question du volume des muscles visibles de l'extérieur, et permet ainsi de faire le lien avec l'aspect plus « artistique » de l'anatomie. En parallèle, il est également possible d'approfondir le côté « scientifique » et de zoomer dans le muscle, afin de montrer des structures que Vinci n'a pas pu observer, telles que l'organisation des fibres, ou même celle des fuseaux neuro-musculaires qui régulent la contraction, et qui jouent donc un rôle essentiel dans les arts du mouvement. Le dessin de Vinci, à condition d'être animé convenablement, peut ainsi agir comme une toile de fond sur laquelle le spectateur/visiteur intègre un éventail d'informations venues de diverses disciplines (arts plastiques, biomécanique, neurobiologie, danse...).

Deuxième expérience d'animation : tourner autour d'un bras

Intéressons-nous maintenant à l'autre aspect du mouvement dans les dessins de Vinci, celui qui se produit lorsque le regard du dessinateur (et du spectateur) tourne autour des objets. Ce comportement est très spontané lorsque nous essayons de mieux saisir une forme. Vinci le traduit littéralement dans des dessins constitués de plusieurs vues. Par exemple, un squelette de bras fléchi et en pronation lui donne l'occasion de deux dessins séparés d'environ 70° (**Figure 5a**). Il est alors possible de calculer une métamorphose (ou morphing) entre les deux vues. Le résultat montre un mouvement général de rotation dans l'espace (**Figure 5b**).

Notre système visuel nous permet cependant d'évaluer la spatialité des formes sans nécessairement nous déplacer pour tourner autour. En effet, la distance entre nos deux yeux constitue souvent elle-même un déplacement suffisant pour percevoir le relief, à partir de vues écartées de seulement quelques degrés d'angle. À partir de deux dessins nettement plus écartés, tels que les deux vues du bras dessinées par Vinci, la métamorphose d'image permet justement de calculer des images très proches les unes des autres. Deux images consécutives dans la série, présentées aux deux yeux, offrent alors au regard l'expérience à la fois nouvelle et évidente d'un « dessin en relief ».

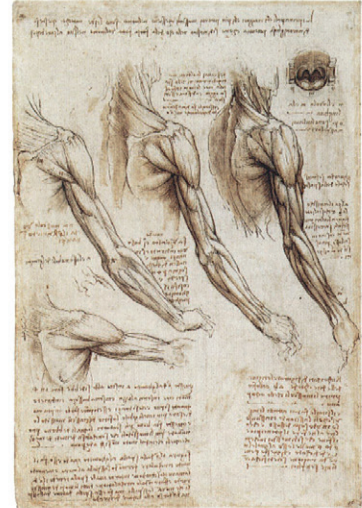
Pour aller encore plus loin, il est possible de diffuser une partie de la séquence d'image dans un écran autostéréoscopique (**Figure 5c**), tel que celui que je teste actuellement. Ces écrans développés par la société française Alioscopy permettent de diffuser des images en relief sans qu'il soit besoin de lunettes : à la place, un dispositif de micro-lentilles diffuse 5 images dans 5 secteurs angulaires successifs, de telle façon que les deux yeux ne voient pas les mêmes images. Cette diffusion d'images en relief autorise alors en plus un léger mouvement de la tête, si bien que la présence du dessin « en relief » est clairement ressentie comme un objet extérieur autour duquel il est possible de tourner.

Dans notre exemple, le dessin montre une configuration spatiale très particulière, dans laquelle

a



b



c

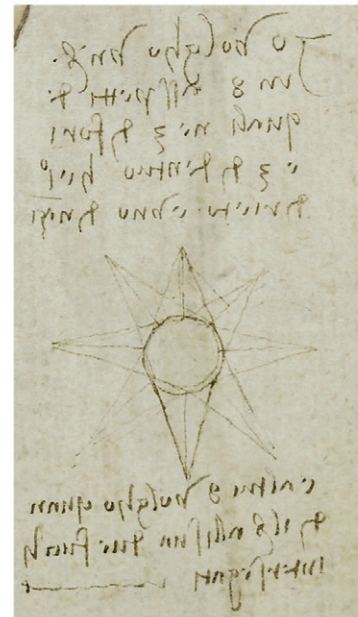


Figure 6 : Mouvement du regard autour du cou, de l'épaule et du bras

a : Etude du cou, de l'épaule et du bras par Léonard de Vinci.

b : Autre étude de la même série.

c : Détail illustrant le projet de réaliser 8 vues autour de l'épaule et du bras, écartées d'environ 45°. Dans les images a et b, on peut remarquer la présence de vues intermédiaires par rapport à ce projet, l'écart entre les dessins consécutifs étant de l'ordre de 22°.

le radius s'enroule en spirale autour de l'humérus. Avec la méthode de métamorphose de dessins et le dispositif de diffusion que je viens de proposer, la façon dont Vinci s'est intéressé à cette spirale devient alors perceptible dans l'espace, sans utiliser d'autre information que celle qu'il nous a transmise avec ses dessins sur papier. Ce type de démarche offre donc un support concret pour mieux comprendre les enjeux de la représentation de l'espace à partir du trait.

Faire sentir le mouvement d'un regard

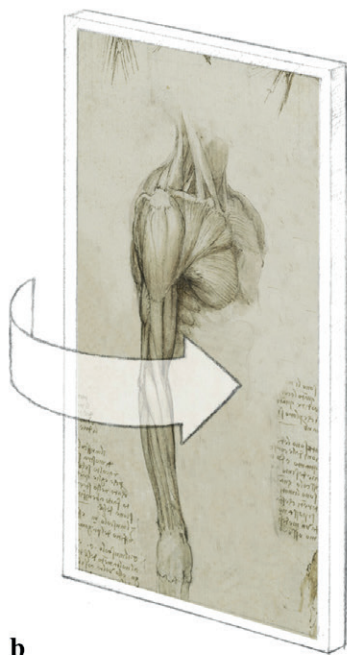
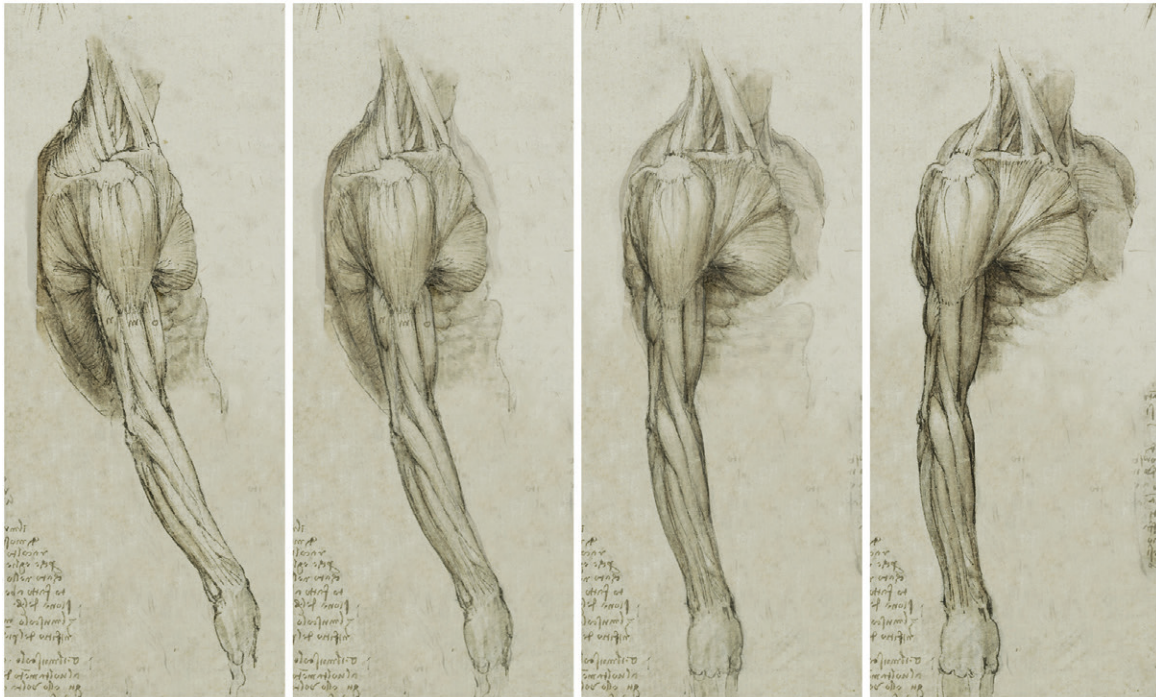
Pour mieux embrasser les formes, surtout lorsqu'elles ne bougent pas, le dessinateur peut donc faire appel au mouvement du regard. Chez Léonard de Vinci, le dessin du bras et de l'épaule en quatre étapes (**figure 6a**), qui prolonge une série de trois dessins analogues sur une autre feuille (**Figure 6b**), est emblématique de cette mobilité. Tous ces étapes peuvent être enchaînées grâce à la métamorphose de dessins, dont elles constituent à vrai dire une préfiguration surprenante.

En effet, d'après un schéma et une note en bas à droite (**Figure 6c**), Vinci s'était apparemment donné comme objectif de faire 8 dessins du bras séparés de 45° (Keele & Roberts, 1984). Avec un tel écart angulaire, deux vues de la même forme sont en effet suffisamment différentes pour justifier deux dessins distincts, mais encore assez proche pour que l'on puisse facilement mettre en correspondance leurs traits. Cependant, en pratique, Vinci est allé plus loin en ajoutant lui-même un dessin intermédiaire, si bien que les trois premiers dessins (en partant de la gauche) ne sont séparés que de 20 à 25°. De toute évidence, Vinci cherche comment les formes légèrement différentes des muscles évoluent à l'occasion d'un léger changement d'angle de vue. Sachant que cette évolution se traduit directement par une évolution du trait, il s'agit sans doute autant d'une préoccupation de dessinateur que d'anatomiste.

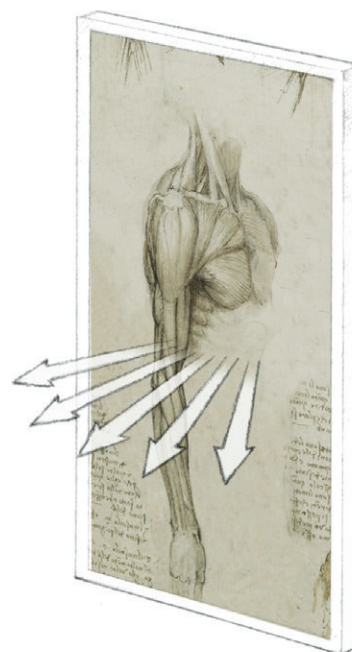
Pour mettre cette étude en mouvement, j'ai utilisé le premier et le troisième dessin, qui correspondent bien à l'écart angulaire nécessaire pour ce type de métamorphose de dessins (**Figure 7a**). L'animation, constituée de 50 images intermédiaires, offre plusieurs enseignements précieux. Tout d'abord, un tel travail éventuellement étendu aux autres dessins de la série trouverait de toute évidence sa place dans une exposition dédiée à l'anatomie de Vinci. Le format standard des écrans 16/9ème n'est manifestement pas adapté au format du dessin, mais un dispositif de projection pourrait facilement être mis en place pour obtenir un format d'image plus en hauteur. Cette installation particulière pourrait avoir un but « contemplatif », afin d'apprécier cet ensemble de dessins de Vinci sous une nouvelle forme. Elle pourrait également avoir un but plus « explicatif », en ajoutant des informations éventuellement inspirées des notes de Vinci lui-même.

Quoiqu'il en soit, dans un dispositif de diffusion classique (écran ou projection), la succession des images intermédiaires serait nécessaire pour faire sentir le mouvement de rotation (**Figure 7b**). Comme nous l'avons vu plus haut, un écran autostéréoscopique de format vertical aurait l'avantage de montrer directement le dessin en relief sous 5 points de vues différents (**Figure 7c**). D'après mes essais dans un format horizontal, il s'agit alors d'un relief assez doux, qui n'apparaît pas comme exogène au dessin, et qui s'accorde même avec la présence de la surface du papier à l'image. Encore une fois, ce dispositif pourrait donc être très intéressant dans le cadre d'une exposition suffisamment ambitieuse.

a



b



c

Figure 7 : Visualisation de la spatialité du dessin

a : Métamorphose entre le premier et le troisième dessin de la figure 6a (L'animation générée compte 50 dessins). Cette séquence peut être visualisée de deux manières :

b : Un écran conventionnel permet de voir l'animation comme un mouvement tournant.

c : Un écran autostéréoscopique permet en outre de voir l'image en relief, grâce à une diffusion multi-vues.

Partie 3 (Discussion)

Mouvement du corps, mouvement du regard : assumer l'ambiguïté du dessin

Après les deux exemples d'animation que j'ai présentés en accentuant leur écart (mouvement de l'objet lui-même vs mouvement du dessinateur autour de l'objet), nous pouvons nous interroger sur la porosité entre les deux types de mouvement. On peut ainsi remarquer que le mouvement du regard autour du bras (Figure 6a) s'accompagne d'une légère pronation, comme si l'homme s'adaptait pour continuer à présenter le dessus de son avant-bras tandis que l'observateur lui tourne autour. De façon générale, dans un croquis, il est souvent fait abstraction du contexte qui permettrait de savoir sans ambiguïté quelles étaient les parties fixes ou mobile du corps considéré, et qui, de l'observateur ou de l'objet, s'est déplacé.

Cette ambiguïté est particulièrement présente dans les planches anatomiques de Léonard de Vinci, qui multiplie les croquis à différentes échelles et sous différents angles de vues. A l'échelle de la feuille entière, il est impossible de dire que « cette scène a été vue depuis ce point de vue ». Par conséquent, l'espace ainsi composé ne répond pas aux lois déterministes de la perspective centrale. Au contraire, il offre plusieurs interprétations possibles. Loin de constituer un problème, cette ambiguïté du dessin est à la source de son efficacité pour la réflexion scientifique (Chabrier 2016).

L'animation de tels dessins peut alors s'orienter sur une voie sensiblement différente de celle qui est habituellement empruntée au cinéma. Dans ce dernier cas, les caméras (réelles ou virtuelles) produisent des images dans lesquelles l'existence d'un « point de vue » est en général sensible ; la narration doit donc en tenir compte. A l'inverse, dans la logique du dessin scientifique autant que dans celle de la métamorphose de dessins, il va être possible de faire abstraction de la notion de « point de vue extérieur » (tout en conservant la notion d'angle de vue). Cette dissolution de la relation classique entre observateur et observé permet de se concentrer sur les configurations spatiales internes au dessin, en évaluant les transformations qui permettront de passer de l'une à l'autre (Chabrier 2020-2). Dans le cas des dessins anatomiques qui nous intéressent ici, cette approche permet tout particulièrement de mettre en évidence des mouvements relatifs entre différentes parties du corps, notamment lorsqu'ils sont plus complexes qu'une simple flexion.

Vers une animation de la pronation/supination

Léonard de Vinci s'est particulièrement intéressé au mouvement de pronation-supination. Chez un humain en position debout qui tient la paume de sa main tournée vers le ciel, la pronation se produit lorsque la main se tourne vers la terre, tandis que la supination désigne le mouvement inverse. De la supination à la pronation, le radius tourne de 180 ° en passant par-dessus le cubitus, si bien qu'ils finissent dans une position croisée, rendue possible par la forme arquée du radius (Figure 5a). Comme nous l'avons déjà vu, cet « enroulement » du radius autour du cubitus crée une spirale à l'intérieur de l'avant-bras. Combinée à d'autres mouvements, cette action peut avoir une grande efficacité mécanique. La spirale permet en effet de redistribuer les forces produites par des muscles courts et puissants dans les directions utiles pour agir à l'extérieur.

De façon générale, dans les dessins de Léonard de Vinci, la pronation/supination affleure dans chaque représentation du bras, même lorsque ce dernier semble « statique ». Comme je l'ai déjà indiqué, le mouvement de regard « autour du bras » animé précédemment (Figure 7a) met en



Figure 8 : Etude des spirales par Léonard de Vinci

a : Etude de déluge (détail).

b : Etude d'écoulement turbulent.

c : « Corps né de la perspective de Léonard de Vinci, disciple de l'expérience » (Trad. C. Pedretti)

évidence une légère mais sensible pronation, lorsque les images se succèdent de la gauche vers la droite. De même, l'animation de la contraction du biceps (**Figure 4b**) pourrait être améliorée en utilisant comme position de départ un avant-bras en légère pronation. La forme des os de l'avant-bras serait rendue plus facilement perceptible, tandis que l'action supinatrice du biceps, qui s'ajoute à l'action de flexion, serait mise en évidence. Sans avoir besoin de le dire explicitement, il existe donc un enchaînement très naturel entre la présentation de ces mouvements « simples » évoqués dans la partie précédente, et le développement d'un sujet plus complexe comme l'action de l'avant-bras.

Une narration scientifique riche et originale peut alors être initiée sur la base de ces images, en développant l'importance de la pronation-supination dans l'évolution des vertébrés terrestres ou plus spécifiquement des primates. Il est également possible de placer la pronation/supination dans le contexte des activités humaines. Le matériau laissé par Léonard de Vinci sur le sujet de la pronation-supination est si riche que de nombreuses animations seraient possibles. Elles offriraient ainsi une base sur laquelle l'imagination des spectateurs pourrait se stabiliser, ce qui justifierait donc un budget de production spécifique. Le développement de ce travail demanderait par ailleurs une réelle collaboration avec différents experts (anatomistes, biomécaniciens, chercheurs en zoologie et évolution, mais aussi artisans, pédagogues de la danse ou des arts martiaux...) afin de choisir plus en détail les animations pertinentes.

En attendant la mise en place d'une production de cette sorte, il est également possible de s'intéresser aux dessins anatomiques de Léonard de Vinci sous un aspect plus fondamental, celui des transformations applicables au dessin. L'étude de la pronation-supination alors être vue comme une occurrence particulièrement importante de la transformation en spirale, très présente dans l'art de Léonard de Vinci.

Les spirales et la « perspective de Léonard de Vinci »

Mathématiquement parlant, une spirale dans l'espace tridimensionnel est produite par la combinaison d'une translation et d'une rotation. Les dessins de Léonard de Vinci laissent deviner un intérêt indiscutable pour ce développement dans l'espace. Il est possible d'identifier des spirales aussi bien dans les vis sans fin qu'il affectionne, que dans ses études de fluide ou de déluges (**Figures 8a et 8b**). La notion de spirale est également très présente en anatomie, du fait des nombreuses torsions inscrites dans la forme même des os. Aucune de ces structures ne peut être représentée strictement « à plat ». Quel que soit le sujet abordé, la capacité de dessiner des formes en spirales est donc intimement liée à celle de donner au trait une valeur spatiale, mais plus encore : il est nécessaire de savoir faire évoluer cette valeur, car la spirale remet sans cesse le trait en question.

Afin de pouvoir animer de tels dessins, il est donc nécessaire de comprendre sur quoi repose la valeur spatiale du trait. La représentation de l'espace a donné lieu à de nombreux traités, qui insistent en général sur la perspective centrale. Nous avons évoqué plus haut le fait que ce type de perspective ne correspondait pas à l'espace qui se déploie dans le dessin scientifique, et dans le dessin de Léonard de Vinci tout particulièrement. De façon générale, plusieurs perspectives ont en fait cohabité chez les maîtres de la Renaissance (Vinciguerra 2007). Léonard de Vinci a exprimé les principes de la sienne de façon très synthétique dans l'un de ses carnets :

« Il est trois sortes de perspectives : la première relative aux causes de la diminution, ou, comme on

l'appelle, à la perspective diminutive des objets à mesure qu'ils s'éloignent de l'œil. La seconde est la manière dont les couleurs se modifient en s'éloignant de l'œil. La troisième et dernière consiste à définir comment les objets doivent être achevés avec d'autant moins de minutie qu'ils sont plus éloignés »

Si les deux premières perspectives citées par Vinci sont relativement familières, la troisième que l'on pourrait appeler en langage moderne « perspective attentionnelle » ouvre à une pensée du trait beaucoup plus originale. Elle rend compte en effet de l'abstraction qui participe fortement à la spatialité des croquis, et qui prend un sens encore plus développé dans l'espace de l'imagination scientifique. Cette façon d'envisager la perspective peut être directement mise en rapport avec certains croquis de structures imaginaires, justement constituées de spirales, simples ou doubles, éventuellement enroulées sous la forme générale d'un tore (**Figure 8c**). Comme le souligne Daniel Arasse (1997) l'un de ces corps est explicitement présenté par son auteur comme « né de la perspective de Léonard de Vinci ». Vinci ajoute : « Que ce corps soit fait sans l'exemple d'aucun corps mais avec de simples lignes » . Avec une grande simplicité, ces croquis à la plume donnent la mesure des transformations que le trait doit pouvoir assumer, selon Vinci, afin d'accéder à la représentation de toutes formes, naturelles aussi bien qu'imaginaires.

Conclusion

Les dessins de Léonard de Vinci invitent au mouvement. En suivant simplement cette piste avec les moyens d'animation moderne, j'ai montré dans cette communication que Léonard de Vinci nous offrait un lien précieux et toujours actuel entre le monde organique et le monde géométrique. A travers le trait, la pronation/supination d'un bras et une spirale abstraite peuvent se mettre en rapport, sans que cette opération ne se fasse au prix d'une réduction de complexité qui dénature l'une ou l'autre.

Nous pouvons voir dans cette démarche un « minimum de dessin » qui, sans chercher la virtuosité, se préoccuperait simplement d'accéder au monde, selon les termes proposés par le philosophe François Jullien (Jullien 2019, Chabrier 2020-1). Cette approche du dessin peut être complétée aujourd'hui par l'animation et par les narrations associées. Elle se déploie alors naturellement dans plusieurs directions. Elle permet d'augmenter la qualité des productions orientées vers le grand public, telles qu'une exposition ou un film documentaire, comme j'en ai évoqué la possibilité à propos de l'anatomie. Elle permet également de redéfinir la pédagogie du dessin, tout particulièrement à destination des élèves intéressés qui cherchent à mieux voir, mais ne se destinent pas pour autant à devenir artistes. Enfin, sur un plan plus fondamental, les recherches que je mène actuellement avec Marie-Paule Cani s'attachent à mieux comprendre la relation entre le trait et ses transformations possibles, de façon à renouer le dialogue, souvent rompu aujourd'hui, entre le dessin sur papier et les abstractions mathématiques.

Concrètement, un tel programme suppose de pouvoir coordonner les activités de production, de formation et de recherche dédiées au dessin, qui se trouvent actuellement très séparées. A un niveau plus global, des prises de conscience sont cependant en cours : elles concernent la nécessité d'apprendre à voir la diversité des formes de vie, aussi bien que l'importance d'utiliser les nouvelles technologies de façon plus humaine. Dans les décennies à venir, ce contexte pourrait nous permettre de relancer l'usage du dessin d'une façon que Léonard de Vinci n'aurait peut-être pas reniée.

Remerciements

This work received support from PSL Research University and from the grants ANR-11-LA-BX-0038 and ANR-10-IDEX-0001-02.

Merci à Clio Gavagni (préparation d'images), Thierry Bertomeu (conception sonore) et Mathilde Beaujean (Production audiovisuelle Universcience).

Merci à Universcience et à l'équipe Geovic du Laboratoire d'Informatique de l'Ecole Polytechnique.

Référence de films en ligne

[1] Leonardo da Vinci – Motion Picture (2013): <https://vimeo.com/84689530>

[2] Cave art animation studies (2010-2016) : <https://vimeo.com/171478742>

[3] Les effets du bon gouvernement (2016) : <https://vimeo.com/199151983>

Références bibliographiques

Arasse D (1997) Léonard de Vinci, le rythme du monde. Hazan, Paris, réédition de 2019, p92

Chabrier R (2016) Pouvoir de représentation contre pouvoir absolu : le dessin scientifique confronté à la perspective. In : Mariannick Guennec, Véfa Lucas (eds) Les images du pouvoir, Univ. Brest, HCTI/UBS, Lorient

Chabrier R, Janke C (2017) The comeback of hand drawing in modern life sciences. *Nature Review Molecular Cell Biology* 19, 137–138

Chabrier R (2020-1) Lettre à François Jullien, sur l'Inouï à portée de crayon. In : Arts et Concepts, Chantier Philosophique de François Jullien/Ateliers d'artistes, ouvrage collectif, PUF, Paris

Chabrier R (2020 -2)- From sketches to morphing: new geometric views on the epistemological role of drawing. In *Space-time representations and movements in the brain and in the arts*, Berthoz A, Flash T. (eds), *Lecture notes on morphogenesis*, Springer (Sous presse)

Jullien F (2019) L'inouï. Grasset, Paris

Keele D, Roberts J (eds) (1984) Leonardo da Vinci Anatomical Drawings From The Royal Library Windsor Castle. Metropolitan Museum of Art New York, 98

Vinciguerra L (2007) Archéologie de la perspective. Lignes d'art, PUF, Paris

Références des dessins :

Figures 1b et 8a : Tempête déferlant sur des arbres et des cavaliers (détail), vers 1514 (Windsor Castle, Royal Library. RL 12376 r)

Figure 2 : Etudes anatomiques du squelette de la main (détails), vers 1509 (Windsor Castle, Royal Library. RL 19009 v)

Figure 3a : Esquisses et figures pour une Cène (détail), vers 1480 (Paris, Musée du Louvre, Cabinet des dessins, inv. 2022)

Figure 3b : Etude sur la lumière et l'ombre, avec étude de personnage en mouvement (détail), vers 1508 (Windsor Castle, Royal Library. RL 19149 v – 19152 v)

Figure 4 : Etudes anatomiques du squelette du bras (détail), vers 1509 (Windsor Castle, Royal Library. RL 19000 v)

Figure 5 : Pronation et supination du squelette du bras, vers 1509 (Windsor Castle, Royal Library. RL 19004 r)

Figures 6a, 6c et 7 : Muscles du bras, de l'épaule et du cou, vers 1509 (Windsor Castle, Royal Library. RL 19008 v)

Figure 6b : Muscles du bras, de l'épaule et du cou, vers 1509 (Windsor Castle, Royal Library. RL 19005 v)

Figure 8b : Vieil homme et étude d'eau (détail), vers 1510-1513 (Windsor Castle, Royal Library. RL 12579 r)

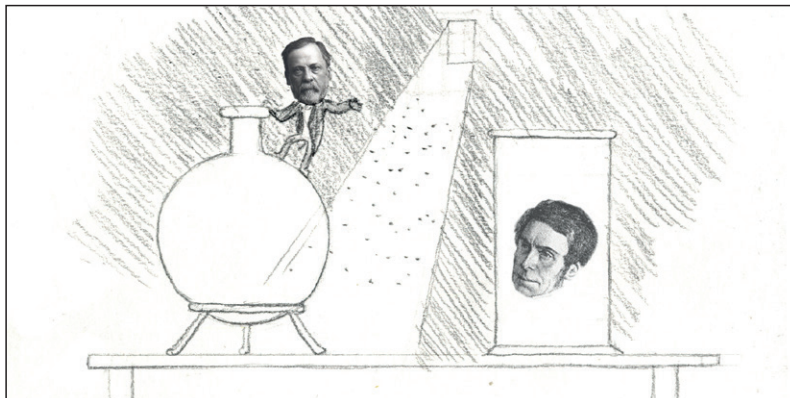
Figure 8c : Etudes de corps inventés (détail), vers 1490-1492 (Codex Atlanticus, Milano, folio 191 v-b)

Chapitre 5

Pasteur et Pouchet

ou

la double controverse



Chapitre basé sur l'écriture des dialogues
du théâtre optique «La controverse des générations spontanées»

Réalisation présentée dans le cadre de l'exposition
«Pasteur, l'expérimentateur» au Palais de la Découverte
décembre 2017 - août 2018

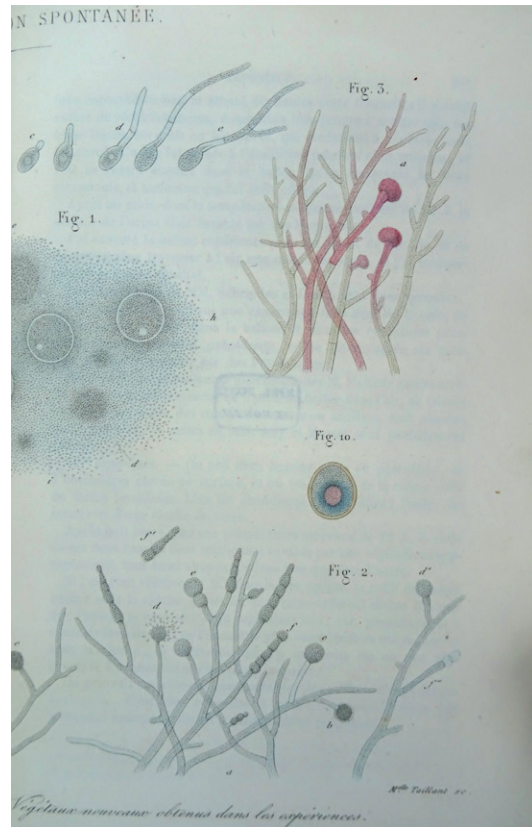
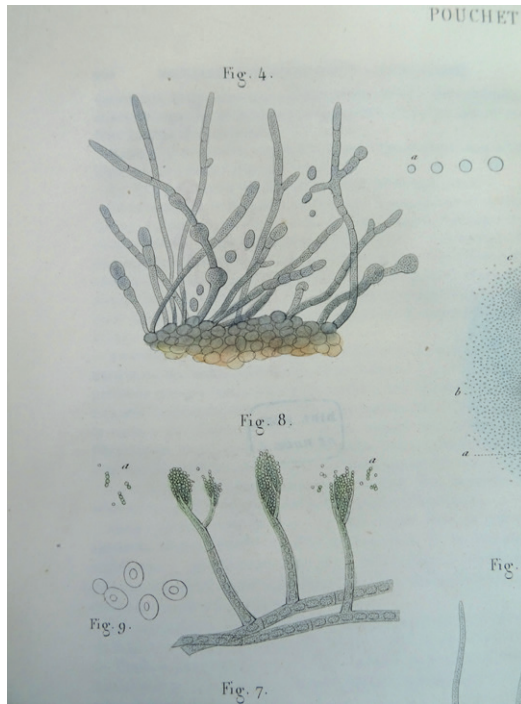


Figure 1 : Observation de «formation spontanée» d'oeufs de micro-organismes par Pouchet
Nouvelles expériences sur la génération spontanée et la résistance vitale, 1864 (Photo Bénédicte Charbonnel)

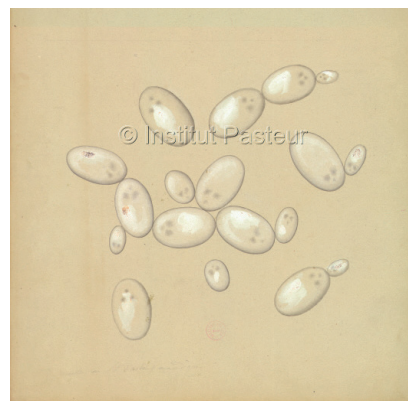
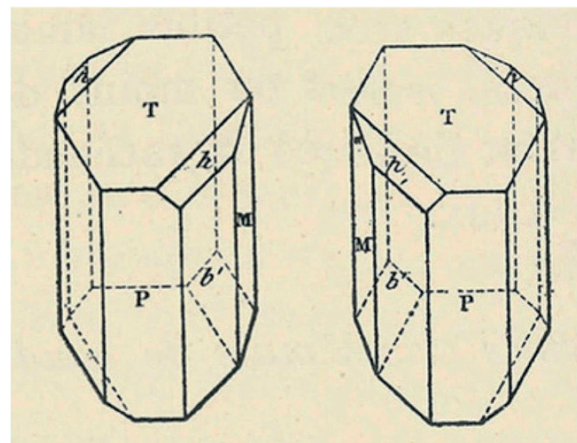


Figure 2 : Utilisation du dessin par Pasteur
a: ferments butyrique et levures (photo Institut Pasteur)
b: Etude de l'acide tartrique (Oeuvres de Pasteur, tome 1, cité dans Gal 2019)



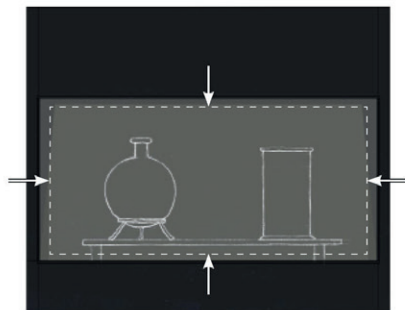
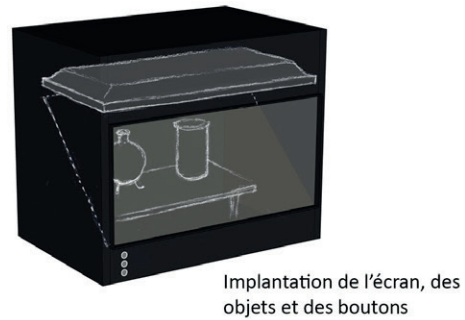
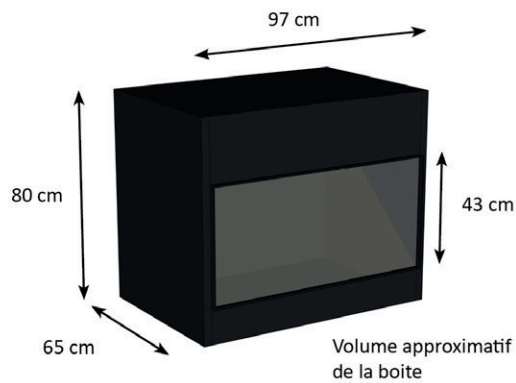
Pasteur et Pouchet
ou
la double controverse
(seconde expérience de réalisation)

1 – Entrée en matière: l’opposition de deux dessinateurs

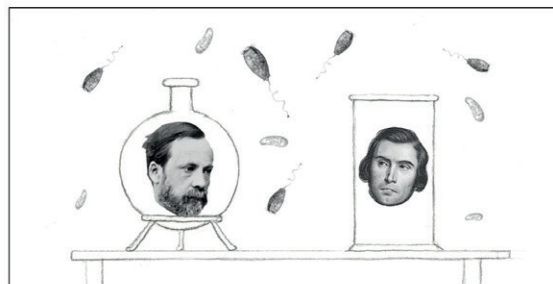
Jusqu’aux années 1860, les sciences du vivant travaillaient principalement à l’échelle humaine, en utilisant les ressources du dessin telles que nous les avons vues dans l’article précédent sur Léonard de Vinci. Le microscope était cependant inventé et utilisé depuis deux siècles. Les dessins étaient alors le seul moyen de rendre compte des observations effectuées par ce biais, à défaut de comprendre les phénomènes sous-jacents. Deux chercheurs ont alors joué un rôle majeur dans la naissance de la microbiologie : Louis Pasteur a montré qu’un microorganisme ne pouvait naître que d’un autre microorganisme, tandis que Koch a adapté la photographie aux images microscopiques (Schwartz & Perrot 2014). Cette dernière innovation nous écarte du dessin : elle marque une nouvelle orientation de la biologie vers l’ « objectivité scientifique », et elle nous rattache à l’état actuel de la discipline qui fait un usage massif d’imagerie microscopique (Dalton & Galison 2007)

En revanche, le dessin fait bien partie du paysage dans les travaux qui opposent Pouchet et Pasteur. Ces deux scientifiques étaient d’excellents dessinateurs (**Figures 1 et 2a**). Les observations dessinées de Pouchet étaient particulièrement fines et vivantes : plus tôt dans sa carrière, il était ainsi parvenu à prouver que l’ovulation chez la femme était spontanée, et non déclenchée par la fécondation. Pasteur, quant à lui, avait pratiqué le pastel et la gravure (Vallery-Radot 1912, Vallery-Radot 1987). L’imagination spatiale qu’il avait développée à travers ces pratiques artistiques a pu fortement l’aider à imaginer l’existence de deux versions symétriques d’une même molécule lorsqu’il a mené l’étude de l’acide tartrique qui a lancé sa carrière (**Figure 2b**, Gal 2019). Par ailleurs, Pouchet comme Pasteur étaient très attachés à la transmission des sciences. Pasteur faisait preuve d’un militantisme habile mais aussi parfois brutal. Pouchet, en tant que fondateur du Muséum de Rouen, n’avait pas ménagé ses efforts pour ouvrir les sciences à un public large et parfois défavorisé, publiant également plusieurs ouvrages de vulgarisation illustrés (Coquidé-Cantor 1992).

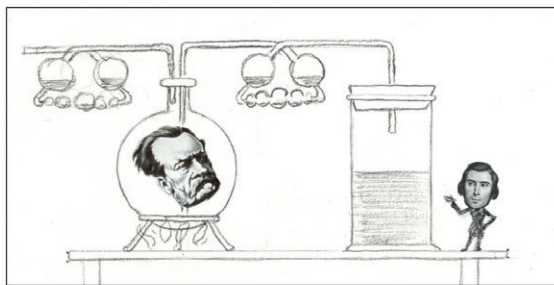
En 1859, Pasteur entrepris de faire définitivement taire la théorie des générations spontanée. Paradoxalement, cette ancienne théorie avait été réactivée par la découverte des micro-organismes, dont il était impossible à l’époque de tracer précisément la provenance. Pouchet, l’un des principaux partisans de ce courant, ne voulait pas que l’on parle de « génération spontanée » à propos des travaux auquel il avait consacré toute la fin de sa vie : il avait donné à sa théorie le nom d’ « hétérogénie ». Il pensait travailler avec des méthodes rigoureusement scientifiques, permettant selon lui de prouver que sous certaines conditions favorables, la vie pouvait émerger de la matière décomposée ou désorganisée. Pasteur n’y voyait que la variante moderne d’une croyance dépassée. Pendant plusieurs



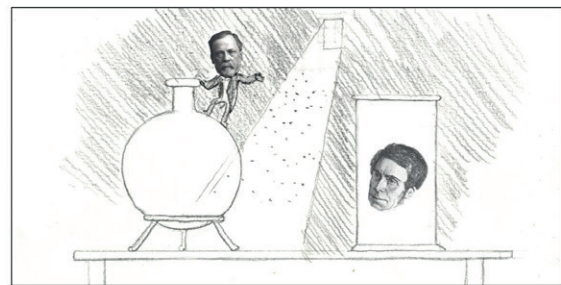
Cadrage des objets (2 ballons ou 1 ballon et 1 bécher). Les limites du cadre seront ajustées en fonction de la position précise de l'écran et du film semi-transparent.



« Vous n'allez tout de même pas prétendre que l'air est inutilement encombré de ces spores et de ces germes! »
« Et pourquoi pas? »



« Constatez par vous même, rien ne pourrait survivre dans l'air qui parvient jusqu'à mon infusion »



« Ces germes, ces spores, mesdames et messieurs... les voici! »

Figure 3 : Illustration du dossier de réponse à l'appel d'offre «Les deux théorie» en vue de l'exposition Pasteur

Le théâtre optique repose sur la superposition d'objets réels (ici des fioles) avec une image, grâce à un film semi-transparent incliné à 45. Ici, les «Fantômes» de Pasteur et Pouchet apparaissent dans les fioles et rejouent leur controverse. Conception P. Minet et R. Chabrier, dessin R. Chabrier

années, les deux chercheurs opposèrent leurs expériences, qui utilisaient des méthodes si différentes qu'elles ne pouvaient se contredire directement. Pasteur finit par convaincre l'académie des sciences en 1864, lors d'une audition restée célèbre, durant laquelle il fit appel à son sens de la mise en scène autant qu'à une logique bien plus cohérente que celle de son adversaire.

2 – Remettre en scène la controverse: un travail d'enquête

Lorsque la Cité des Sciences voulut organiser une grande exposition sur Pasteur en 2017, la controverse des générations spontanées faisait donc figure de passage obligé. Le commissaire Eric Lapie et son équipe décidèrent de lancer un appel d'offre pour mettre en scène ce débat scientifique sous la forme d'un théâtre optique : un dispositif aussi nommé « Pepper's ghost », qui permet de faire cohabiter le plan d'une image avec des objets réels, grâce à un film semi-réfléchissant incliné à 45°. Le sujet m'intéressait beaucoup, la forme également. Mon équipe de réalisation muséographique gagna l'appel avec le vidéaste Pascal Minet à la réalisation, tandis que je m'occupais du scénario et des textes.

Cette installation reposait sur un principe simple : les fantômes de Pasteur et Pouchet (en film) apparaissaient dans deux fioles (réelles), puis rejouaient le débat qui les avait opposés (**Figure 3**). En me penchant sur la documentation fournie par l'équipe de muséographie de la Cité des Sciences, qui travaillait sur le sujet depuis un an et demi, je constatais cependant une étrangeté : la plupart des textes qui m'étaient fournis prenaient le parti de Pouchet, et laissaient entendre que Pasteur n'avait pas gagné sur des arguments scientifiques. Il aurait surtout disposé d'un meilleur réseau social et aurait mieux su théâtraliser ses preuves. J'apprenais alors que cette interprétation était directement liée aux travaux de Bruno Latour dans les années 80 (Latour, 1985). A sa suite, un autre chercheur, Gerald L. Geison, avait étudié les carnets de laboratoire de Pasteur, et en avait déduit que ce dernier avait caché le résultat de certaines expériences car elles n'allaient pas dans le sens voulu (Geison, 1995). Ces publications, assez peu connues dans le milieu des sciences « dures » autant qu'« expérimentales », avaient en revanche fait grand bruit dans d'autres milieux universitaires liées à l'histoire des sciences, à la sociologie, ainsi qu'à la médiation culturelle et scientifique. A tel point que c'était un Pasteur quasiment cynique et discrédité que l'on me priait de mettre en scène. En me renseignant, je trouvais d'autres publications prenant la défense de Pasteur (Raynaud, 1999). Il y avait donc une controverse qui se rajoutait à la controverse, et le sujet apparaissait singulièrement plus compliqué que prévu.

Intrigué, je me rendis alors au musée de l'institut Pasteur avec Pascal Minet, où nous fûmes aidés par Maxime Schwartz et la conservatrice Muriel Hilaire-Soule. Là-bas, j'obtins une copie du texte de la conférence de Pasteur en 1864 (ainsi que de tous les articles qui précédaient), ainsi qu'une copie, plus rare, d'une conférence donnée par un assistant de Pouchet pour répondre aux arguments de Pasteur (Joly, 1864). La lecture de ces textes était une révélation, tout d'abord au niveau de la qualité du langage : ils me permirent de composer un dialogue crédible entre les deux chercheurs, suffisamment simplifié pour être compréhensible aujourd'hui, mais en ouvrant un accès vers l'inouï d'une langue plus précise et plus subtile que celle que nous pratiquons aujourd'hui dans les milieux scientifiques.

Cependant le texte de ces deux conférences comportait aussi une autre révélation, d'ordre logique. L'essentiel du débat y porte sur la question de savoir si l'air peut contaminer un échantillon. Pou-

chet soutient que c'est impossible, car l'air nous apparaîtrait beaucoup plus épais s'il devait contenir tous les germes nécessaires. Mais Pasteur insiste sur le fait que Pouchet voit l'air comme un milieu continu et partout identique, tandis que lui-même l'air voit comme un milieu non-homogène, où la présence de spore peut être plus ou moins forte, avec une grande part de hasard. Il s'agit donc là de deux cadres théoriques différents qui, avec les moyens de l'époque, ne pouvaient pas être totalement réfutés l'un par l'autre. Il était seulement possible de comparer leurs cohérences.

Ce changement de paradigme introduit par Pasteur, sur la base de la théorie cellulaire initiée par Rudolph Virchow avant lui, est extrêmement important : sur le plan de la logique, on peut le comparer à l'introduction de la mécanique quantique en physique. Mais cet aspect de la controverse initiale ne semble pas ressortir dans les travaux de Bruno Latour. L'analyse de ce dernier sur les mauvais arguments de Pasteur reste pourtant pertinente, en particulier lorsque Pasteur laisse entendre que Pouchet serait athée, devant un public acquis à la cause catholique. Mon intention n'était donc pas de m'opposer à l'interprétation de la controverse par Bruno Latour et ses nombreux lecteurs, mais d'utiliser cette lecture sociologique seulement là où elle était pertinente.

3 - Ecrire avec le mouvement

J'ai donc composé un dialogue qui replace Pasteur au niveau scientifique qu'il me semble mériter, tout en montrant une certaine rouerie et un indéniable sens de la mise en scène. Pouchet, de son côté, devait apparaître passionné et sympathique, mais prisonnier du cadre théorique qu'il avait construit. Comme je l'ai dit plus haut, le dessin jouait ici le rôle d'un terrain commun. Les personnages pouvaient donc tous deux évoluer dans un même univers de dessins de spores et de schémas d'expériences, de telle façon qu'un dialogue restait possible malgré l'opposition. Ce texte, que je propose à la lecture dans les pages suivantes (et en vidéo avec ce lien ci-dessous), constitue un exemple d'écriture conçue pour jouer étroitement avec le dessin autant qu'avec le mouvement des idées (voir **figure 4** en fin de chapitre)

En épilogue, l'expérience prit un dernier tour inattendu le jour du tournage. Inspirés par les caricatures de l'époque, nous avons pris le parti de représenter les personnages avec une grosse tête dessinée, montée sur un petit corps filmé en prise de vue réelle. Les images obtenues avec cette méthode, quoiqu'un peu sommaires pour un film, passent très bien dans un théâtre optique. Il était prévu que j'incarne le corps de Pouchet, tandis qu'un animateur de notre équipe devait incarner celui de Pasteur, tous deux en costume d'époque. Nous devons dire le texte en jouant pour avoir le bon rythme de mouvement, sur lequel les voix d'acteurs professionnels seraient rajoutés plus tard. Mais devant la caméra, le collaborateur qui devait jouer Pouchet perdit totalement la mémoire de son texte. En urgence, il fallut que je le remplace, quitte à rembourrer le costume et à tasser l'image pour apparaître plus râblais que je ne suis. C'est ainsi qu'en plus de composer les phrases à la place de Pouchet et de Pasteur, j'ai « dansé » chacun des deux personnages. C'était finalement le meilleur moyen de faire vivre l'écart entre leurs postures et leurs dynamiques, et de mettre l'ensemble au service du texte.

*La captation du théâtre optique (durée 7 mn) est disponible à l'adresse:
<https://vimeo.com/renaudchabrier/lacontroverse>*

Dialogue imaginaire entre les fantômes de Pasteur et Pouchet

(R. Chabrier, octobre 2017)

Dans le théâtre optique, deux ballons en verre sont disposés sur des trépieds. Le reste de la boîte est entièrement noir.

*Accroche vidéo montre une légère poussière lumineuse en suspension avec le titre :
« Félix Archimède Pouchet et Louis Pasteur dans La controverse »*

Dans le ballon de gauche, une fumée lumineuse apparaît puis s'échappe par le col (bruitage). Entre les deux ballons, la fumée prend la forme d'un personnage mi-caricatural (il a un petit corps et une grosse tête), mi-fantomatique.

Le personnage se pose à proximité du ballon de droite et toque dessus.

Pouchet : Monsieur Pasteur. Mon-sieur Pas-teur !

Le fantôme d'une tête apparaît dans le ballon. Il n'y a pas de corps, elle occupe toute la place.

Pasteur : Oui ? (*surpris*) Comment c'est encore vous Monsieur Pouchet ?

Pouchet : Oh, je vous vois venir : bien à l'abri de son prestige, monsieur Pasteur ne daigne plus me répondre.

Pasteur : Nous ne sommes plus de ce monde, monsieur. Nous avons tout le temps. De quoi s'agit-il ?

Pouchet : Et bien, de la doctrine des générations spontanées et de votre soi-disant théorie des germes, évidemment.

Pasteur : Vous aviez refusé d'en débattre en 1864.

Pouchet : La commission était acquise à votre cause !

Pasteur : Vous y aviez des amis, et votre comportement les a lassés...

Pouchet : Oublions tout cela. Voici une assistance respectable, et j'ose le penser, sans préjugés.

(il se tourne vers le public et se radoucit)

Mesdames et Messieurs, voulez-vous entendre cette belle idée injustement étouffée à l'époque de vos aïeux ? Monsieur Pasteur, acceptez-vous enfin un débat loyal ?

Pasteur : Soit. Expliquez-nous votre doctrine.

Pouchet : Avant toute explication, je veux montrer un fait, car c'est l'expérience qui doit nous guider dans la démarche scientifique.

Pasteur : En cela, je suis parfaitement d'accord avec vous.

Pouchet : *(d'un geste, il fait apparaître un liquide et des feuilles dans le ballon de gauche)*

Laissons infuser des feuilles à l'air libre, et obs-er-vons. En quelques heures, une pellicule se forme à la surface.

(Pouchet se tourne vers le public, et on visualise au fur et à mesure ses dessins d'observation au-dessus de sa tête)

D'abord, c'est un amas granuleux de matière organique, sans doute en décomposition. Puis des êtres simples y deviennent visibles, suivis par une foule d'infusoires, de moisissures et d'animalcules.

Ce miracle, chers auditeurs, chaque physiologiste l'a vu et dessiné mille fois sous le microscope, mais monsieur Pasteur semble à tout prix vouloir l'ignorer.

Pasteur : Alors comment l'expliquez-vous?

Pouchet : Je n'explique pas, je constate : les animalcules microscopiques, pour naître, n'ont pas besoin de parents. C'est la fertilité mystérieuse de la matière organique, combinée à celle de l'air et de l'eau dans une chaleur modérée, qui renouvelle la vie sous ses formes les plus simples.

Pasteur : Autrefois, on racontait aussi bien que les souris apparaissent spontanément dans les chemises sales. *(Le ballon de gauche se remplit de linge froissé, des souris y apparaissent)*

Pouchet : *(Pouchet balaie les souris d'un geste)* Je n'y crois pas plus que vous. Et pour éviter la confusion, j'ai donné à ma doctrine le nom «d'hétérogénie», c'est-à-dire la naissance d'un être sans parents semblable à lui. *(Le titre du livre apparaît au-dessus de lui)*

Pasteur : Vous attribuez à la matière une puissance créatrice bien singulière ! Elle égale celle de Dieu, voire elle le remplacerait. *(Vicieusement)* Ne seriez-vous pas matérialiste?

Pouchet : Oh, malhonnête ! Vous voudriez me faire passer pour un athée!

Pasteur : Ce n'était qu'une remarque. Laissons la science décider, et rien d'autre. Ces animalcules naitraient donc sans parents ?

Pouchet : J'en suis certains. Je ne les ai jamais vus.

Pasteur : Sans germes, introduits par maladresse?

Pouchet : Oui, et je sais ce que vous pensez. Dites-le donc plus clairement à notre public.

Pasteur : Très bien. *(Pasteur disparaît de son ballon et réapparaît avec un petit corps à côté de Pouchet)* *(démonstratif, un peu grandiloquent)* Mesdames et messieurs, je vais faire passer un rayon de lumière dans cette pièce *(visualisation)*.

Voyez-vous soudain comme la poussière vole et se dépose sans cesse autour de vous ?

Pouchet : Alors, venez-en au fait.

Pasteur : Je pense que vos expériences ne contrôlent pas bien la poussière. Vous croyez voir la vie apparaître spontanément, mais elle vient de germes introduits par négligence.

Pouchet : Enfin, la poussière ne contient pas de germes !

Pasteur : Vous parlez de la poussière statique, que l'on trouve sur le sol. Mais les microorganismes vivants sont bien plus fins et légers que la suie. (*Pasteur entre en lévitation*) Si l'air contient des germes, c'est dans la poussière en mouvement que nous devons les chercher.

Pouchet : Pour cela Monsieur, (*il sort un aéroscopie à la façon de Tex Avery*) j'ai justement inventé l'aéroscopie. Pendant 10 ans j'ai cherché vos germes dans l'air du monde entier sans rien trouver !

Pasteur : (*Haussant les épaules*) Vous cherchiez mal, et aux mauvais endroits.

Pouchet : Tout ceci est absurde, à la fin ! Si l'air contenait tous les spores et les œufs indispensables pour expliquer les organismes que l'on voit incessamment surgir partout et dans tout, il en serait absolument et inutilement encombré. Au lieu d'un air transparent, c'est un épais brouillard que nous aurions sous les yeux!

Pasteur : Pour peupler une infusion, pas besoin que les germes soient si nombreux. Un seul peut suffire.

Pouchet : (*ironique*) Un seul ? Vous croyez donc à un monde bien fantastique !

Pasteur : (*sans se démonter*) De plus, vous supposez que l'air est partout identique, mais je soutiens que l'air n'est pas un milieu continu. Si vous en prélevez un volume au hasard, il pourra contenir des germes, ou pas. Je vais en faire la démonstration

(*Visualisation de l'expérience dans le flacon de droite*)

Faisons bouillir une infusion de levure, et avant qu'elle ne refroidisse, fermons rapidement le flacon en passant le col à la flamme. Ce liquide pourtant très putrescible restera intact des semaines, des mois s'il le faut.

Pouchet : (*désolé*) Mais c'est bien le problème ! Privée d'air, et torturée par le feu, votre préparation n'est plus assez fertile !

Pasteur : (*sans se laisser interrompre*) Chers spectateurs, ce liquide stérile va maintenant être exposé à l'air libre, et donc aux poussières. Je casse le col du flacon pour faire rentrer un peu d'air (*bruitage d'aspiration*), puis je le referme juste après. Que va-t-il se passer?

Et bien, les résultats sont très variables.

Dans un cas, nous verrons proliférer le pénicillium glaucum, ou une autre espèce moins habituelle. (*visualisation sur le flacon de droite*)

Dans un autre cas, il ne se passera rien du tout. (*visualisation sur le flacon de gauche*)

Si l'air est pris dans une rue poussiéreuse, les flacons contaminés seront nombreux. Sur une montagne où l'air est plus pur, au contraire, les flacons resteront souvent intacts. (*La montagne et la rue*)

apparaissent respectivement dans les flacons de gauche et droite)

Ne pas contrôler la poussière, c'est s'exposer aux germes. Voilà pourquoi vos expériences et celles de nos prédécesseurs étaient si contradictoires.

Pouchet : Enfin c'est trop facile ! Vous ne pouvez pas dire qu'il y avait des germes ici et pas là, uniquement pour expliquer vos résultats et contester les nôtres!

Mesdames et Messieurs, Pasteur essaie de vous manipuler ! Et je le prouve, car moi aussi j'ai gravi des montagnes pour ouvrir mes flacons d'infusion de foin dans l'air pur, et je n'ai vu aucune différence avec l'air de la rue !

Pasteur : Monsieur Pouchet, il y a tant de façons de compromettre une expérience, que je ne pouvais pas passer ma vie à reprendre et contester les vôtres.

Pouchet : Quel mépris ! *(il retourne dans le ballon de gauche. La tête mécontente y reste un peu visible, comme celle de Pasteur au début)*

Pasteur : Monsieur Pouchet, ne vous vexez pas... Pour étudier correctement les microbes, il fallait une nouvelle science, la microbiologie, et j'étais justement en train de l'inventer.

(le col de cygne et la planche des expériences de pasteur apparaissent)

Mais votre remarquable opposition scientifique fut utile : elle m'encouragea à faire des expériences grâce auxquelles plus personne ne croit aujourd'hui aux générations spontanées. *(la tête de Pouchet s'efface)*

(S'adressant au public)

Mesdames et messieurs, je peux l'affirmer: animaux, humains, plantes ou microbes, il n'y a pas d'êtres vivants sans parents !

Il se volatilise en poussières lumineuses, laissant seuls les deux ballons.

Une légère poussière lumineuse reste en suspension et le titre revient.

Principales sources de documentation pour l'argumentation:

Pasteur, Rapports d'expériences, communications et conférences sur les générations spontanées, de 1860 à 1864 (œuvres complètes, T2a, p192-346)

Joly N., Conférence publique sur l'hétérogénéité, juin 1864 (Argumentation d'un des principaux collaborateurs de Pouchet en réponse à la conférence de Pasteur d'avril 1864)

Principales sources pour le contexte social/culturel :

Latour B., Pasteur et Pouchet, hétérogénéité de l'histoire des sciences 1989 In Michel Serres (sous la direction de) *Eléments d'histoire des sciences*, Paris, Bordas pp. 423-445, 1989

Raynaud D., La correspondance de F-A. Pouchet avec les membres de l'Académie des sciences : une réévaluation du débat sur les générations spontanées, HAL, novembre 2005

Coquidé-Cantor Maryline, Pouchet, savant et vulgarisateur, thèse de doctorat, univ Paris 11, 1992

Schwartz M, Perrot A, Pasteur et Koch, un duel de géants dans le monde des microbes, Odile Jacob



«C'est la fertilité mystérieuse de la matière organique, combinée à celle de l'air et de l'eau dans une chaleur modérée, qui renouvelle la vie sous ses formes les plus simples.»



«Mesdames et messieurs, je vais faire passer un rayon de lumière dans cette pièce. Voyez-vous soudain comme la poussière vole et se dépose sans cesse autour de vous ?»



«Monsieur Pouchet, il y a tant de façons de compromettre une expérience, que je ne pouvais pas passer ma vie à reprendre et contester les vôtres.»

Figure 4 : Rendu final des images projetée dans le théâtre optique

Chapitre 6

L'aventure de Globule : rencontre avec une cellule immunitaire



Chapitre basé sur la réalisation
du livre expérimental «Globule, le magazine de toutes les cellules»

Projet soutenu par les Labex DCBiol et CelTisPhyBio / CellNScale
de 2016 à 2018

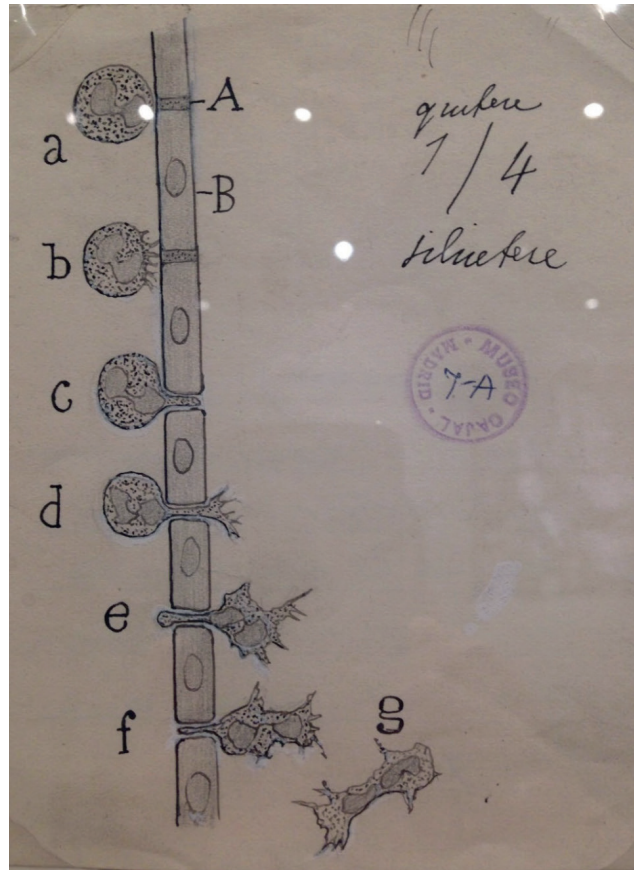


Figure 1 : Migration d'une cellule immunitaire à travers un épithélium par Ramon y Cajal, vers 1900
Museo Cajal, Madrid, photographie de Mathieu Piel

L'aventure de Globule : rencontre avec une cellule immunitaire (Troisième expérience de réalisation)

1 – Entrée en matière: l'apparition des cellules immunitaires

Dans les années 1880, peu après les grands succès de Louis Pasteur sur la vaccination, un chercheur russe nommé Ilya Metchnikov s'intéressait lui aussi à l'immunité. En étudiant des larves d'étoiles de mer, il remarqua des cellules qui venaient s'attaquer aux intrusions étrangères, telles que la piqûre d'une aiguille de sapin. Il en distingua deux sortes : les « macrophages » et les « microphages » (aujourd'hui appelés « neutrophiles »). Poursuivant ses recherches à l'Institut Pasteur à partir de 1888, il obtint le prix Nobel de médecine en 1908 pour sa description de la phagocytose, ainsi que l'on nomme le processus par lequel les macrophages incorporent un corps étranger pour le détruire.

L'immunité commençait à apparaître sous un jour étonnant. Les cellules immunitaires faisaient bien partie de notre corps, au même titre que celles de la peau ou des muscles, mais au lieu d'être intégrées dans un tissu comme ces dernières, ou d'être simplement entraînées par le flux du sang comme les globules rouges, elles étaient capables de se déplacer de façon autonome, d'une façon comparable aux amibes. En 1918 le chercheur espagnol Santiago Ramon Y Cajal, célèbre aujourd'hui pour ses prodigieux dessins d'observation de neurones, traça ainsi les étapes de la migration d'une de ces cellules immunitaires à travers la paroi d'un vaisseau sanguin (**Figure 1**). Cependant de telles observations de cellules en mouvement restaient difficiles au début du 20ème siècle. Les bases de l'analyse du mouvement animal avaient bien été posées par Jules-Etienne Marey, grâce à l'introduction de la chronophotographie (Marey 1894), mais il fallut attendre la fin du 20ème siècle pour qu'une telle démarche soit applicable en microbiologie, avec l'aide des microscopes automatisés et du traitement d'images informatique. Toute une gamme de mesures (détection de contours, flux, orientation des déplacements...), qui faisait autrefois l'objet d'un long travail sur table lumineuse et papier calque, devinrent alors beaucoup plus accessibles (à défaut d'être réellement moins laborieuses).

La physique, au cours du 20ème siècle, avait fait de son côté des progrès qui permettaient de donner beaucoup plus de sens à ces observations : comment imaginer, auparavant, que l'expérience de se déplacer dans l'eau, à l'échelle microscopique, ressemble à celle de se déplacer dans une piscine de miel épais, si on la transpose à l'échelle humaine ? Le mouvement des cellules ouvrait sur un monde étrange, mais en partie accessible à condition d'user des bonnes métaphores. Pendant ce temps, la compréhension de l'immunité avait buté sur un problème : les macrophages étaient manifestement impliqués dans une immunité « innée », disponible dès la naissance¹, tandis que les molécules d'an-

¹ L'immunité « innée » est aussi due à un autre mécanisme nommé le « complément »

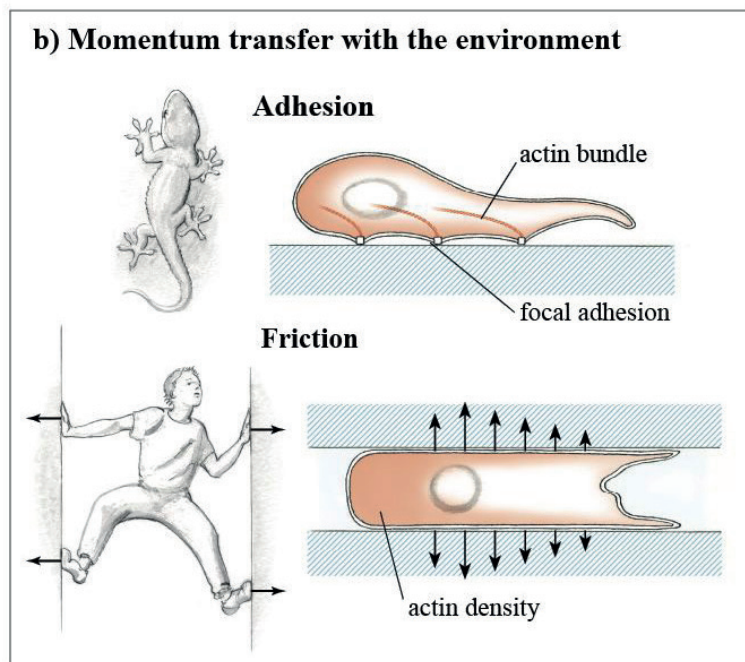
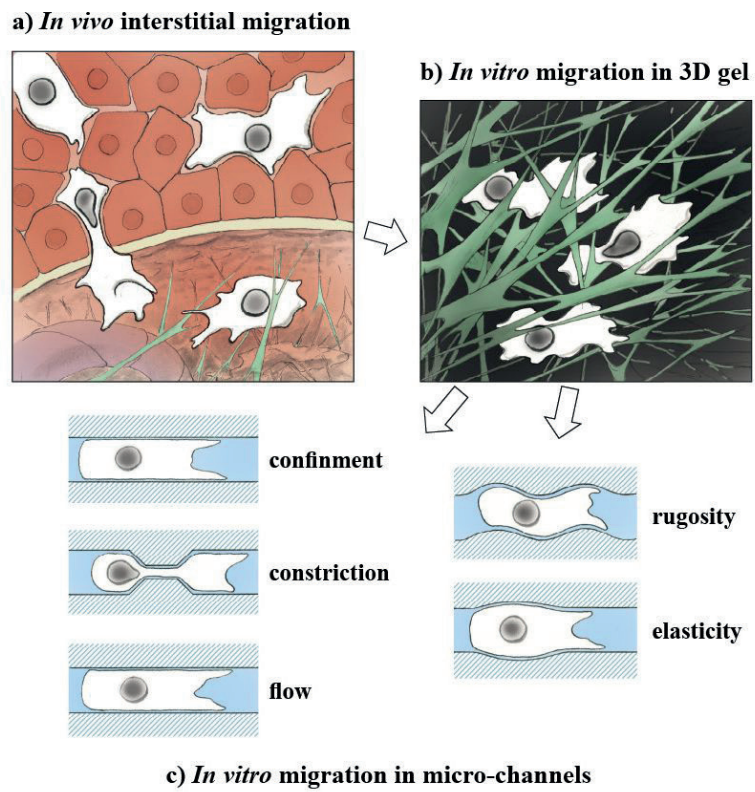


Figure 2 : Deux exemples d'illustrations réalisées pour le dossier de financement du projet MICEMICO auprès de la fondation Inabiosanté en 2008 (R. Chabrier)

ticorps étaient impliquées dans l'immunité « acquise » : celle qui peut être gagnée, en particulier, par la vaccination. Aucune théorie ne parvenait à rassembler les deux.

En 1973, Ralph Steinman et Zanvil Cohn observèrent alors une cellule capable d'effectuer une sorte de phagocytose, comme les macrophages (Steinman & Zanvil 1973). Son aspect était cependant différent, car elle était dotée de protrusions rappelant la forme de dendrites. Ils l'appelèrent donc Cellule Dendritique. Par la suite, il s'avéra que cette cellule était la principale pièce manquante dans la compréhension du système immunitaire : celle qui arrive tôt sur les lieux de l'inflammation, comme les cellules liées à l'immunité innée, mais qui en repart pour aller porter dans les ganglions lymphatique l'information nécessaire pour sélectionner la réponse à une menace nouvelle².

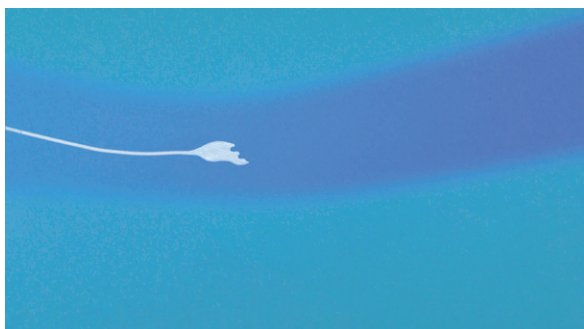
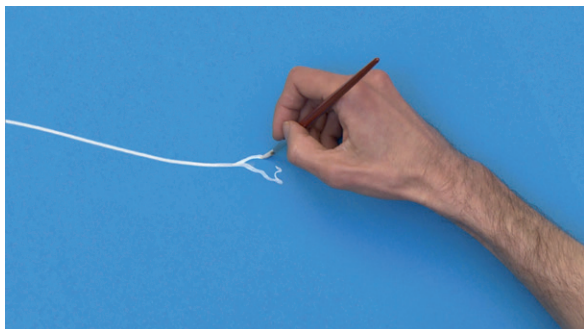
2 – Dessiner pour les chercheurs, entre biologie et physique

Dans les années 2000, prenant de plus en plus conscience du rôle joué par les cellules dendritiques, des chercheurs se posèrent la question de les utiliser pour favoriser une réponse immunitaire contre le cancer. En 2008, Matthieu Piel et Ana-Maria Lennon, de l'Institut Curie, montèrent un important projet interdisciplinaire pour étudier la question sous tous les angles requis par une telle combinaison de mouvements et de processus biochimiques. Ayant passé la première étape de sélection, ils se posèrent la question d'unifier les illustrations de leurs dossiers : différents laboratoires, issus de différentes disciplines, montraient en effet des illustrations si disparates qu'elles risquaient de faire passer les lecteurs à côté du message. Matthieu Piel eu alors l'idée de me commander une série d'illustrations dont la réalisation fut, pour eux comme pour moi, une expérience étonnamment réussie (**Figure 2**). Ils remportèrent l'appel d'offre et purent ainsi initier un vaste programme d'étude lié à l'immunothérapie. De plus, ils se servirent des dessins pour leurs présentations pendant les 10 ans qui suivirent. Mais le plus intéressant, en ce qui nous concerne ici, fut la phase de conception des dessins : nous nous rendîmes tous compte que ce travail déclenchait un dialogue constructif entre les chercheurs, et levait même des zones d'obscurité entre eux.

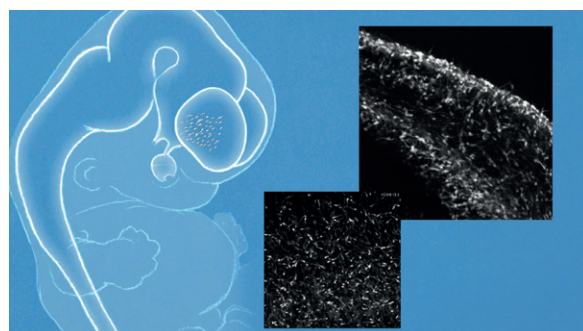
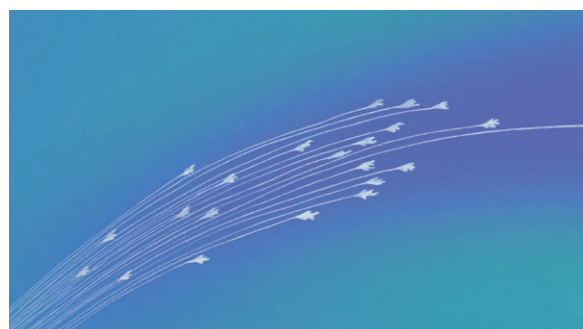
Par la suite, les chercheurs de l'Institut Curie m'offrirent une vingtaine d'occasions de travailler, en fonction de leurs besoins. Je ne cherchais pas à développer cette activité au-delà de bouche à oreille, car ce travail se déroulait dans le cadre de prestations ponctuelles, dans lesquelles je tenais le rôle d'un « illustrateur indépendant ». L'essentiel de mon énergie était concentré sur des projets muséographiques d'une échelle différente : ils impliquaient des budgets, des publics et des temps de réalisations nettement plus importants (note : entre 600 et 1200€, entre 15000 et 40000€), demandaient l'organisation d'une équipe et la gestion d'un atelier, et supposaient, enfin, d'entretenir un effort de recherche et de développement soutenu. En me commandant une illustration ou une animation, les chercheurs pouvaient donc bénéficier d'un système de production opérationnel, mais le financement principal de ce dernier devait être assuré par d'autres voies. D'autre part, comme j'ignorais l'usage que les chercheurs faisaient de mes dessins scientifiques après leur création, il était difficile à l'époque de mesurer ou d'améliorer leur durabilité. Contrairement à ce qui semblerait aujourd'hui logique pour un travail de « design », je n'étais donc pas en mesure de valoriser le rôle de conseil qui accompagnait souvent la création d'un dessin.

²Cette découverte valut à Steinman un prix Nobel en 2011

a



b



c

Figure 3 : Evocation du mouvement des neurones pendant le développement embryonnaire dans le court-métrage «naissance d'un cerveau» (Chabrier 2014)

a: animation d'un cône de croissance

b: évocation d'un ensemble d'axone et changement d'échelle

c: évocation de la migration des interneurones

La nature discrète mais finalement assez régulière de cette activité me permit de me familiariser progressivement avec le type de biologie pratiquée à l'institut Curie, et d'apprécier le dialogue qui se nouait à chaque fois avec les chercheurs concernés, qui étaient le plus souvent des chefs d'équipe. Il n'était pas question de hiérarchie ni d'autorité, ce qui aurait parasité l'enjeu principal : transcrire sur le papier ce que les chercheurs avaient dans la tête mais ne pouvaient représenter eux-mêmes. Le plus souvent, c'était la représentation de l'espace qui posait problème. Ma méthode consistait donc à évaluer la spatialité des phénomènes, en posant des questions qui remettaient souvent en cause les représentations schématiques. Je pouvais alors proposer une composition à partir d'esquisses, avant de passer à un dessin plus abouti et lisible une fois que l'esquisse était validée. Je me formais ainsi « sur le tas » à différents aspects de la biologie cellulaire et moléculaire, et je prenais le temps de lire quelques livres plus spécialisés sur le mouvement des cellules (Bray 2000). Différentes techniques de représentation purent être testées en fonction des demandes : dessin à la main, encrage, dessin vectoriel, composition d'image, animation vectorielle, et même animation par morphing. Le plus souvent, ces outils étaient disponibles parce que je les avais mis en place pour les travaux muséographiques.

3 – Muséographie et recherche: la possibilité d'un cercle vertueux

En retour, la Cité des Sciences tira elle aussi les bénéfices de ces expérimentations lorsqu'elle me sollicita en 2014 pour concevoir le film « Naissance d'un cerveau » (voir référence de film [1]). De nombreux aspects du développement embryonnaire sont en effet liés à la capacité de mouvement des cellules : par exemple, le cône de croissance des neurones en développement s'apparente sous certains aspects à une cellule en migration, tandis que les interneuronnes déplacent entièrement (Figure 3). Etant déjà familiarisé avec ce type d'études, je fus capable d'intégrer en un mois une information qui aurait découragé n'importe quel réalisateur. Le référent scientifique du film était Alain Chedotal, de l'Institut de la Vision. En tant que directeur de recherche, il était trop occupé pour suivre pas à pas la conception d'un film. Pour répondre à mes questions sur le développement embryonnaire, il me donna deux « textbooks » à lire.

Les « textbook » ou « manuels », en sciences, sont des outils précieux : ce sont de gros ouvrages, souvent très illustrés, auxquels des petits groupes de chercheurs consacrent plusieurs années de leur vie afin de synthétiser et de transmettre tout ce qui leur est possible sur un domaine. Pour prendre connaissance de la culture visuelle et de la logique d'une discipline, il est extrêmement efficace de pouvoir les consulter. Mais le plus souvent, leur présentation est inutilisable telle quelle, pour un public qui n'a pas fait les études requises. Il faut réorganiser toute l'information, de façon à en extraire une narration accessible. Dans le cas du développement du cerveau, par exemple, les différents chapitres des deux manuels correspondaient à différents sous-domaines d'études, relativement séparés les uns des autres (cellules souches, migration, axone, dendrites...). Pour le film, il était nécessaire de relier ces différents aspects du processus dans même enchaînement temporel.

Deux types d'institutions complètement séparées, les Institut de Recherche et la Cité des Sciences, trouvaient donc avantage à ce qu'un « designer » transpose d'un côté les outils et connaissances qu'il avait acquis de l'autre. Tandis que mon expérience dans l'utilisation du dessin et de l'animation pour la transmission des sciences du vivant se consolidait à travers ce type de réalisations, je prenais conscience d'une difficulté croissante à valoriser cette expertise dans le cadre des appels d'offre de la Cité des Sciences et de l'Industrie.

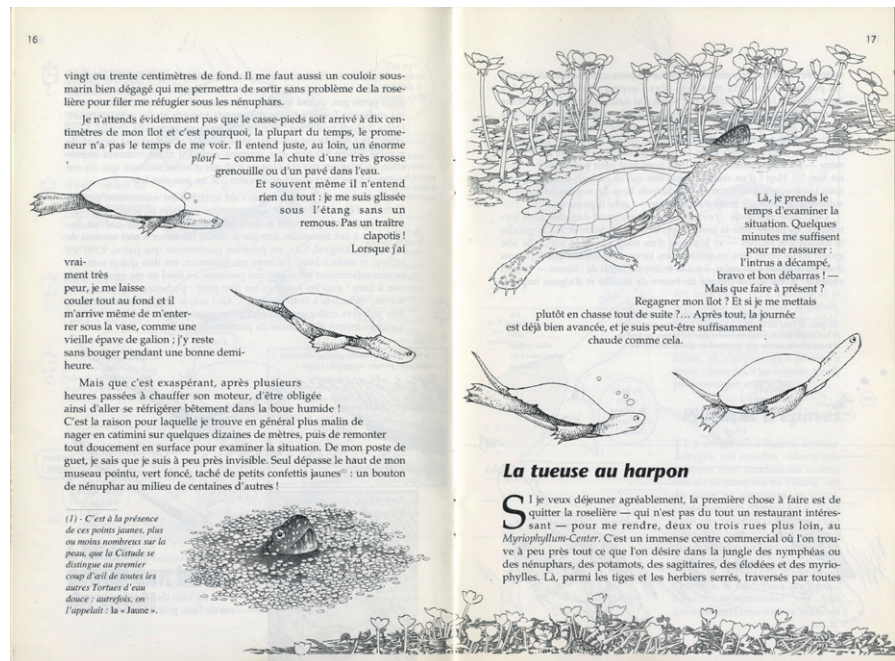
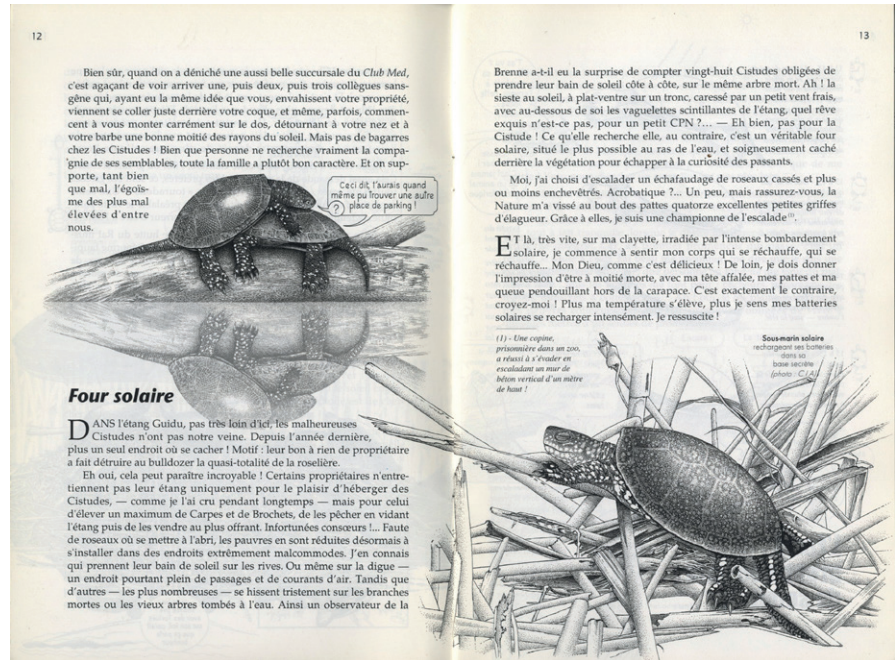
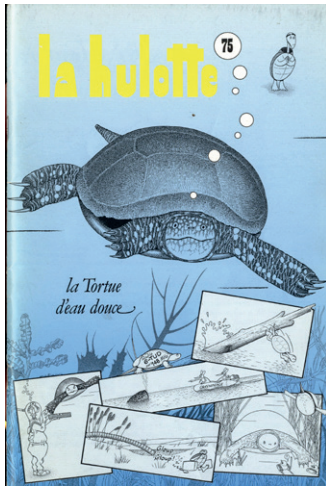


Figure 4 : Le magazine «La Hulotte» raconte tous les six mois la vie d'un animal ou d'une plante, en utilisant largement la géométrie sans point de vue dans ses compositions.

Extrait du numéro 75, dessins et texte de Pierre Déom.

4 – Du projet muséographique au projet de livre

Les expositions « Darwin » et « Pasteur », parmi d'autres auxquelles j'ai pu participer, montraient en effet une tendance de plus en plus affirmée à valoriser les angles historiques et sociologiques. Cette démarche était très intéressante, mais elle s'accompagnait d'une prise de distance avec les sciences actuelles, qui se traduisait elle-même par un appauvrissement du travail de représentation demandé par les muséographes. Il devint par exemple possible, et même souhaitable, de montrer l'agitation moléculaire par le mouvement d'un point vaguement animé sous After Effect (exposition « Froid »), ou d'évoquer la théorie de l'évolution à l'aide de symboles sans prendre le risque de montrer un seul corps animal (exposition « Darwin »). Le « Motion Design » donnait à ce type de représentation animée un aspect moderne à court terme, bien qu'il se fût agi d'une authentique régression. Certaines sociétés de production concurrentes ou partenaires n'hésitèrent pas à aller dans ce sens, la survie économique imposant de s'adapter à l'évolution du marché. Mais je ne voulais pas m'y résoudre, ce qui me coûta plusieurs appels d'offre.

Il devint de plus en plus évident que la muséographie scientifique évoluait dans un sens peu conciliable avec l'idée de faire accéder le grand public à un inouï. La recherche simultanée de l'« effet waou » et de la baisse des coûts par production³, additionnée à l'idée que les détails scientifiques n'intéressent au fond personne et que les images des chercheurs sont par nature incompréhensibles, laissait de moins en moins la possibilité aux auteurs et réalisateurs de réellement prendre en main leur sujet. Puisqu'une authentique démarche de design devenait impraticable, il était temps de trouver une autre façon de travailler en amont des appels d'offres.

Sachant qu'une grande exposition liée à la biologie cellulaire serait nécessairement programmée un jour, il me semblait tout à fait possible d'anticiper les besoins de narration et de représentation qui n'allaient pas manquer de s'exprimer. Mais comment répondre à une demande future avant que les commanditaires habituels n'en aient conscience ? Ceci suppose tout avant tout de pouvoir faire un investissement. Cependant, le secteur économique que l'on appelle l'« industrie » culturelle ne dispose pas de moyens de financement comparable avec ceux de la grande industrie, excepté pour les produits de pure fiction. Le moyen le plus efficace pour structurer une proposition nouvelle avec des moyens réduits est alors souvent la réalisation d'un livre. L'exposition « Microbiome », basée en 2017 sur le best-seller « Le charme discret de l'intestin » (Enders, 2014) donne ainsi l'exemple d'une exposition largement préparée par un ouvrage imprimé, dont le succès n'avait pas été anticipé au départ.

C'est dans ce contexte, début 2016, que Daria Bonazzi alors doctorante à l'Institut Pasteur donna une idée originale à Matthieu Piel : lui et moi étant passionnés par le magazine « La Hulotte », nous pourrions créer un équivalent... mais en parlant des cellules. « La Hulotte » est un phénomène unique dans l'édition et la presse française : totalement indépendant, disponible sur abonnement, il est diffusé à 150000 exemplaires et se consacre environ tous les six mois à un animal ou une plante, existant sur le sol français ou européen. (Figure 4) Des dessins à l'encre de grande qualité sont associés à des textes rédigés le plus souvent du point de vue de l'animal, ou sous forme d'interview.

³ Pour comprendre l'évolution des structures de production en muséographie scientifique, il est nécessaire de distinguer le budget global d'une exposition, et le budget alloué à chaque élément séparément: les expositions de plus en plus ambitieuses au cours des années 2010, à coût constant, se sont souvent traduites par une baisse des budgets *par* production.

a

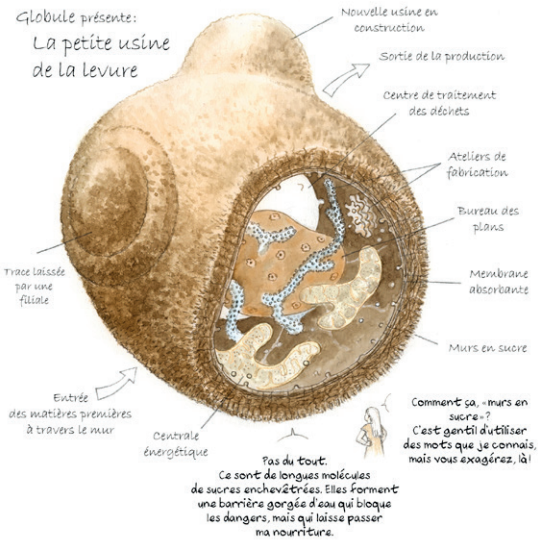


Figure 5 : Les organismes unicellulaires et pluricellulaires n'ont pas les mêmes enveloppes

Les organismes unicellulaires sont souvent protégés par une paroi rigide, constituée de molécules particulières que les cellules immunitaires savent souvent reconnaître.

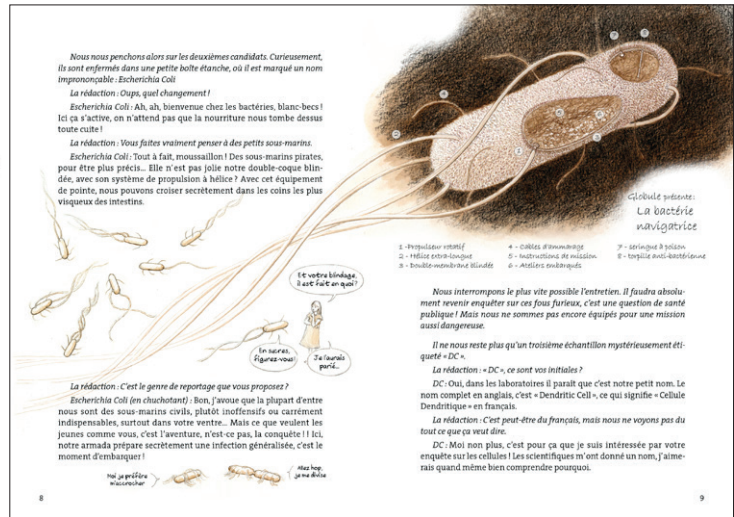
a : rencontre avec une levure (la paroi a été ouverte)

b : rencontre avec une bactérie (la paroi a été ouverte)

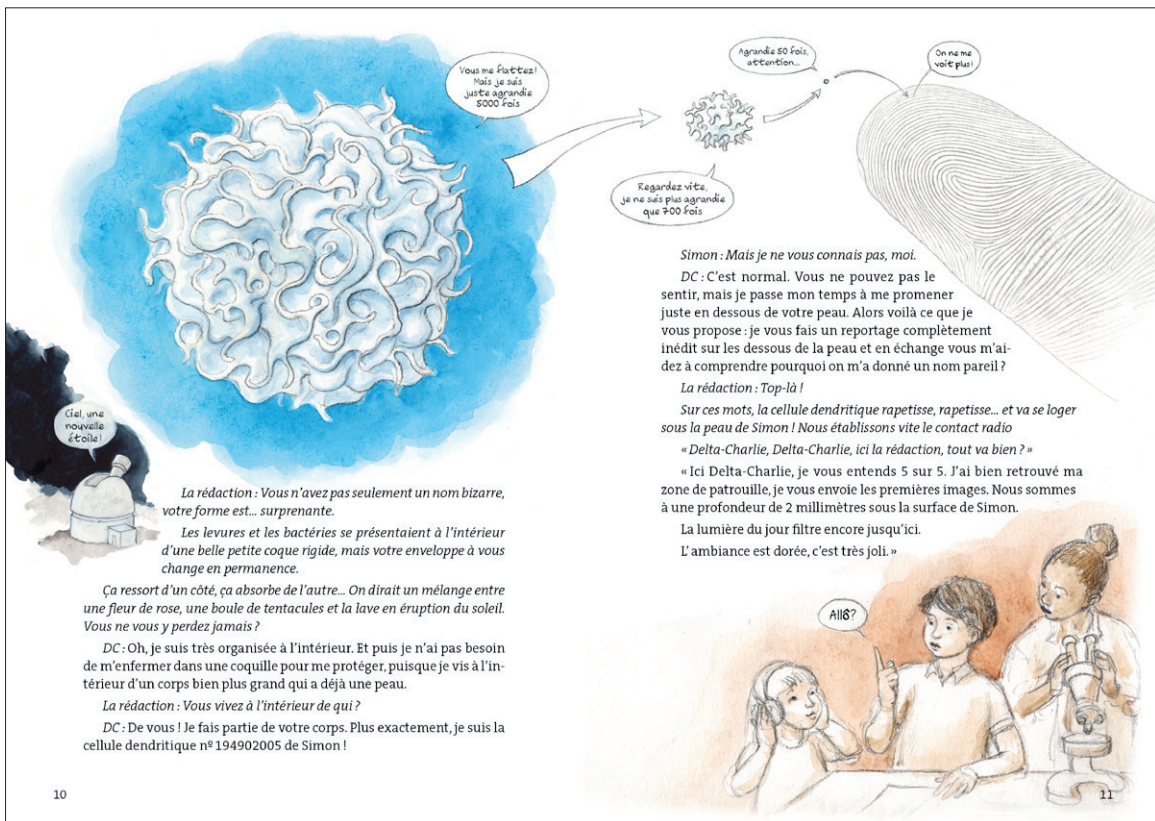
Les organismes pluricellulaires mobiles, au contraire, peuvent jouer sur la spécialisation de certaines cellules qui vont assurer la protection, en produisant une peau ou une carapace, ou qui vont assurer la structure, en produisant un squelette, un exosquelette ou encore des fibres.

Les cellules animales, de façon générale, n'ont donc pas besoin d'être limitées par autre chose qu'une membrane de lipides très souple.

c : rencontre avec une cellule dendritique (Pages extraites de Globule vol.1, dessins R. Chabrier)



b



c

La combinaison des images et des textes donne lieu à des mises en pages variées dans lesquelles on reconnaît souvent l'efficacité de la géométrie sans point de vue. Mais surtout, la lecture d'un numéro de la Hulotte ouvre un inouï dans le sens le plus pur : un arbre, le plus souvent disponible depuis longtemps sous nos yeux, devient alors visible.

Était-il possible de composer une histoire de la même manière, mais en parlant de cellules qui par nature resteront imperceptible, même si nous les avons sous les yeux ? L'inouï auquel le livre donnerait accès serait nécessairement d'un autre ordre : il s'agirait de l'inouï de la microscopie bien entendu, mais aussi de l'inouï qui se dégage de notions plus abstraites, lorsqu'on accepte de les creuser un peu... comme l'immunité par exemple. Nous décidâmes de relever le défi, en commençant par une cellule qui avait toutes les qualités requises pour faire figure d'héroïne : la cellule dendritique. Le labex CelTisPhyBio et le labex DCBiol acceptèrent chacun d'investir 5000 € dans le projet. Matthieu Piel, Ana-Maria Lennon et moi-même commençâmes alors le travail.

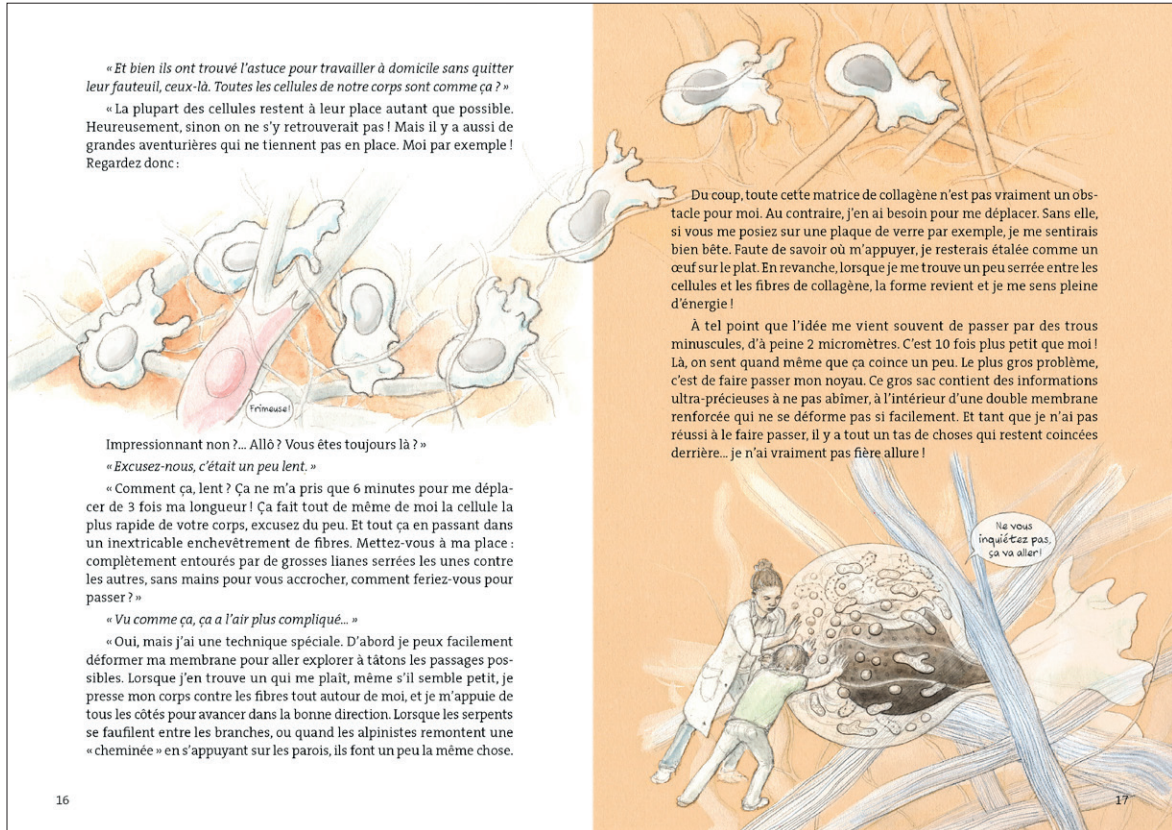
5 – Le premier numéro de Globule

La conception du premier numéro de « Globule, le magazine de toutes les cellules », fut un travail riche et complexe. Il ne s'agissait pas de faire « un » ouvrage, mais de démarrer une série de publications : rapidement, l'idée me vint d'introduire des personnages humains, enfants et adolescents, qui pourraient dialoguer avec les cellules. Ils aideraient les lecteurs à rentrer dans le sujet, tout en assumant l'existence d'un écart important entre les deux échelles. La cellule dendritique tint ses promesses : plus je discutais avec Matthieu Piel et Ana-Maria Lennon, plus je me rendais compte que les cellules immunitaires constituaient une « porte d'entrée » insoupçonnée sur la biologie. Elles poussent à s'intéresser aux êtres vivants sous un angle inhabituel, qui met en valeur à la fois leur mobilité et la façon dont ils se protègent (**figure 5a, 5b et 5c**)

Je décidais que ce serait la simple curiosité qui pousserait le groupe d'enfants à s'intéresser aux cellules : les informations requises pour comprendre les enjeux de la mobilité et de la protection apparaîtraient progressivement, au fur et à mesure de leurs conversations avec une levure, avec une bactérie et enfin avec la cellule dendritique, autour de laquelle allait s'articuler l'histoire principale. Pour développer cette dernière, il existait un scénario relativement évident : un enfant se coupait, une infection commençait, et il n'y avait plus qu'à suivre le voyage d'une cellule dendritique, depuis les lieux de la coupure jusqu'aux ganglions, pour décrire sa fonction. C'est d'ailleurs ce scénario très simple que nous avons utilisé, en parallèle à la réalisation de Globule, pour structurer un court-métrage présentant le travail de l'équipe de Matthieu Piel (voir référence de film [7]) (Note : «The Big Squeeze: What Dendritic Cells Do to Fight Infection» a été primé durant la conférence de l'American Society for Cell Biology en 2016). Mais dans le cadre d'une histoire plus longue, il y avait mieux à faire. En effet, la cellule dendritique a une vie, avant l'évènement éventuel qui la pousse à rejoindre un ganglion lymphatique. L'immense majorité des cellules dendritiques ne rencontre d'ailleurs jamais une infection. Il était donc plus intéressant de consacrer une large part du récit à la vie de cette cellule avant qu'elle ne découvre son propre rôle (**figure 6a**). Plus tard, vers le milieu de l'histoire, l'enfant auquel appartient cette cellule se coupe, et les évènements se précipitent. (**figure 6b**).

Matthieu Piel et Ana-Maria Lennon pouvaient m'expliquer eux-mêmes de nombreux aspects de la vie « normale » d'une cellule dendritique. Je n'échappais cependant pas à la lecture d'un « textbook » d'immunologie, et j'en survolais un autre de biophysique. Cependant, tandis que ma vision du mou-

a



b

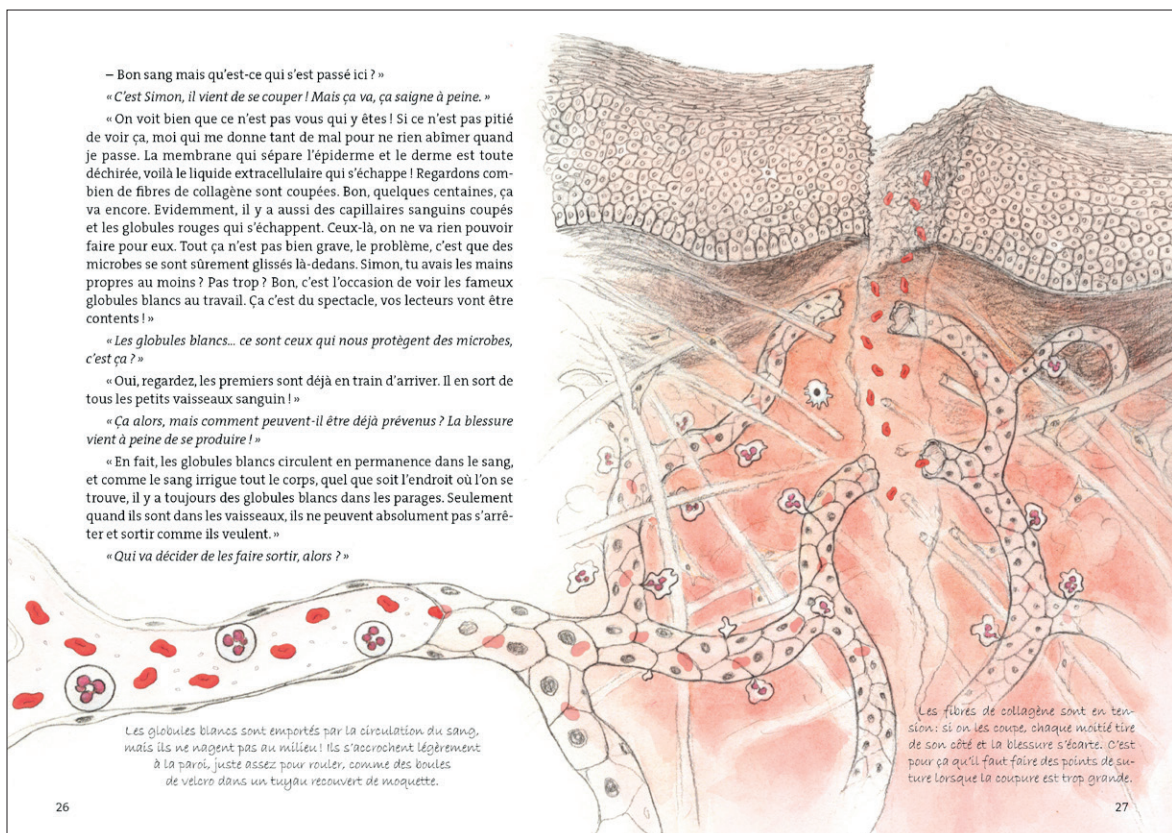


Figure 6: La vie habituelle d'une cellule dendritique (a), et l'évènement d'une coupure (b)

Pages extraites de Globule vol.1, dessins R. Chabrier

vement et des actions de la cellule dendritique se précisait, je restais sur ma faim lorsque je posais des questions sur le milieu dans lequel elle évoluait. A quoi ressemblaient vraiment les dessous de la peau, traversés de fibres de collagène ? Sans ces informations, il m'était difficile de dessiner et de raconter le paysage dans lequel évoluait la cellule. Le collagène devint ainsi rapidement l'objet d'une deuxième enquête, plus difficile à vrai dire que celle qui concernait la cellule dendritique. Danijela Vignjevic, de l'Institut Curie, me fournit des images microscopiques en volume d'un échantillon de fibres (**Figure 7**, page suivante), que je parvins à visualiser en stéréoscopie avec l'aide de la société Alioscopy. Il s'avéra plus tard que ce type d'imagerie commençait tout juste à être disponible, et que je posais ma question en quelque sorte deux ans trop tôt.

Ameya Murukutla, une jeune biologiste en master venue faire un stage dans mon atelier, m'aida à chercher les réponses à d'autres questions : par exemple, comment les fibres se rattachent-elles à la membrane basale ? Ce type d'information, que la plupart des chercheurs considérerait sans importance pour leurs études, devenait incontournable dans le cadre d'une réalisation comme *Globule*. Mais nos moyens étaient limités. Au bout d'un moment, j'ai senti que je pouvais dessiner ce paysage de collagène et qu'il serait raisonnablement juste, à défaut d'être réaliste, parce que les fibres se déployaient de façon fluide au bout de mon crayon et de mon pinceau. Sans plus me référer à une quelconque documentation, je m'installais à ma table et je dessinais un paysage de sous l'épiderme (**Figure 8**, page suivante) Cette expérience avait évidemment beaucoup à voir avec l'approche chinoise du paysage, dans laquelle le peintre ne cherche pas à peindre « sur le motif », ni même « de mémoire », mais plutôt comme le prolongement naturel de tout un travail d'intégration (Jullien, 2003).

La cellule dendritique et le collagène correspondaient ainsi à deux inouïs distincts, qu'il fallait chercher à des sources différentes pour pouvoir les rassembler dans un même dessin, ou dans le fil d'une même histoire. Comme je l'ai dit plus haut, faire jouer l'écart entre deux inouïs est le meilleur moyen de créer du « commun » dans un dessin scientifique, et de rendre l'ensemble à la fois plus intéressant et plus accessible. Ceci compensait dans une certaine mesure le problème que j'ai abordé plus haut, à savoir que l'inouï des cellules, quoi qu'on fasse, reste plus distant de nous que l'inouï du hérisson. Le couple que formaient la cellule dendritique et le collagène permettait ce jeu, mais il ne fut pas le seul à prendre en charge.

Chaque double-page ou presque révéla ce type de problème-ressource, qu'il s'agisse des molécules à montrer, des vésicules ou encore des autres cellules immunitaires, si bien que les besoins de documentation ne semblaient pas avoir de fin. Au bout du compte, le tome 1 de *Globule* fut prêt après deux ans de travail. Une première impression sur un papier de qualité, à 500 exemplaires, fut diffusée à titre expérimental à partir de mars 2018. Le magazine *La Recherche* y consacra un article de deux pages (Germain 2018), et une inauguration eut lieu à l'espace des sciences Pierre-Gilles de Gennes le 7 mars 2018. Puis une version anglaise fut réalisée grâce à la traduction de la chercheuse américaine Chloe Bulinski, et imprimée à 500 exemplaires grâce au soutien de l'équipe Janke, avant d'être présentée dans plusieurs congrès scientifiques. De nombreux retours, très positifs, encourageaient à continuer le travail.

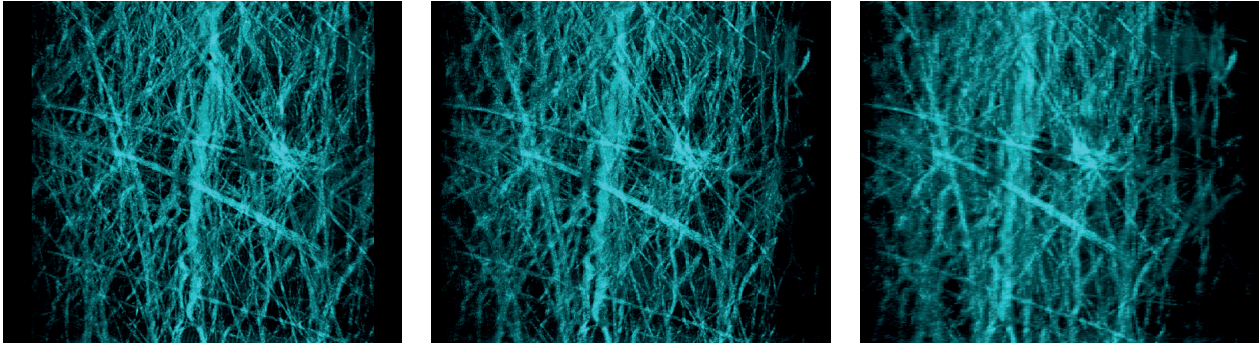


Figure 7: vue tournante d'un réseau de fibres de collagène

Images de Danijela Vignjevic, Insitut Curie, 2016

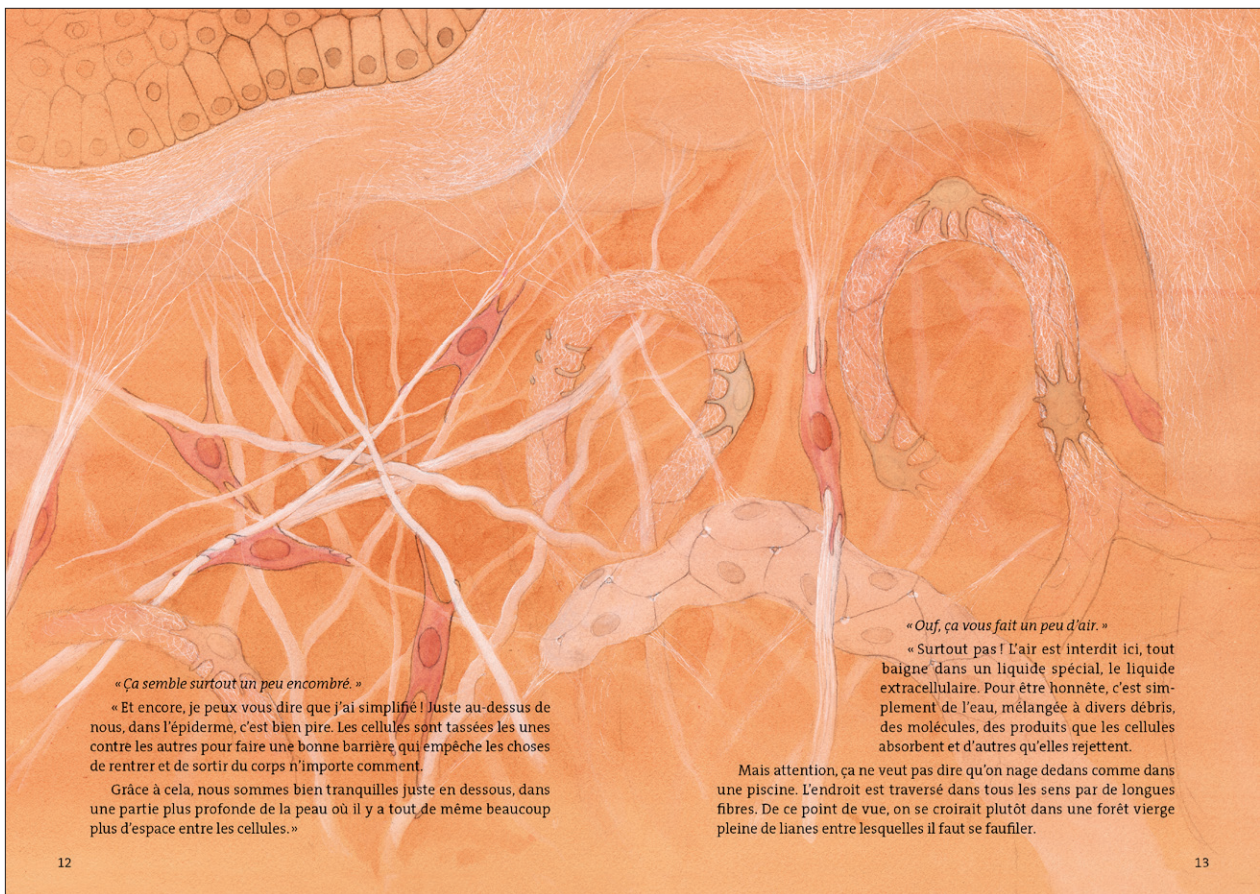


Figure 8: paysage de fibres et de vaisseaux sous l'épiderme

Pages extraites de Globule vol.1, dessins R. Chabrier

6 – Les limites de la diffusion

Nous étions allés au bout du projet initial : tenter de faire un équivalent de la Hulotte en biologie cellulaire. « Globule » prenait donc la forme d'un livret de 44 pages, au format A5, au tarif extrêmement abordable de 6 €. Une fois ce premier tome imprimé, Matthieu Piel et moi-même fumes été reçus par Pierre Déom, l'auteur et dessinateur de la Hulotte, dans son atelier de Boulton-aux-Bois. Nous voulions lui présenter le livre avant de le diffuser, pour nous assurer qu'il serait d'accord avec notre adaptation, ce qui était le cas.

Il nous expliqua alors ses méthodes de travail, qui correspondaient en tout point à celles que j'avais adoptées pour Globule, même si nos styles de dessin sont différents. Pour pouvoir produire une « Hulotte » tous les six mois, il avait mis en place au fil des ans des conditions exceptionnelles : une documentaliste l'assistait à temps plein, tandis qu'une équipe d'une dizaine de personnes, dirigée par son épouse, assurait la diffusion. Il nous raconta comment toutes les tentatives de partenariat avec les éditeurs conventionnels avaient échoué, y compris à l'étranger. « La Hulotte » était une exception qui ne devait compter que sur ses propres forces, ainsi que sur le réseau de lecteur patiemment créé depuis bientôt cinquante ans. En suivant ses traces, « Globule » allait avoir à s'assumer également comme exception.

Il était donc déjà évident, au moment de la sortie, qu'il serait impossible de produire un nouvel ouvrage de ce type tous les six mois, à moins de pouvoir financer immédiatement une véritable équipe. Plus généralement, la pérennisation d'un tel projet suppose de faire intervenir des compétences diverses (agent, éditeur, diffuseur) qui ne sont pas du ressort des chercheurs ni des auteurs. Quoiqu'il en soit, ce projet garde un important potentiel, et les idées ne manquent pas pour lui donner des suites : les synopsis de 4 autres tomes sont déjà définis, et plusieurs collaborations scientifiques sont en cours pour les préciser petit à petit.

7 – Des suites possibles

Globule était lié, dès l'origine, à une dé-coïncidence d'avec le monde de la muséographie dont les appels d'offre n'offraient plus assez de marge de manoeuvre pour créer du nouveau. Cet écart a-t-il permis dégager des pistes intéressantes pour y revenir ? D'ores et déjà, le travail déjà réalisé autour des cellules immunitaires pourrait facilement inspirer tout ou partie d'une grande exposition. Cette approche permet en effet d'aborder aussi bien les micro-organismes que le cancer, sans devoir axer d'entrée de jeu la présentation sur des états pathologiques.

Plus généralement, en expérimentant l'efficacité narrative du dessin à travers la géométrie sans point de vue, Globule permet de redécouvrir des ouvrages qui ont également eu vocation à faire apparaître l'inouï du vivant, et qui ont été largement diffusés sans avoir peut être encore livré tout leur potentiel. Les oeuvres de Pierre Déom avec «La Hulotte» et de David Macaulay avec «The way we work» (2008) pourraient ainsi être étendues ou complétées dans des directions qu'elles n'ont pas explorées, tout en restant dans le même esprit.

Enfin Globule a aussi défriché une piste plus ambitieuse : réaliser une série animée qui mettrait en scène la rencontre entre des personnages humains et des cellules. Ce principe a déjà été utilisé avec succès il y a 40 ans dans la série « Il était une fois la vie », mais depuis il a été étonnamment peu

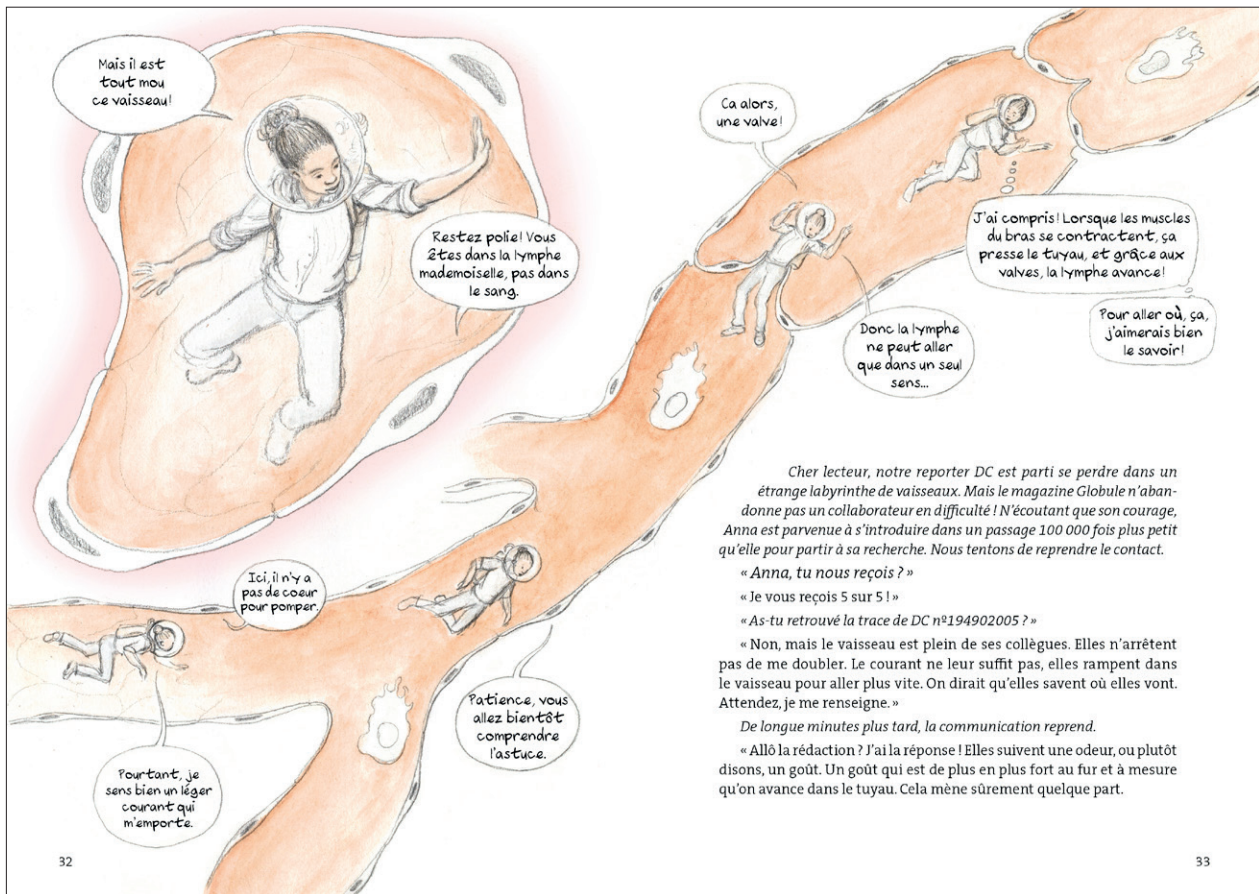


Figure 9: A l'intérieur d'un vaisseau lymphatique
Pages extraites de Globule vol.1, dessins R. Chabrier

utilisé et surtout actualisé. Aujourd'hui, il serait possible d'associer le dessin et les outils d'animation numérique, afin de mettre par exemple en scène des moments de suspension et d'exploration tels que ceux de la **figure 9**, en composant au besoin avec les images de synthèse et la prise de vue réelle. Pour être financés, de tels développements impliquent bien entendu un important travail de production qui ne peut pas être abordé ici.

7 - Epilogue

Cette aventure a connu un rebondissement durant la récente crise du Covid-19. Tout d'un coup, l'immunité devenait un enjeu de santé public et un sujet d'actualité majeur. « Globule » aurait eu son rôle à jouer, tout particulièrement vis-à-vis des collégiens, si une diffusion suffisante avait déjà pu être assurée en amont. Mais puisque ces moyens de cette diffusion n'avaient jamais réellement existé, je décidais de mettre simplement l'ouvrage en ligne, dans les deux langues avec quelques adaptations (voir lien ci-dessous).

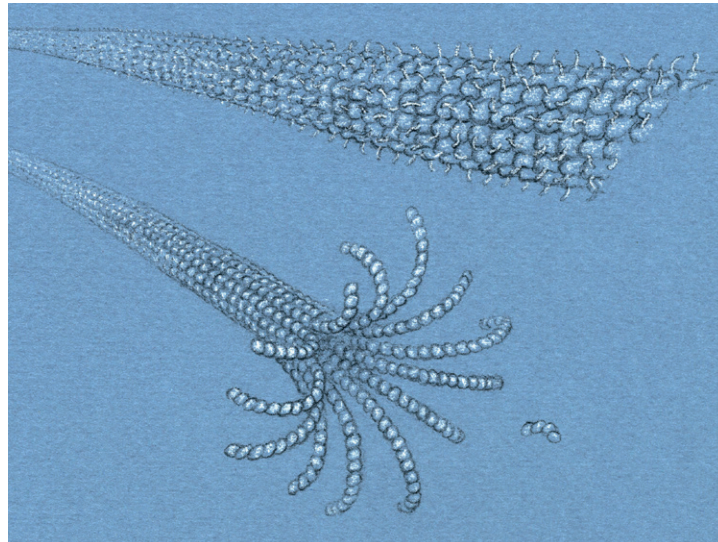
Sur le site internet, j'ai aussi fait en sorte que ce petit groupe puisse « publier » des articles sous forme de BD-Blog, par exemple pour expliquer dans le futur comment fonctionne un virus, ou tout autre sujet. Un tel dispositif peut être efficace pour tester des thématiques, ainsi que pour montrer des images, des dessins ou des animations intéressantes réalisés par d'autres personnes. Il ne s'agit bien entendu que d'un germe, qui devra attendre une période plus favorable pour se développer.

Quoiqu'il en soit, si j'ai pris la peine de revenir ainsi sur « Globule », c'était avant tout pour vérifier si les personnages étaient toujours bien vivants. Et sur ce point, j'ai été rassuré.

*Globule peut être consulté en ligne à partir du site:
www.globulemag.org*

Chapitre 7

La tubuline: une molécule aux multiples visages.



Chapitre basé sur la réalisation
de croquis sur le vif et d'une affiche dans le cadre de la conférence
«Microtubules, from atoms to complex system»
European Molecular Biology Organization
Heidelberg, 2016

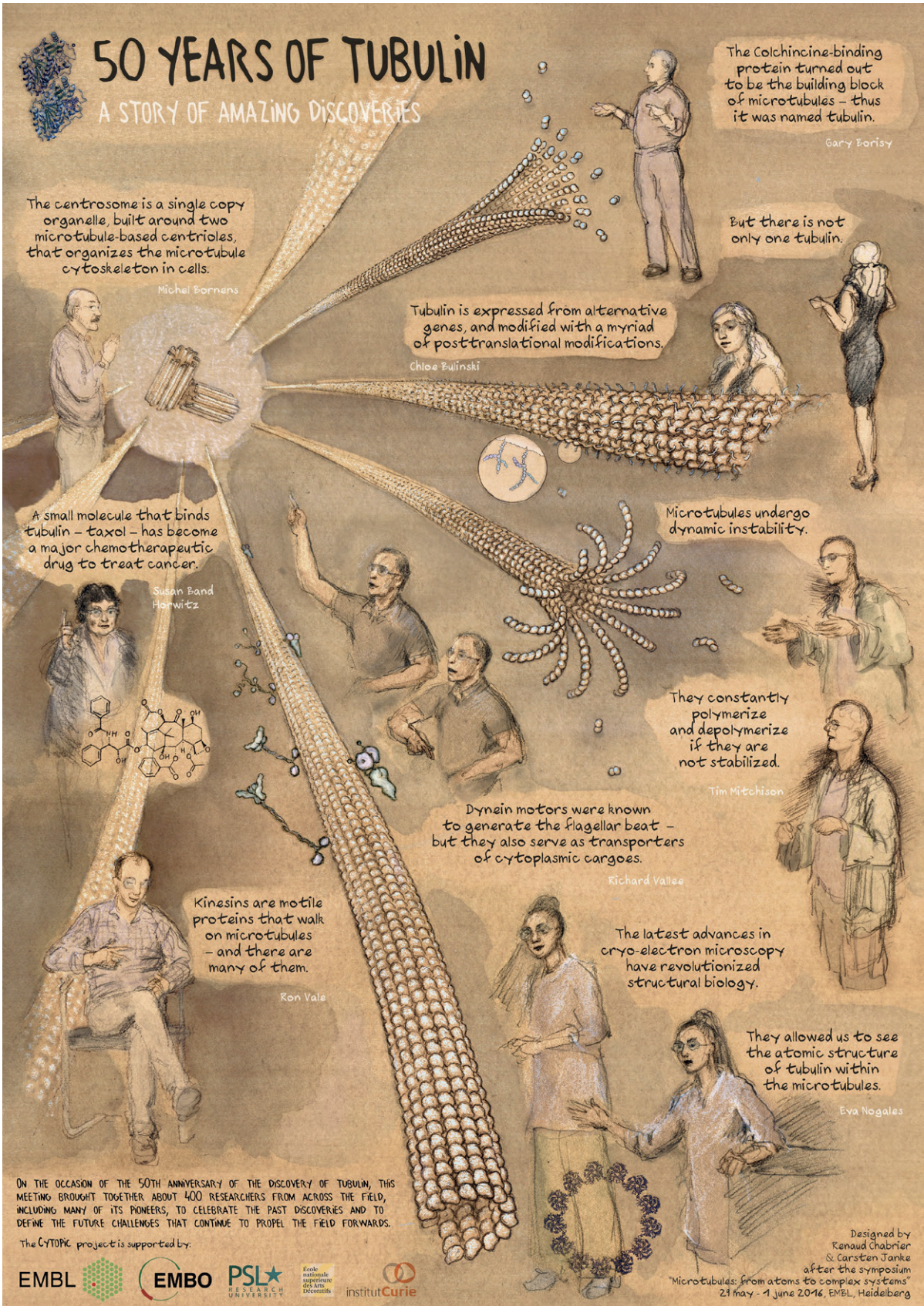


Figure 1: Poster réalisé à l'occasion du symposium EMBO/EMBL «Microtubules, from atoms to complex systems» 2016
 Conception et dessin R. Chabrier

La tubuline:
une molécule aux multiples visages.
(Quatrième expérience de réalisation)

1 - Entrée en matière : peut-on dessiner une molécule?

Le 20^{ème} siècle est marqué par l'essor de la biologie moléculaire, qui conduit à l'identification des principaux mécanismes à l'origine de la reproduction, du développement et de l'évolution. La façon dont la représentation des molécules se construit et se transforme chez les chercheurs au cours de cette période mérite d'être retracée, car elle finit par redonner une certaine prise au dessin sur un sujet qui en était au départ très éloigné.

La biochimie se développe au début du 20^{ème} siècle, dans un contexte globalement peu favorable au dessin scientifique. Les chercheurs tous bords manifestaient alors une volonté nouvelle d'« objectivité ». L'observation visuelle directe se révélait en effet trompeuse pour apprécier des phénomènes rapides ou microscopiques, tels que la chute des gouttes de lait ou la variété des flocons de neiges (Dalton & Galison, 2007). Au dessin, les chercheurs commençaient donc à préférer la photographie, voire l'absence totale de visualisation. Mais dans le cadre de nouveaux domaines d'étude tels que la biochimie, ni le dessin ni la photographie n'avaient de prise : les molécules étaient de toute façon trop petites pour être observées au microscope, et encore trop mal connues pour être dessinées d'imagination.

La biochimie, puis la biologie moléculaire après elle, se sont donc développées dans une double absence de dessin : non seulement l'objet d'étude ne s'y prêtait pas à priori, contrairement à ce qui s'était produit auparavant dans beaucoup d'autres domaines de l'Histoire Naturelle, mais le contexte culturel lié à l'essor de la photographie commençait à rendre marginale la pratique du dessin dans la formation scolaire et extra-scolaire des scientifiques. Il n'est donc pas étonnant, aujourd'hui, de constater un émiettement considérable des représentations dans l'ensemble des disciplines liées à l'essor de la biologie moléculaire : chacune s'est trouvée en situation de « bricoler » les représentations qui convenaient au niveau d'abstraction auquel elle se plaçait, sans chercher à construire une cohérence générale. En termes de design, c'est cet émiettement qu'il faut d'abord évaluer, puis tenter de résoudre pour espérer pouvoir intégrer les aspects moléculaires du vivant dans une histoire naturelle compréhensible par tous.

L'« Histoire de la biologie moléculaire » écrite par Michel Morange (2003) offre un guide précieux pour retracer cette avancée scientifique majeure du 20^{ème} siècle. Dans les pages qui vont suivre, je vais beaucoup m'appuyer sur ce livre, tout en apportant des informations complémentaires relevant plus de l'histoire du dessin et des représentations. La biologie moléculaire est traversée par des enjeux importants liés à la génétique et à l'évolution, mais je vais surtout me concentrer ici sur les enjeux liés à la représentation des protéines.

1900-1936 : quand les molécules du vivant n'étaient pas « visualisables »

Au début du 20^{ème} siècle, la biochimie se développa dans deux directions (Morange 2003, p27). D'une part, les différentes étapes de la transformation des molécules à l'intérieur du vivant commencèrent à être décrites, en insistant particulièrement sur les sucres. Les biochimistes parvinrent alors à décrire les grands cycles métaboliques. Ces découvertes importantes ont peu engagé l'imagination visuelle : aujourd'hui, les visualisations qui accompagnent l'enseignement de la respiration cellulaire sont avant tout des réseaux de flèches reliant des noms, des formules de molécules ou des symboles graphiques.

D'autre part, les chercheurs s'employèrent à caractériser les protéines et enzymes. Les protéines étaient reconnues comme composants essentiels du vivant, et les enzymes étaient responsables des différentes transformations qui s'y produisent. Nous savons aujourd'hui à quel point la caractérisation des protéines repose sur leur structure spatiale : sans représentation de l'espace d'une façon ou d'une autre (maquette, dessin, image de synthèse...), les interactions entre molécules sont largement incompréhensibles.

Au début du 20^{ème} siècle, ce type de visualisation spatiale était impossible à établir. Il existait de façon générale un grand flou sur les constituants de la matière interne des cellules. La « théorie colloïdale du vivant » s'était donné pour mission de le dissiper. Pour reprendre les mots de Michel Morange, cette théorie à l'interface de la chimie et de la biologie « affirme l'existence d'un nouvel état de la matière, l'état colloïdal, possédant des propriétés physico-chimiques spécifiques. Cet état est caractéristique des êtres vivants. [...] Les frontières de cette théorie sont mal définies et plusieurs des travaux qui y furent menés apparaissent maintenant comme des recherches tout à fait classiques de chimie-physique. L'oubli dans lequel elle est tombée ne doit pas masquer l'importance qu'elle a eue : plusieurs prix Nobel furent attribués à des travaux de colloïdologie » (*Ibid.* p 28).

Passé cette remarque, Michel Morange élude volontairement la théorie colloïdale de son histoire. Cette théorie mérite cependant que je m'y arrête encore, car elle interfère avec l'une des ressources épistémologiques les plus importantes pour le renouveau du dessin. Effectivement, entre 1900 et le début des années 30, la théorie colloïdale du vivant semblait si prometteuse qu'Alfred Korzybski la mit presque sur un pied d'égalité avec la mécanique quantique ou la théorie de la relativité, dans la grande synthèse qu'il opère à travers le livre « Science and Sanity » (1933). Avec certains travaux de Gaston Bachelard comme « La philosophie du non » (1940), ce livre fondateur de la pensée non-aristotélicienne constitue à ma connaissance le seul effort de réflexion vraiment comparable à celui de François Jullien pour proposer une pensée alternative à la « philosophie de l'être » développée par Aristote. S'il est nécessaire ici faire intervenir ce type de pensée, c'est qu'elle est fondamentalement inscrite dans la pratique des représentations en sciences et tout particulièrement en biologie, mais le plus souvent sans être formulée explicitement.

Pour utiliser correctement les représentations produites dans les sciences modernes, il est en effet toujours nécessaire de garder conscience qu'une représentation « n'est pas » ce qu'elle représente. Tôt ou tard, une telle identification agit en effet comme une source de confusion. La façon apparemment la plus sûre de découpler une représentation visuelle de ce sur quoi elle pointe consiste alors à utiliser une symbolique. Des mots et des formes géométriques simples, accompagnés d'indications telles que des flèches, permettent alors effectivement d'établir des relations de succession ou

d'inclusion entre différents objets, sans prendre de risque quant à leur représentation. Ce « vocabulaire » limité permet d'établir des « cartes mentales » qui peuvent présenter une certaine efficacité : contrairement au texte, l'information peut y être présentée de façon non-linéaire. Aujourd'hui, l'utilisation courante des cartes mentales en « Design Thinking » illustre bien les avantages et les dangers de cette approche : un travail de réflexion, de partage et d'enquête sérieux permet de produire une « carte » utile, mais il est aussi extrêmement facile de produire une « carte » fallacieuse au gré d'un travail superficiel. En sciences comme en design, il est donc nécessaire de savoir traiter les cartes avec précautions.

Alfred Korzybski, qui s'inscrit dans le prolongement de Whitehead et Russel, est l'auteur de la célèbre mise en garde : « Une carte n'est pas le territoire » (Korzybski 1950). En exprimant clairement les dangers de l'identification entre une représentation et la réalité, il est aussi et surtout l'un des premiers à avoir su indiquer le type de précautions à prendre pour l'éviter. L'enjeu, selon lui, consiste à développer la « conscience d'abstraire ». Au lieu d'une séparation binaire entre réel et symbolique, Korzybski attribue en effet à la pensée humaine la capacité de jouer sur une infinité de « niveaux d'abstractions ». Chaque changement de niveau d'abstraction est susceptible de faire émerger de la conscience, et c'est cette « conscience d'abstraire », opérant non pas sur deux ou trois mais sur de très nombreux niveaux, qui permet de ne pas se perdre dans des boucles de raisonnement et des paradoxes apparents¹.

La notion de « niveau d'abstraction » est incontournable, à mon sens, pour comprendre l'efficacité propre au dessin : contrairement aux symboles, à la photographie ou aux images de synthèse, le dessin offre la possibilité de jouer facilement sur de nombreux niveaux d'abstraction en variant le trait. Pour développer une notion si importante, Korzybski avait mené auparavant une réflexion très générale sur la transmission d'information : il envisageait celle-ci d'une génération à l'autre, mais aussi d'une zone du cortex à une autre, en tenant compte (très qualitativement) de l'abstraction opérée au passage. Tout ceci reste pertinent aujourd'hui pour la transmission scientifique par le biais du dessin. Mais l'existence de la théorie colloïdale, dans les années 20 et 30, lui permettait de généraliser encore son propos et d'envisager la transmission d'information à l'intérieur même de la cellule, en tant que perspective pour la science future bien entendu.

Comme le remarque Michel Morange, une grande partie des questions posées par la théorie colloïdale étaient bonnes : elles ont d'ailleurs été reprises plus tard par la biophysique. Le principal défaut de la théorie colloïdale était un de ses postulats de départ, apparemment inspiré par une identification malheureuse avec la physique statistique, selon lequel il ne pouvait exister que des petites molécules. Les constituants du vivant ne pouvaient alors avoir de structure bien définie : les grandes molécules devaient être des agrégats, dont la masse était fluctuante et répartie autour d'une moyenne. Ceci fut clairement démenti au cours des années 30 par des techniques plus précises de mesure de masses moléculaires (par centrifugation) et d'analyse de structure (par cristallisation de protéine et diffraction de rayons X). A l'opposée des principes de la théorie colloïdale, ces expériences prouvèrent que les protéines qui constituaient les cellules étaient souvent de grande taille, avec une masse particulière et une structure très spécifique (*Ibid.* page 29 ; Bernal 1940)

¹ Il est possible de faire appel à la philosophie de François Jullien pour mieux cerner l'originalité de cette proposition : François Jullien propose pour sa part d'associer la conscience avec la « dé-coïncidence ». « Coïncidence », pour François Jullien et « identification », pour Alfred Korzybski semblent selon moi désigner deux concepts jumeaux.

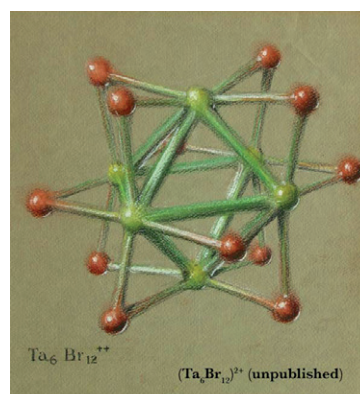
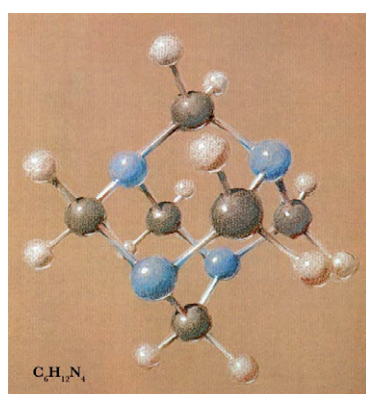
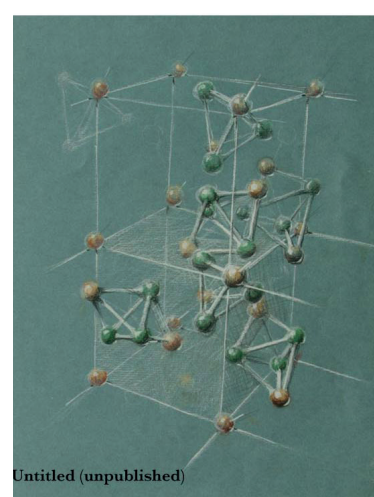
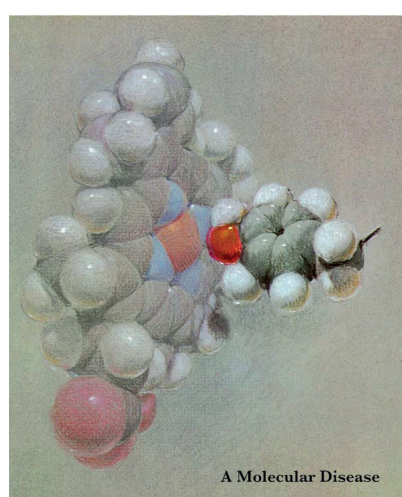
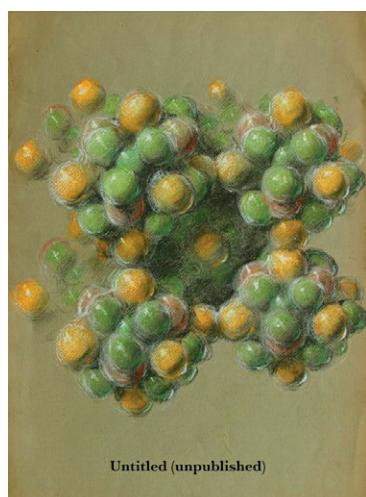
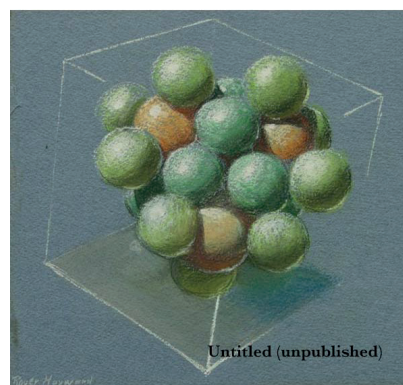
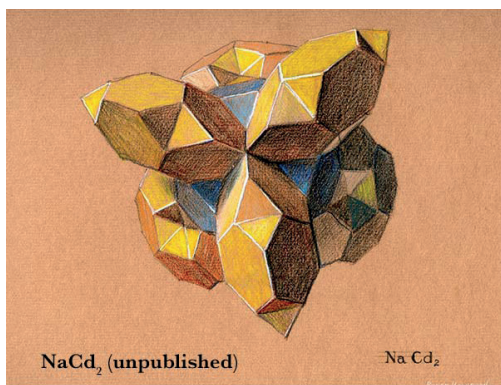


Figure 2 : Dessins au pastel de Roger Hayward, en collaboration avec Linus Pauling, vers 1960
 Source: Oregon State University Libraries SCARC / paulingblog.wordpress.com

De 1936 à aujourd'hui : quand la spatialité des protéines se précise, puis s'impose

Durant l'entre-deux guerre, élaborer une représentation spatiale claire de ces protéines et de ces enzymes était encore impossible. Leur caractérisation put cependant progresser en associant l'immunologie et la chimie. En injectant à un animal des protéines extraites d'autres organisme, les chercheurs parvenaient à obtenir presque à coup sûr des anticorps spécifiquement dirigés contre ces molécules étrangères. La réponse immunitaire permettait ainsi de montrer la spécificité des constituants du vivant, sans qu'il soit besoin d'avoir une idée précise des formes associées à cette spécificité. (*Ibid.* p 30 ; Landsteiner 1938).

Entre 1936 et 1940, l'étude de la spécificité des protéines prit cependant une nouvelle tournure, lorsque l'immunologiste Karl Landsteiner, déjà prix Nobel en 1930 pour la découverte des groupes sanguins, s'associa avec le physicien Linus Pauling. En associant les concepts de la mécanique quantique avec des données expérimentales, Pauling était parvenu à définir des règles simples grâce auxquelles les chimistes pouvaient deviner la structure spatiale des molécules. Il distingua en particulier les liaisons fortes ou covalentes, qui correspondent à un partage d'électron entre deux atomes, et les liaisons faibles (hydrogène ou ioniques) qui ont une importance toute aussi grande en biologie. Si les liaisons fortes donnent l'architecture générale d'une molécule, les liaisons faibles vont lui permettre de se replier d'une certaine manière, de se placer préférentiellement dans l'eau, dans une membrane de lipides ou à l'interface, et encore d'interagir avec d'autres molécules. (*Ibid.* p 31-33)

La collaboration entre Landsteiner et Pauling permit d'établir que l'antigène et l'anticorps présentent des structures spatiales complémentaires qui s'emboîtent pour former des liaisons faibles. Plus généralement, les concepts apportés par Pauling ouvrirent la possibilité de visualiser la structure spatiale des molécules, en établissant leur structure en fonction d'angles précis. Les visualisations tridimensionnelles en image de synthèse qui nous sont familières aujourd'hui découlent directement de ces travaux, mais dans les années 30, et jusque dans les années 80, cette technique n'était évidemment pas disponible. Le recours au dessin s'est donc imposé à nouveau, souvent sous des formes aussi simples qu'incontournable pour visualiser les interactions, les repliements et les enroulements des chaînes de peptides.

Pour un public plus élargi, ce retour du dessin a débouché sur la publication du livre « The Architecture of Molecules » (1964), grâce à la collaboration de Pauling avec un ex-architecte en reconversion dans le dessin scientifique, Roger Hayward. Contrairement aux scientifiques, les architectes étaient encore formés au dessin à cette époque, et Roger Hayward disposait ainsi des ressources nécessaires rendre l'inouï des protéines accessible à un plus grand public. Les esquisses au crayon et les dessins au pastel de Hayward offrent un exemple parfait de la combinaison entre plusieurs niveaux d'abstraction dans une représentation spatiale, en jouant tout particulièrement sur les textures ². (**Figure 2**, ressource en ligne [d]).

Un peu plus tard, dans les années 1970, la connaissance des protéines s'était précisée au point de faire apparaître les « hélices alpha » et « feuilletts bêta », mais les chercheurs ne trouvaient pas de

² Il se trouve que j'ai déjà eu l'occasion de dessiner et d'animer grâce au morphing des molécules de ce type, dessinées au pastel: il serait donc tout à fait possible aujourd'hui de mettre en mouvement le travail de Hayward pour le faire dé-coïncider d'avec son apparence statique en le spatialisant ou en le faisant vibrer, dans la même logique que la mise en mouvement de dessins anatomiques de Vinci

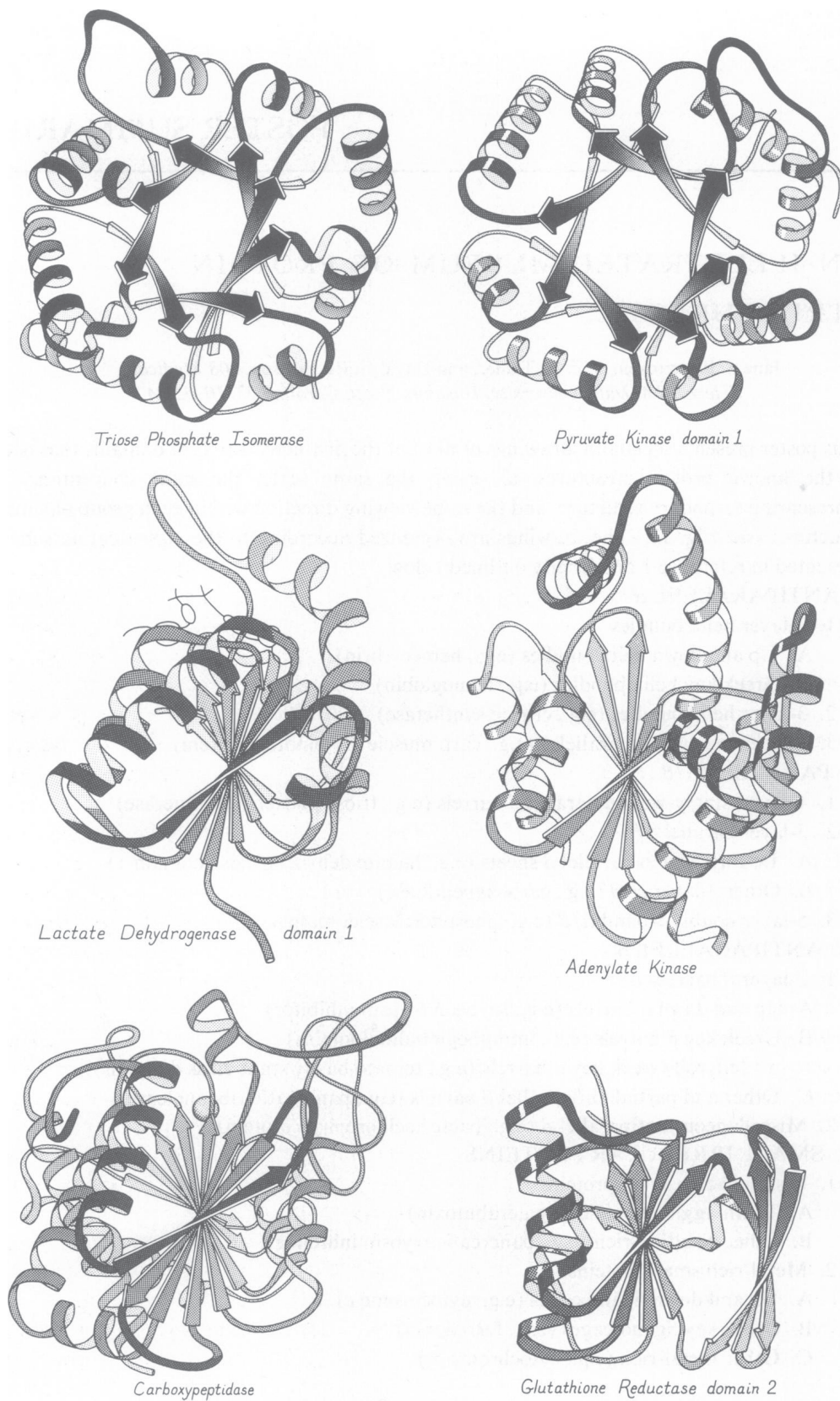


Figure 1 Schematic backbone drawings of a few of the parallel α/β protein domains. Top two structures: singly-wound parallel β barrels. Bottom four structures: 3-layer α/β domains with varying degrees of resemblance to the classic doubly-wound β sheet of lactate dehydrogenase.

Figure 3 : Poster dessiné de Janet Richardson et al. proposant la représentation en ruban en 1981

solutions élégantes pour les représenter. Au terme de deux ans de travail, la chercheuse et dessinatrice Janet Richardson trouva une façon de substituer à ces structures complexes des spirales et des flèches larges et courbées (Morange 2011). Dans un poster dessiné, elle proposa cette visualisation qui se généralisa rapidement (Figure 3, Richardson et al. 1981). Aujourd'hui cette solution est reprise dans tous les logiciels de visualisation de protéines, mais à l'origine elle constitue un nouvel exemple de la capacité du dessin à jouer sur les niveaux d'abstraction en préservant une information spatiale.

A partir des années 80, l'analyse structurale des molécules du vivant progressa considérablement, en liaison étroite avec le développement de l'informatique et des images de synthèse. Mais là encore, le dessin réapparut dès les années 90 : David Goodsell, un chercheur particulièrement impliqué dans ce domaine, se fit connaître à la fois pour ses images de synthèse et pour ses dessins. Les images de synthèse étaient très efficaces pour montrer une molécule isolée. Les dessins permirent à Goodsell d'étendre le champ de ces visualisations, en montrant l'inouï de l'encombrement moléculaire à l'intérieur d'une cellule, et en développant des narrations visuelles pour raconter les processus qui s'y déroulent (Goodsell 1992, Goodsell 2009). En général, les dessins de Goodsell montrent une « tranche », avec juste assez de « profondeur de champs » pour sentir l'existence d'un espace plus vaste (Figure 4a et 4b). Mais surtout, ils reposent sur une géométrie sans point de vue, alors même que les images de synthèse développées dans les années 90 avaient une forte propension à exagérer les effets de la perspective centrale. Peut-être David Goodsell était-il justement l'un des mieux placés pour s'en rendre compte ?

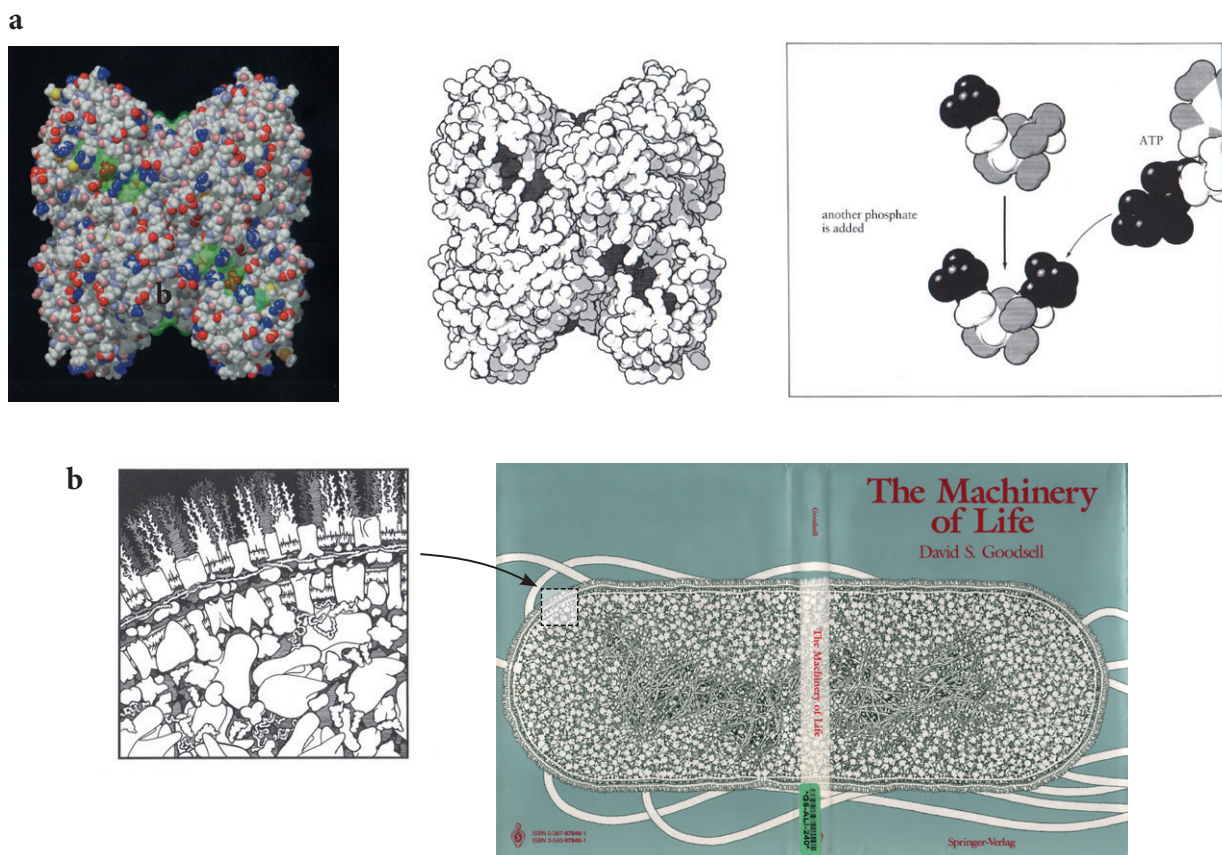
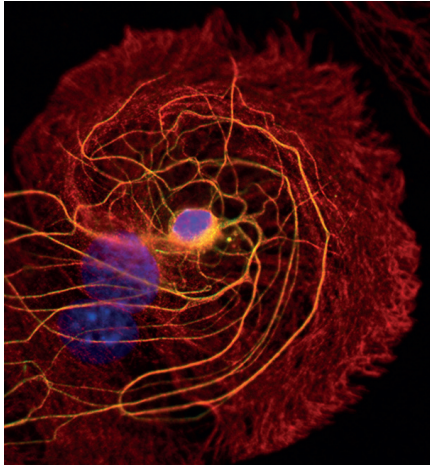


Figure 4: Dessins de David Goodsell en 1992 dans the Machinery of life (première édition)

a: représentation de l'enzyme phosphohydrokinase en image de synthèse, au trait, et détail du processus

b: illustration montrant l'encombrement moléculaire à proximité de la paroi dans la bactérie Escherichia Coli, et vue d'ensemble

a



b

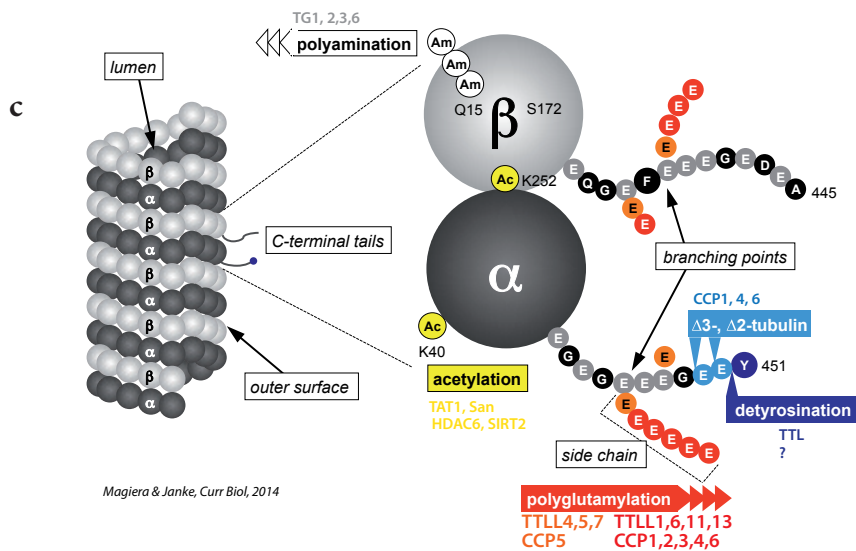


Figure 5 : Différents aspect de la tubuline

a : la tubuline polymérise pour former de longs microtubules à l'intérieur des cellules eucaryotes. Des faisceaux de microtubules sont vus ici en microscopie électronique par fluorescence (image Janke team)

b : la tubuline existe sous deux formes légèrement différentes, qui s'associent pour former un dimère visualisé ici avec la méthode des «rubands» inventée par Janet Richardson

c : la tubuline possède une chaîne latérale souple, qui peut être allongée et ramifiée par ajout de glutamate ou de glycine (image de Maria Magiera)

La prééminence des images de synthèse, et leur succès particulièrement massif dans le domaine des visualisations moléculaires, tend aujourd'hui à faire oublier ces contributions du dessin, qui restent cependant d'actualité : nous verrons plus loin l'efficacité des esquisses dessinées pour préparer des animations moléculaires en images de synthèse. En fait, dès que la structure spatiale des molécules est sortie du flou, un recours au dessin s'est imposé à la fois dans le travail des chercheurs et dans la transmission vers le grand public. Il serait cependant inapproprié d'en déduire qu'une « relation » suivie entre science et dessin s'est reconstituée à la faveur de la représentation des molécules. Il convient mieux de voir le livre de Pauling et Hayward (1964), l'invention de Janet Richardson (1981) et les dessins de David Goodsell (1992, 2006) comme des « rencontres » entre deux personnes venant d'univers professionnel différents, ou au sein d'une seule personne maîtrisant les deux domaines, en sachant que ce cas est exceptionnel.

A chaque fois, l'enjeu de ces rencontres consiste à ajuster les niveaux d'abstractions du dessin pour faire dé-coïncider les protéines d'avec une représentation dans laquelle elles risquent de s'enliser. Pour Pauling et Hayward, il fallait dessiner les molécules de telle façon qu'elles apparaissent nettement plus riches que les formules abstraites ne le laissent supposer, d'où le recours au jeu de textures des pastels. Pour Janet Richardson, il fallait au contraire synthétiser la représentation, pour faire apparaître la structure spatiale intermédiaire des hélices et des feuillettes sans se perdre dans la variété des détails de structure inutiles. Enfin, pour Goodsell, il fallait étendre le concept de protéine et en faire paysage, pour éviter que ce concept fondamental ne se stérilise en coïncidant avec « la » molécule isolée, telle qu'elle est le plus souvent visualisée en image de synthèse. Les travaux que j'ai menés avec Carsten Janke, doivent se comprendre selon la même logique de rencontre : un chercheur et un dessinateur réunissent leurs compétences pour tenter de donner un meilleur accès à l'inouï d'une protéine.

2 - La tubuline : une molécule à la frontière entre deux logiques

Carsten Janke s'intéresse avant tout à la tubuline, qui possède la propriété de pouvoir s'assembler pour former de longs polymères en forme de tubes à l'intérieur des cellules (**Figure 5a**). Chez les eucaryotes (cellules comportant un noyau), ces « microtubules » sont l'un des trois constituants du cytosquelette, qui donne à la cellule sa structure et ses propriétés dynamiques. Les microtubules jouent un rôle important au moment de la division cellulaire : ils contribuent à répartir les chromosomes à part égale dans les deux cellules-filles. Quand la cellule ne se divise pas, ils constituent avant tout des « voies de communication » : des moteurs moléculaires, les kinésines et les dyneines, « marchent » le long des microtubules en tirant des vésicules ou encore des mitochondries. Dans le cas d'un neurone, ce transport peut même être effectué sur de très longues distances de l'ordre du mètre. La structure des molécules de tubuline leur permet en effet de se lier temporairement avec les « pattes » des moteurs moléculaires, de telle façon que ces derniers puissent progresser le long du microtubule.

Pour étudier la structure de la tubuline, les chercheurs disposent aujourd'hui d'outils très puissants basés sur la cristallographie. Un ensemble de protéines du même type peut en effet être mis sous forme de cristal, c'est-à-dire que toutes les protéines s'alignent selon la même orientation et se répartissent de façon régulière dans l'espace. Un rayon X qui traverse un tel échantillon se trouve alors diffracté d'une façon particulière. En analysant les taches de diffraction, il est possible d'ob-

tenir des informations sur l'orientation spatiale des différentes liaisons chimiques qui structurent la molécule. Ce couplage entre la chimie et l'optique a une longue histoire qui déborde celle des protéines : Pasteur a commencé ses travaux en étudiant la polarisation de la lumière par les cristaux d'acide urique, tandis que Crick et Watson ont découvert la structure de l'ADN en analysant des données cristallographiques obtenues par Rosalind Franklin (Cramer 2020).

Depuis les années 80, l'analyse informatique a considérablement augmenté la puissance de la méthode cristallographique, permettant de visualiser par exemple la tubuline sous la forme de la **figure 5b**. Cependant cette méthode garde un défaut : elle ne donne pas l'information sur la structure spatiale d'une molécule individuelle. Ce sont les structures répétées de façon similaire dans toutes les molécules du signal qui font apparaître des taches de diffraction. Or il arrive souvent qu'une partie d'une molécule soit faite d'une chaîne de peptides plus « lâche ». Dans le cristal obtenu à partir de la molécule, cette chaîne qui n'est pas maintenue dans une conformation particulière par des liaisons faibles avec d'autres parties, se trouvera dans des positions très variées. Elle ne donnera donc pas de tache de diffraction et n'apparaîtra pas dans l'analyse (Dyson & Wright 2005). Le plus souvent, elle ne sera même pas affichée dans les banques de données en ligne où les biologistes partagent leurs structures de molécules, puisqu'ils y publient sans modifications les résultats qu'ils obtiennent, dans la tradition de l'objectivité scientifique. Si bien qu'une partie de l'information, pourtant bien connue dans la formule chimique d'une protéine, peut facilement disparaître au cours du processus nécessaire pour la visualiser dans l'espace.

Dans le cas de la tubuline, la partie « oubliée » de cette molécule est une petite chaîne latérale, qui dépasse à l'extérieur des microtubules. Absente des données structurales, cette chaîne de quelques peptides n'est en général pas non plus représentée dans les illustrations montrant des microtubules, qu'il s'agisse de dessins ou d'images de synthèse. D'une certaine façon, elle ne « compte pas » dans le tableau global du fonctionnement de la cellule. Dans la vraie vie des cellules, cependant, cette chaîne latérale se trouve fortement modifiée par des enzymes qui lui rattachent d'autres chaînes plus ou moins longues de glutamate et de glycine (**Figure 5c**). Ces modifications ne sont pas spécifiées par le code génétique qui détermine la composition chimique de la tubuline, ni par les grosses molécules-chaperon qui aident la tubuline à se replier pour trouver sa forme finale. Elles dépendent du type de cellule et de la zone dans laquelle les microtubules se trouvent : s'il s'agit d'un neurone d'un certain type, d'une cellule flagellée, etc. (Janke & Magiera 2020). Tant tous les cas, l'aspect du microtubule est très différent, selon qu'il est fait abstraction ou pas de ces chaînes latérales : le tube apparemment constitué d'une sorte de pavage d'osselet, dans le premier cas, apparaît plus ou moins chevelu dans le second.

Dans les années 2000, les recherches menées par l'équipe de Carsten Janke se sont d'abord focalisées sur l'identification et la maîtrise de ces enzymes responsables de telles modifications. Aujourd'hui, c'est l'effet de ces modifications sur la vie de la cellule qu'ils étudient, en utilisant les techniques de modification génétiques issues de la biologie moléculaire. Cette démarche est illustrée par une étude de Maria Magiera (Magiera et al. 2018), pour qui j'ai réalisé le **figure 6** à des fins de présentation orale. Le premier cas, en haut, montre un microtubule dans un neurone de souris normal : des moteurs moléculaires marchent à sa surface, et transportent des mitochondries pour fournir de l'énergie tout le long du neurone. Dans le deuxième cas, le neurone provient d'une souche de souris génétiquement modifiée à qui il manque l'une des enzymes qui enlève le glutamate des chaînes latérales, si bien que ces dernières sont beaucoup plus longues et ramifiées qu'à l'état nor-

mal. Il semble alors que les moteurs moléculaires soient gênés dans leur progression par ces chaînes trop longues. Mais il n'est pas possible aujourd'hui de d'observer une interaction aussi fine à la surface des microtubules, dans une cellule vivante.

Pour faire apparaître ce phénomène, Maria Magiera et Satish Bodakuntla ont donc adopté une démarche indirecte, en filmant non pas le déplacement des moteurs eux-mêmes, mais le déplacement des mitochondries. Ils ont préparé des neurones de souris embryonnaires, avec et sans modification génétique, puis ils ont suivi le déplacement des mitochondries grâce à un marqueur fluorescent. On constate alors que les mitochondries sont alors transportées de façon plus fluide sur les microtubules de souris normale, sans chaîne latérale ramifiée. Dans l'autre cas, les mitochondries ne sont pas radicalement stoppées, mais la différence semble suffisante pour expliquer un éventuel dysfonctionnement de la cellule nerveuse qui pourrait, sur un temps plus important, entraîner la mort cellulaire et donc, la neurodégénérescence (Magiera et al. 2018).

Une telle méthode illustre bien la situation de la biologie cellulaire actuelle, qui s'attaque à des phénomènes très complexes tout en gardant une ferme volonté de ramener ces derniers à des mécanismes moléculaires. Certaines propriétés des molécules peuvent alors être mises en évidence de manière franche, le plus souvent en montrant une opposition entre deux états. La tubuline « libre » peut ainsi être opposée à la tubuline sous forme de « dimère », les « dimères libres » aux dimères « assemblés sous forme de microtubule », les microtubules « stables » aux microtubules « prêts à se désagréger », etc. D'autres propriétés moléculaires, cependant, ne se manifestent pas d'une façon aussi binaire. Plutôt qu'à un passage d'un « état » à un autre, les mécanismes associés correspondent plutôt à des « tendances », qui ne deviennent significatives qu'à une autre échelle, dans le contexte plus général de la vie de la cellule.

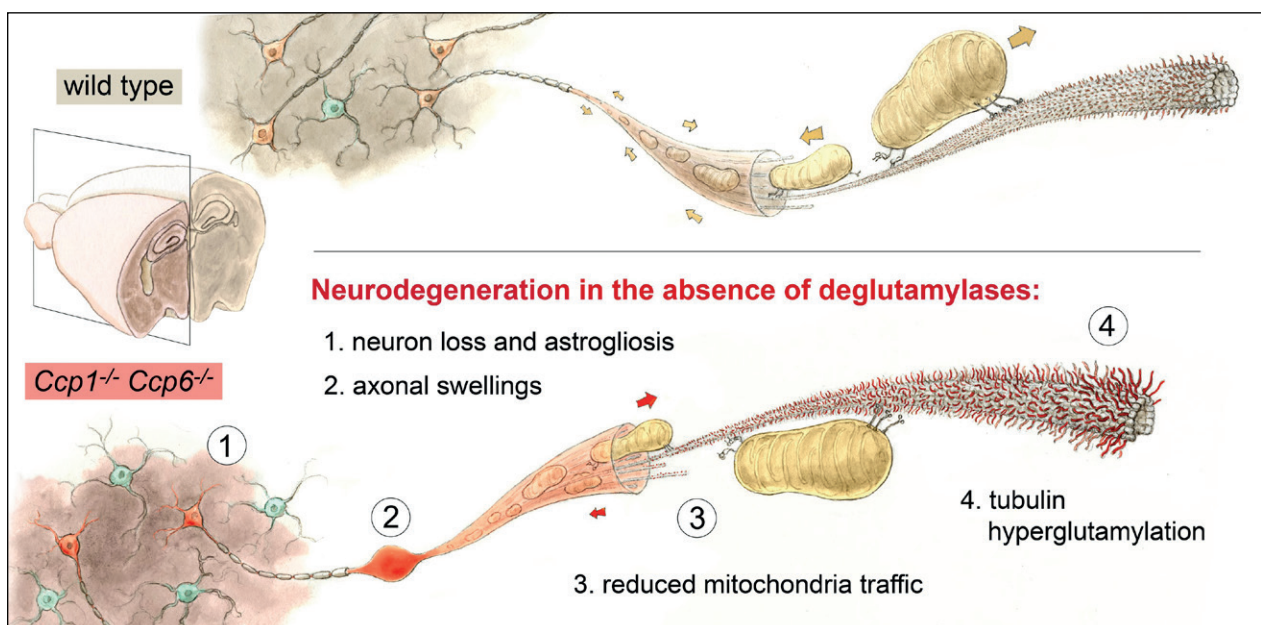
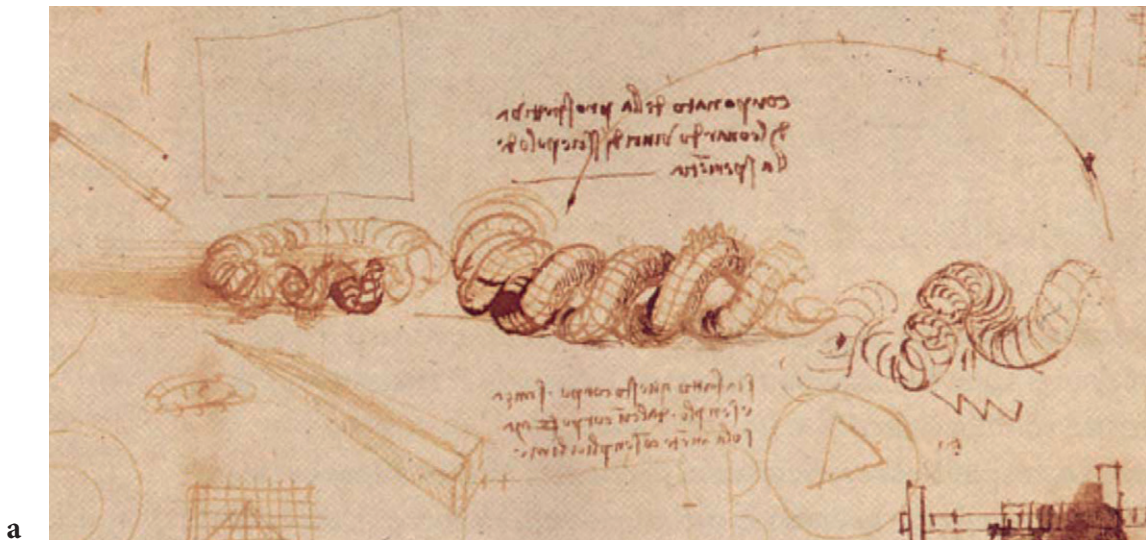


Figure 6 : L'organisation moléculaire à la surface des microtubules a une influence sur le transport intracellulaire
En haut : à l'état normal, des moteurs moléculaires assurent le transport de vésicules ou de mitochondries en progressant le long des microtubules.
En bas : une ramification excessive des chaînes latérales due à l'absence d'une enzyme peut gêner le trafic et faire dégénérer les neurones (dessin R. Chabrier, 2018)



a



b

Figure 7: le dessin offre des ressources pour faire apparaître le contexte et la variance avec des moyens simples, qui mobilisent à la fois la Géométrie sans point de vue et l'Inouï

a: Dans sa Manga, Katsushika Hokusai montre comment chaque corps peut devenir un contexte pour les autres. Ce principe de composition génère une géométrie sans point de vue (double page «vent soudain», vers 1820)

b: illustration par Léonard de Vinci des trois principes de sa perspective: la profondeur fait varier la couleur, la taille et le niveau de détail. Ce dernier point, plus spécifique au dessin que les autres, constitue un moyen efficace pour faire apparaître l'Inouï de la profondeur. (vers 1490-1492, Codex Atlanticus, Milano, folio 191 v-b)

Contexte et variance : quand le dessin retrouve une prise sur la biologie cellulaire

Dans ces réponses expérimentales aux questions posées par les microtubules, on voit resurgir deux façons de penser qui ont dû être écartées au cours de l'histoire de la biologie, mais qui ont retrouvé une certaine pertinence sur des bases nouvelles, et qui ouvrent de nouvelles possibilités de rencontre avec le dessin.

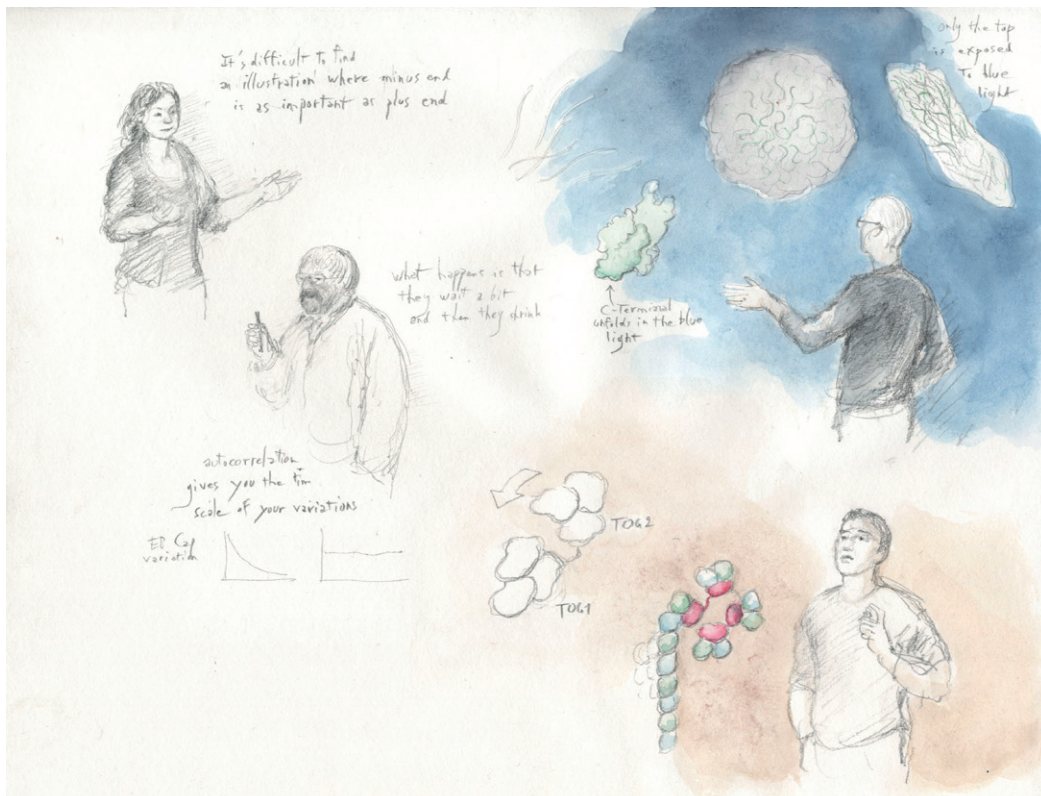
La première est le souci du contexte. Les êtres vivants, autant que leur sous-parties, sont souvent présentés « hors contexte » pour des raisons pratiques d'espace disponible, mais aussi pour des raisons plus profondes qui nous ramènent à la controverse des générations spontanée. Pouchet soutenait, à tort, que les expériences de Pasteur dénaturaient la matière en la plaçant dans des conditions qui interdisent la vie. C'était, selon lui, la raison pour laquelle Pasteur n'observait pas de génération spontanée lorsqu'il stérilisait ses échantillons. La science de Pasteur a bien entendu démonté ce raisonnement. Cependant, en contrôlant de plus en plus précisément les conditions expérimentales, les biochimistes ont pu développer une tendance à séparer les objets d'étude les uns des autres, ce qui, poussé à l'extrême, conduit à considérer les molécules isolément les unes des autres. Or il apparaît que certaines propriétés moléculaires ne peuvent pas apparaître hors du contexte de la cellule, de même que la richesse des interactions entre les organismes n'apparaît qu'en étudiant un écosystème fonctionnel.

La seconde façon de penser correspond à une sensibilité à la variance. Ce concept est à la fois lié aux statistiques et à la philosophie : la « variance » nomme des possibilités d'écart entre les occurrences d'un même phénomène, tandis que la « variété » nomme un ensemble de différences tranchées (Jullien F 2015). Cette distinction se retrouve dans la façon d'imaginer les molécules : pour les partisans de la théorie colloïdale du vivant, dont j'ai parlé plus tôt, les processus internes à la cellule étaient le résultat de phénomènes statistiques, et pas celui d'interactions entre différentes macromolécules de forme bien définie. Dans ce cas, il s'agissait d'une fausse piste : les macromolécules ont au contraire des structures très précises et différentes les unes des autres. Schématiquement, on associe donc la « variété » aux protéines et la « variance » à leur agitation : les statistiques interviennent non pas sur la forme et les propriétés des molécules, mais sur les probabilités de rencontre. Cependant, le fait reste que tout n'est pas « bien défini » dans le vivant. Maintenant que l'importance de la structure des macromolécules est acquise, le rôle de sous-structures plus lâches ou d'assemblages plus souples peut apparaître. Une coloration moins déterministe doit alors être intégrée dans des études qui assument par ailleurs tout l'héritage de la biologie moléculaire.

Ce souci du contexte et de la variance correspondent à des formes d'attention que le dessin peut facilement mettre en œuvre, surtout s'il reste proche du croquis ou de l'esquisse. En premier lieu, avec un ensemble de traits, il est possible d'évoquer un paysage autour du sujet principal, de façon à ne pas « oublier » qu'il existe un contexte. Mais si l'on compose plusieurs croquis sur une feuille, dans le cadre d'une géométrie sans point de vue, la notion de contexte se joue aussi à un niveau d'abstraction légèrement différent : il ne s'agit plus de « reconstituer une scène » mais plus généralement de faire apparaître la co-existence de plusieurs formes, c'est-à-dire que l'existence de l'une ne fasse pas immédiatement oublier celle de l'autre, et que chacune constitue un contexte pour celles d'à côté.



a



b

Figure 8 (cette page, et pages suivantes): croquis réalisés pendant la conférence EMBO/EMBL «Microtubules: from atoms to complex systems» 2016

La variance, pour sa part, émerge dans le simple fait de dessiner à la main plusieurs occurrences de la même forme. A vrai dire, il est beaucoup plus ennuyeux de dessiner exactement la même chose plusieurs fois, que de montrer des variations. Échapper ainsi à l'ennui, en jouant à la fois sur les orientations et les conformations des corps auxquels on s'intéresse, revient précisément à accéder à un inouï.

Pour visualiser le lien entre la « variance » et « l'inouï », Léonard de Vinci offre la ressource de «sa» perspective (**Figure 7a**, voir page 124, chapitre 4, figure 8c). Cette dernière, explorée à l'aide du dessin à la plume et à l'encre brune, permet de faire apparaître la profondeur en introduisant une variance dans la densité de l'encre (c'est-à-dire dans le contraste) et dans le niveau de détail. En s'intéressant à des tissus organiques et à des formes abstraites, Vinci ouvre des pistes évidentes pour appliquer cette démarche à l'échelle des cellules et des molécules. Il suffit pour cela d'apprendre à tailler une plume d'oie.

Mais s'il faut retenir une référence pour visualiser les liens entre le « contexte » et la « géométrie sans point de vue », je pense que ce sont les mangas de Hokusai qui s'imposent (**Figure 7b**, voir aussi page 42, Chapitre 1, figure 4c). Ces planches développent chaque fois un thème : des guerriers qui s'habillent, un coup de vent sur des passants, des ouvriers, etc. Elles ne montrent pas une variété de personnages, mais bien une variance qui les relie au moins autant qu'elle les distingue. Enfin et surtout, chaque personnage constitue une partie du contexte pour les autres. Cette approche du dessin paraît donc très pertinente pour les questions soulevées ici en biologie cellulaire et moléculaire, même si bien entendu Hokusai l'appliquait avant tout à des corps à l'échelle humaine.

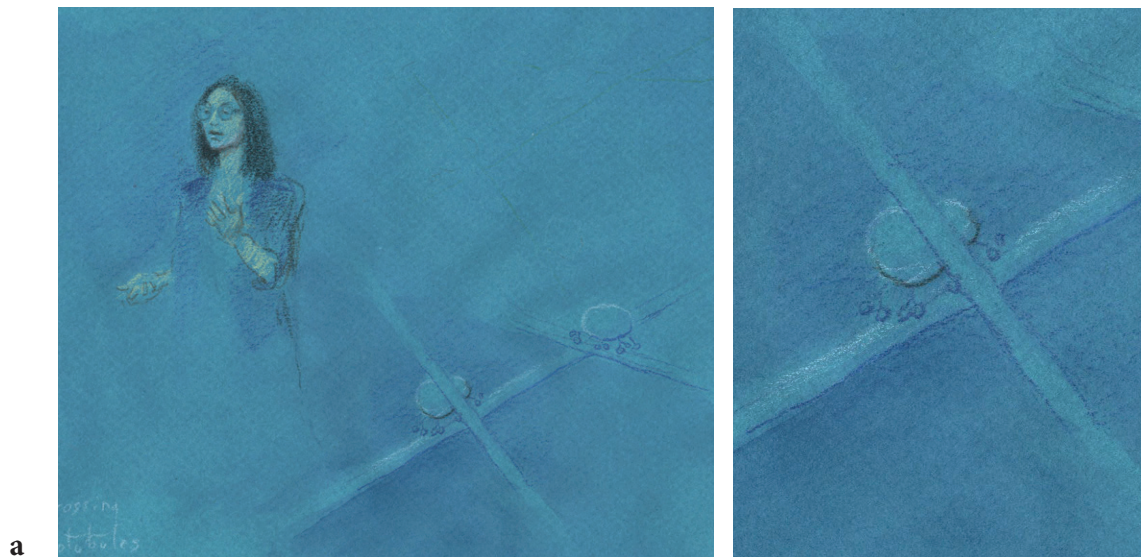
Lorsque Carsten Janke m'a présenté les questions soulevées par le cytosquelette, elles ont fait écho à toutes ces ressources propres au dessin, si bien qu'une nouvelle rencontre entre le dessin et la biologie apparaissait vraiment possible. Pour la concrétiser, Carsten Janke me proposa de suivre la conférence organisée par EMBO à Heidelberg, pour les 50 ans de la découverte de la tubuline.

3 – Une science sur le vif

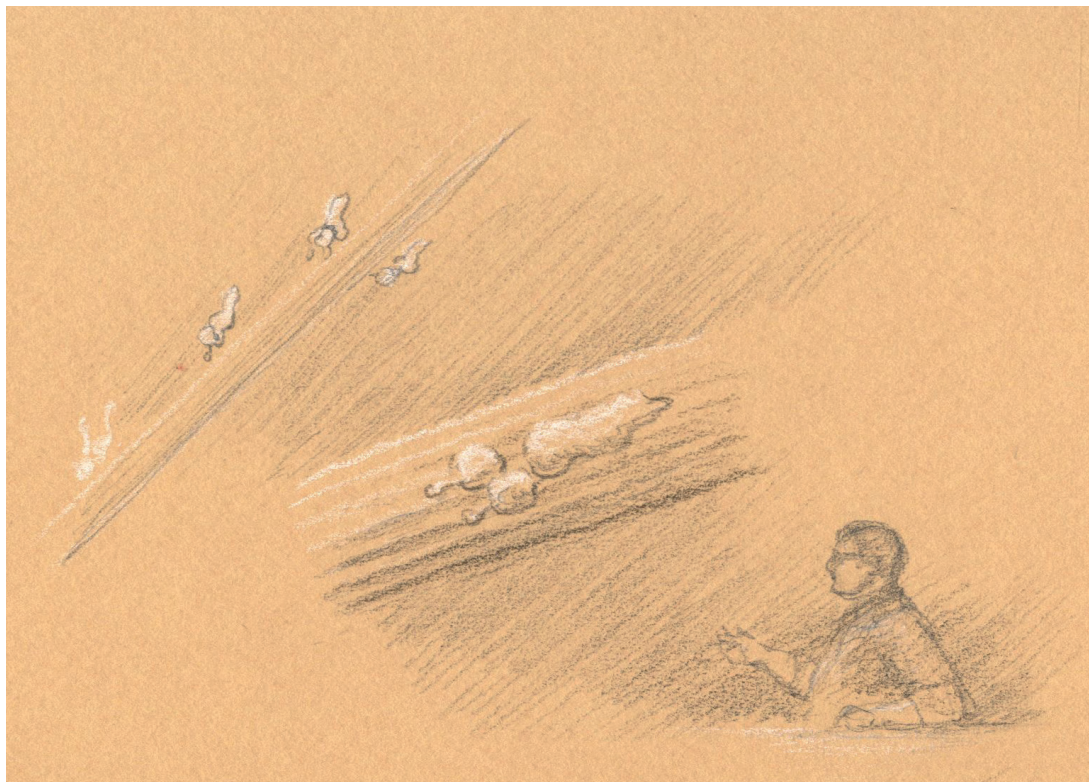
Venir dessiner « sur le vif » à l'Organisation de Biologie Moléculaire Européenne était l'occasion de découvrir l'épicentre de ce domaine de recherche en Europe. EMBO a été fondée en 1964 pour promouvoir la recherche en sciences de la vie sur le continent. Le Laboratoire de Biologie Moléculaire Européen (EMBL) fut ensuite monté dans les années 1979 à Grenoble et Heidelberg. L'idée initiale, venue de Leó Szilárd, James Watson and John Kendrew, était de donner à l'Europe une dynamique comparable celle des Etats-Unis dans ce domaine, en offrant à la biologie une structure analogue à celle du CERN pour la physique.

L'EMBL et EMBO disposent aujourd'hui d'un siège principal à Heidelberg, où un « learning center » a été inauguré en 2010 pour accueillir les conférences et les ateliers. EMBO est en Europe le principal organisateur de ces événements, et par conséquent le carrefour où se rencontrent régulièrement les acteurs d'un vaste éventail de spécialités en biologie cellulaire et moléculaire. Une conférence internationale dédiée aux microtubules a ainsi lieu tous les deux ans.

En 2016 la conférence « EMBO/EMBL symposium microtubules : from atoms to complex systems » se distinguait des précédentes, car la tubuline avait été découverte par Gary Borisy juste 50 ans avant, en 1966. Carsten Janke et les autres organisateurs avaient donc demandé aux principaux



a



b

Figure 9: le travail sur papier teinté s'accorde souvent bien avec les images microscopiques

a: Problème du croisement des microtubules pour les moteurs moléculaires (détail à droite)

b: Vue rapprochée de la dynéine (moteur moléculaire)

c: Kinésines (autre moteur moléculaire) à l'extrémité d'un microtubule (détail à droite)

intervenant de mettre plus en relief que d'habitude la perspective historique de leur travail. Dans ce type de conférence, il arrive qu'une « keynote » (intervention principale, distincte des autres communications) prennent ce parti-pris, mais il est rare qu'une dizaine de conférenciers et conférencières s'emploient à le faire. Il s'agissait donc d'une occasion unique de prendre du recul sur le chemin accompli depuis cinquante ans dans ce domaine.

Ma présence en tant que dessinateur invité était donc loin d'être due au hasard : elle s'intégrait dans une démarche pour rassembler les connaissances liées aux microtubules, à un moment où le succès de ces recherches les engage aussi dans une diversification parfois difficile à suivre. Il était prévu que je m'entretienne personnellement avec chacun des principaux acteurs historiques de ce champ scientifique, afin d'évaluer si une telle histoire pouvait être organisée sous forme de livre. Le reste du temps, j'assistais aux interventions qui se succédaient et surtout je dessinais les conférenciers, en m'efforçant de faire cohabiter dans mes croquis leurs corps et leurs sujets d'étude.

Dessiner ainsi « sur le vif » des personnes que l'on n'a jamais vues, dont on découvre le discours et les images, le tout dans de mauvaises conditions d'éclairage, demande un certain entraînement. Je disposais heureusement d'une solide expérience de croquis dans le monde du cabaret, dont les présentations partagent certains aspects avec les présentations scientifiques : il s'agit en général d'une personne debout sur la scène, dont la mission est d'emmener l'assistance dans son univers en un temps assez limité. Les artistes de cabarets sont en général mieux éclairés, mais la salle est tout aussi sombre. Je savais donc quel type de matériel je devais apporter (planche, éclairage complémentaire) pour pratiquer le dessin, et je savais dans quelle direction travailler : celle des croquis « sans point de vue » de Hokusai et de Léonard de Vinci, en prêtant un maximum d'attention à la variance des postures.

Une vingtaine de planches furent ainsi dessinées au crayon, rehaussées d'aquarelle quand le temps le permettait (**Figure 8, page précédente**). J'expérimentais aussi des papiers colorés, qui permettent d'utiliser le crayon blanc et se lient parfois mieux avec l'univers visuel de la microscopie (**Figure 9**). A d'autres moments, je me concentrais sur les attitudes des intervenants (**Figure 10**). Petit à petit, une



c

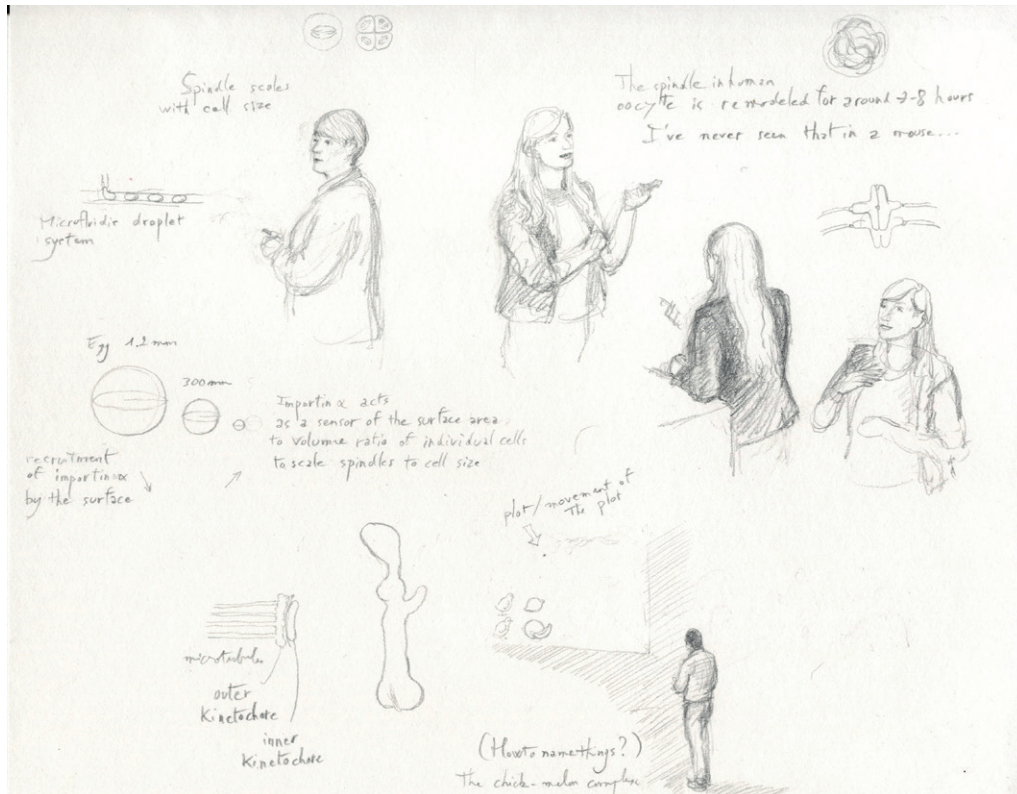


Figure 10 : Notes et études de posture des intervenants.

Les corps font contexte pour eux-mêmes dans le cadre d'une géométrie non seulement «sans point de vue», mais aussi «sans instant de prise de vue»

Une performance de dessin similaire a été effectuée en 2016 dans la conférence EMBO/EMBL «Actin», ainsi que dans l'édition de la conférence «Microtubules» en 2018

vue d'ensemble se dégagait : dessinées de la même main, les interventions paraissaient moins disparates et formaient un univers commun. Je constatais une fois de plus l'efficacité de cette démarche de croquis pour se familiariser avec une société, d'une façon que certains anthropologues utilisent également (Royer 2017) : la présence du dessinateur est en effet différente de celle du photographe. Le dessin demande du temps, et ce temps peut s'étirer pendant des heures car la personne qui dessine s'ennuie beaucoup moins facilement que celle qui se contente de regarder. Si bien que le dessinateur, tout en étant présent, peut « disparaître » aux yeux de l'assistance : il est là, mais il ne gêne pas. Assez rapidement, les personnes autour de lui se détendent et « se laissent dessiner ».

La série des dessins fut projetée en conclusion de la conférence, induisant chez les participants le jeu qui consiste à reconnaître les intervenants, et offrant le temps de quelques minutes une re-coïncidence entre la salle et ce qui s'y était passé durant les quatre jours précédent. Une rencontre avait bien eu lieu, un « portrait » de la conférence avait été dessiné. Était-il possible de faire de même avec la discipline ?

Entre chercheurs et molécules : le portrait d'une discipline

Si la réalisation de dessin pendant la conférence avait été un succès, aucune diffusion n'avait été prévu en amont pour un tel travail : il s'agissait, après tout, d'un essai. Après la conférence, il était cependant souhaitable de publier d'une façon ou d'une autre le matériel de dessin dont nous disposions, ainsi que les entretiens que j'avais pu mener. Carsten Janke, les responsables d'EMBO et moi-même nous mirent d'accord sur la réalisation d'une affiche, ou « poster », qui serait envoyé à tous les participants, afin de montrer quel visage la recherche sur la tubuline avait offert pour ses 50 ans.

Les « posters » sont une composante importante dans la transmission scientifique. Les jeunes chercheurs doivent souvent réaliser leurs propres posters, en exemplaire unique, afin de présenter leurs travaux. Les éditeurs scientifiques publient aussi des posters, souvent dans le but de synthétiser les informations sur un domaine. Les posters les mieux réalisés restent affichés pendant longtemps sur les murs des laboratoires, où ils servent d'abord de ressource, puis font partie du paysage. Comme tout affiche qui reste installée trop longtemps à la même place, le poster finit toujours par disparaître. Cependant son influence visuelle peut s'en trouver d'autant plus grande, car elle ne se remarque plus.

Réaliser l'affiche des 50 ans de la tubuline, publié par EMBO, constituait donc une excellente occasion de faire rentrer le dessin dans les laboratoires, en sachant qu'il serait impossible de préjuger du résultat à plus long terme. Cependant, comme je l'ai déjà dit, il n'était pas question d'une telle affiche tandis que je réalisais les dessins. Comment composer avec ces derniers une « grande image » cohérente, sans avoir pu en anticiper la composition ? Heureusement, il s'agit précisément de l'une des forces de la géométrie sans point de vue : la facilité avec laquelle elle permet de re-composer les dessins. Je pouvais donc, en théorie, utiliser les croquis des principaux intervenant pour leur faire dire à chacun quelques mots à propos d'un aspect des microtubules.

Les croquis des intervenants n'étaient pas suffisants pour une grande composition, Et il me semblait impératif de donner une large place à l'inouï des microtubules. Après une première esquisse et mise en place (**Figure 11a** et **11b**), je réalisais donc un grand dessin plus fouillé que les croquis effectués sur le vif (**Figure 11c**). A l'appui du discours des personnages, je pouvais alors montrer le centrosome (organelle à laquelle une extrémité des microtubules est rattachée), la polymérisation et

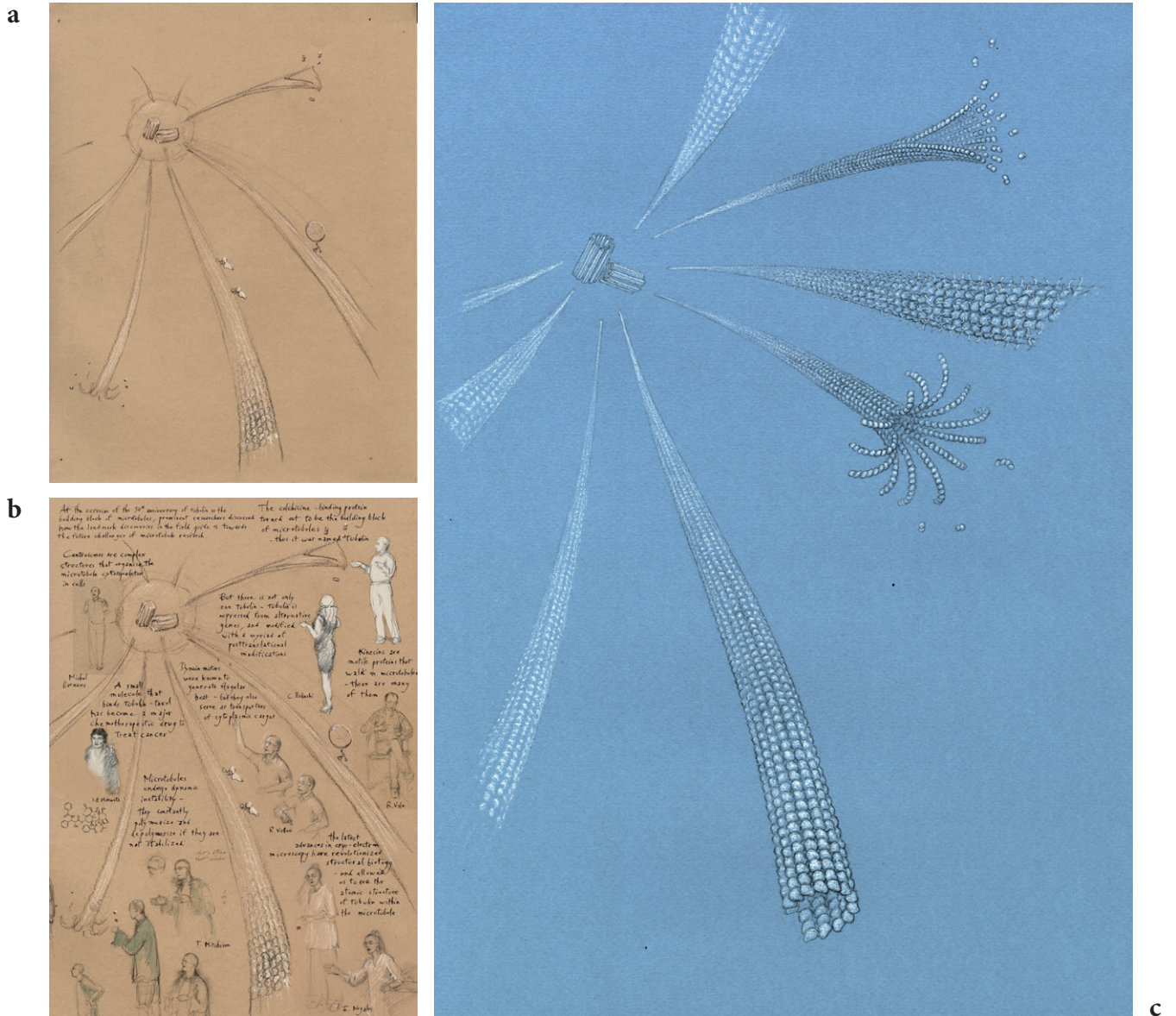


Figure 11 : Dessins complémentaire pour la composition du poster

a : un premier croquis de mise en place est réalisé. A cette étape, il est utile de projeter des dessins de référence sur la feuille, de telle sorte que le nouveaux dessin complémentaire s’y ajuste bien.

b: Ces différentes couches de travail peuvent ensuite être composées et transformées dans un logiciel de traitement d’image ou de « compositing », ici pour mettre en place les textes.

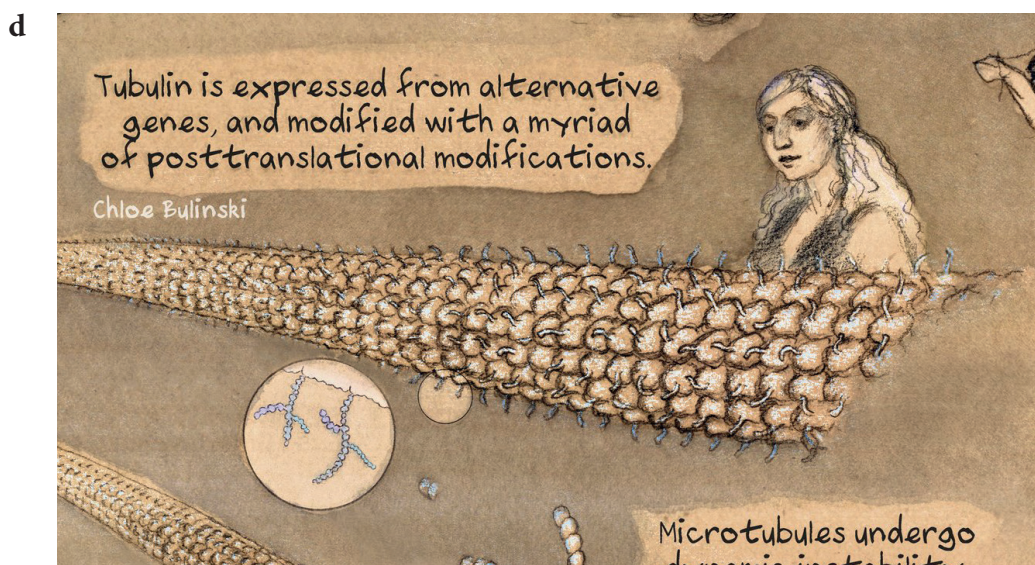
c: Pour réaliser la version définitive du dessin de fond en grand format, un premier dessin sur fond blanc est réalisé. Ce dessin est imprimé sur puis des rehauts de blanc sont ajoutés sur une impression en grand format sur papier teinté permet de réaliser des rehauts de blanc.

d: Détail du poster final montrant la chercheuse Chloe Bulinski et les modifications post-translationnelles de la tubuline.

la dépolymérisation qui se succèdent dans un « équilibre dynamique », la modification des chaînes latérales (**Figure 11d**), les moteurs moléculaires (kinésines dans un sens et dynéine dans l'autre), etc. Le poster final fait ainsi le portrait d'une discipline qui compose avec un sujet extrêmement «protéiforme» (**Figure 1** en début de chapitre).

En pratique, une difficulté vint du fait que certains croquis étaient sur papier teinté, tandis que d'autres étaient sur fond blanc, et d'autres encore étaient aquarellés. Ces différences de texture étaient souhaitables dans le cadre d'une recherche exploratoire. En écrivant ce mémoire, j'ai ainsi constaté qu'elles m'avaient permis de retrouver sans le savoir la piste des dessins de Pasteur et Hayward. En revanche, ces différences de texture étaient gênantes pour l'homogénéité d'un poster. Difficile à rattraper, elles sont responsables d'une certaine lourdeur d'ensemble dans le résultat «fini». Par suite, ce dernier a pu nous détourner de pistes de travail plus simples, sensibles dans les **figures 9, 11a** et **11c**. Ceci illustre une règle importante mais souvent oubliée dans la relation entre sciences et dessin: il est dangereux de vouloir passer trop vite de la recherche à la communication.

Quoiqu'il en soit, le portrait est-il réussi ? Les retours en tout cas furent excellents, et le poster bien accueilli. Il préfigurait pour Carsten Janke et moi un travail plus ambitieux, développé sous forme de roman graphique. Même s'il se limitait aux fondateurs de la discipline, ce portrait avait cependant déjà des allures d'hydre alors qu'il ne montrait même pas les ramifications auxquelles s'attaquent les chercheurs des générations suivantes. Ces derniers doivent en effet aborder des problèmes scientifiques complexes, doublés de problèmes de représentation nouveaux que nous allons examiner.



Chapitre 8

La « 3D », la « 2D », et la ressource du trait

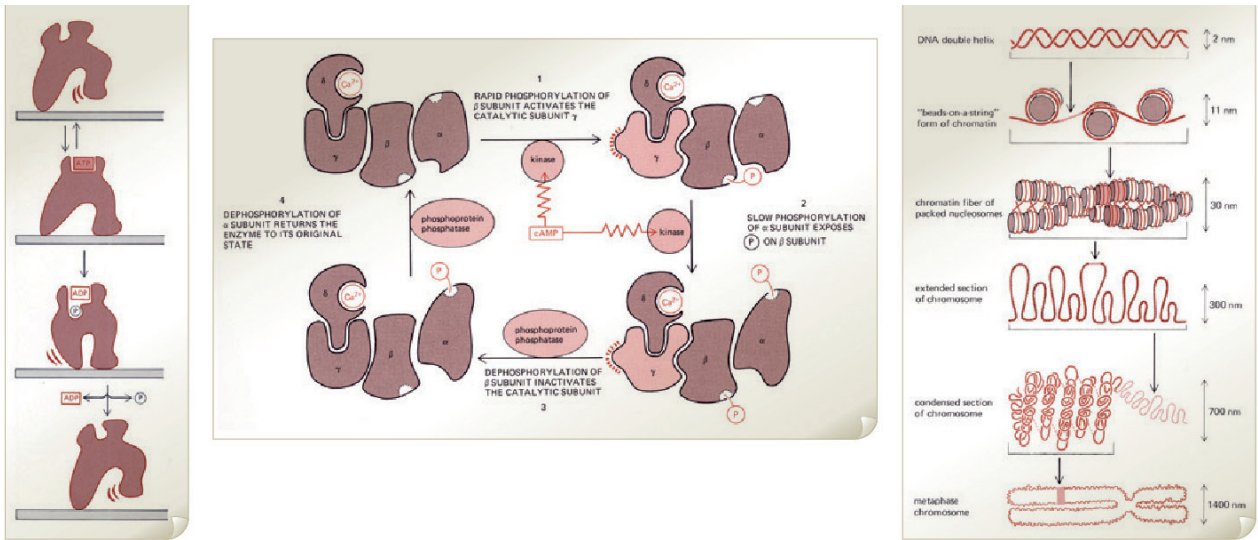


Figure 1 : Figures dessinées par Keith Roberts dans « Molecular Biology of the Cell » (Alberts et al. 1983)

Selection extraite de «Beyond a pedagogical tool: 30 years of Molecular Biology of the Cell» (Serpente, 2013).

Le dessin à la main laisse exister un minimum de spatilité, même dans une forme très simple dessinée par son contour.

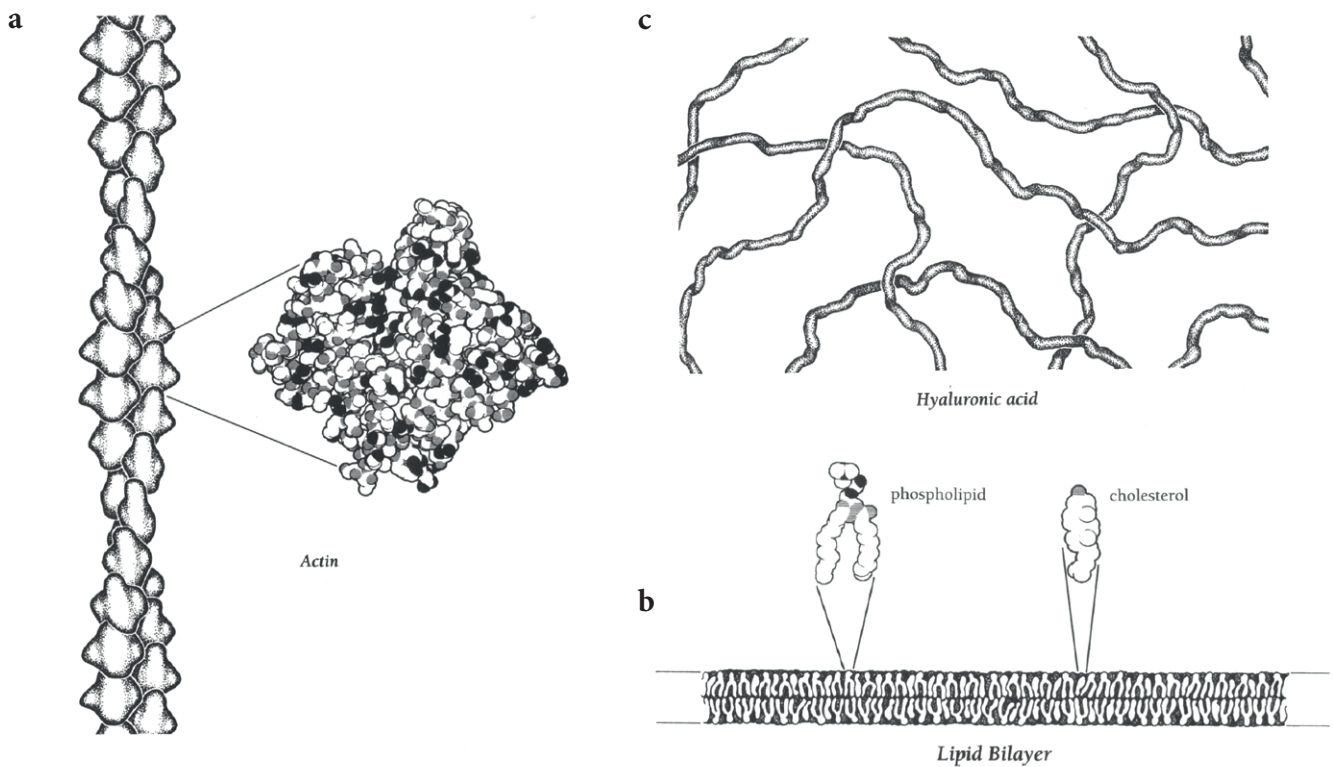


Figure 2 : Figures dessinées par David Goodsell dans «Our molecular nature» (1996)

a, b: La technique des petits points et le rendu des images de synthèse sont utilisés de façon à pouvoir se rapprocher.

c: Des structures souples peuvent également être dessinées de cette façon

**La « 3D », la « 2D »,
et la ressource du trait
(Cinquième expérience de réalisation)**

1 – Entrée en matière: une brève histoire des représentations en biologie cellulaire et moléculaire

Il existe aujourd'hui une grande variété de représentations en sciences, tout particulièrement dans les disciplines liées à la biologie cellulaire et moléculaires. Si on compare les figures 5a, 5b et 5c du chapitre précédent (page 168), on constate que ces différentes façons de voir la tubuline ne se situent pas du tout au même niveau d'abstraction. Le dessin tente de combler l'écart entre ces représentations, ce qui a également pour effet d'ouvrir un paysage plus large. La plus grande difficulté que peut rencontrer un dessinateur, en travaillant sur des sujets de ce type, se situe ainsi au niveau de la documentation : comment prendre appui sur des représentations aussi distantes ? Ces représentations sont-elles seulement fiables, pour qui n'est pas spécialiste du sujet concerné ?

En biologie cellulaire, l'hétérogénéité des visualisations scientifiques semble s'être installée en trois temps. Sans chercher à remonter trop loin dans le passé, elle trouve d'abord sa source dans le développement de la biologie moléculaire entre 1940 et 1980, lorsque les méthodes, bien plus que les représentations, deviennent la vraie « culture commune » de ce domaine scientifique (Morange, 2003). Dans un second temps, les techniques de microscopie par fluorescence ont beaucoup enrichi l'imagerie de la biologie cellulaire dans les années 1980, en même temps que cette discipline déployait un effort de représentation pour intégrer les concepts de la biologie moléculaire : une nouvelle façon de schématiser l'univers des molécules du vivant a été introduite à cette occasion. Le troisième temps est lié à l'extension des outils de graphisme assistés par ordinateur, en « 3D » comme en « 2D », au cours des années 2000.

1940-1980 : la biologie moléculaire et le « commun » des méthodes

Nous avons vu au chapitre précédent que la découverte de la structure spatiale des protéines avait fait intervenir la biochimie, l'immunologie et la mécanique quantique. Dans le développement de la biologie moléculaire, d'autres disciplines comme la génétique, l'évolution ou encore l'informatique ont également joué un rôle fondamental que je ne peux pas aborder ici. C'est donc à travers une construction très complexe que cette nouvelle discipline est parvenue à décoder puis à manipuler l'ADN. D'après Michel Morange, les physiciens ont joué un rôle majeur dans cette avancée dès les années 1940. Ce rôle s'est décliné de deux façons : d'une part, ils ont apporté l'élan conceptuel qui allait permettre de séparer l'idée de « code génétique » d'avec les protéines. D'autre part, ils ont développé des méthodes expérimentales rapidement diffusés à travers le monde.

A partir des années 50, quelle que soit leur façon d'étudier les molécules du vivant, tous les laboratoires se sont appropriés des outils comme l'ultracentrifugation et l'électrophorèse pour les extraire et mesurer leur présence. Avec des techniques plus tardives comme l'amplification de l'ADN (ou PCR, mise au point en 1983), ces méthodes se sont ajoutées aux « communs » en usage depuis l'époque de Pasteur et Koch (étuves, photographie microscopique). Ce partage des méthodes, qui a fait l'unité de la biologie moléculaire selon Michel Morange (*Ibid.* p 127), constitue toujours aujourd'hui une part essentielle de la culture des laboratoires.

A l'inverse des méthodes expérimentales, le partage et le perfectionnement des représentations ne semble pas avoir été un chantier prioritaire pour les acteurs de la biologie moléculaire. Si les recherches sur la structure spatiale des macromolécules conduisaient logiquement à des visualisations, les méthodes biochimiques ou génétiques nécessaires pour étudier d'autres aspects de la vie cellulaire ne s'y prêtaient pas aussi bien. Le développement de la microscopie électronique compensa ce manque de représentations, mais seulement pour le grand public : à cause de leur complexité et de leurs nombreux artefacts, « les photos de microscopie électronique eurent certes une vertu pédagogique et une valeur de témoignage ; mais elles ne furent pas à l'origine des découvertes. Elles montrèrent la « réalité » des résultats obtenus... sans elle » (*Ibid.* p 140).

Il est ainsi possible de cerner, au cours de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, le début d'une profonde déconnection entre le « grand public » et les sciences de la vie à l'échelle microscopique. Contrairement à l'idée implicitement véhiculée par la microscopie électronique, les images vraiment « pertinentes » en biologie moléculaire avant les années 1980 étaient les moins compréhensibles, y compris par un public scientifique : qui, à part les spécialistes, peut donner un sens à une image de diffraction des rayons X sur un cristal de molécule ?

Vers 1980 : La biologie cellulaire devient moléculaire, et réinvestit les représentations

A la fin des années 70, le succès de la biologie moléculaire était évident, puisque les principaux fondements moléculaires de la reproduction, de la génétique et de l'évolution avaient été découverts. Cependant, à mesure que les interactions entre molécules révélaient leur complexité, l'espoir initial porté par les physiciens commençait à s'étioler : trouver des explications aussi simples et élégantes que celles de la physique fondamentale pour les problèmes posés par le vivant s'avérait de plus en plus difficile. C'est la biologie cellulaire, en revanche, qui prit un nouvel essor dans les années 80. L'étude des cellules bénéficia de nouvelles techniques d'imagerie, en particulier l'imagerie par fluorescence, grâce auxquelles les organelles de la cellule purent enfin être observés de façon lisible. Les chercheurs découvrirent en particulier l'importance du cytosquelette et des compartiments¹.

Selon Michel Morange, la biologie moléculaire était alors parvenue au terme de son programme car les sciences du vivant étaient désormais toutes « molécularisées ». La publication en 1983 du manuel « *Molecular Biology of the Cell* » joua un rôle important dans la façon dont la biologie cellulaire fit cet effort d'intégration (Alberts et al. 1983). Le chercheur Bruce Alberts entama le chantier de ce livre au milieu des années 70, en s'assurant la collaboration de plusieurs autres collègues, et

¹ Pour étudier des structures de cette taille, la microscopie électronique avait cette fois une pertinence. Depuis les années 50, elle permettait de montrer grâce à des vues en coupe l'organisation du centrosome et des centrioles, à partir duquel poussent les microtubules (Bornens 2020)

surtout celle du chercheur-illustrateur Keith Roberts, qui avait déjà travaillé sur la troisième édition du manuel « Molecular Biology of the Gene » (Watson J D, 1976). Pendant plusieurs années, Bruce Alberts et ses collaborateurs se réunirent régulièrement pour comparer leurs chapitres en assurant la cohérence de l'ensemble. Cette histoire est racontée par Norberto Serpente (2013), dans un article précieux pour comprendre l'investissement considérable que représente la réalisation d'un manuel scientifique de qualité.

Outre la qualité des textes, le succès de « Molecular Biology of the Cell » (MBoC) reposa aussi beaucoup sur l'usage de figures dessinées (**figure 1**). Ce livre offrit un terrain commun de représentations qui permit à toute une communauté scientifique de stabiliser sa pensée. Ce type de figures a ensuite été repris et adapté sans cesse depuis la publication du livre, si bien qu'il apparaît comme le prototype de nombreux schémas utilisés aujourd'hui. Cependant, il est important de remarquer que dans les premières éditions de MBoC ces figures étaient dessinées à la main : chaque forme présente de légères variations de courbure et de texture qui laissent deviner une rondeur (la molécule n'est pas plate), une variance (les molécules ne sont pas des clones parfaitement rigides) ou encore une profondeur (les formes ne cohabitent pas dans un plan).

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, les années 1980 et 1990 virent aussi se développer de nouveaux moyens de visualisation des molécules. Nous retrouvons donc ici le chercheur David Goodsell, qui fut très impliqué dans le développement des visualisations de protéine en images de synthèse. Comme il était également dessinateur, il développa une approche consistant à utiliser les deux ressources : les images de synthèse étaient très efficaces pour visualiser les molécules « isolées », directement d'après les données cristallographiques, tandis que le dessin permettait de mettre ces formes dans un contexte plus large : celui d'un polymère, d'une membrane, ou encore de l'intérieur très encombré d'une cellule (voir figure 6 du chapitre 7, page 167). Les deux premiers livres de David Goodsell, « The Machinery of Life » (1992) et « Our Molecular Nature » (1996), sont remarquables par leur filiation évidente avec le dessin scientifique pratiqué dans les muséums d'histoire naturelle : imprimés en noir et blanc, ils utilisent même la technique des « petit points » pour l'ombrage des molécules, comme cela se pratique pour la publication des observations anatomiques (**figure 2**). De fait, David Goodsell a participé aux travaux de la Guild of Scientific Illustrators dans « the guild handbook of scientific illustrations » (Hodges et al. 2003), créant un pont entre deux échelles de travail très éloignées.

Avec ses travaux sur les rendus des images de synthèse, David Goodsell a durablement influencé la vision spatiale des protéines, tandis que Keith Roberts en a offert une vision plus plate et schématique. Il serait tentant de rapporter le premier à la « 3D » et le second à la « 2D », mais il s'agirait d'un anachronisme. En effet, dans les années 1980 et 1990, le dessin à la main était encore incontournable pour l'illustration des manuels. Il a alors agi comme un opérateur de « dé-coïncidence » (Jullien 2017), en transformant l'intention initiale des représentations de deux façons opposées. En faisant exister, au sein même d'une représentation « à plat », une certaine spatialité induite par la texture et la courbure du trait (voir chapitres 2 et 3), le dessin a compensé le caractère forcément abusif de cet aplatissement : c'est ce qu'a fait Keith Roberts. En détachant l'information spatiale de son abstraction pour la ramener sur une surface matérielle, le dessin a permis d'étendre le concept de molécule à une plus grande échelle : c'est ce qu'a fait David Goodsell.

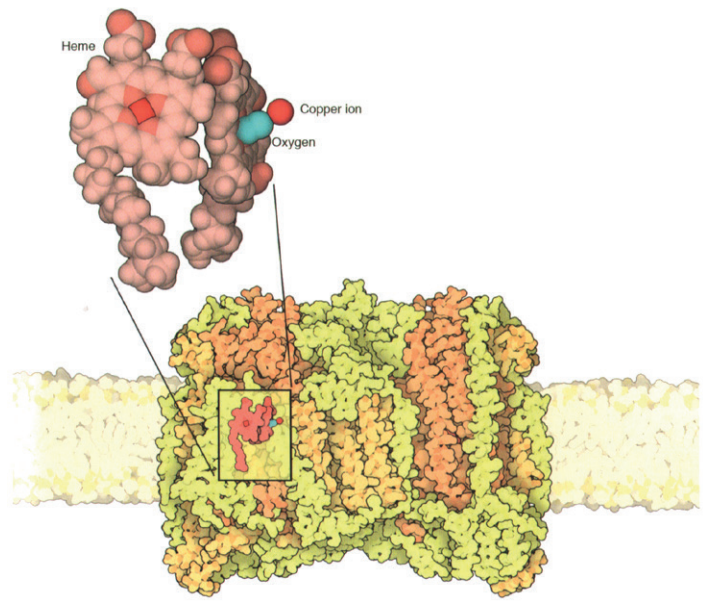
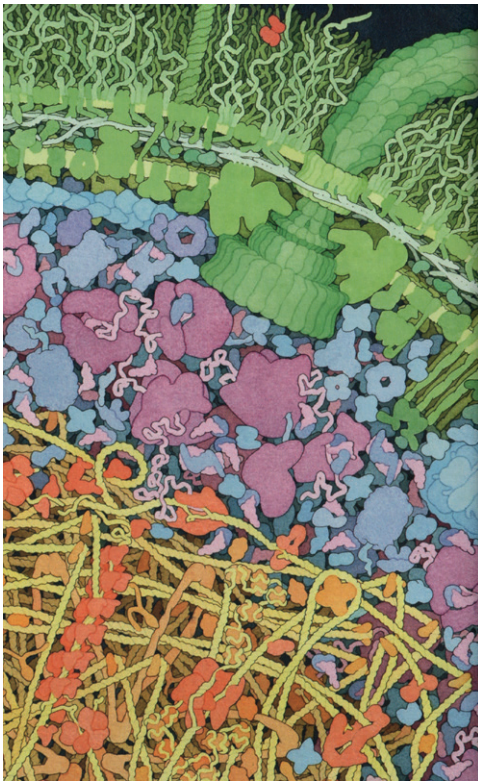


Fig. 7.7 Cytochrome c Oxidase Cytochrome c oxidase is the major culprit in the formation of reactive oxygen molecules. It performs the last step in respiration, placing the electrons extracted from food molecules onto oxygen. It is a large protein complex found in the mitochondria. The active site is buried deep inside the protein, and several heme molecules and copper atoms assist with the reaction. The oxygen molecule is shown in bright blue. (top, 20,000,000 X; bottom, 5,000,000 X)

Figure 3 : Recherche d'un rendu homogène en aquarelle et en images de synthèse par David Goodsell

Dans la deuxième édition de «The machinery of life» (2009), David Goodsell développe sa méthode en reprenant toutes les figures en couleur, dans une recherche de cohérence visuelle

(A gauche, détail d'une coupe sur la bactérie Escherichia Coli; à droite, la Cytochrome Oxydase)

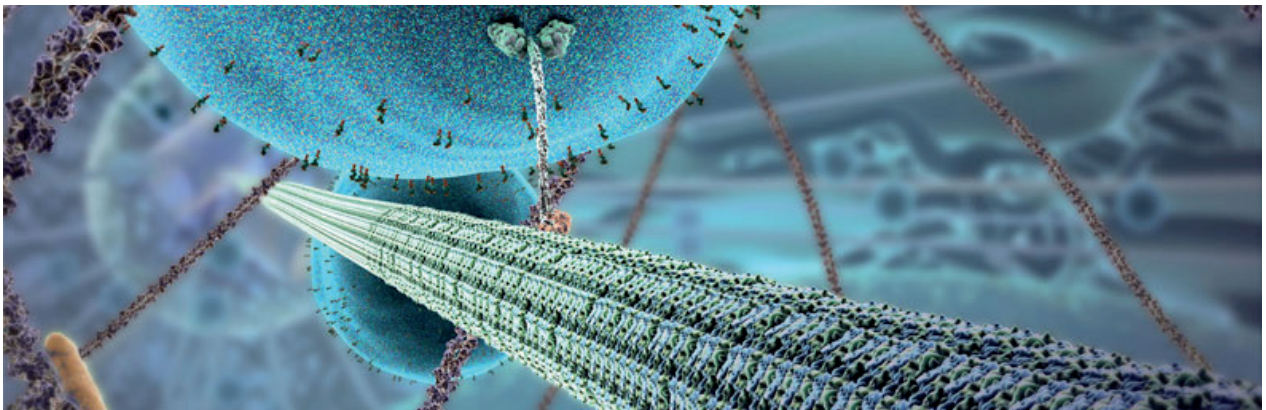


Figure 4 : Image extraite du film «Inner life of the cell» (Harward University, XVIVO, 2006)

Vers 2000 : la « 3D » et la « 2D » imposent leurs règles

A la fin des années 1990, l'usage des outils de création graphique assistés par ordinateur se généralisa dans les laboratoires et dans le monde en général. C'est à partir de cette époque qu'il est possible de parler réellement de « 3D » et de « 2D » pour désigner simultanément des techniques de représentation, des familles de logiciels et des types de donnée. La visualisation des molécules, principalement axée sur la « 3D », a alors été l'objet de beaucoup de perfectionnements qui continuent aujourd'hui. Elle a vite été reconnue comme une expertise, peu de biologistes étant capables (encore aujourd'hui) d'éditer, de modifier et d'animer des modèles 3D. La réalisation des figures, en revanche, a connu une évolution inverse : tous les chercheurs ont été plus ou moins forcés de s'approprier les nouveaux outils de création graphique en « 2D », disponibles dans des logiciels tels que Powerpoint (de la société Microsoft), ou Photoshop et Illustrator (de la société Adobe). Entre 2000 et 2010, la quasi-totalité des figures produites par les biologistes a ainsi changé de nature, sans qu'il y ait à ma connaissance de concertation sur la formation nécessaire pour employer ces nouveaux outils. A la fin des années 2000, des conférences et des publications commencèrent à s'emparer de cet enjeu en se focalisant sur la visualisation de données (O'Donohue et al. 2010), mais en ce qui concerne le dessin, la transition avait déjà eu lieu.

David Goodsell a brillamment tiré parti de cette évolution, en faisant évoluer à la fois le rendu de ses images de synthèse et son dessin. Dans la deuxième édition de « *The Machinery of Life* » (2009), il renouvela toute les illustrations en associant cette fois des dessins coloré à l'aquarelle avec des images de synthèse pour lesquelles il avait développé un rendu similaire (**figure 3**). L'autre réalisation marquante des années 2000 fut le court-métrage « *Inner Life of the Cell* » par David Bolinsky, John Liebler et Mike Astrachan (2006, référence de film [7], **figure 4**). Ce film de 8 minutes, qui demanda 14 mois de travail d'équipe, offrit une vision des phénomènes moléculaires à l'intérieur d'une cellule immunitaire avec une grande qualité de mouvement et de rendu. Comme le travail de David Goodsell, il a durablement marqué l'imagination des chercheurs, tout en restant un cas relativement isolé. Le succès indiscutable des images de synthèse a ainsi été accompagné d'une part d'illusion : dans un contexte où les moyens dédiés à la fiction en images de synthèse devenaient considérables (les films de Pixar, en association avec Disney, atteignaient alors le statut de méga-production), quelques réalisations de grande qualité dans le domaine scientifique ont pu laisser croire que ces nouveaux outils allaient remplacer tous les autres.

Si remplacement il y a eu, c'est surtout celui des figures dessinées à la main par des figures dites « vectorielles ». Comme je l'ai montré dans le chapitre 3 de ce mémoire, la notion de « dessin vectoriel » repose sur un malentendu. Dans le cas qui nous occupe ici, il est nettement préférable de la remplacer par celle d'« illustration paramétrique ». Cette expression désigne beaucoup plus précisément les objets graphiques dont il est question, car ils sont effectivement définis à l'aide d'un petit nombre de paramètres (centre, rayon, point de contrôle, tangente...). En général, les formes paramétriques ne sont pas dessinées avec un geste de tracé, mais spécifiées par une succession de « drag-and-drop » effectués avec une souris. Même si une ligne paramétrique peut ressembler à un trait, il est donc dangereux d'assimiler les deux concepts trop rapidement car ils ne portent en général pas la même information.

La **figure 5**, tirée d'un second article de Norberto Serpente (2016), permet d'évaluer les efficacités

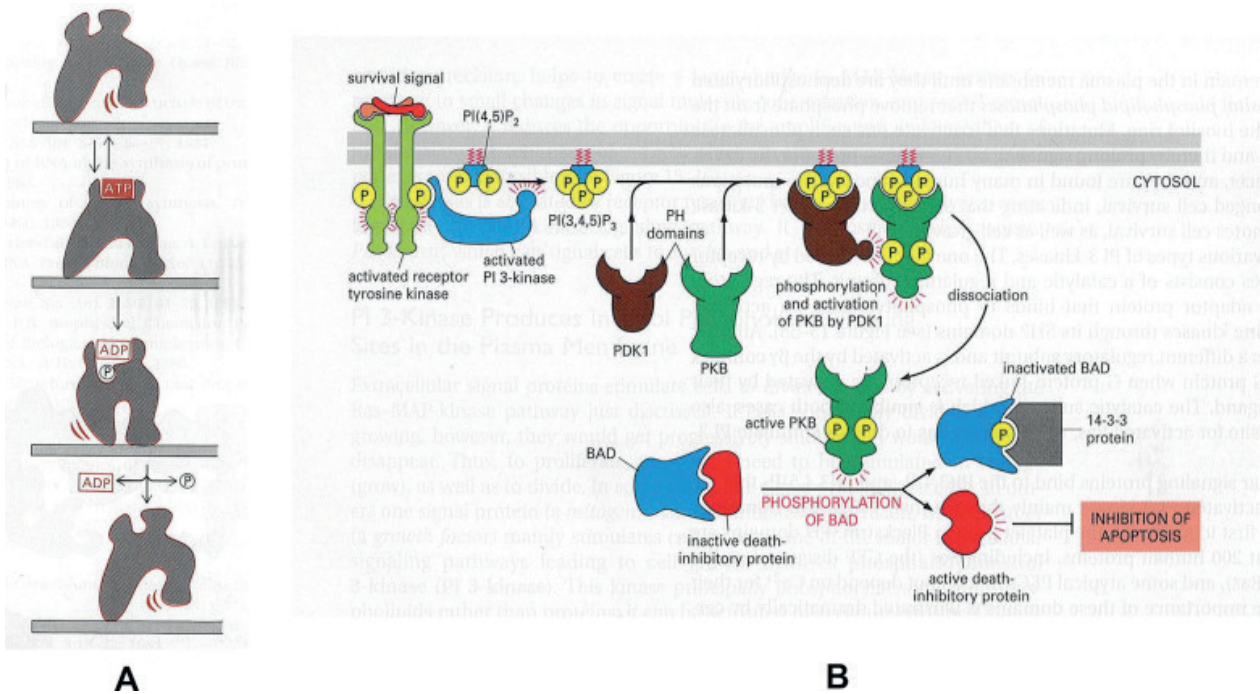


Figure 5 : Figures dessinées par Keith Roberts dans « Molecular Biology of the Cell » (Alberts et al)

Selection extraite de «Justifying molecular images in cell biology textbooks: From construction to primary data» (Serpente 2016)

(A gauche, figure de l'édition de 1989, à droite, figure de l'édition de 2002)

respectives du dessin à la main et de l'illustration paramétrique. Dans les deux cas, les illustrations sont signées par Keith Roberts, c'est-à-dire par le fondateur de ce type de représentation lui-même. La figure de gauche, rééditée en 1989 dans « *Molecular Biology of the Cell* » (MBoC), montre l'idée d'un « molécule qui marche », vivante à la façon d'un personnage de cartoon. La figure de droite, publiée dans MBoC en 2002, lui ressemble tout en étant nettement plus froide : le caractère très « plat » et statique des objets graphiques est renforcé par leur duplication à l'identique : elle annonce le succès des formes paramétriques dans les années suivantes. Les facilités de création et de duplication de ce dernier outil sont en effet très appréciées des biologistes, lorsqu'ils ont besoin d'une illustration pour évoquer l'association et la séparation de différentes molécules sans rentrer dans le détail de leurs structures. Il leur est donc utile de pouvoir effacer ou rajouter facilement, « d'un simple clic », les symboles graphiques dont ils ont besoin. Si le dessin et l'illustration paramétrique répondent à des enjeux de représentation différents, c'est donc avant tout parce qu'ils manifestent des propensions différentes, vers la vie d'un côté, vers la symbolique de l'autre.

Ainsi, les outils numériques communément appelés « 3D » et « 2D » ont profondément influencé les représentations utilisées en biologie cellulaire. Mais contrairement aux méthodes expérimentales et aux techniques de microscopie, ces outils sont restés relativement étrangers à la plupart des chercheurs concernés, même s'ils y sont confrontés tous les jours. Il n'est pas exagéré de parler, dans ce cas, d'une aliénation des représentations. Par contrecoup, cette aliénation touche aussi le grand public. La relation entre les images et les sciences du vivant s'était déjà brouillé durant le développement de la biologie moléculaire, à cause d'un décalage entre ce qui était montré au public et ce qui était réellement utilisé en sciences. Elle est devenue encore plus obscure lorsque la géométrie des illustrations s'est mise à ne plus correspondre nécessairement à celle des phénomènes observés, et à emprunter des outils explicitement développés pour les besoins du cinéma, du management et du marketing. Il est donc nécessaire de mieux évaluer les effets de cette évolution, de voir comment en corriger les aspects indésirables, et enfin d'engager une meilleure appropriation des outils de visualisations par les chercheurs.

2 – Ce que la « 3D » et la « 2D » font aux échelles

De quoi parle-t-on exactement, lorsque nous employons les expressions « 3D » et « 2D » ? Je me limiterai ici à chercher le sens de ces expressions lorsqu'elles s'appliquent à des visualisations en biologie cellulaire et moléculaire, tout en sachant que cette réflexion s'applique à bien d'autres domaines. Dans ce contexte, comme nous venons de le voir, « 3D » se réfère au premier abord à « structure de molécule », tandis que « 2D » se réfère à « illustration » en sous-entendant le plus souvent « illustration paramétrique ». Mais plus généralement, nous allons voir que « 3D » et « 2D » désignent aussi des familles de logiciels qui reposent sur deux métaphores différentes : celle de la caméra, d'une part, et celle du papier-calque, d'autre part. Il sera alors possible d'examiner l'usage de ces outils « 3D » et « 2D », en se demandant dans quelles géométries ils ont respectivement conduit les représentations utilisées en biologie cellulaire. En répondant à cette question, nous ferons apparaître l'importance du dessin pour évoquer les changements d'échelle.

Les géométries sous-jacentes des images « 3D » et « 2D »

Dans les chapitres qui précèdent, j'ai montré à quel point la « géométrie sans point de vue » était

liée au dessin scientifique. Les transformations qu'elle autorise font partie du raisonnement, en particulier lorsqu'il s'agit de comparer deux corps ou d'effectuer des changements d'échelle. La « 3D » et la « 2D », qui dominent aujourd'hui, ont-elles rempli cette fonction ? Pour répondre à cette question, il faut examiner d'un peu plus près la conception des logiciels et leurs géométries sous-jacente.

Le cas de la « 3D » : la métaphore de la caméra

La « 3D » désigne le plus souvent les « images de synthèse ». Il s'agit alors d'images obtenues à l'aide de caméras virtuelles : ces dernières simulent une prise de vue sur une scène composée d'objets, virtuels eux aussi². Même si d'autres réglages sont possibles, la propension des images de synthèse va donc vers l'utilisation d'un « point de vue ». Le résultat peut être à la fois spectaculaire et instructif lorsque les moyens sont à la hauteur des ambitions, comme dans le film « Inner Life of the cell » (2006, référence de film [8]). Le caractère immersif de ces images a des avantages mais aussi des inconvénients. En particulier, les distorsions de la perspective centrale peuvent interférer considérablement avec la perception des formes et des échelles. L'effet d'immersion suscite l'émotion du spectateur, mais cet effet est toujours le même, quel que soit la scène, et peut donc générer une lassitude.

Paradoxalement, l'existence d'un point de vue gêne donc la perception de la variance intrinsèque d'une scène, en ajoutant une importante variance extrinsèque simplement due à la localisation des objets par rapport au centre de projection : l'effet est intéressant dans certains cas, mais pas toujours souhaitable. Pour diminuer l'effet d'immersion, et se rapprocher d'une géométrie « sans point de vue », il est nécessaire de reculer les caméras virtuelles, de resserrer leur angle d'ouverture, et de travailler simultanément sur la qualité des textures. En pratique, ce travail est rarement effectué pour des raisons ergonomiques : l'écart entre la caméra et la scène filmée rend alors leur manipulation difficile sur l'écran. Si la géométrie projective assure l'aspect spectaculaire des visualisations en images de synthèse de façon automatique, leur qualité pédagogique dépend en revanche de réglages qui demandent un professionnalisme certain.

Le cas de la « 2D » : la métaphore des papiers-calque

A l'inverse, les images numériques créées en « 2D » n'utilisent en général pas de point de vue. Qu'ils servent à manipuler des formes paramétriques ou des pixels, les logiciels « 2D » sont en effet basés avant tout sur la métaphore des papiers-calque. Ils permettent ainsi de composer entre eux des éléments graphiques, comme s'ils étaient superposés les uns au-dessus des autres. Cette logique fait en elle-même mentir l'expression « 2D », puisque la superposition des calques apporte une possibilité de profondeur. Cependant, la spatialité des outils « 2D » n'est pas donnée de façon automatique. On y accède notamment en composant des dessins numérisés qui possèdent eux-mêmes une spatialité intrinsèque. On peut aussi ne pas mettre de spatialité en oeuvre, ou induire une spatialité simplifiée en utilisant par exemple des ombrages automatiques.

²La « 3D » peut aussi désigner aussi un autre type d'image, issu de la visualisation de « données 3D » obtenues par un microscope ou une tomographie. De telles données reposent sur des « voxels », c'est à dire des pixels en volume. Elles peuvent alors être visualisées « en 3D » à l'aide d'une caméra virtuelle ou en « 2D » en y faisant des « coupes virtuelles ». Le terme « 3D » est aussi parfois employé pour désigner les images stéréoscopiques, ce qui prête à confusion.

En pratique, les outils « 2D » sont souvent utilisés de façon purement numérique, en l'absence de dessin ou de photo, afin de créer des images à l'aide de formes paramétriques. Dans ce cas, ils développent une spatialité très limitée mais ils offrent des facilités pour créer des formes planes, les remplir, les dupliquer ou les agrandir. Des possibilités de création et de transformation très similaires sont présentes dans l'autre sous-catégorie de logiciels de la famille « 2D », dont le fonctionnement n'est pas basé sur des formes paramétriques mais sur des matrices de pixels, tels que Photoshop (de Adobe) ou Gimp (logiciel libre). Il est donc extrêmement facile, dans ce contexte technique, de faire glisser une forme par rapport à une autre et d'exagérer les rapports de proportions, simplement en jouant sur la position et l'échelle des calques.

Les images numériques réalisées en « 3D » et en « 2D » développent donc deux géométries très différentes, qui dérivent directement de la métaphore de la caméra et de la métaphore des calques. La première est extrêmement liée à un point de vue : toute l'image est assujettie à ce dernier. La seconde n'est pas liée à un point de vue, mais elle n'est pas non plus liée à des proportions : les différentes couches peuvent être librement transformées. Dans les deux cas, pour des raisons inverses (liées à la contrainte du point de vue de la caméra, d'un côté et à la désarticulation des calques, de l'autre) ces techniques promeuvent des transformations qui ne facilitent pas toujours la lecture des échelles.

Proportions et changements d'échelle : des transformations trop silencieuses.

Lorsqu'un chercheur montre une « image » à un public, qu'elle soit fixe ou en mouvement, il donne à voir deux types de transformations : celles qui sont liées au phénomène observé ou évoqué, et celles qu'il a lui-même effectuées pour rendre les phénomènes plus apparents. L'idéal de transparence, qui voudrait que le chercheur n'intervienne pas sur les résultats qu'il montre, se heurte alors à des enjeux cognitifs très simples : certaines transformations de l'image sont nécessaires pour que le phénomène apparaisse, mais les précautions habituelles qui consistent à afficher les échelles de temps et d'espace ne sont pas toujours suffisantes, quand elles sont réellement prises.

Ce problème est facile à identifier en ce qui concerne le temps. Aujourd'hui, les chercheurs utilisent en effet souvent de courtes animations, directement issues de leurs observations : elles servent à montrer le mouvement d'une cellule vue en time-lapse au microscope, aussi bien que la polymérisation d'une fibre. La transformation visible à l'image est alors interprétée, selon les cas, comme un déplacement, une déformation ou encore un assemblage. De façon générale, il est possible de prendre conscience d'une telle transformation lorsqu'elle est animée suffisamment rapidement pour être perçue. Les chercheurs sont donc amenés à accélérer sur une dizaine de seconde des processus qui prennent quelques heures ou quelques jours, si bien qu'une bonne intuition des échelles de temps, d'une animation à l'autre, est difficile à construire. Il n'existe pas, pour le moment, de moyen évident pour faire sentir l'amplitude de ces transformations dans la dimension temporelle.

Les images fixes posent un problème du même ordre. Les chercheurs en biologie cellulaire se servent en effet souvent des outils « 2D » pour mettre en valeur les concepts qui les intéressent le plus dans une illustration, en modifiant des couleurs, en rajoutant des flèches et des légendes, et surtout en agrandissant certaines parties. De nombreuses figures brouillent ainsi volontairement la notion d'échelle, en représentant des molécules considérablement agrandies par rapport à la membrane dans laquelle elles sont enchâssées. La transformation qui a été opérée sur l'image est

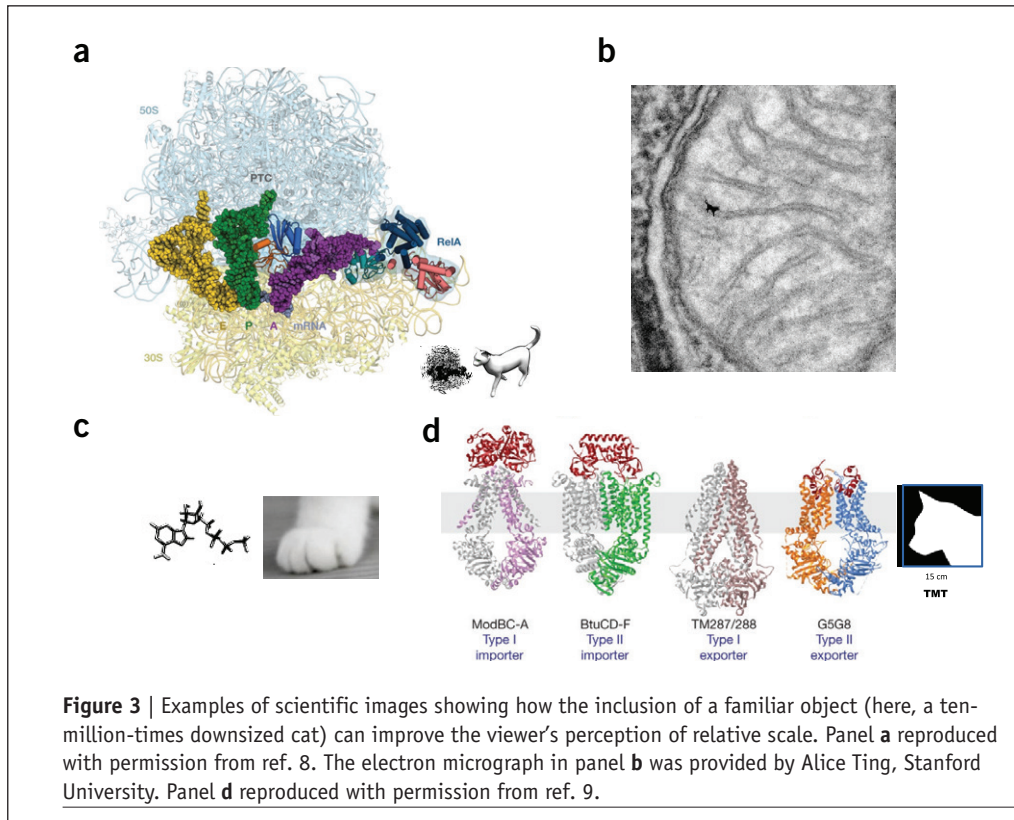


Figure 6 : Monica Zoppé propose une référence pour évaluer les échelles en biologie cellulaire et moléculaire
Figure extraite de «Towards a perceptive understanding of size in cellular biology» (Zoppé, 2017)

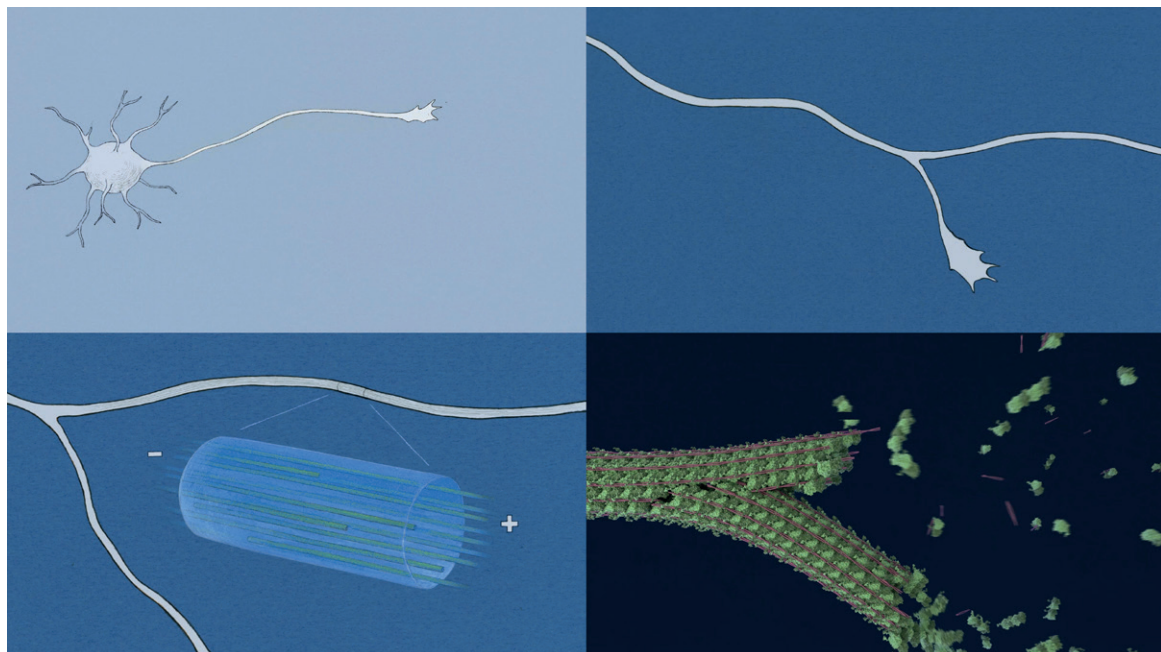


Figure 7 : Dans une séquence animée, il est possible de passer progressivement de l'échelle des cellules, en dessin, à celle des molécules, en images de synthèse

Images extraite de l'animation «Microtubule branching in neurons in the presence of SSNA2» (Réal R. Chabrier, Réal 3D A. Kawska, dir scientifique N. Mizuno, 2019)

donc totalement implicite.

Un problème similaire se pose avec les images de molécules en « 3D », c'est-à-dire en images de synthèse. Il est fréquent que ces vues soient publiées en isolant la molécule, sans proposer une visualisation du contexte comme le fait David Goodsell, et sans être donner d'échelle : il faudrait en effet savoir où placer cette dernière, en profondeur, vis-à-vis de la caméra virtuelle. Monica Zoppè, l'une des principales chercheuse-réalisatrice travaillant sur les animations moléculaires en images de synthèse, a relevé ce flou qui règne souvent sur les proportions et les échelles, au sein des images véhiculées par la biologie cellulaire et moléculaire (Zoppè 2017). Elle propose une solution originale : utiliser une référence connue de tous, celle d'un chat, qui aiderait à se repérer entre les différentes échelles nécessaires pour décrire un processus aux échelles microscopiques (**figure 6a**: Le chat entier correspondrait ainsi à la taille d'un ribosome, sa griffe à celle d'une liaison atomique.)

Cette proposition peut faire sourire, si on l'imagine appliquée dans les journaux scientifiques. Cependant, elle semble tout à fait opérationnelle dans une narration. Elle fait écho à la planche des chats de Léonard de Vinci (voir Annexe 1 page 230), qui constitue pour sa part l'un des exemples les plus emblématiques de la géométrie sans point de vue. A défaut d'apparaître partout dans le journal « Nature Cell and Molecular Biology », le chat de Monica Zoppè pourrait donc très bien s'associer à ceux de Vinci pour conduire un public plus large dans un voyage à travers la cellule.

3 - Changer d'échelle avec le dessin

Au cours de cette réflexion pour comprendre ce que le numérique a fait aux représentations en biologie, il apparaît que la «géométrie de la vie» est souvent moins respectée qu'elle n'en a l'air. La question des proportions et des échelles apparaît alors comme un axe de travail particulièrement important qui justifie le recours au dessin. Il ne s'agit pas de réhabiliter ce dernier sur des terrains où il n'a que peu de prise, mais de faire en sorte que les ressources respectives des images de synthèse, des outils paramétriques et du dessin soient employées en bonne intelligence. Je vais montrer comment cela est possible dans le contexte d'images en mouvement, puis dans le contexte d'images «fixes», avant de porter un regard plus rapproché sur le rôle de la texture du trait dans les changements d'échelle.

Changer d'échelle avec l'animation : du dessin aux images de synthèse

La chercheuse Naoko Mizuno, qui étudie les microtubules à l'Institut Max Plank, avait en 2017 un problème pour transmettre le message de sa dernière étude : en étudiant le cytosquelette des neurones, elle et ses collaborateurs avaient montré l'existence de branchements des microtubules au niveau du branchement des axones (Basnet et al. 2018). Les différentes audiences auxquelles elle avait pu s'adresser peinaient pourtant à suivre son explication. Ayant assisté à une intervention dans laquelle j'avais parlé du rôle de l'animation dans la transmission scientifique³, elle s'adressa à moi pour réaliser une séquence animée qui appuierait son « take-home message » lors d'une conférence importante qu'elle devait donner quelques mois plus tard.

Lorsque Naoko Mizuno me montra sa présentation, je vis un problème directement lié à l'utilisation courante des outils « 2D » en biologie. Elle employait quasiment la même représentation pour

³Durant la conférence internationale «EMBO Cytoskeleton 2018», Pune, Inde

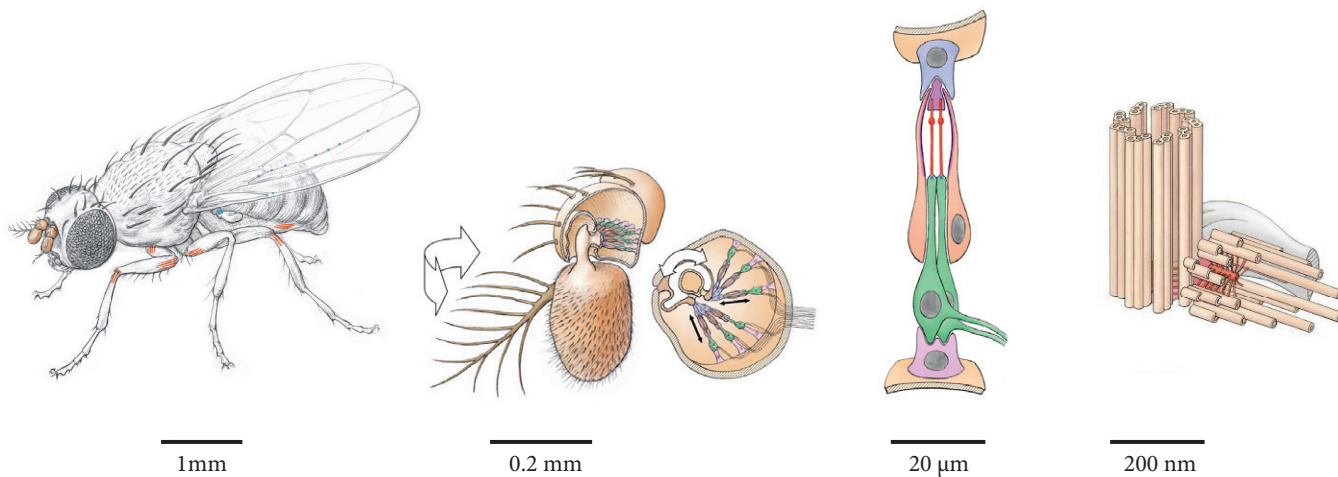


Figure 8 : Drosophile, organe de Johnston, cellule sensorielle et duplication du corps basal du cilium
 Dessins R. Chabrier pour Anne Houdusse (Institut Curie, 2009) Echelle à titre indicatif

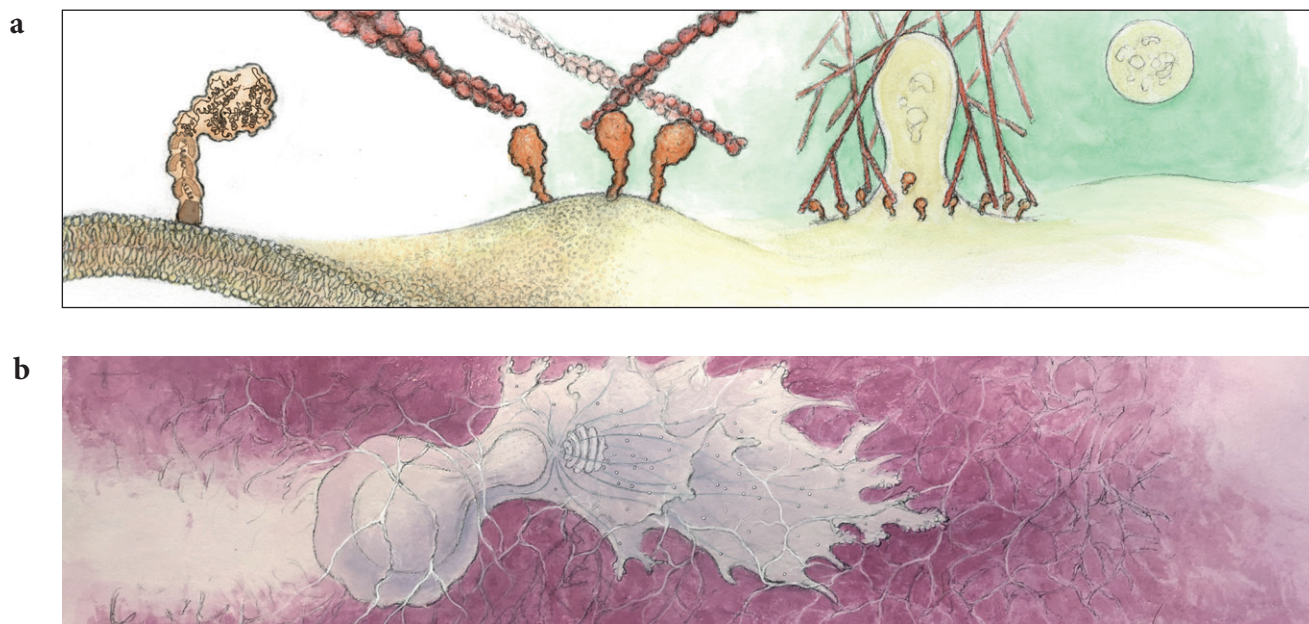


Figure 9 : Illustrations pour le dossier de renouvellement du Labex CellNScale

a: des protéines membranaires recrutent des filaments d'actine, et créent une dépression qui forme une vésicule

b: une cellule cancéreuse progresse dans une matrice de collagène en la dégradant au passage

c: des «organoïdes» permettent d'étudier les cellules spécialisées (ici des neurones) dans un contexte viable



évoquer le branchement des axones, et le branchement des microtubules à l'intérieur. Il s'agissait dans les deux cas d'une forme paramétrique en Y tourné de 90°, qui ne différait que par la couleur. Un tel effet fractal de « retour du même » à une échelle différente peut être intellectuellement séduisant, mais il est surtout porteur d'une grande confusion lorsqu'il ne se justifie pas mathématiquement. D'un « Y » à l'autre, Naoko Mizuno passait à une échelle 1000 fois plus petite (du micromètre au nanomètre) sans que rien dans la représentation ne le manifeste : la transformation était, dans ce cas, beaucoup trop silencieuse.

Il me sembla donc que la priorité était de mettre plus clairement en scène le changement d'échelle, depuis celle du neurone à celle des molécules impliquées dans le branchement. Je réalisai toute la partie à l'échelle des neurones sous forme de dessins, tandis qu'Agnieszka Kawska (fondatrice de la société Illusciencia) créait une animation moléculaire en 3D. De cette façon, il était possible d'évoquer successivement les méthodes et les échelles de raisonnement qui avaient mené à la découverte de la protéine SSNA2, apparemment responsable du branchement des microtubules, jusqu'à montrer une modélisation de cette dernière à l'échelle moléculaire (**figure 7**)

Cette réalisation constitue aujourd'hui un bon exemple de « design de changement d'échelle » appliqué à la transmission scientifique professionnelle. Plus généralement, elle montre une nouvelle fois que le dessin et l'animation peuvent considérablement aider le public à emprunter les chemins de transformation nécessaires pour suivre un raisonnement scientifique. S'il faut un jour présenter la biologie cellulaire et moléculaire sous une forme qui ne se limite pas à l'impact visuel des molécules représentées en « 3D », mais qui évoque aussi toute la part « non visuelle » de cette histoire et en particulier celle des méthodes expérimentales, il sera de toute évidence nécessaire d'organiser des équipes de productions capables d'étendre de telles méthodes de travail à l'échelle d'une exposition entière, d'un long métrage ou d'une série.

En attendant, il est possible de mieux comprendre cette relation entre le dessin et les changements d'échelles, alors que ces derniers prennent une nouvelle importance scientifique.

Changer d'échelle à travers une succession de dessin

Avec le recul, presque tous les dessins que j'ai eu à faire pour des chercheurs au cours des quinze dernières années demandaient un travail de changement d'échelle. En 2009 par exemple, j'ai pu réaliser un dessin de drosophile pour Anne Houdusse de l'Institut Curie, afin de montrer les organes sensoriels, puis les cellules nerveuses impliquées dans ces organes, puis la formation du corps basal du cilium de l'une de ces cellules (**figure 8**). Pour réaliser ces dessins, il fallait recueillir une certaine documentation qui permettait souvent de tracer à quelle époque quelle structure avait été observée. Dans ces conditions, le changement d'échelle me laissait souvent l'impression de passer d'une échelle « déjà connue » à une échelle plus petite « encore mal connue ».

Que le changement d'échelle dans les deux sens devienne une thématique de recherche explicite qui se traduit par des demandes de films et de dessin, m'est donc apparu comme une nouveauté. En 2018, le Labex « CelTisPhyBio » a ainsi préparé son renouvellement, en changeant de nom au passage pour adopter celui de « CellNScale ». En tant que membre d'une équipe associée à ce Labex, les responsables souhaitaient que je réalise trois illustrations pour accompagner le dossier, afin d'introduire les trois échelles de travail qu'ils souhaitaient aborder : celles des populations de molécules (**figure 9a**), celle des cellules et de leurs compartiments (**figure 9b**), et celle des tissus et

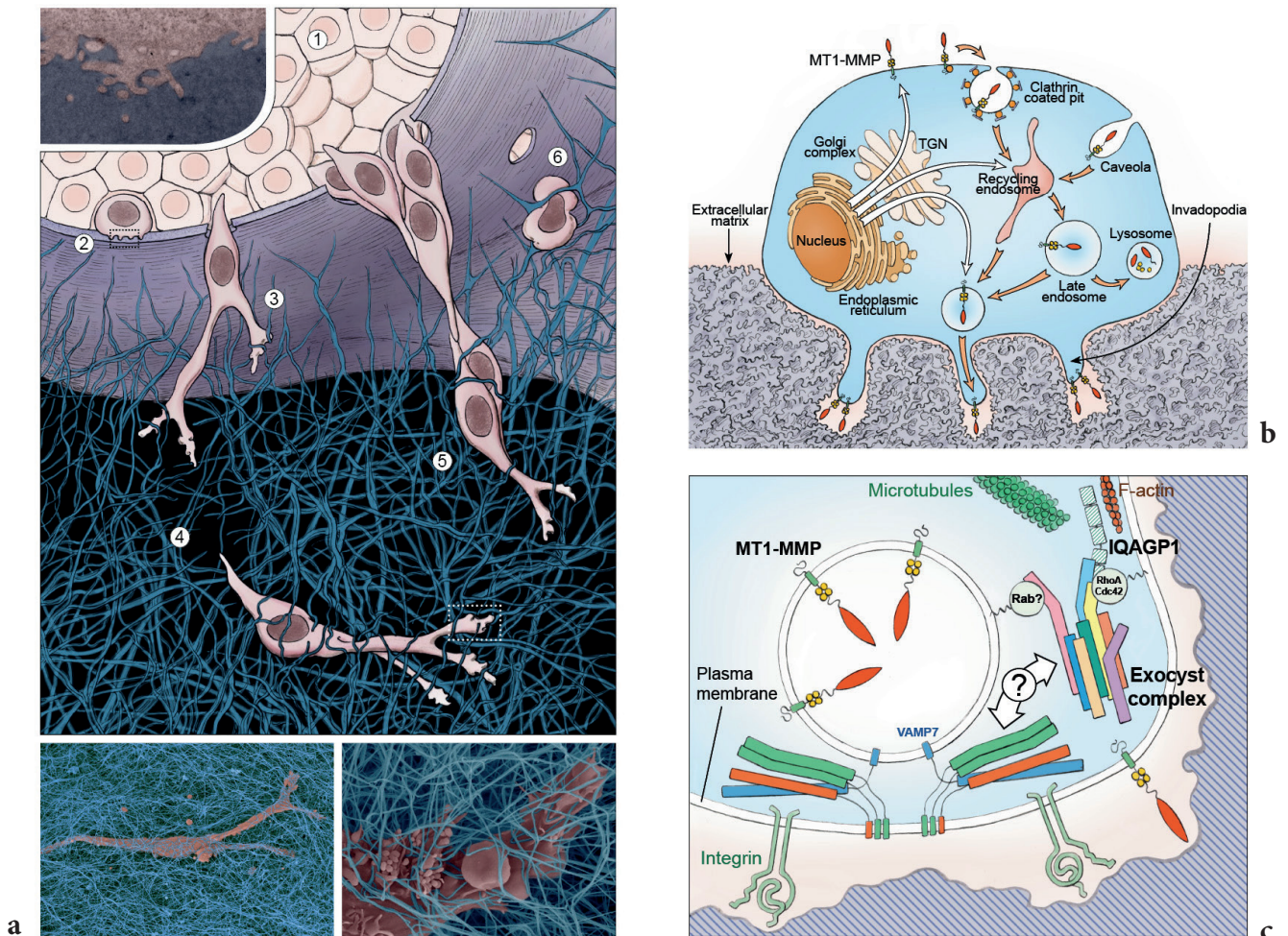


Figure 10 : Le dessin accompagne les changements d'échelles par un jeu de mise en contexte et de relais attentionnels
 Dessin de R. Chabrier pour P. Chavrier (2009), Institut Curie

a: Différents aspects de la migration des cellules cancéreuses. Le dessin d'ensemble s'accorde avec deux vues microscopiques de détail (en haut à gauche et en bas à droite) pour leur donner un contexte

b: Vue schématique de l'attaque d'une membrane basale par les invadopodes de la cellule. La membrane basale est dessinée de façon à évoquer sa matière, ce qui permet également au regard de faire une étape dans le changement d'échelle.

c: Vue schématique rapprochée des molécules impliquées dans la dégradation de la membrane.

des organes (**figure 9c**). Plutôt qu' « une échelle », chacun de ces dessins montre en réalité « une façon de passer d'une échelle à une autre ». Le premier dessin joue ainsi sur l'éloignement en profondeur, le second intègre des petites vésicules à l'intérieur d'une cellule, dans un dessin plus vaste mis en couleur à l'huile, et le troisième utilise le contraste de l'encre brune pour distinguer quelques neurones à l'intérieur d'un organoïde.

De tels dessins montrent à nouveau comment des représentations plus riches que les schémas, mais moins froides que les images de synthèse, pourraient être développées à destination d'un public de non-spécialistes. Mais ils montrent aussi que la capacité du dessin à induire des changements d'échelle s'accorde désormais à des enjeux scientifiques majeurs. Les nouveaux moyens en imagerie microscopique permettent ainsi d'observer des échantillons plus grands et plus complexes ; la connaissance des moteurs moléculaires permet de s'attaquer à leur comportement collectif, etc. Dans tous les cas, un important travail de relais entre les observations scientifiques et les dessins devra être mis en place pour qu'un public élargi accède à ces nouvelles possibilités de passages d'une échelle à une autre. Pour s'y préparer, il serait utile de réunir un corpus de dessins récents aussi bien qu'anciens, afin de repérer les principes de composition sur lesquels il reposent.

Parmi ceux que j'ai réalisés, un exemple réalisé en 2009 pour Philippe Chavier, de l'Institut Curie illustre bien le fait que le changement d'échelle implique souvent des changements de texture (**figure 10**). Cette composition aborde la migration des cellules cancéreuses à l'extérieur d'une tumeur (comme la figure 9b, réalisée dix ans plus tard). Dans la **figure 10a**, un premier changement de texture et d'échelle est mis en place entre le dessin principal et la microphotographie en bas à droite. Un second changement d'échelle du même type est mis en place en haut à gauche pour montrer comment les invadopodes de la cellule cancéreuse attaquent une membrane basale, plus dure que la matrice de collagène en dessous.

Cette dernière action de la cellule cancéreuse est reprise en plus grand dans la **figure 10b**. Ce dessin est déjà beaucoup plus schématique, et il présente les distorsions de proportions typiques dont je parlais plus haut. Le zoom ne s'arrête cependant pas là : il continue dans la **figure 10c** jusqu'à s'intéresser de près aux molécules impliquées dans la dégradation de la membrane basale, toujours de façon très schématique. L'intérêt de ce dessin, en termes de changement d'échelle, réside dans la matière que j'ai donnée à la membrane basale dans la **figure 10b**. J'aurais tout à fait pu laisser une surface lisse, au lieu de dessiner une matière. Mais alors l'attention aurait « glissé » sur cette figure sans trouver d'accroche. Ici, la matière relativement compacte de la membrane permet de faire sentir au passage le travail nécessaire pour que la cellule passe à travers. Cet aspect du dessin constitue ainsi un « relais attentionnel ». Elle ouvre l'accès à un inouï en même temps qu'elle offre une prise pour continuer l'exploration, là où la figure aurait pu être simplement lassante.

Les deux échelles du trait

Je pourrais m'en tenir au constat de cette efficacité pratique : en image fixe autant qu'en image animée, le dessin offre des ressources précieuses pour guider le public au long d'un changement d'échelle. On peut y voir une « mission », susceptible d'être remplie dans le cadre d'un contrat. Pourtant, il est possible de pousser la réflexion un peu plus loin : au-delà des commandes répondant à tel ou tel besoin, y a-t-il une relation plus fondamentale entre le dessin et les changements d'échelle ?

La première partie de ce mémoire répond en partie à cette question avec le concept de « géomé-

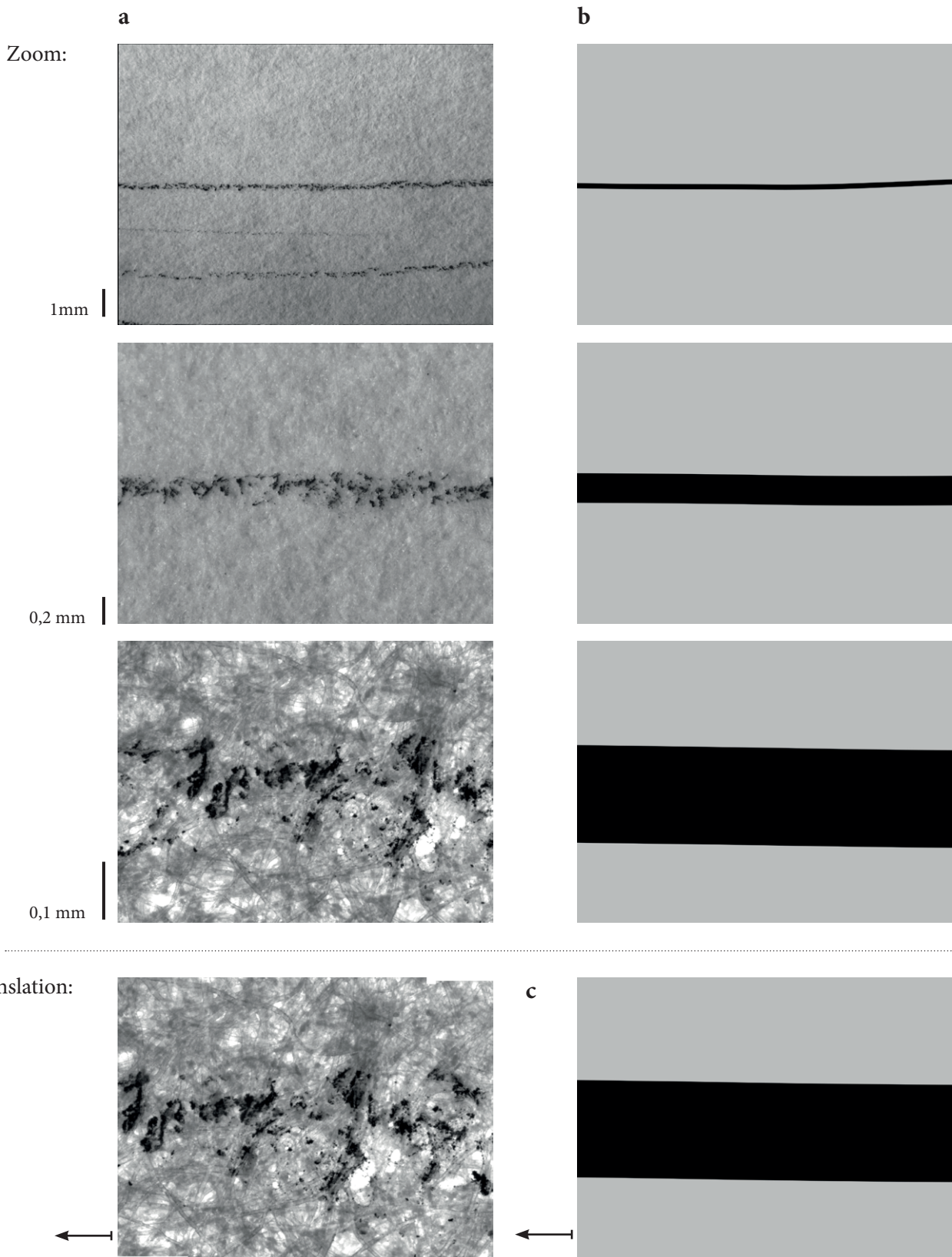


Figure 11 : la texture du trait induit deux échelles de lecture, tandis qu'une forme paramétrique n'en comporte qu'une
a: Agrandissement d'un trait de crayon sur papier à la loupe binoculaire: le zoom fait mieux apparaître la texture (la troisième étape est rétroéclairée pour mieux faire apparaître les amas de graphite contre les fibres). Echelle indicative.
b: Agrandissement analogue sur une forme paramétrique: la forme s'affiche toujours de la même manière.
c: Déplacement latéral sur les deux types de textures: la texture du trait permet d'évaluer le déplacement par rapport à l'image au-dessus, tandis que le regard glisse sur la forme paramétrique.

trie sans point de vue ». Cette dernière, particulièrement facile à mettre en œuvre dans le dessin, présente l'intérêt de pouvoir tenir un équilibre entre liberté et rigueur : la liberté de transformation nécessaire à l'imagination des changements d'échelle peut y être assurée, mais les jeux de courbures et de proportions indispensables pour une évocation fiable des corps vivants peuvent être aussi respectés. En poussant cette idée plus loin, j'ai ensuite proposé de considérer le dessin non pas comme une image, mais comme un « vecteur de transformation »⁴. Ces deux propositions amènent l'idée que le dessin porte en lui-même un potentiel de transformation, aussi bien au niveau de la composition générale que du trait. Ce potentiel peut-il être un peu mieux précisé, dans le cas de cette transformation particulière qu'on appelle « changement d'échelle » ? Pour enquêter sur cette question, il est intéressant d'emprunter les outils de la biologie pour observer le dessin de plus près.

Un trait de crayon HB sur papier, à l'œil nu, nous apparaît en général comme un trait gris continu, quoique bruité, ou plus exactement, légèrement « vibrant ». Une simple loupe binoculaire suffit à voir que le trait est plus fragmenté qu'il n'y paraît (**figure 11a**). En utilisant de plus forts grossissements, la microstructure du trait apparaît mieux. Elle est considérablement plus aérée que ce qu'il semblait au premier abord, et elle laisse même deviner comment les petits tas de pigment se sont accrochés contre les fibres de cellulose, en fonction de la direction du tracé. Le trait comporte donc, intrinsèquement au moins deux échelles de lecture.

Nous pouvons alors comparer ce zoom avec un zoom identique, appliqué cette fois à une forme paramétrique (**figure 11b**). La principale propriété d'un tel objet graphique est qu'il peut être affiché de façon parfaitement lisse, quelle que soit la résolution demandée. Sans surprise, par conséquent, un zoom sur ce type d'objet ne fait rien apparaître de nouveau. De même, si l'on effectue une translation (**figure 11c**), elle est très bien ressentie grâce au déplacement de la texture du trait, mais elle reste imperceptible sur la version paramétrique à droite. Ces différences de perception des transformations, entre le trait et l'objet paramétrique, sont encore plus évidentes lorsque ce zoom et cette translation sont animés.

Une telle comparaison peut être effectuée avec un matériel disponible dans n'importe quel collège. Elle permet de donner corps à une observation fondamentale : contrairement aux images purement numériques, la propension du trait sur papier est de donner au regard de quoi s'« accrocher ». D'entrée de jeu, le trait sur papier intègre donc un « inouï » : une vibration au seuil de nos capacités de perception, aussi fondamentale que facile à négliger. Consciemment ou non, cette texture donne accès à une gamme de transformations différentes des images numériques, de la même façon qu'on n'effectue pas les mêmes actions dans un arbre ou sur une patinoire.

Au cours du dessin, c'est en fait l'information haptique du frottement de l'outil sur le papier qui renseigne le mieux le dessinateur sur cette seconde échelle du trait. En dessinant sous une loupe binoculaire, il est facile d'observer ce dépôt des pigments sous l'outil, et de se rendre compte à quel point le dessin n'est pas seulement « visuel ».

⁴Note : Mon argumentation partait du fait que des « traits » apparaissent lorsqu'il existe un écart entre deux images, si bien que le trait semble lié à différentes sortes de transformations : mouvement du corps, mouvement d'observation, stéréoscopie, changement de lumière, etc. (voir Chapitre 3)

4 - Epilogue

«Un retour du dessin dans les sciences de la vie moderne» est-il vraiment à l'œuvre actuellement, comme nous l'avons évoqué il y a trois ans dans un article? (Chabrier & Janke 2017, voir annexe 4). A l'Institut Curie, j'ai en tout cas pu explorer plusieurs façon d'étendre l'espace du dessin : en travaillant dans les locaux d'un laboratoire, en répondant aux sollicitation de nombreux chercheurs, et en réalisant notamment le design d'un nouveau poster basé sur la géométrie sans point de vue (Annexe 5).

Plusieurs expérimentations ont été menées pour transposer des méthodes issues de la muséographie et de l'informatique graphique à des questions de représentation en biologie cellulaire et moléculaire (**figure 12**). Nous avons également entrepris de visualiser les données 3D en stéréoscopie, de telle façon qu'il soit plus facile de percevoir leur spatialité et donc de les dessiner: avec ma stagiaire Aurélie Faure de Peybere, nous avons ainsi développé un outil pour visualiser des molécules ou des échantillons microscopique sur un écran autostéréoscopique sans lunette (ce type d'écran a été évoqué au chapitre 4). Je ne développerai pas plus ces travaux ici, car ils se rattachent pour l'instant aux conditions de développement d'une pratique *professionnelle* du dessin en relation avec la biologie.

Ils nous détourneraient donc ici de la principale question: puisque les problèmes de représentation actuels sont fortement liés à une forme d'aliénation induite par les images numériques, le dessin peut-il aider les chercheurs à se réappropriier les représentations *avant* de faire appel à un professionnel? En d'autres termes, les chercheurs sont-ils prêt à prendre le temps de dessiner? Pour certains, la réponse est indiscutablement oui, et ils sont en demande de formation.

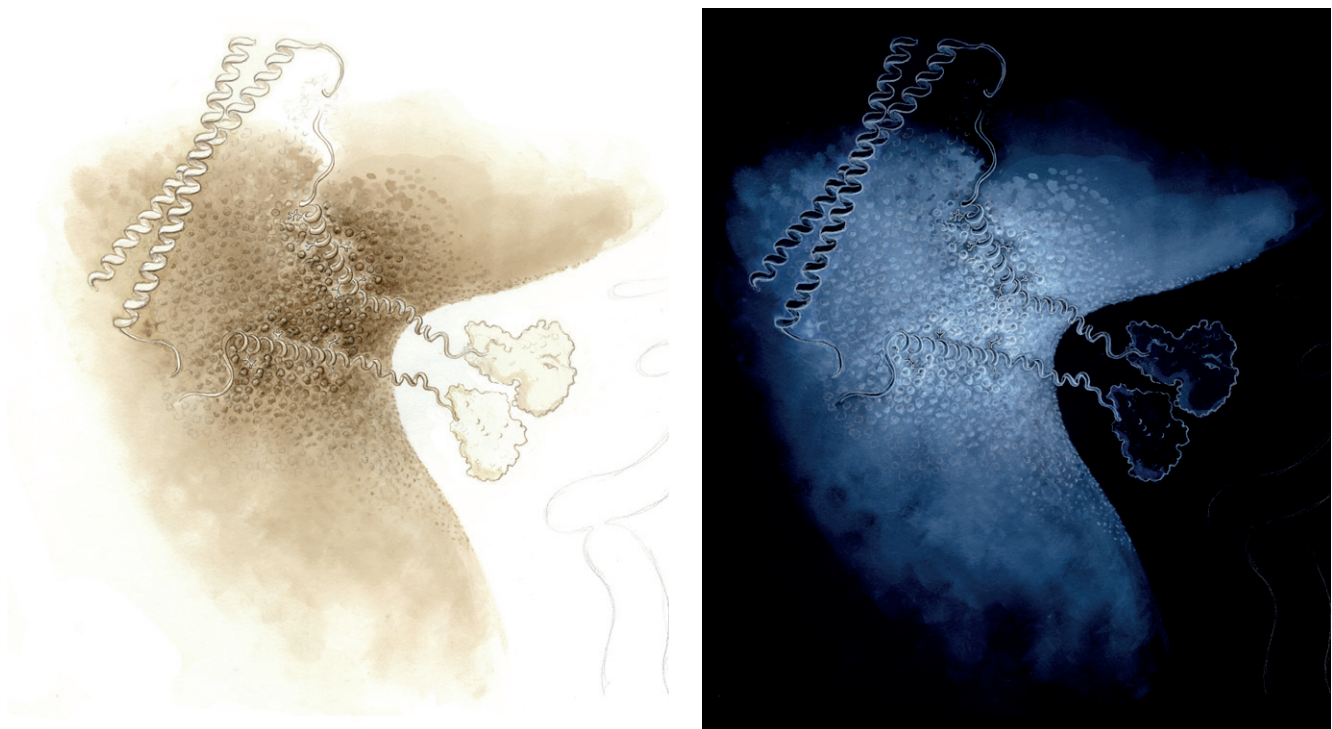


Figure 12: Des recherches de rendu et de spatialisations inspirées de la muséographie et de l'informatique graphique peuvent aider à évoquer les processus moléculaires à différents niveaux d'abstraction.

Recherche en dessin sur l'action de la mitofusine dans la fusion des membranes de deux mitochondries, en collaboration avec David Tareste (Université Paris Descartes)

Au sein de l'Institut Curie, un premier essai d'initiation au croquis pour les chercheurs fut ainsi organisé avec succès en 2019: certains découvraient ces possibilités, d'autres avaient déjà une pratique qui ne demandait qu'à être encouragée pour être appliquée (figure 13). En 2020, la Training Unit souhaitait que j'organise un second stage plus long. Je suggérai alors qu'il soit organisé au Muséum National d'Histoire Naturelle, ou Didier Geffard-Kuryama, le dessinateur responsable de l'atelier d'iconographie scientifique, avait réuni des moyens pédagogiques très intéressants. Reporté en septembre 2020 à la suite de la crise du Covid-19, ce stage a eu lieu juste à temps pour figurer en conclusion de ce mémoire, et pour refermer la boucle ouverte au début de la seconde partie.

En abordant la question du dessin anatomique, j'avais en effet commencé par présenter des dessins réalisés au Muséum. Puis, en suivant la piste de Pasteur, de l'immunologie et enfin de la biologie moléculaire et cellulaire, je me suis largement écartée des disciplines les plus souvent associées à l'Histoire Naturelle. De la même manière, les biologistes qui travaillent à l'Institut Curie ont peu d'occasions de croiser des botanistes, des archéologues ou des zoologues.

En découvrant de nouvelles techniques de dessin, les participants ont donc aussi pu effleurer des sciences dans lesquelles le dessin n'a pas disparu. Ils ont ainsi utilisé la camera lucida (système optique permettant de superposer reporter la vision d'une scène avec la feuille de papier) pour dessiner des plantes, puis des cranes de différentes tailles, jusqu'à dessiner de petits objets, en l'occurrence des crânes de chauves-souris, sous la loupe binoculaire (figure 14). Les chercheurs de l'Institut Curie pourront poursuivre eux-même ce voyage entre les échelles, en dessinant leurs sujets de travail microscopiques. Mais durant le temps qu'ils ont passé au Muséum, ils ont aussi participé à une nouvelle circulation entre les domaines de l'Histoire Naturelle, ce qui correspond parfaitement à la vocation du dessin.

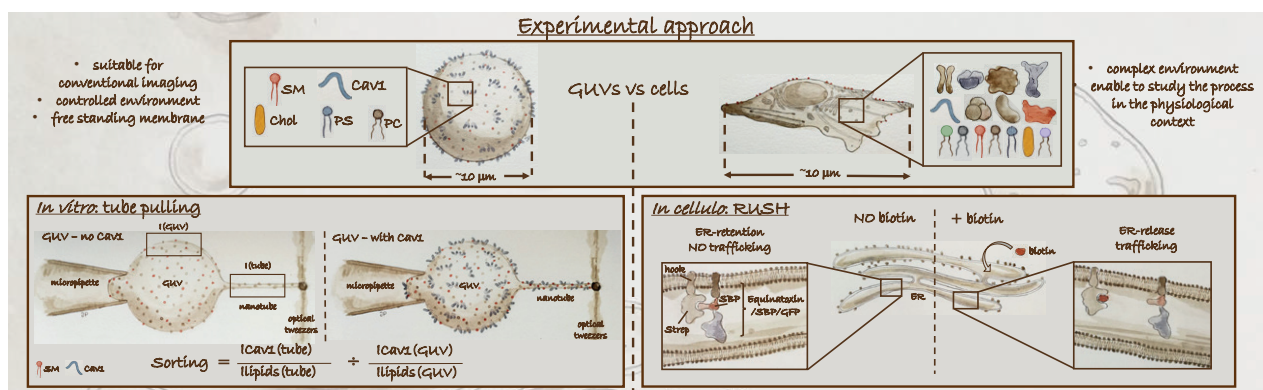


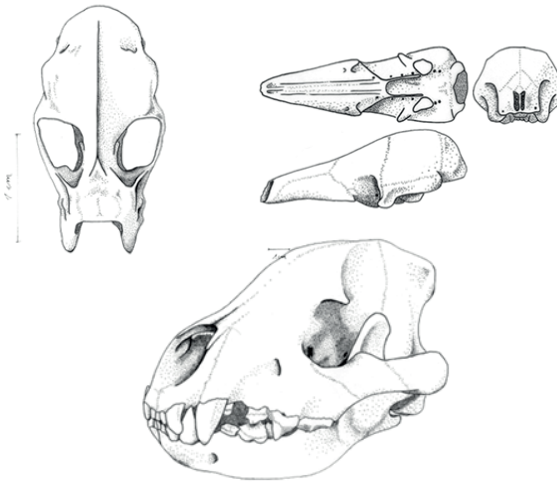
Figure 13: Une première formation courte de dessin à l'Institut Curie a montré que certains chercheurs peuvent utiliser et développer les compétences en dessin qu'il possèdent déjà.

Dessin extrait d'un poster de Joanna Podkalicka, chercheuse à l'Institut Curie, 2019



Figure 14: Stage de dessin scientifique organisé au Muséum National d'Histoire Naturelle pour les chercheurs de l'Institut Curie, septembre 2020

(Dessin de plante par Paula Santa Barbara Ruiz, dessins de cranes par Xavier Sabate-Cadenas)



« C'est la théorie qui décide
de ce que nous pouvons observer »

Albert Einstein, physicien

« Le dessin, ce n'est pas visuel.
On met longtemps à s'en apercevoir »

Jeanne Gatard, dessinatrice

Conclusion

Quel serait l'enjeu, aujourd'hui, d'une recherche en dessin? Comme je le disais au chapitre 1, il s'agirait simplement de renouer avec une ressource de notre cerveau, qui s'avère capable de tirer partie d'une gamme de géométries plus large que ce que l'on suppose habituellement. Ces géométries sont à portée de crayon, à condition de réserver au dessin le temps et l'espace dont il a besoin.

Le temps de cette thèse aura permis de mieux mesurer l'ampleur des connections que le dessin entretient avec la philosophie, l'informatique graphique et la biologie. Il permet ainsi de travailler « entre » les disciplines, et d'utiliser les enjeux de l'une pour mieux faire apparaître les ressources de l'autre.

De la géométrie aux sciences du vivant

Appliqué aux sciences du vivant, le dessin se voit amené à travailler principalement avec des traits courbes et des textures, souvent sans utiliser un point de vue unique : ce faisant, il fait apparaître la possibilité d'utiliser la géométrie affine avec les moyens numériques modernes. Cette possibilité n'a rien de nouveau en informatique graphique: simplement, les problèmes auxquels elle s'attaque habituellement ne conduisent pas à la mettre en avant.

De la même façon, en utilisant ces ressources mathématiques pour tenter d'évaluer automatiquement la spatialité d'un trait, à partir d'une opération de traitement d'image qui consiste simplement à déplacer une image de quelques pixels par rapport à elle-même, j'ai pu faire apparaître le concept philosophique d' « écart ». Ce dernier a permis de prolonger la réflexion sur un terrain plus large que la création d'image, jusqu'à proposer précisément de concevoir le dessin non pas comme une image, mais comme un vecteur, porteur de transformations.

Ce changement conceptuel, si on l'accepte, explique alors pourquoi le dessin est si peu intégré dans l'histoire de l'art, celle-ci étant avant tout une histoire des images, qui s'est elle-même largement identifiée à une histoire des points de vue. A l'inverse, les sciences du vivant font apparaître

tout le potentiel du dessin, lorsque leur objectif est de donner accès à la richesse « inouïe » de la vie. L'étendue des moyens disponibles aujourd'hui en termes de traitement d'image, d'animation ou de projection est telle aujourd'hui qu'une pensée qui rapporte le dessin à des « image fixe » ne suffit plus. Mais a-t-elle jamais suffi ? L'animation numérique montre en fait que le potentiel de transformation est intrinsèquement lié au dessin, qu'il soit animé ou pas.

Une éthique des transformations

Le dessin a ainsi la capacité d'induire des passages d'un univers à un autre, d'une échelle à une autre, ou simplement d'une position à une autre. Ces transformations de tous ordres m'ont servi de guide pour suivre une certaine progression dans les sciences du vivant, depuis les débuts du dessin anatomique jusqu'à la biologie moléculaire. Chaque fois, il était question d'un ou plusieurs Inouïs du monde scientifique, c'est-à-dire d'aspects du monde qui peuvent facilement être négligés, mais qui font la richesse de la vie si l'on y accède. « Donner accès » à ces inouïs constitue une éthique, qui porte en elle l'exigence d'engager la transformation du regard dans une direction fertile.

La généralisation des outils informatiques pose ici des questions qui ne doivent pas être sous-estimées. Nous avons vu comment la biologie cellulaire et moléculaire, une science récente qui n'utilisait les ressources du dessin que de façon très marginale, a soudain dû composer avec la « 3D », autrement dit les images de synthèses générées par des caméras virtuelles, et la « 2D » une famille d'outils basés sur la superposition de calques. Peu de biologistes (on peut même dire : peu de scientifiques) étaient formés pour maîtriser les géométries induites par ces outils, d'autant plus qu'ils ont souvent été introduits sous des formes appauvries, en particulier dans le cas du graphisme paramétrique.

Pour faire face aux problèmes de représentation qui la fragilisent autant en interne que vis-à-vis du grand public, la biologie cellulaire doit se donner les moyens d'une meilleure maîtrise des géométries qu'elle met en œuvre, en facilitant la formation et la pratique chez les étudiants et chercheurs intéressés. Cette démarche a vocation à favoriser les rencontres : elle conduit la biologie cellulaire et moléculaire à se raccorder à d'autres domaines de l'histoire naturelle, qui ont pour leur part entretenu une expertise en dessin au cours du 20^{ème} siècle. La facilité avec laquelle le dessin guide les changements d'échelle, du fait de sa matérialité, ne peut qu'aller dans le sens d'une prise en compte plus complète des écosystèmes et des enjeux environnementaux.

Un enjeu pour l'éducation

Sous l'angle géométrique, l'enjeu éducatif du dessin s'étend à de nombreux domaines: quelle activité humaine, d'une façon ou d'une autre, n'est pas liée à la vie ? D'où l'importance de porter une plus grande attention à la gamme des transformations auxquelles les jeunes ont accès au cours de leur formation : cette gamme est-elle assez complète pour s'accorder avec la « géométrie de la vie » ?

La pratique du dessin à la main apparaît alors comme une « pièce manquante » dans la dialectique de la « 2D » et de la « 3D » : en simplifiant un peu, il semble possible de dire que le dessin permet une transition entre la géométrie euclidienne et la géométrie projective, en travaillant au niveau de la géométrie affine. Or, sachant que cette dernière est basée sur des jeux de surfaces plutôt

sur des distances abstraites, il faut bien noter que c'est l'aspect *matériel* du dessin sur papier qui la fait émerger.

Abstrait et concret ne donc s'opposent pas ici : il se complètent. Promouvoir simplement la pratique du dessin chez les nombreux jeunes qui s'y intéressent déjà, en montrant la diversité des connections possibles avec les autres champs d'activité en sciences, en ingénierie et en design, pourrait constituer un véritable programme en Europe pour les années à venir.

Une recherche en dessin

Dans de nombreux domaines, le dessin a discrètement tenu un rôle de « garde-fou », avant que le monde des représentations ne se numérise massivement. Ce rôle apparaît surtout par contraste avec les représentations purement « 3D » et « 2D » qui ont été développées ultérieurement : sans qu'il soit besoin d'en faire une théorie, le dessin à la main permettait de rendre la pensée spatiale moins abstraite et la pensée abstraite plus spatiale.

Est-il nécessaire aujourd'hui de proposer une théorie du dessin? Ce dernier est certainement trop intime pour être vraiment observable. En revanche, il est possible de reconnaître à quel point il est lié à l'Ecart et à la Dé-coïncidence, en commençant par l'une des plus radicales, rappelée par Jeanne Gatard: le dessin a beau passer par nos yeux, il n'est pas «visuel». L'idée de considérer le dessin comme vecteur plutôt que comme image est peut-être une autre façon de dire la même chose, en se rattachant à des concepts mathématiques applicables en neurosciences aussi bien qu'en animation.

Cette démarche ouvre alors une piste expérimentale potentiellement très riche, qui pousse à revisiter ce que les humains ont fait du dessin depuis les peintures rupestres jusqu'à l'art moderne, en passant par la peinture chinoise et la renaissance. Ces ressources ne demandent aujourd'hui qu'à réapparaître, et une « recherche en dessin » pourrait y trouver sa raison d'exister.

Références

Références bibliographiques

- Alberti L B (1435) De pictura. Edition française : De pictura (Trad. Sonnier D) Allia (2019)
- Alberts B, Johnson A, Lewis J, Morgan D, Raff M, Roberts K, Walter P (1983) Molecular biology of the cell, W W Norton & Co, New York
- Bachelard G (1937) L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine. Librairie Félix Alcan, Paris
- Bachelard G (1940) La Philosophie du non : essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique. Presses Universitaires de France, Paris
- Bennequin D, Fuchs R, Berthoz A, Flash T (2009) Movement timing and invariance arise from several geometries. PLoS Computational Biology
- Bennequin D, Berthoz A (2017) Several geometries for movement generation. In: Laumond JP, Mansard N, Lasserre JB (eds) Geometric and Numerical Foundations of Movements, STAR Series 117, Springer, Heidelberg
- Bernal J D (1939) Structure of proteins. Nature 143, 663-667
- Berio D, Calinon S, Fol Leymarie F (2017) Generating Calligraphic Trajectories with Model Predictive Control. In : Graphics Interface 2017, Edmonton, Canada
- Berthoz A (2009) La simplicité. Odile Jacob, Paris
- Bon M et al. (2020) Pour un retour au débat scientifique et à l'intelligence collective. Le Monde, 30 septembre 2020, Paris
- Bourdieu P (2013) Manet, une révolution symbolique. Raisons d'agir, Seuil, Paris
- Bourguignon D, Cani M P, Drettakix G (2001) Drawing for illustration and annotation in 3D. In Proceedings of the Eurographics conference 20:3, 114-122
- Bourguignon D (2003) Animation interactive et modélisation par le dessin: applications pédagogiques en médecine. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Bourguignon D, Chaine R, Cani M P, Drettakix G (2004) Relief: a modelling by drawing tool. In:

Jorge J A & Hugues J F (eds) Eurographics workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling, 2004, 151-160

Bornens M (2002) The centrosome in cells and organisms. *Science* 335(6067), 422-426

Bray D (2000) Cell movement. From molecules to motility (Second edition). Garland, New York

Brew A (2015) Learning to draw: an active perceptual approach to observational drawing synchronising the eye and hand in time and space. Mémoire de thèse, The University of the Arts, London.

Brew A, Fava M, Kantrowitz A (2013) Drawing connections: new directions in drawing and cognition research. Tracey.

Brew A (2011) Learning to Pause. In: Kantrowitz A, Brew A & Fava M (eds) Thinking through Drawing: practice into knowledge. New York: Teachers College, Columbia University, Art and Art Education Program, 67-72

Chabrier R (1999) La cécité aux changements progressifs dans les scènes visuelles complexes. Mémoire de DEA (CogMaster) sous la direction de Kevin O'Regan, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociale, Paris.

Chabrier R, Stehr G (2012) Les lunettes à voir le squelette. L'école des loisirs, Paris

Chabrier R, Piel M (2008) Inventer un mouvement... à partir de quoi ? In : Toulouse I, Danétis D (eds), Eurêka, le moment de l'invention. Un dialogue entre art et science, coll. Arts 8, L'Harmattan, Paris

Chabrier R (2016) Pouvoir de représentation contre pouvoir absolu : le dessin scientifique confronté à la perspective. In : Guennec M, Lucas V (eds) Les images du pouvoir, Univ.Brest, HCTI/UBS, Lorient

Chabrier R (2017) La pensée du trait. In : Philosophie de François Jullien. Des concepts proposés à l'art, Art Press 2 n°46, Paris

Chabrier R, Janke C (2017) The comeback of hand drawing in modern life sciences. *Nature Review Molecular Cell Biology* 19, 137-138

Chabrier R (2020-1) L'inouï à portée de crayon. In : L'Yvonnet (ed) Art et concepts. Chantier philosophique de François Jullien / Ateliers d'artistes, Presses Universitaires de France, Paris

Chabrier R (2020-2) From sketches to morphing: new geometric views on the epistemological role of drawing. In : Flash T, Berthoz A (eds) Space-time geometries for motion and perception in the brain and the arts, Lecture notes in morphogenesis, Springer, Heidelberg (in press)

Chabrier R (2021) Un dessin en mouvement. In : Actes du colloque international : « Léonard de Vinci, Anatomiste. Pionnier de l'anatomie comparée, de la biomécanique, de la bionique et de la physiognomonie », CNRS édition, 2021

Coleman E J (1978) Philosophy of painting by Shih-T'ao. Mouton, The Hague

Coquidé-Cantor M (1992) Pouchet, savant et vulgarisateur. Thèse de doctorat, univ Paris 11

Cramer P (2020) Rosalind Franklin and the Advent of Molecular Biology. *Cell* 182, 787-789

D'Arcy Thompson (1917) *On growth and form*. Reedition Cambridge University press (1961), Cambridge

Daston L, Galison P (2007) *Objectivity*. Zone Books, New York

Dyson HJ, Wright PE (2005) Intrinsically unstructured proteins and their functions. *Nat Rev Mol Cell Biol* 6, 197-208

El Beheiry M, Doutreligne S, Caporal C, Ostertag C, Dahan M, Masson J B (2019) Virtual reality: beyond visualization. *Journal of molecular biology* 431 (7), 1315-1321

Enders G, Enders J (2014) *Le charme discret de l'intestin* (traduit de l'allemand), Actes Sud, Paris

Fava M (2011) Developing a cognitive model of observational drawing. In: Kantrowitz A, Brew A & Fava M (eds) *Thinking through Drawing: practice into knowledge*. New York: Teachers College, Columbia University, Art and Art Education Program, 79-85

Flash T, Handzel A (2007) Affine differential geometry analysis of human arm movements. *Biological Cybernetics* 96, 577-601

Fondevilla A, Bousseau A, Rohmer D, Hahmann S, Cani M P (2017) Patterns from Photograph: Reverse-Engineering Developable Products, *Computer & Graphics* 66, 4-13

Fong W C (2003) Why Chinese Painting is History. *The Art Bulletin* 85(2), 258-280

Fraipont G (1897) *L'art d'utiliser ses connaissances en dessin*. H. Laurens, Paris

Gal J (2019) Louis Pasteur, Chemical Linguist: Founding the Language of Stereochemistry. *Helvetica Chimica Acta* 102 (8)

Garcia-Arcos J M, Chabrier R, Deygas M, Nader G, Barbier L, Sáez P J, Mathur A, Vargas P, Piel M (2019) Reconstitution of cell migration at a glance. *Journal of Cell Science*, Company of Biologists 132 (4), pp.jcs225565

Geison L G (1995) *The private science of Louis Pasteur*. Princeton Legacy Library

Germain M (2018) *Dessine-moi une cellule*. La Recherche n°534 (avril 2018) Sophia publication, Paris

Goodsell DS (1992) *The Machinery of Life*. Springer-Verlag, New York

Goodsell DS (1996) *Our Molecular Nature*. Copernicus, Springer-Verlag, New York

Goodsell DS (2009) *The Machinery of Life* (second edition). Copernicus, Springer, New York

Goodsell DS (2016) *Atomic Evidence*. Springer, New York

Goodsell DS, Olson AJ, Forli S (2020) Art and Science of the Cellular Mesoscale. *Trends Biochem Sci* 45, 472-483

Gould S-J (1989) *La vie est belle, les surprises de l'évolution* (Trad. Blanc M) Points Sciences (1998)

Grossos P (2017) *Signe et forme: Philosophie de l'art et art paléolithique*. Les Editions du Cerf, Paris

Gülzow J, Grayver L, Deussen O (2018) Self-Improving Robotic Brushstroke Replication. *Arts*

Heckbert P S (1989) Fundamentals of Texture Mapping and Image Warping, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, University of California

Heider F, Simmel M (1944) An Experimental Study of Apparent Behavior. *The American Journal of Psychology* 57 (2), 243-259

Hodges E (ed) et al. (2003) *The guild handbook of scientific illustration*. John Wiley & Sons, Hoboken

Ivey T, Landsberg JM (2003) *Cartan for beginners: differential geometry via moving frames and exterior differential systems*. American Mathematical Society, Providence

Janke C, Magiera MM (2020) The tubulin code and its role in controlling microtubule properties and functions. *Nat Rev Mol Cell Biol* 21, 307-326

Johnston A, Rae J, Ariotti N, Bailey B, Lija A, Webb R, Ferguson C, Maher S, Davis T, Webb R, McGhee J, Parton R (2018) Journey to the centre of the cell: Virtual reality immersion into scientific data. *Traffic*.

Joly N (1864) Conférence publique sur l'hétérogénéité ou génération spontanée faite à la faculté de médecine de Paris le 28 juin 1864. Librairie Germer-Baillière, Paris

Jullien F (1991) *Eloge de la fadeur. A partir de la pensée et de l'esthétique de la Chine*. Edition Philippe Pickier, biblio Essai, Le livre de poche

Jullien F (2003) *La grande image n'a pas de forme, ou du non-objet dans la peinture*, Seuil, Paris. English edition (2009) *The great image has no form, or on the nonobject through painting* (Trad: Todd J M). University of Chicago Press

Jullien F (2009) *Les transformations silencieuses*. Grasset, Paris. English edition (2011) *The silent Transformations* (Trad : Fijalkowski K, Richardson, M). Seagull Books, Calcutta

Jullien F (2015) *De l'être au vivre. Lexique euro-chinois de la pensée*. Bibliothèque des idées, Galilée, Paris

Jullien F (2017) *Dé-coïncidence. D'où viennent l'art et l'existence*. Editions Grasset, Paris

Jullien F (2019) *L'inouï, ou l'autre nom de ce si lassant réel*. Editions Grasset, Paris

Jullien F (2020) *De la vraie vie*. Editions de l'Observatoire, Paris

Kantrowitz A, Brew A, Fava M (eds) (2011) *Thinking through drawing: practice into knowledge*, Teachers College, Columbia University, New York

Kantrowitz A (2012) The Man behind the Curtain: What Cognitive Science Reveals about Drawing. In: *The Journal of Aesthetic Education* 46(1), 1-14.

Korzybski A (1933) *Science and Sanity: An Introduction to Non-Aristotelian Systems and General Semantics*, Institute of General Semantics (1994) 5th edition

Korzybski A (1950) Le rôle du langage dans les processus perceptuels. In : *Une carte n'est pas le territoire*. Edition française : Edition de l'éclat (2015) (Trad : Kohn D, de Moura M, Denis J C), Paris

- Klein F (1872) *Vergleichende Betrachtungen über neuerer geometrische Forschungen*. Deichert
- Landsteiner K (1936) *The specificity of serological reactions*. Harvard University Press, Cambridge
- Latour B (1984) *Guerre et paix des microbes*. Réed La Découverte, Paris
- Leroy-Gourhan A (1965) *Préhistoire de l'art occidental*. Mazenod, Paris
- Macaulay D (1973) *Naissance d'une Cathédrale*. Les deux Coqs d'Or (1974), Paris
- Macaulay D (2008) *The way we work*. HMH Books for Young Readers. (Edition Française) *Le corps humain: une machine incroyable* (2009) *De la Martinière jeunesse*, Paris
- MacLaren N (1960) *Vertical lines* (short movie). Office National du Film Canadien
- Magiera MM, Bodakuntla S, Ziak J, Lacomme S, Marques Sousa P, Leboucher S, Hausrat TJ, Bosc C, Andrieux A, Kneussel M, Landry M, Calas A, Balastik M, Janke C (2018) Excessive tubulin polyglutamylolation causes neurodegeneration and perturbs neuronal transport. *EMBO J* 37: e100440
- Marey E-J (1894) *Le mouvement*. ed. Jacqueline Chambon (2002), Nimes
- Basnet N, Nedozralova H, Crevenna A, Bodakuntla S, Schlichthaerle T, Taschner M, Cardone G, Janke C, Jungmann R, Magiera M M, Biertümpfel C, Mizuno N (2018) Direct induction of microtubule branching by microtubule nucleation factor SSNA1. *Nat. Cell Biol.* 20(10), 1172-1180
- Morange M (2003) *Histoire de la biologie moléculaire* (livre numérique). La Découverte
- Morange M (2011) *Construction of the ribbon model of proteins* (1981) *The contribution of Jane Richardson*. *J. Biosci.* 36(4), 571-574
- Nicolaides K (1941). *The Natural Way to Draw*. Houghton Mifflin, Boston
- O'Donoghue S, Gavin A-C, Gehlenborg N, Goodsell D S, Hériché J-K, Nielsen C B, North C, Olson A J, Procter J B, Shattuck D W, Walter T & Wong B (2010) *Visualizing biological data—now and in the future*. *Nature Method Supplement*, vol 7 n° 3s
- Olivier P, Chabrier R, Rohmer D, de Thoisy E, Cani M P (2019) *Nested Explorative Maps: A new 3D canvas for conceptual design in architecture*. *Computers and Graphics, Elsevier, Special Section on SMI 2019*, 203-213.
- Palombi O, Pihuit A, Cani M P (2011) *3D Modeling of branching vessels from anatomical sketches: towards a new interactive teaching of anatomy*. *Proc. of Surgical and Radiologic Anatomy*
- Panofsky E (1927) *Perspective as a symbolic form*. Reedition Zone Books (1991) New York
- Pasteur L (1864) *Conférence faite aux "Soirées scientifiques de la Sorbonne" le 7 avril 1864*. In *Œuvres de Pasteur* (1922) Masson et Cie, Paris
- Pauling L, Hayward R (1964) *The architecture of molecules*. W.H. Freeman and Co, San Francisco, London
- Pignocchi A (2008) *Les intentions du dessinateur : un cas d'étude à l'interface entre la philosophie de l'art et les sciences cognitives*. Mémoire de thèse, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS).

- Pignocchi A (2019) *La recomposition des mondes*, Seuil, Paris.
- Popescu-Pampu, P (2018) De la topographie à la géométrie. In : Patrick Picouet (ed) *La carte invente le monde*. Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Asq
- Raynaud D (1999) La correspondance de F.-A. Pouchet avec les membres de l'Académie des Sciences : une réévaluation du débat sur la génération spontanée. *European Journal of Sociology*, 40(2), 257-276
- Richardson J S, Tainer J A, Richardson D C (1980) An illustrated museum of protein structures. *Biophys. J.* 32, 211-213
- Rensink, R.A., O'Regan J.K., & Clark, J.J. (1997) To see or not to see: the need for attention to perceive changes in scenes. *Psychological Science* 8, 368-373.
- Royer M (2017) *Le dessin comme outil de médiation* », workshop *Drawing challenges/les défis du dessin*, École normale supérieure Ulm, Institut Nicod (CNRS/EHESS/ENS), 02/03 juin 2017
- Ruskin J (1857) *The Elements of Drawing*. In: *Three letters to beginners*, Project Gutenberg (2009)
- Ruskin J (1843) *Modern Painters vol. 1*. Reedition J.M. Dent & Sons ltd, Londres (1907)
- Serpente R (2013) Beyond a pedagogical tool: 30 years of *Molecular Biology of the Cell*. *Nature Review Molecular Cell Biology* 14, 120–125
- Serpente R (2016) Justifying molecular images in cell biology textbooks: From construction to primary data. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 55, 105-116
- Simmons S (2011) Philosophical dimensions of drawing instructions. In: Kantrowitz A, Brew A & Fava M (eds) *Thinking through Drawing: practice into knowledge*. New York: Teachers College, Columbia University, Art and Art Education Program
- Shitao (1710) *Les propos sur la peinture du moine Citrouille-amère*. Edition française : Hermann (1984) (Trad : Ryckmans P), Paris
- Steinman R, Zanvil A C (1973) Identification of a novel cell type in peripheral lymphoid organs of mice. *J Exp Med.* 137(5), 1142–1162.
- Schwartz M, Perrot A (2014) *Pasteur et Koch, un duel de géants dans le monde des microbes*, Odile Jacob
- Tchalenko J, Nam S H, Ladanga M, Miall R C (2015) The Gaze-Shift Strategy in Drawing. *Psychology of Aesthetics Creativity and the Arts*, 8, 330-339
- Todd S et al. (2015) FoldSynth: interactive 2D/3D visualisation platform for molecular strands. In *Proceedings of the Eurographics Workshop on Visual Computing for Biology and Medicine (VCBM)* 41-50.
- Tresset P, Fol Leymarie F (2011) Paul the robot as a naïve drawer. In: Kantrowitz A, Brew A & Fava M (eds) *Thinking through Drawing: practice into knowledge*. New York: Teachers College, Columbia University, Art and Art Education Program, 103-106
- Tresset P, Fol Leymarie F (2013) *Portrait drawing by Paul the robot*. *Computers and Graphics*,

Tversky B (1995) Cognitive origins of graphic conventions. In: Marchese F T (ed) *Understanding Images*, Springer-Verlag, New York, 29-53.

Tversky B (2002-1) What do sketches say about thinking? In Stahovic T, Landay J and Davis R (eds.) *Proceedings of AAAI spring symposium on sketch understanding*. Menlo Park, CA: AAAI Press.

Tversky B, Morrison J B, Bertrancourt M (2002-2) Animation: can it facilitate? *Int. J. Human-Computer Studies* 57, 247-262.

Tversky B & Suwa M (2009) *Thinking with sketches*. In: Markman A B and Wood K L (eds.) *Tools for Innovation*. Oxford University Press.

Vallery-Radot R (1912) *L'Album Pasteur, dessinateur et pastelliste*. Publications A. Marty, É. Paul frères

Vallery-Radot M (1987) *Louis Pasteur, dessins et pastels*. Hervas, Paris

Vinciguerra L (2007) *Archéologie de la perspective*. Lignes d'art, PUF, paris

Viollet-le-Duc E (1873) *Histoire d'un dessinateur, comment on apprend à dessiner*. Reedition Pierre Mardaga (1978), Bruxelles

Viviani P, Flash T. (1995) Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony: Converging approaches to movement planning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 32-53

Watson J D (1976) *Molecular biology of the gene* (3ère edition). Benjamin-Cummings Publishing Co, Subs. of Addison

White S J, Coniston D, Rogers R, Frith U (2011) Developing the Frith-Happé animations: a quick and objective test of theory of mind for adults with autism. *Autism Research* 4, 149-154

Wingate R, Kwint M (2006) Imaging the brain cell: the neuron in visual culture. *Nat. Rev. Neurosci.* 7, 745-752.

Wright J, Shah N (2011) Evolving dialogues between surgeon and drawing practitioner. In: Kantrowitz A, Brew A & Fava M (eds) *Thinking through Drawing: practice into knowledge*. New York: Teachers College, Columbia University, Art and Art Education Program, 109-113

Yarbus A. L. (1965) *Eye Movements and Vision*. American edition: Plenum Press, 1967 (Trans. Haigh B) New York

Zoppè M (2017) Towards a perceptive understanding of size in cellular biology. *Nature Methods* 14 (7), 662-665

Références de films

- [1] Naissance d'un cerveau (Chabrier R, 2016):
Version française : <https://vimeo.com/104912254>
Version anglaise : <https://vimeo.com/183004485>
- [2] Leonardo da Vinci – Motion Picture (Chabrier R 2013):
<https://vimeo.com/84689530>
- [3] Cave art animation studies (Chabrier R 2011-2016):
<https://vimeo.com/171478742>
- [4] Etude de mouvements de tête par morphing (Chabrier R 2003):
http://www.renaudchabrier.com/fr/morphing_video
- [5] Court-métrage réalisé en animation par soustraction (Chabrier R, 2005):
<http://www.renaudchabrier.com/fr/ideesfixes>
- [6] Captation du théâtre optique « La controverse des génération spontanées »
(Minet P, Chabrier R, 2017)
<https://vimeo.com/renaudchabrier/lacontroverse>
- [7] The Big Squeeze: What Dendritic Cells Do to Fight Infection (2016):
<https://www.youtube.com/watch?v=wAAfMjkkEFc>
- [8] Inner Life of the Cell (Harward University, XVIVO, 2006)
<https://xvivo.com/inner-life-of-the-cell/>
- [9] Le mystère de l'amulette (Chabrier R, 2016)
<https://vimeo.com/191624012>
- [10] A la découverte des textiles minéralisés (Arene C, Chabrier R, 2020)
<https://vimeo.com/448083288>

Ressources en ligne

[a] Chabrier, R (2014) Le Morphing, l'art de transformer les images:

<https://images.math.cnrs.fr/Le-Morphing.html>

[b] Popescu-Pampu, P (2016) De la Topographie à la Géométrie:

<https://images.math.cnrs.fr/De-la-topographie-a-la-geometrie-I.html>

[c] Premier tome de « Globule, le magazine de toutes les cellules » (Chabrier 2018-2020)

www.globulemag.org

[d] Article du Oregon State University Libraries Special Collections & Archive Research Center (SCARC) sur le livre de Linus Pauling et Roger Haywards

<https://paulingblog.wordpress.com/2015/07/02/the-architecture-of-molecules/>

ANNEXES

Annexe 1

Pouvoir de représentation contre pouvoir absolu: le dessin scientifique confronté à la perspective



Article publié en 2016 dans les actes du colloque
« Les images du pouvoir »
Ecole supérieure d'art de Bretagne /
Laboratoire HCTI, Université Bretagne-Sud
Lorient, 13 mars 2015

Dessin de Leonard de Vinci

Pouvoir de représentation contre pouvoir absolu : le dessin scientifique confronté à la perspective

Se repérer 'dans' l'espace est un enjeu fondamental pour les êtres vivants capables de se mouvoir. Le dessin scientifique est une variante spécifiquement humaine de cette capacité : il répond au besoin de se repérer relativement à l'organisation spatiale d'un corps, d'un phénomène ou encore d'une réflexion abstraite, afin de pouvoir voyager mentalement entre différents points de vue et différents niveaux explicatifs. Au long de ce texte, nous allons donc nous intéresser au dessin scientifique en tant que pouvoir de représentation de l'espace.

Nous verrons d'abord qu'une nouvelle liberté de regard sur les corps s'est mise en place à la Renaissance, grâce à un usage généralisé du dessin. Cette révolution a favorisé le développement d'une façon particulière de composer l'espace que nous allons caractériser. Dédié aux êtres vivants, aux éléments et à la représentation du mouvement, ce pouvoir de représentation est très différent de ce que l'on désigne aujourd'hui par le mot « perspective¹ ». Il entretient une relation étroite avec la structure tridimensionnelle du réel, mais il laisse à l'imagination spatiale du spectateur une plus grande marge d'interprétation : il ne s'agit pas d'un pouvoir de représentation absolu.

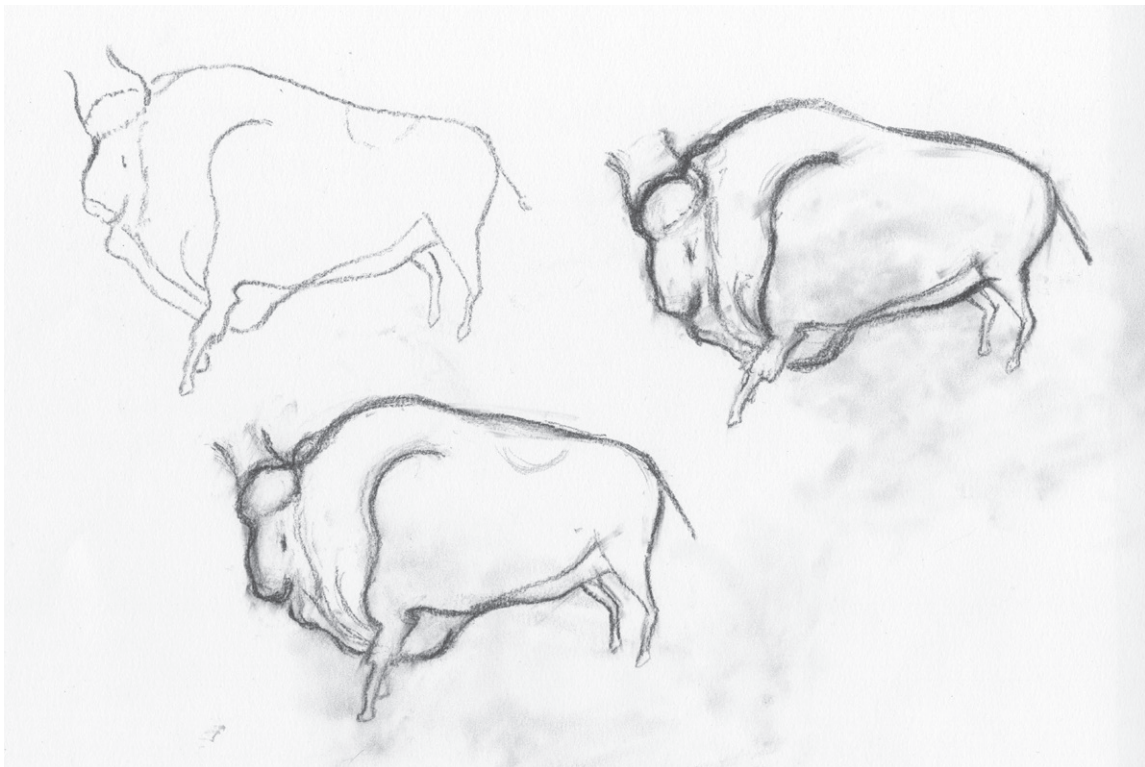
Exercé de cette façon, le dessin s'est avéré très cohérent avec les bouleversements scientifiques qui ont suivi. Il permettait de révéler de nouvelles observations, de faire de nouveaux rapprochements, et d'exprimer de nouvelles hypothèses. Il a ainsi été impliqué dans la remise en cause de la philosophie néo-aristotélicienne, fondée au contraire sur la stabilité du monde et de la connaissance. Par la suite, pendant plusieurs siècles, le dessin scientifique et la perspective ont déployé deux conceptions de l'espace tellement différentes qu'elles semblent avoir eu très peu d'influence l'une sur l'autre.

Je montrerai alors que le dessin scientifique n'a été directement affecté par la perspective qu'à la fin du XIXe siècle, avec la diffusion de la photographie, puis à la fin du XXe siècle avec celles des images de synthèse. La photographie a eu pour effet d'« aplatir » les représentations dessinées en deux dimensions, et de faire régresser la prise en compte de l'espace dans plusieurs disciplines scientifiques. Par la suite, les images de synthèse ont imposé un espace tridimensionnel soumis à la perspective. Nous verrons que ces techniques n'ont pas fait disparaître le dessin des sciences, mais

¹ Sauf mention contraire, le mot « perspective » désignera ici une représentation dans laquelle la sensation d'espace est procurée par des lignes droites qui convergent vers des « points de fuite ». Il s'agit, de loin, de la notion de perspective la plus répandue. Léonard de Vinci utilise ce type de perspective dans plusieurs de ses œuvres, mais il appelle également « perspective » une autre méthode d'évocation de la profondeur, beaucoup plus générale.



a



b

Figure 1: exemples de mouvements possibles pour un bison de la grotte Chauvet

a: image initiale

b: dessins préparatoires à une mise en mouvement par morphing (photo Marc Azéma, dessin Renaud Chabrier)

qu'elles ont largement fait oublier son usage et son potentiel actuel, notamment dans le domaine de la transmission scientifique.

En conclusion, j'apporterai des éléments de réflexion pour mieux comprendre cette apparente victoire culturelle de la perspective sur le dessin scientifique, au-delà des aspects techniques. Grâce à l'analyse de deux approches totalement opposées de la notion d'espace, diffusées respectivement par Bachelard et Panofsky dans les années 30, nous pourrions identifier dans quelle logique s'est mis en place un partage des pouvoirs sur la description du monde, dont le dessin et les sciences du vivant sont globalement exclues, et qui contribue à entretenir une profonde coupure entre les sciences et la société.

La révolution du dessin

La capacité de représenter la présence spatiale d'un corps est aussi ancienne que le dessin lui-même. Grâce aux techniques d'animation par morphing, on peut même aujourd'hui « prouver » la spatialité des dessins de la Grotte Chauvet. En mettant le dessin d'un bison en mouvement autour de sa position initiale, il devient évident que ce mouvement se déploie dans l'espace, et que la représentation du bison n'est pas qu'une silhouette symbolique en deux dimensions (voir **figure 1**).

Ce pouvoir de représentation spatiale a longtemps fluctué selon les époques et les civilisations, sans jamais pouvoir être considéré comme complet. Lorsque Platon définit ce que devrait être l'éducation fondamentale, dans un passage étonnant de la République³, il fait faire à Socrate la réflexion suivante : après l'étude de la géométrie des surfaces, « l'investigation concernant le passage à la profondeur » devrait être la seconde priorité, mais « sous l'angle de la recherche, elle est dans un état ridicule ». Faute de mieux, il faut donc passer directement à l'étude de l'astronomie, qui concerne « le mouvement de ce qui a de la profondeur », sans avoir compris la nature de la profondeur elle-même³.

La Renaissance apparaît alors comme une authentique révolution du dessin, au propre comme au figuré. Pour la première fois, entre la fin du XVe siècle et le début du XVIe, des dessinateurs comme Vinci ou Dürer ont développé avec succès un dessin susceptible de s'appliquer à n'importe quoi, vu sous n'importe quel angle (**figure 2**). Cette possibilité de « tourner autour » du sujet pour en appréhender l'espace a constitué une révolution, au sens scientifique d'un « mouvement de rotation autour d'un axe ». À son échelle, chaque sujet d'intérêt devint effectivement l'équivalent d'une planète (ou d'une nébuleuse) à étudier. Une révolution au sens politique de « bouleversement des hiérarchies » en a découlé, puisqu'il devint naturel de s'intéresser à tout avec un même engagement de l'attention : comme l'a montré Dürer dans une aquarelle célèbre, une touffe d'herbe mérite autant d'investissement qu'une nativité. La même qualité de trait peut s'appliquer à des paysans, à des nobles ou encore à des archanges. Les frontières entre les représentations du sacré et du profane, celles des puissants et des misérables en ont été, sinon effacées, du moins fortement atténuées. À

² Platon, *La République*, Livre VII, 528 (Traduction Pierre Pachet, Paris, ed Folio essais, 1993, p. 380-381). Ce passage se situe juste après le mythe de la caverne.

³ Encore aujourd'hui, l'« Espace » désigne plus souvent l'espace intersidéral que celui qui nous entoure, et l'astronomie est de loin la discipline scientifique la plus médiatique.



Figure 2: exemple du pouvoir de représentation spatiale pendant la Renaissance (Léonard de Vinci, vers 1510)

partir du XVI^e siècle, le dessin devint donc un terrain privilégié pour exercer une nouvelle façon de voir le monde, en rapport avec le développement de l'humanisme. Grâce aux nouvelles techniques d'impression développées depuis Gutenberg, sa diffusion massive sous forme de gravures a marqué le début d'une nouvelle alliance entre le texte et l'image.

Dans ce contexte, le dessin est apparu comme un outil d'exploration du monde à part entière, qu'il s'agisse du monde extérieur ou du monde mental. Dans la pratique, il se nourrit d'un aller-retour permanent entre les deux. Nous allons essayer de mieux comprendre cet équilibre dynamique entre « ce que je vois » et « ce que je sais », tel qu'il se présente à la Renaissance.

Plusieurs directions de travail étaient simultanément abordées par les artistes, chacune générant des façons particulières de représenter l'espace. Une première, très importante, s'est concentrée sur la présence des êtres vivants, qu'il s'agisse de portraits ou d'études de mouvement. Une seconde consistait à exercer son dessin sur des sujets qui défient la notion de « forme » tout en développant une grande spatialité, tels que les roches, les arbres, les drapés, les chevelures, ou encore les nuages. Une troisième piste pouvait encore être l'étude des formes géométriques tridimensionnelles, des plus simples aux plus complexes.

La gamme des traits, des hachures et des lavis s'est trouvée considérablement élargie et assouplie par un tel entraînement, comme on le voit de façon spectaculaire chez Vinci et Dürer. Grâce à une maîtrise particulièrement poussée de la texture et de la courbure des traits, la représentation dessinée a pu s'adapter plus finement au sujet, à l'angle de vue et aux circonstances que dans les époques précédentes. Le dessin a ainsi permis aux dessinateurs de mieux prendre conscience de l'univers visible, en renouvelant des schémas de représentation préconçus.

Pour autant, la représentation du réel n'est pas devenue strictement dépendante de la réalité immédiate. En premier lieu, le dessin de la Renaissance restait fondamentalement « irréaliste », par le simple fait qu'aucun trait n'est en général observable explicitement dans la nature : ceci est vrai non seulement pour les traits de contour, mais encore plus pour les hachures qui sont utilisées de façon extrêmement dynamique à cette époque. De plus, l'information tirée du réel n'était pas reproduite « mécaniquement » sur la feuille. Au contraire, elle pouvait être remaniée pour présenter le sujet sous un meilleur angle, ajuster sa présence, corriger certaines distorsions, mais aussi rajouter des informations ou synthétiser plusieurs observations en une seule représentation. Grâce à ces transformations parfois subtiles, les dessinateurs ont pu accéder à la composition d'un espace mental tout en préservant une relation étroite avec le réel.

Afin de mieux identifier ce procédé de composition très important, mais apparemment mal identifié dans la littérature scientifique, nous allons nous concentrer un moment sur la représentation des corps vivants en mouvement. Dans ce type de dessin (qui peut tout à fait être pratiqué aujourd'hui) l'habillage architectural ou graphique est souvent absent ou minimal. Cette absence de décor préserve de nombreux espaces libres sur la feuille : au lieu d'un dessin, le dessinateur peut en composer plusieurs. Lorsqu'un premier corps est ainsi dessiné, le deuxième est rarement posé à côté au hasard. Au contraire, le premier corps génère déjà lui-même une spatialité à laquelle le deuxième doit être adapté, afin que le regard puisse embrasser l'ensemble et s'orienter sans peine

de l'un à l'autre. Dans le cas d'un travail d'observation, chaque dessin est donc l'objet d'une double adaptation, à la fois vis-à-vis de la réalité qui l'inspire, et vis-à-vis des autres corps déjà représentés sur la feuille.

Une étude de chats de Léonard de Vinci (**figure 3**) donne un excellent exemple de cette démarche. Chaque chat possède sa propre spatialité, qui peut être rendue encore plus évidente par l'animation⁴. Les intentions de mouvement sont clairement définies de façon spatiale, et pas ramenées d'une façon ou d'une autre dans le plan. La spatialité de chaque chat est ainsi bien affirmée, mais elle n'est pas isolée pour autant. Notre regard et notre attention peuvent librement jouer à associer plusieurs chats afin de ressentir l'espace qu'ils organisent ensemble. Chaque spatialité locale est compatible avec celles des autres.

Cette façon de composer l'espace ne respecte pas les règles de représentation à partir desquelles nous sommes habitués à réfléchir. Lorsque nous considérons des dessins qui « respectent les proportions » des corps, et qui entretiennent donc une référence explicite avec la structure tridimensionnelle de la réalité, nos habitudes de langage laissent supposer que tous ces corps occupent une place déterminée « dans » un espace unique, plus général, l'espace euclidien. Or, dans le cas de ces chats, notre imagination peut trouver de multiples solutions spatiales pour combiner les chats ensemble. La taille relative des corps, leur localisation en profondeur, et par conséquent les distances qui les séparent, dépendent d'une interprétation active de l'observateur. Entre les corps, il est possible d'imaginer des circulations. D'un corps à l'autre, notre regard peut s'imaginer avoir tourné, s'être éloigné ou s'être rapproché. Par ailleurs, il n'est pas difficile d'imaginer d'autres solutions de composition, à partir des mêmes dessins, en les repositionnant les uns par rapport aux autres. Enfin, si les dessins des chats eux-mêmes se modifiaient, en remontant le temps ou en suivant le cours de leur mouvement, la composition actuelle serait amenée à changer. Ces différentes possibilités de changement contribuent à la perception de différentes tensions spatiales au sein de l'image. Dès que l'on tient compte de l'imagination qui la fait vivre, cette composition n'est donc ni unique, ni univoque, ni définitive. Elle évoque l'espace, mais elle ne le surdétermine pas.

Pourquoi s'attarder autant sur cette image, quand les carnets de Léonard de Vinci sont remplis de schémas, d'observations et de dispositifs techniques beaucoup plus proches de ce que l'on attend des sciences ? Tout d'abord, les dessins « pré-scientifiques » de Vinci ont précisément l'inconvénient de trop bien offrir l'apparence d'une démarche scientifique moderne. Ils doivent être analysés avec des précautions qui ne peuvent pas être développées ici. À l'inverse, puisqu'à son époque il n'y avait pas de différence claire entre les arts, les sciences et les techniques, il me semble utile de chercher une source commune aux différents types de dessin qui ont été développés ensuite dans ces domaines respectifs. Ces dessins de chats permettent donc d'identifier un aspect essentiel et général de la révolution du dessin, sans devoir faire intervenir chez le dessinateur une intention scientifique qui risquerait d'être anachronique.

⁴Une série complète d'animations de dessins de Léonard de Vinci, réalisée pour l'exposition « Léonard de Vinci, projets, dessins, machines » en 2012 à la Cité des sciences, est visible à cette adresse : <https://vimeo.com/84689530>.

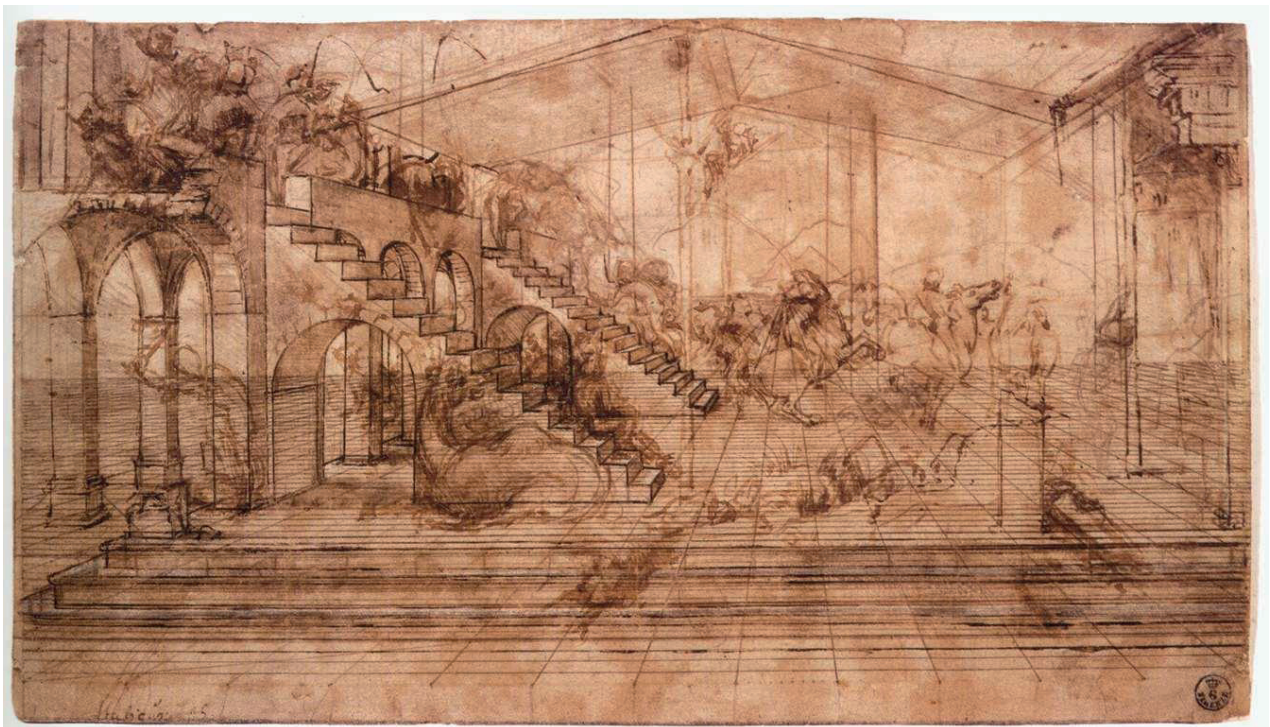


Figure 4: panneau des lions de la grotte Chauvet, 33 à 29 000 ans BP

Figure 5: étude de perspective linéaire par Leonard de Vinci, 1481-1482

La spatialité « non-déterministe » que je viens de décrire est directement reliée à la capacité de représentation spatiale associée au dessin depuis ses origines les plus anciennes. Une peinture rupestre qui accumule les dessins sur une paroi opère de façon assez semblable, comme dans la grotte Chauvet (**figure 4**) ou à Lascaux. On peut donc supposer sans risque que ce procédé de représentation repose avant tout sur des capacités cognitives spécifiques des êtres humains, plutôt que sur le « style » particulier d'une époque. La différence (importante) est que les dessinateurs préhistoriques ne s'intéressaient pas à tout, et s'aidaient souvent du relief réel de la paroi⁵. La Renaissance n'invente donc pas la spatialité non-déterministe, mais elle l'explore dans une gamme de travail beaucoup plus étendue, avec des supports et des outils beaucoup plus légers et pratiques.

Pour éviter tout malentendu, il faut préciser que le terme « non-déterministe » n'est pas synonyme de « flou » ou d'« imprécis ». Il signifie que le dessin peut être relativement précis sous certains aspects et laisser plus d'indétermination sur d'autres. Bien composés, ces différents niveaux d'indétermination peuvent alors offrir des informations spatiales et temporelles plus riches qu'une représentation qui cherche l'exactitude de façon uniforme. Le « sfumato » de Vinci est un exemple très connu de cette démarche en peinture, mais l'utilisation du niveau de détail dans les dessins de la Renaissance offre une multitude d'exemples concrets de cette approche⁶.

Nous pouvons maintenant comparer cette spatialité avec celle qui est mise en place à travers la perspective à point de fuite, aussi appelée perspective linéaire. Un autre dessin de Vinci, beaucoup plus connu, montre la structure typique de cette méthode : des lignes droites, convergentes dans la profondeur, déterminent une grille spatiale (**figure 5**). Il s'agit, rigoureusement parlant, de la mise en place d'un système de coordonnées tridimensionnelles sur la feuille. Ce sont le plus souvent les lignes et les surfaces architecturales qui servent à définir ce système mais, comme dans le dessin de Vinci, les lignes peuvent être plus abstraites. Dans tous les cas, la représentation de l'espace se fige : chaque corps est désormais assigné à une place précise (à partir du moment où il est en contact avec une des surfaces ainsi construite). Le fait de placer les corps « dans » un système de coordonnées tridimensionnel général limite le déploiement de leur propre spatialité. « Dans » une architecture en perspective, il n'est plus aussi facile de sentir les circulations possibles entre les corps, ni de les imaginer quitter leur place. Pour notre imagination spatiale, la perspective à point de fuite a donc un effet clairement déterministe.

Le mouvement apparaît alors comme une démarcation entre deux façons de gérer l'espace, qui sont développées quasi simultanément par les mêmes artistes. Parmi eux, Léonard de Vinci est de loin le dessinateur chez qui l'imagination spatiale est la plus habitée par le mouvement. Il est donc cohérent d'observer que ses dessins, « scientifiques » ou pas, précis ou esquissés, génèrent la plupart du temps un espace non-déterministe. La proposition que je soutiens dans la suite de ce texte est la suivante : contrairement à la peinture qui a largement mis en avant une approche déterministe de

⁵ L'utilisation du relief de la paroi est avérée dans la peinture rupestre, tout particulièrement lorsque les animaux ne sont pas dessinés de côté mais de face ou de trois quart. Il faut également remarquer qu'en parallèle à la Renaissance occidentale, la peinture chinoise développe une approche de l'espace qui peut être comprise de la même façon. Ce sujet sera développé dans de futurs travaux.

⁶ De façon plus explicite, l'indétermination joue également un rôle important dans la peinture chinoise, comme le montre François Jullien dans *Éloge de la fadeur*, Arles, ed. Philippe Picquier, 1991.

l'espace dans l'art religieux et officiel, à travers l'usage de la perspective, le dessin scientifique s'est développé en assumant une représentation non-déterministe de l'espace, plus proche des principes fondamentaux du dessin. Nous allons maintenant voir que cette approche était particulièrement en accord avec la révolution scientifique qui a suivi la Renaissance.

Entre le dessin et les sciences, un accord fondamental

À la fin du XVe siècle, au moment où la révolution du dessin prenait toute son ampleur, la pensée scolastique développée au moyen-âge était très majoritaire. Elle affirmait l'idée d'un monde stable, en se basant largement sur la philosophie d'Aristote⁷. Elle refusait par conséquent l'idée que la terre puisse bouger.

La notion de mouvement est problématique pour concevoir le monde à partir de sa stabilité. Comme le souligne Paul Feyerabend, l'édifice intellectuel de cette pensée néo-aristotélicienne reposait donc sur une conception du mouvement compatible avec cette stabilité de principe. Le mouvement était ainsi considéré comme la « transition d'une forme de l'agent vers le patient », la permanence de cette forme garantissant la stabilité nécessaire. La perception était alors considérée de façon analogue comme « un processus au cours duquel la forme de l'objet pénètre celui qui le perçoit [...] de sorte que celui qui perçoit, en un sens, est affecté des propriétés de l'objet⁸ ». Selon cette théorie, puisqu'il y a identité entre les propriétés des objets et la perception de ces derniers, la réalité ne peut pas être en désaccord avec la perception. Dans ce cadre de pensée, il était donc mal venu de nier les évidences du sens commun : en particulier, le « fait » que la terre ne tourne pas, puisque personne ne peut sentir ce mouvement. Chercher à étendre le champ des observations à l'aide de dispositifs techniques était également malvenu, puisque ces derniers étaient jugés plus trompeurs que la perception « immédiate ». Ces positions étaient en partie justifiées car les nouveaux outils optiques étaient encore mal connus et maîtrisés. Cependant la scolastique avait développé ainsi un système de pensée dans lequel toute possibilité de travail scientifique dans le sens moderne était verrouillée.

La révolution copernicienne s'est alors jouée en plusieurs temps que nous allons simplement rappeler. D'abord Copernic (1473-1543) a affirmé, défendu et publié en 1543 une idée contre-intuitive en proposant de considérer que la terre tourne autour du soleil. Galilée (1564-1642) a ensuite repris et développée cette théorie avec le renfort d'un nouvel outil d'observation, le télescope. De son côté, Kepler (1571-1630) a montré que les planètes effectuent un mouvement elliptique, et ne suivent pas une trajectoire circulaire a priori plus « parfaite ». Newton (1643-1727) a fait ensuite naître l'astronomie et la physique moderne en établissant la loi de la gravitation universelle. Pour de nombreux auteurs, Newton marque un progrès décisif, mais aussi le retour à une cosmologie fondée sur la stabilité. A partir de ses travaux, le monde est à nouveau sensé être régi et organisé de façon stable par une loi universelle, qui ne sera remise en question qu'à la fin du XIXe siècle⁹.

⁷ Plusieurs auteurs cités ici (Feyerabend, Bachelard, Korzybski...) choisissent de désigner sous l'appellation « philosophie d'Aristote » le néo-aristotélianisme du moyen-âge et ses dérivés plus tardifs, tout en prévenant que la pensée d'Aristote lui-même est plus subtile et difficile à cerner. Je vais donc utiliser la même convention dans la suite du texte.

⁸ FEYERABEND P., *Contre la méthode, Esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*, Paris, Seuil, Point Sciences, 1975, page 159. Ces deux paragraphes s'inspirent largement de ce livre, sans en reprendre les aspects plus polémiques.

Dans la période de transition entre l'expression des idées de Copernic et le siècle des lumières, un rapport étroit s'est noué entre les sciences et le dessin, pour des raisons aussi pratiques que fondamentales.

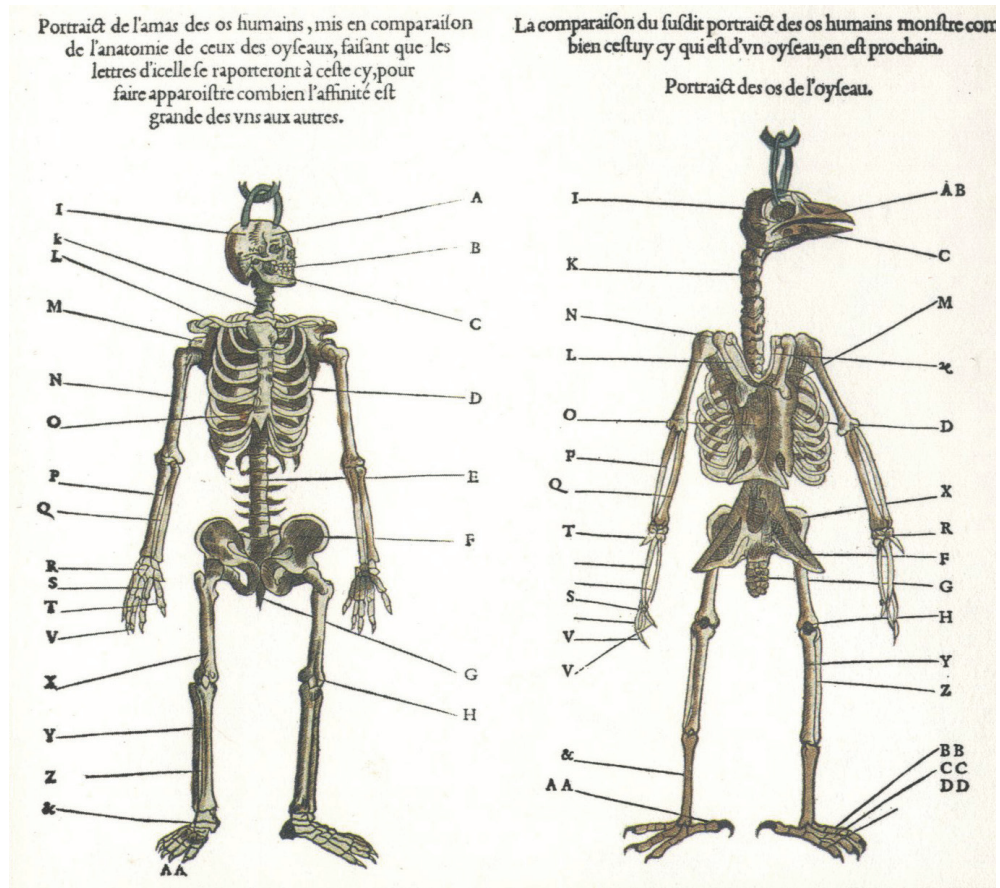
En premier lieu, le dessin est devenu un accompagnateur et un facilitateur de l'observation au quotidien : Galilée, et de très nombreux astronomes après lui, observaient les astres en dessinant. Jusqu'à l'invention de la photographie, il n'y a eu quasiment aucun autre moyen de garder une trace visuelle des observations. Cependant le dessin n'est pas un outil d'enregistrement au sens où nous l'entendons aujourd'hui. Comme n'importe qui peut le constater en pratiquant lui-même, le dessin n'est pas instantané. Il oblige à rester confronté aux phénomènes étudiés pendant un temps qui peut se compter en heures, tout en restant actif en permanence. Pendant ce temps, le regard change. En supposant que le dessinateur a le minimum de technique nécessaire, il se sensibilise progressivement à ce qu'il étudie. Pour des raisons liées à la plasticité neuronale qui sont assez bien comprises aujourd'hui, les effets les plus remarquables ont souvent lieu après avoir dessiné, ou le lendemain : la perception n'est plus la même car un apprentissage a eu lieu. Ce phénomène qui peut se répéter de jours en jours est contradictoire avec l'idée néo-aristotélicienne que la réalité et la perception sont a priori en accord, même chez les « savants » et les « experts ». Au contraire, il faut souvent tout un travail pour prendre conscience de ce qui paraîtra évident le lendemain. Quel que soit son aspect, depuis le schéma mathématique abstrait jusqu'au naturalisme, le dessin ne peut jamais être considéré comme une vérité définitive, parfaitement exacte.

Lorsque les travaux scientifiques sont assez aboutis pour être publiés, un deuxième type de dessin scientifique est nécessaire : le dessin de transmission, souvent réalisé par des artistes professionnels et pas directement par les chercheurs. En 1555 (deux ans après la publication majeure de Copernic), Pierre Belon publie ainsi à Paris une *Histoire naturelle des oiseaux*, qui comporte la première gravure d'anatomie comparée. Celle-ci montre un squelette d'homme, à côté d'un squelette d'oiseau dans la position de l'homme (**figure 6a**). Cette planche permet d'établir de nombreuses correspondances anatomiques surprenantes : la structure générale de l'homme et de l'oiseau est en grande partie la même, notamment au niveau des bras. Le dessin permet ici de se libérer des questions d'échelle (un oiseau est en général nettement plus petit qu'un homme) et de créer un espace d'observation commun pour ces deux corps en apparence à peine comparables. Loin d'être « définitive », cette composition visuelle en suggère d'autres : on peut parfaitement imaginer l'homme dans la position de l'oiseau (**figure 6b**) et mieux remarquer d'autres correspondances de structure, notamment au niveau des jambes.

Au XVI^e siècle comme aujourd'hui, le dessin permet ainsi de proposer des rapprochements impossibles à rencontrer dans l'expérience quotidienne, et souvent dans la réalité en général. Ces rapprochements ont été expérimentés par des scientifiques qui les jugent assez pertinents pour être transmis à un public plus large¹⁰. Plus qu'une connaissance ponctuelle, la spatialité non-détermi-

¹⁰Le développement de l'astronomie offre des points de repère incontournables pour l'histoire des sciences. Pour garder une vision globale, il faut donc aussi garder en mémoire que de nombreuses avancées, impossibles à détailler ici, avaient lieu en parallèle dans d'autres domaines de la physique, ainsi qu'en chimie, mathématiques, anatomie, zoologie, etc.

a



b

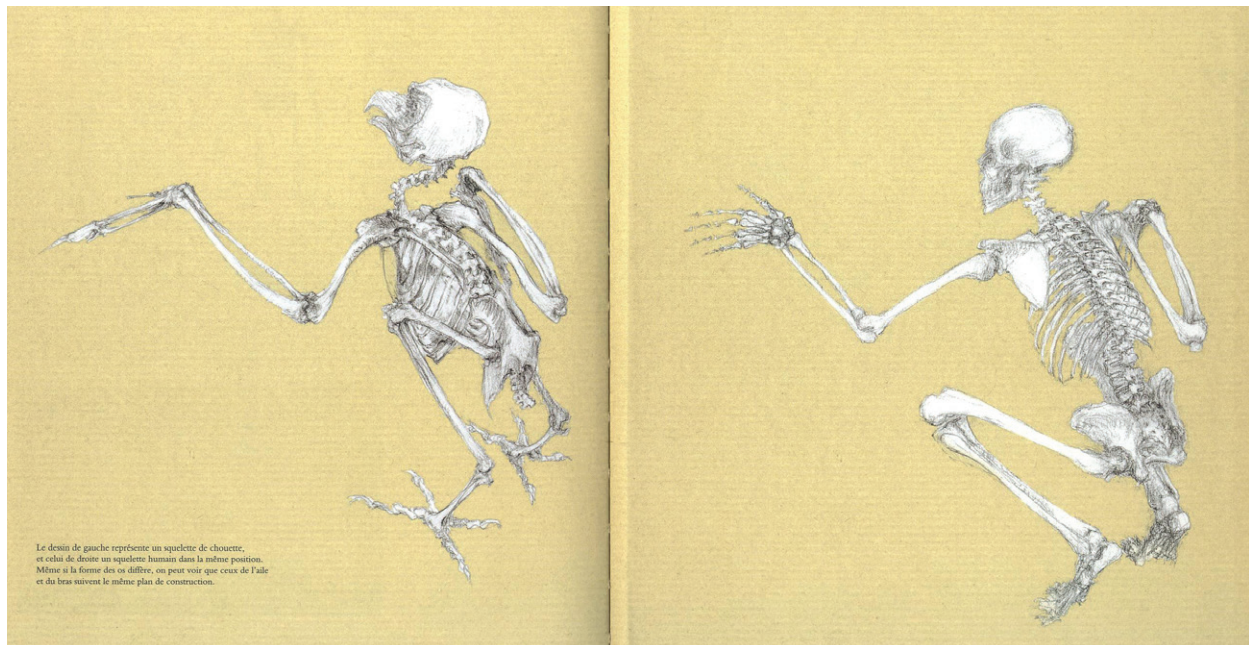


Figure 5: anatomie comparée de l'homme et de l'oiseau

a: *Histoire des Oiseaux* de Pierre Belon, 1555

b: *Les lunettes à voir le squelette*, Chabrier/Stehr, 2002

niste du dessin scientifique permet de transmettre à autrui la possibilité de certaines opérations mentales. Le chercheur a dû les faire pour avancer dans la compréhension d'un phénomène, et l'observateur de l'image est invité à les faire pour lui-même. L'image ne prend donc sens que si l'imagination du spectateur s'emploie à explorer et à faire vivre l'espace qu'on lui propose. Si la représentation de l'espace est déterministe, c'est-à-dire si la position de chaque corps est déterminée dans l'espace par une perspective, liée elle-même à un point de vue unique, ce jeu n'a pas lieu d'être. C'est pourquoi, jusqu'à l'avènement de la photographie, l'espace du dessin scientifique a été globalement non-déterministe, probablement sans que les scientifiques eux-mêmes n'aient eu à s'interroger clairement sur la question.

Pour continuer, il est maintenant nécessaire de revenir très brièvement sur l'histoire de la perspective. À la Renaissance, cette dernière n'était pas encore la technique à vocation universelle qu'elle deviendra progressivement à partir XVIIe siècle. Très vite, les artistes constatèrent que l'usage des lignes de fuite n'était d'aucune utilité pour dessiner et peindre les corps vivants¹¹. Au contraire, elle induisait des distorsions peu souhaitables, les mêmes qui sont aujourd'hui faciles à identifier dans les photos prises de trop près, ou avec un trop grand angle. Des représentations de l'espace hétérogènes se sont alors mises en place dans les tableaux : si l'architecture était traitée en perspective, les personnages, animaux, et paysages ne l'étaient globalement pas. Une grande ingéniosité fut alors déployée pour raccorder les corps avec les surfaces sur lesquelles ils étaient posés. Une continuité ou une simple cohabitation étaient ainsi établies entre ce qui pouvait être parfaitement défini dans l'espace, d'un point de vue mathématique (les formes géométriques, les surfaces architecturales, et enfin l'espace vide qu'elles définissent), et ce qui était fondamentalement changeant et donc imparfaitement défini (les corps vivants, et tout ce qui relève du « naturel » en général, notamment les arbres). Dans son livre *Archéologie de la perspective*, Luciano Vinciguerra explique de façon détaillée cette façon d'associer et de connecter des espaces de représentation différents. Il montre qu'elle avait un sens spirituel et philosophique important, notamment chez Pierro della Francesca.

Ici encore, nous pouvons identifier un lien de continuité entre la Renaissance et le dessin scientifique. La cohabitation de systèmes de représentation hétérogènes est en effet l'une de ses fonctions essentielles, utilisée massivement jusqu'à aujourd'hui. Le simple fait de montrer une représentation spatiale et d'y associer une coupe, ou d'y intégrer des éléments schématiques, est une opération de ce type. Les différences d'aspect et de texture permettent alors de donner des statuts différents aux éléments représentés, selon qu'ils sont bien connus ou mal connus, qu'ils donnent le contexte ou qu'ils constituent le sujet d'intérêt principal de l'étude. Ces indications parfois très intuitives peuvent alléger considérablement la lecture du texte.

¹⁰ Ce public peut être un public de scientifiques tout aussi qualifiés mais de spécialités différentes. Les scientifiques en question peuvent également être jeunes, et s'adresser à un public relativement « plus qualifié ». La notion de « vulgarisation » traduit très mal ce type d'échanges. Je préfère donc utiliser le mot « transmission ».

¹¹ Erwin Panofsky, dont nous reparlerons à la fin de ce texte, le reconnaissait dans un court paragraphe de *La perspective comme forme symbolique*, 1927, Paris, éditions de Minuit, 1975, p. 156 : « [...] de toute façon et en dépit de tous les efforts entrepris par Pierro della Francesca et Dürer, la construction perspective exacte de configurations tout à fait irrégulières, et plus particulièrement celle du corps humain ou animal ne reçut jamais de véritable application dans « l'usage quotidien » »

Dans les siècles qui ont suivi la Renaissance, la peinture a au contraire largement abandonné cette conception hétérogène de la représentation. Toutes les raisons religieuses, philosophiques et techniques qui ont conduit à l'unification de l'espace pictural sous le régime de la perspective sont largement documentées. En revanche, il est un peu moins souvent rappelé que la perspective prend au XVIIe siècle un rôle spectaculaire dans les décors de théâtre et d'opéra. Si l'on considère que l'importance culturelle de ces spectacles est équivalente à celle des blockbusters au cinéma aujourd'hui (qui sont réalisés à grand renfort d'effets spéciaux en perspective), on comprend aisément que les commanditaires de tableaux aient progressivement exigé des peintres l'usage d'une scénographie immersive équivalente. En consultant les dessins des mêmes artistes, on peut constater qu'ils continuaient cependant à ne pas utiliser la perspective dans une très large partie de leurs études et de leurs tableaux, pour la simple raison qu'elle n'était pas appropriée. Il suffisait manifestement de donner l'illusion d'utiliser la perspective de façon globale lorsque c'était nécessaire. Certains peintres comme Le Lorrain ou Vélasquez devinrent maîtres en la matière.

Au XIXe siècle, la perspective devint cependant une véritable contrainte sociale pesant sur les peintres, comme l'analyse Bourdieu dans le livre *Manet*¹². Dans les académies de l'époque, elle était désormais imposée de façon systématique dans l'étude du corps humain. Dessiner des êtres vivants en cherchant à respecter scrupuleusement la projection perspective change totalement la logique de l'entraînement. Au lieu d'intéresser le dessinateur à la spatialité du corps et à ses diverses relations possibles avec les autres, comme dans l'exemple des chats de Vinci, cette approche le conduit à affirmer le point de vue particulier qu'il a sur ce corps particulier, en affirmant les distorsions liées à la projection sur un plan au lieu de les atténuer. Ces distorsions sont spécifiques au point de vue, et les différents points de vue ne sont pas égaux entre eux : certains d'entre eux mettent plus en valeur le sujet, et donc le dessinateur lui-même s'il réussit son travail. Comme le relève Bourdieu (sans faire l'analyse qui précède), les élèves des académies pouvaient ainsi choisir leur place dans l'ordre du classement, les moins bien classés obtenant les points de vue les plus défavorables sur le modèle.

En s'imposant à l'ensemble de la représentation, surtout dans la grande peinture historique, la logique de la perspective conduit à un « réalisme » de principe. Ceci peut facilement être mis en relation aujourd'hui avec l'ultra-réalisme dans les images de synthèse. Cette véritable obsession du détail et du contrôle, jusque dans les aspects les plus anecdotiques, est vraisemblablement liée à la possibilité théorique de localiser précisément dans l'espace tous les éléments de la représentation. D'après tout ce qui précède, il est facile de comprendre que cette conception « réaliste » de la représentation, incompatible avec une approche non-déterministe de l'espace, n'avait pas beaucoup d'intérêt pour le dessin scientifique.

¹² BOURDIEU P., *Manet, une révolution symbolique*, ed. Raisons d'agir / ed. du Seuil, 2013.

¹³ *Ibid.*, p. 181.

Le choc de la perspective

Contrairement à la peinture, le dessin scientifique s'est donc développé dans un rapport de relative indépendance vis-à-vis de la perspective. De Buffon à Haeckel en passant par Darwin, la nécessité de comprendre les formes du vivant a généré une profusion de croquis aussi bien que de planches gravées, qui possèdent les caractéristiques spatiales dont nous avons parlé : dans l'ensemble, en dehors de quelques effets modestes de mise en scène, elles visaient à produire des compositions d'observations sans y imposer une hiérarchie formelle trop envahissante, et sans privilégier une place d'observation. En d'autres mots, ces images ne s'inscrivaient pas dans une scénographie exogène, autre que celle qui était générée par la spatialité des corps eux-mêmes¹⁴.

L'introduction de la photographie dans les pratiques scientifiques changea brutalement cette situation. Cette projection perspective automatisée devint rapidement plus efficace, plus rapide et moins laborieuse que le dessin pour enregistrer des informations. Marey fut un des premiers à l'utiliser systématiquement et avec succès comme outil de mesure, notamment pour étudier le mouvement animal. Certaines de ses chronophotographies sur fond noir évoquent une grande sensibilité à l'espace (**figure 7a**). Encore aujourd'hui, de telles images peuvent laisser croire que le dessin est dépassé sur son propre terrain.

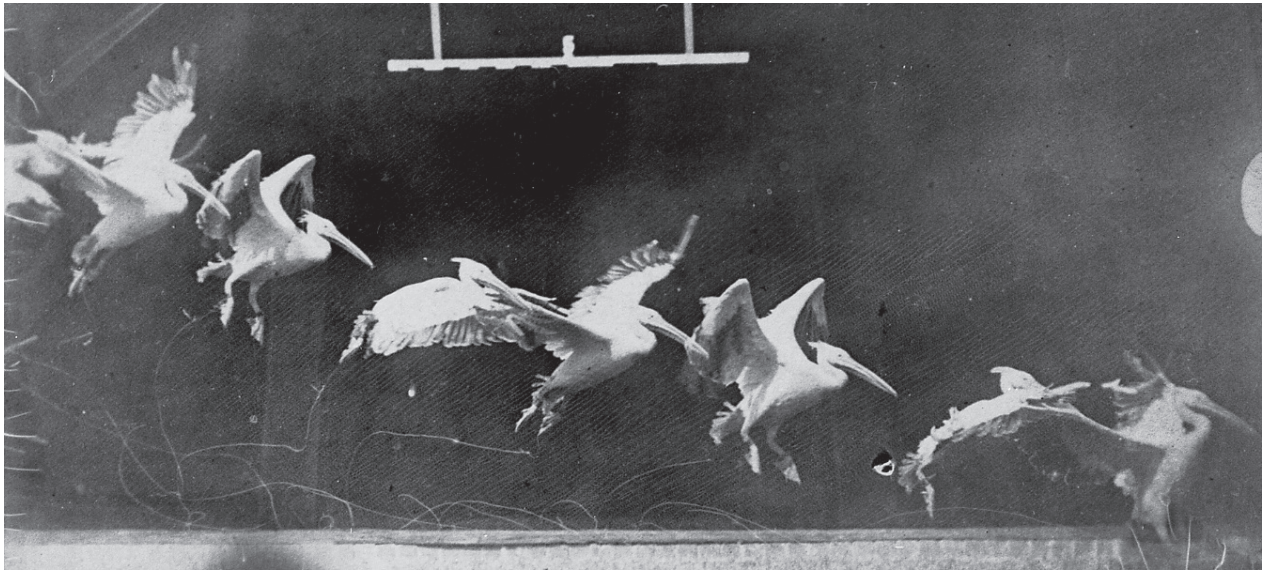
Le dessin prit alors un rôle annexe : celui de recopier et de clarifier les informations capturées, principalement en décalquant le contour des corps photographiés. Marey utilisa largement ce type de dessin, mais il chercha aussi comment s'épargner cette étape en enregistrant directement des relevés graphiques, grâce à des costumes appropriés (**figure 7b**). Dans les deux cas, la photographie posait cependant un problème spatial : seules les vues de face et de côté étaient faciles à exploiter en tant que mesure¹⁵. Par la suite, la prise de vue s'est donc très vite normalisée en même temps que la photographie se répandait dans le travail scientifique. Sous l'effet de cette normalisation et du tracé des contours, un véritable aplatissement des représentations s'est alors produit.

Cette perte de spatialité dans les visualisations scientifiques eut des conséquences notables pour les sciences du vivant. En effet, le passage obligé par la projection sur un plan a privilégié certaines formes de vie par rapport à d'autres. Typiquement, l'homme et le cheval supportent relativement bien la projection en vue de côté : réduire leur marche et leur course à un mouvement en 2D est abusif, mais reste en partie possible (**figure 7c**). Ce n'est pas le cas pour la grande majorité des espèces dont la structure corporelle est « incorrigiblement » tridimensionnelle.

Dans *La vie est belle*, Stephen Jay Gould raconte ainsi comment Charles Doolittle Walcott, le paléontologue qui a découvert les fossiles de la couche de Burgess en 1909, est passé à côté de l'une des plus importantes découvertes de ce siècle. Considérant ces fossiles comme des objets en 2D,

¹⁴ Les planches scientifiques ne sont évidemment pas dénuées de contraintes formelles plus ou moins heureuses. Au XIXe siècle, la composition utilise souvent l'idée d'un « rangement » des corps devant les yeux du spectateur, comme on peut en voir sur les étagères des cabinets de curiosité ou dans les vitrines des muséums. Le caractère arbitraire de ce rangement reste cependant assez évident.

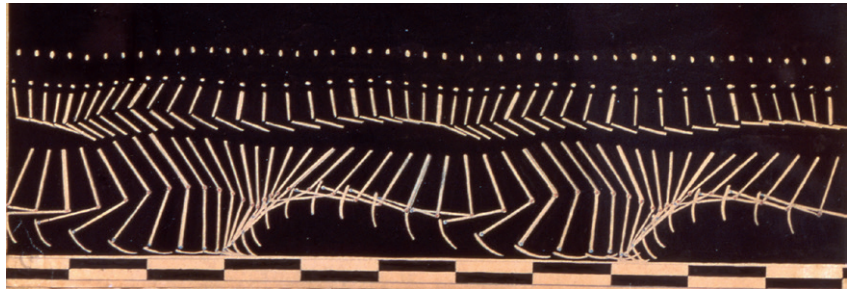
¹⁵ Le livre *Le mouvement* d'Etienne-Jules Marey (1894, ed. Jacqueline Chambon, 2002) montre une grande variété d'images et de tentatives pour appréhender le mouvement dans un espace tridimensionnel. Les techniques de capture de mouvement (système Vicon, etc.) n'ont cependant levé ce problème qu'à la fin du XXe siècle.



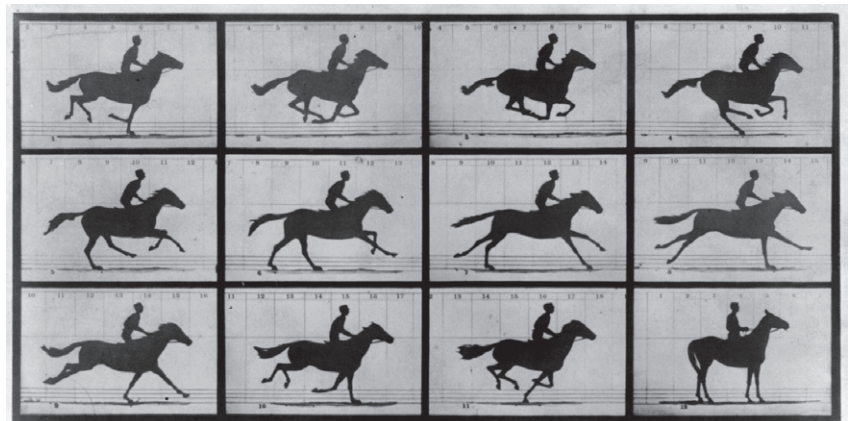
a



b



c



d

Figure 7: Etude du mouvement par chronophotographie vers 1880

7 a : Etienne-Jules Marey, *Vol d'un pélican*, chronophotographie sur plaque fixe, 1888, Dépôt du Collège de France en 1978, Musée Marey, Beaune. Photo: J-D Lajoux

7 b : Etienne-Jules Marey, *Georges Demeny portant le costume noir à lignes et points blanc*, photographie, 1883, Dépôt du Collège de France en 1978, Musée Marey, Beaune. Photo: J-C Couval

7 c : Etienne-Jules Marey, *Images successives d'un coureur*, chronophotographie géométrique partielle retouchée à la gouache, vers 1883, détail du panneau *Etude chronophotographique de la locomotion humaine*, Dépôt du Collège de France en 1955, Musée Marey, Beaune. Photo: J-C Couval

7d: Etude de la course du cheval par Muybridge

il a projeté sur eux une interprétation préconçue : il les a interprétés comme des précurseurs des espèces que nous connaissons aujourd'hui, assimilant les plus étranges à des « vers ». Cela lui permettait de faire rentrer le tout dans une hiérarchie positiviste de l'évolution. Cette dernière postulait que la diversité du vivant avait augmenté de façon linéaire, et que la perfection était allée croissante, pour aboutir à l'homme (il est assez facile de sentir l'influence de la perspective linéaire dans cette conception de l'évolution). Pour soutenir son interprétation, il publia des photographies parfois fortement retouchées.

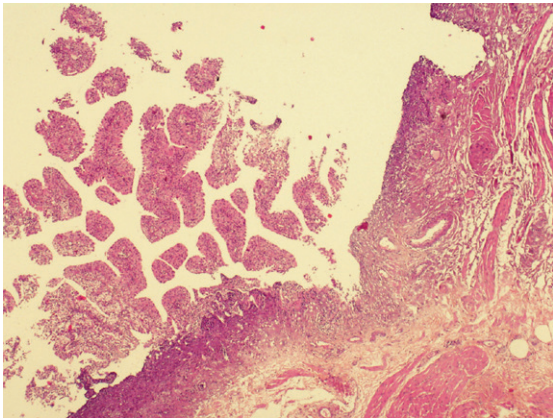
Reprenant ce travail dans les années 1970, Whittington, Briggs et Morris employèrent une méthode différente : ils analysèrent les fossiles dans leur épaisseur, en dégagant certaines parties et en utilisant un système optique permettant de dessiner par-dessus l'image microscopique. Ils purent alors mettre en évidence que la plupart des espèces étaient inconnues, en observant la structure tridimensionnelle de leurs articulations. Grâce au dessin, ces fossiles ont finalement révélé l'« explosion de biodiversité cambrienne », qui était alors insoupçonnable, et qui remettait totalement en question l'idée d'une progression linéaire de la diversité du vivant.

Cette histoire montre à quel point la prise en compte de la structure spatiale du monde joue un rôle important : elle empêche de plaquer un schéma préconçu sur la réalité. Cependant, de façon générale, le XXe siècle est pour les sciences un siècle de schématisation. Pour de bonnes et de mauvaises raisons, le recours aux schémas 2D s'est généralisé et reste extrêmement présent aujourd'hui. Pour analyser de façon rigoureuse ce phénomène, il faudrait probablement tenir compte des techniques d'impression et de projection. Ces dernières firent privilégier un dessin à l'encre très linéaire, loin des jeux de trait et de matière qui donnent accès au pouvoir de représentation abordé plus haut. L'utilisation des figures vectorielles n'a fait que renforcer le phénomène.

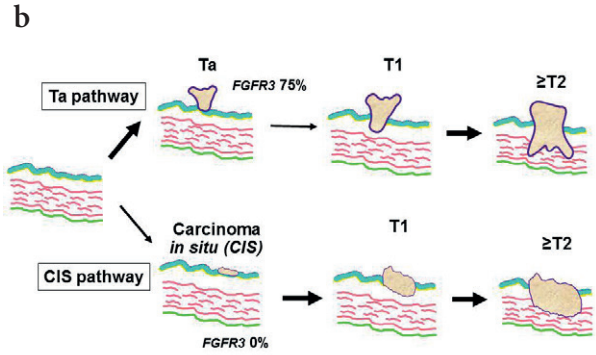
Dans ce contexte, l'arrivée des images de synthèse dans les années 80 représenta un véritable appel d'air pour tous les chercheurs qui devaient, d'une façon ou d'une autre, tenir compte des représentations spatiales. Comme la photographie, les images de synthèse sont une forme de perspective automatique. Cette fois, cependant, les objets photographiés ou filmés sont définis dans un espace virtuel, où sont placées des caméras qui peuvent librement se déplacer. Il s'agit d'une révolution presque équivalente à celle du dessin cinq siècles auparavant : il devint possible de tourner « librement » autour des formes virtuelles. En quelques décennies, les images de synthèse se sont affirmées comme un outil incontournable dans de très nombreuses disciplines, notamment celles qui se développent à partir des années 90 : neurosciences, biophysique, etc.

Le dessin est-il, cette fois, devenu vraiment inutile pour les sciences ? Pas encore. En premier lieu, certaines disciplines continuent à développer la pratique du dessin, car elle y est irremplaçable, soit pour dessiner sous le microscope comme nous l'avons vu (systématique, évolution), soit pour apprendre et mémoriser les formes des fossiles et des plantes (paléontologie, botanique), soit pour prendre des notes de terrain (anthropologie).

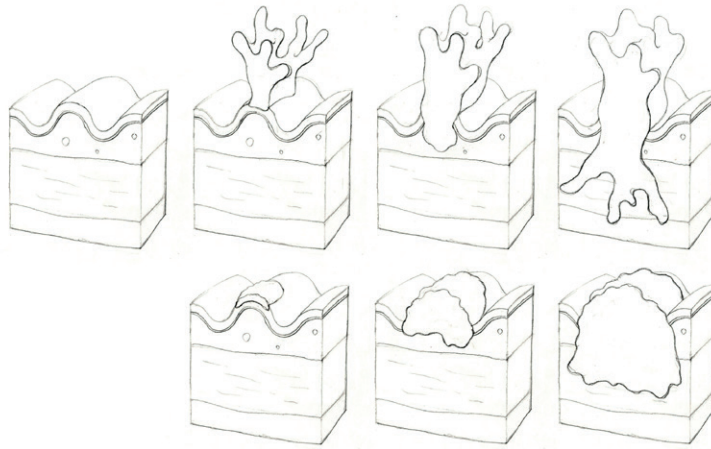
En dehors de ces domaines, le dessin semble à première vue dépassé au profit de techniques 2D ou 3D toutes liées d'une façon ou d'une autre à la perspective. Cependant, lorsque nous avons identifié plus haut l'espace non-déterministe du dessin scientifique, nous avons vu qu'il était, d'une part,



a



c



d

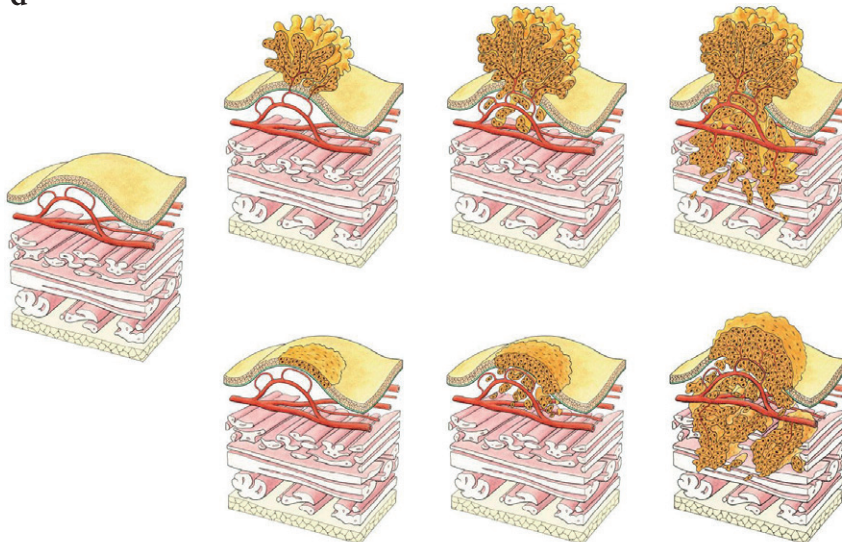


Figure 8: réalisation d'une illustration du cancer de la vessie

a: coupe histologique d'une tumeur papillaire avec la paroi vésicale (Dr Yves Allory, APHP)

b: deux voies de progression du cancer de la vessie (François Radvanyi, institut Curie)

c: première esquisse pour un dessin synthétisant les deux types d'information

d: dessin final (R.Chabrier)

totalemment cohérent avec la philosophie, la pratique et la transmission des sciences, et d'autre part incompatible avec l'usage de la perspective. Les sciences ont-elles changé de philosophie ? Ou les outils perspectifs que sont la photographie et les images de synthèse 3D, complétés par le graphisme vectoriel 2D, ont-ils finalement couvert l'ancien champ d'action du dessin ?

Nous allons d'abord considérer la seconde question. Il n'est pas question ici de nier l'utilité et l'importance des techniques que nous venons de citer. Cependant, il faut relever que les images scientifiques produites aujourd'hui sont principalement de deux sortes.

- D'une part, il s'agit de schémas 2D dont la spatialité est très limitée et dont l'information est relativement fruste : il faut être scientifique soi-même pour savoir ce qu'ils symbolisent.

- D'autre part, il s'agit de données d'acquisition, photographiques ou tridimensionnelles. Ces dernières, après divers ajustements graphiques, produisent souvent des images magnifiques ou spectaculaires. Mais cette fois elles sont trop riches et trop « brutes » pour pouvoir être interprétées par des observateurs qui ne sont pas spécialistes.

Les images scientifiques sont apparemment condamnées aujourd'hui à l'hermétisme, soit par le trop, soit par le trop peu d'informations. Le public, lui, se retrouve cantonné dans un rôle de spectateur passif prié d'admirer de belles images.

Le dessin retrouve alors ici son rôle de transmission. Si par exemple un chercheur et un médecin étudient le développement du cancer de la vessie, ils produisent au cours de leurs travaux de nombreuses images photographiques (**figure 8a**, coupe histologique), ainsi que des schémas 2D qui synthétisent leur compréhension du phénomène (**figure 8b**). Ces images conviennent très bien pour mener la diffusion de leurs recherches, jusqu'à un certain point. Ils peuvent alors faire appel à un dessinateur qui va esquisser directement au cours de la discussion une proposition de visualisation spatiale du phénomène (**figure 8c**). Cette esquisse est importante : c'est la première étape d'un processus qui doit permettre de visualiser ce qui occupe l'espace mental des chercheurs. Elle donnera naissance à un dessin plus abouti, qui ajoute au schéma de nombreuses informations de contexte (structure musculaire de la vessie, etc.), mais qui reste plus abordable que la vision directe des coupes histologiques (**figure 8c**).

Ce type de réalisation ne peut-il pas être réalisé directement avec les techniques numériques, 2D ou 3D ? Par définition, les techniques vectorielles 2D reposent sur l'utilisation de formes graphiques plates et régulières. Or, dans un dessin, toutes les variations de texture sont significatives : c'est pourquoi la spatialité d'une esquisse un peu « sale » est souvent plus juste que celle d'un dessin bien « nettoyé ». Les techniques vectorielles 2D ne permettent donc pas de concevoir aisément une telle image, surtout s'il faut le faire en déplacement. Les techniques 3D, de leur côté, génèrent des quantités d'informations de texture non significatives, à cause du rendu perspectif réaliste¹⁶. En pratique, les techniques purement numériques 2D et 3D ont une utilité indiscutable, mais elles font aussi écran avec le réel, soit par excès de symbolisme, soit par excès de réalisme.

¹⁶ Des rendus non-photoréalistes sont possibles, mais ils ont tendance à faire basculer l'image dans une esthétique 2D. Même si l'amélioration des rendus est une piste très intéressante, les moyens disponibles dans la création d'images scientifiques donnent rarement accès à une grande subtilité, contrairement à ce que peut faire un studio comme Pixar.



Figure 9: dessin extrait de la reconstitution en maquette et projections animées d'une cérémonie gauloise (R. Chabrier)

Exposition «Gaulois, une expo renversante», Cité des sciences et de l'industrie, 2011-2012

Grâce à ses qualités d'indétermination, le dessin sur papier s'avère dans bien des cas le meilleur point de départ pour transmettre la spatialité des phénomènes, dans les sciences du vivant mais aussi dans les sciences de la matière ou en mathématiques. Qu'il soit utilisé tel quel ou qu'il soit augmenté par diverses techniques informatiques, il fonctionne souvent aujourd'hui comme un relais, un « passage par l'espace » pour comprendre ce qui relie différentes informations scientifiques entre elles. Très souvent, la réalisation d'un dessin ou d'un court-métrage est alors l'occasion pour plusieurs chercheurs de coordonner leurs compréhensions d'un phénomène, d'une façon qu'ils n'avaient pas anticipée en s'engageant dans cette démarche de transmission.

Dessiner sur papier est aujourd'hui un point de départ. Grâce au développement des techniques d'animation, le mouvement fait aujourd'hui partie du dessin. De plus, les techniques de compositing, de projection et d'interaction ont considérablement étendu le domaine d'application des images produites sur papier. Elles sont aujourd'hui largement utilisées dans les grandes expositions scientifiques, notamment à la Cité des Sciences, où elles recommencent à jouer un rôle essentiel pour lier les sciences avec la société. Ainsi, l'exposition « Gaulois, une exposition renversante » (2011) posait des questions de représentation très délicates, surtout dans le contexte actuel : comment associer ce que l'on sait de façon précise (la forme des objets retrouvés) avec ce que l'on sait peu ou pas du tout (à quoi ressemblaient les druides, quels vêtements portaient-ils ?). Comment représenter sans trop identifier ? En ajustant la précision du trait et des matières, le dessin permet de rester perméable à ces questions (**figure 9**).

Pourtant, le rôle du dessin reste méconnu, souvent jusque chez les responsables de production concernés. Cette situation est liée à une répartition des pouvoirs qui mérite d'être relevée ici. En effet, la hiérarchie actuelle dans la conception d'une grande exposition scientifique est dictée par l'ordre dans lequel sont lancés les appels d'offre. Typiquement, après la définition du thème et des grandes lignes de l'exposition par les commissaires et les muséographes, un appel d'offre de scénographie est lancé. Puis vient un appel d'offre de graphisme. En dernier lieu, sont lancés des appels et des consultations pour la réalisation des nouveaux « contenus ». La création de dessins répondant précisément aux besoins de l'exposition, avec toutes les recherches et les dialogues avec les chercheurs qu'elle suppose, elle se situe donc tout à la fin de la chaîne de production. Un souci de transmission scientifique cohérent voudrait au contraire qu'on s'en préoccupe au début.

Cette organisation est parfaitement significative de la domination actuelle de deux systèmes de représentation, respectivement mis en avant par la scénographie et par le graphisme. Le premier de ces systèmes est fortement associé à l'architecture, à la perspective et à la « 3D », tandis que le second est associé à la typographie, à la signalétique et plus généralement à la « 2D ». D'après l'analyse que nous venons de mener, même en déployant toute la bonne volonté possible, aucun de ces deux systèmes n'entretient de relation forte avec les sciences, contrairement au dessin. Pour retrouver une spatialité sans laquelle la transmission scientifique est condamnée à rester superficielle, une réévaluation du dessin s'impose donc plus que jamais. Si elle advenait, elle pourrait alors amener de profonds changements dans notre manière de comprendre les images.

Une telle réévaluation devra en effet remettre en cause des résistances puissantes qui sont non seulement techniques et hiérarchiques, mais aussi philosophiques. On peut en trouver une des origines dans *La perspective comme forme symbolique*, publié par Panofsky en 1927¹⁷. Ce livre construit une fiction remarquable, car l'auteur écarte explicitement la représentation des corps vivants de toute analyse de l'espace. Une fois la question de la spatialité des corps éliminée, l'analyse de l'espace peut se réduire à tracer des lignes de fuite pour évaluer leur convergence à l'« infini ». Panofsky démontre alors que pendant la Renaissance, la peinture religieuse occidentale « découvre » progressivement un espace absolu dont toutes les lignes de fuite finissent par converger de façon cohérente. Pour l'auteur, les peintres identifient alors l'infini, grâce aux points de fuite. C'est cet accès explicite à l'infini qui distinguerait la pensée moderne de la pensée aristotélicienne du moyen-âge.

Contrairement à ce qu'il semble croire, Panofsky ne propose pas une conception de l'espace libérée de la pensée aristotélicienne. Bien au contraire, son analyse de l'espace reste purement déterministe. Elle ne fait que moderniser la pensée d'Aristote en étendant à l'« infini » son domaine de validité. Dans le cadre d'une réflexion sur la symbolique religieuse, ce raisonnement peut avoir du sens. En-dehors de ce cadre, il n'a aucun sens scientifique, mais il garde encore aujourd'hui une efficacité psychologique redoutable grâce à la puissance schématique de quelques lignes tracées sur des œuvres célèbres. Négliger ainsi les corps au départ d'une réflexion sur l'espace, c'est alors les considérer comme plongés « dans » l'espace préexistant. Ils sont censés y être localisables grâce à l'existence implicite d'un centre qui ne sera en fait jamais identifié.

Bachelard explique parfaitement cette opération mentale dans sa critique du « réalisme », en introduction de *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine* (1937¹⁸). Pour Bachelard, le point de vue « réaliste » repose sur une croyance ferme en la possibilité de localiser précisément chaque chose, tout en évitant soigneusement d'aller vérifier plus en détail. Cette démarche débouche sur l'utilisation de catégories grossières : plus les « boîtes » qu'il définit sont larges, plus le réaliste peut se sentir sûr qu'elles contiennent le centre des choses. Dans ce texte, puis dans *La philosophie du Non*, Bachelard décrit ainsi comment l'exigence de réalisme, qui est intenable, débouche en pratique sur le symbolisme : « Pour le réaliste, le Réel est une sorte de Dieu que l'on trouve partout dès qu'on le cherche avec négligence¹⁹ ». À l'inverse, il montre qu'une conception moderne de l'espace consiste à en assumer l'indétermination, pour ne pas entretenir un rapport illusoire avec le réel²⁰.

Ces enjeux philosophiques permettent de porter un regard plus précis sur le réalisme de la « 3D » et le symbolisme de la « 2D », qui ont tous deux pris le pas sur le dessin. En apparence opposés²¹, ils apparaissent alors comme deux faces d'un même système de représentation qui rentre en contradiction avec les principes fondamentaux du travail scientifique. Sans prétendre renoncer à ces outils lorsqu'ils sont utiles et bien maîtrisés, le dessin offre une possibilité de se dégager de leur emprise, et d'échapper ainsi à la pensée néo-aristotélicienne telle qu'elle se présente sous sa forme moderne.

¹⁷ Erwin Panofsky, *La perspective comme forme symbolique*, 1927, Paris, éditions de Minuit, 1975.

¹⁸ BACHELARD G., *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine*, Paris, librairie Félix Alcan, 1937.

¹⁹ *Ibid.*, p. 21.

Pour le moment, le dessin scientifique semble être devenu ce que François Jullien appelle un « impensé » des sociétés occidentales, peut-être en France plus qu'ailleurs. Ceci signifie qu'il n'existe pas actuellement de discours capable d'identifier clairement ce qu'il apporte. Malgré cela, il repose comme nous l'avons vu sur des processus constitutifs du rapport entre les humains et le monde qui les entoure. Ces processus peuvent être ignorés par le langage, mais certainement pas éliminés, ni dans les sciences, ni dans la vie quotidienne. Le but de ce texte était de commencer à combler ce vide, en espérant contribuer ainsi à une meilleure prise en compte du dessin dans une culture qui le néglige depuis longtemps.

Conclusion

Nous avons vu que la révolution du dessin anticipe la révolution scientifique qui se déclenche au XVI^e siècle. Depuis, la fonction du dessin scientifique est de mettre l'imagination en mouvement. Il ne permet donc pas d'exprimer une vérité définitive, à moins de perdre toute son utilité. En revanche, il impose de garder en mémoire la spatialité des corps vivants et des formes naturelles. Pendant plusieurs siècles, il est vraisemblable que la pratique du dessin ait constitué pour les scientifiques un garde-fou vis-à-vis d'une tendance à devenir déterministe, c'est-à-dire à revenir implicitement à une conception néo-aristotélicienne de la connaissance.

L'abandon, ou plus exactement la négligence du rapport entre le dessin et les sciences à partir de la fin du XIX^e siècle, a entraîné une déconnexion entre les sciences et la réalité perceptible, qui n'était pas forcément injustifiée. Les sciences ont alors connu une révolution considérable à travers la théorie de la relativité et la mécanique quantique. Les notions d'espace et de temps ont été bouleversées dans les échelles de grandeur très grandes et très petites par rapport à l'échelle humaine. Dans ce cas, il existait un réel besoin de prendre une distance avec les formes de représentation utilisées auparavant.

Dès les années 30, de nombreuses personnalités comme Korzybski²² ou Bachelard²³ ont cependant compris que des développements scientifiques incontournables dans les sciences du vivant et la psychologie étaient également liés à une remise en cause des systèmes de pensée portés par la mécanique newtonienne, par la logique d'Aristote, et par la notion d'espace euclidien. Par exemple, l'idée que l'information ne se propage pas à une vitesse infinie ne concerne pas que la lumière. Cette idée joue un rôle extrêmement important en biophysique (par exemple dans la prise en compte des phénomènes de diffusion en embryogénèse) et en neurosciences (temps de propagation de l'influx nerveux, temps d'intégration de l'information par divers types de cellules...).

²⁰ La réflexion de Bachelard s'appuie sur le principe d'indétermination de Heisenberg, qui exprime l'idée que l'on ne peut pas faire simultanément des mesures de position et de vitesse avec une précision arbitraire. Ce principe trouve son équivalent à notre échelle dans le traitement du signal. L'indétermination concerne alors tous les processus impliquant une mesure à travers des signaux périodiques : le radar, le sonar, l'écholocation par la chauve-souris... et probablement notre propre perception de l'espace.

²¹ Dans *Manet, une révolution symbolique*, Pierre Bourdieu associe ainsi de façon répétée l'académisme et le conservatisme à la 3D et à la profondeur, tandis qu'il associe l'art moderne et le progressisme social à la 2D, la bidimensionnalité, ou encore la surface. Il ne semble pas soupçonner la possibilité d'envisager l'espace en-dehors de cette alternative.

Après la seconde Guerre Mondiale, la diffusion de telles idées semble avoir été bloquée par la stabilisation d'un nouveau partage des pouvoirs sur la représentation du monde. D'une part la physique fondamentale, pratiquée par l'« élite » des physiciens et des mathématiciens, s'occupe de décrire les échelles du cosmos et des particules. D'autre part, l'« ancien système » lié à la mécanique newtonienne s'affirme plus que jamais pour les activités du reste de l'humanité. Au-delà de sa validité scientifique dans le domaine de la physique, cette affirmation correspond surtout à une idéologie qui place le vivant au second rang, et qui trouve dans la perspective une forme de représentation parfaitement adaptée à sa logique.

L'utilisation systématique de représentations inadéquates peut expliquer en partie les difficultés rencontrées par la diffusion des sciences. Ces difficultés deviennent critiques : pour comprendre les enjeux climatiques actuels aussi bien que les problèmes posés par les perturbateurs endocriniens, il est indispensable de prendre en compte les phénomènes non-linéaires. La culture de la perspective linéaire, particulièrement répandue chez certaines élites qui apprécient son aspect hiérarchique, devient alors un obstacle considérable pour se représenter l'importance de ce genre de phénomènes. De même, le mot « perspective » est utilisé sans précautions dans des milliers d'articles pour désigner non seulement l'espace mais aussi l'avenir. Ce symbolisme semble trouver ses limites et générer plus de contresens et de panique que de réflexion.

Redécouvrir le dessin constitue alors une façon très simple de rapprocher les sciences de la société de façon plus consistante et plus équilibrée. Il ne s'agit finalement que de retrouver une complémentarité très ancienne entre le dessin et le langage.

²² KORZYBSKI A., *Science and Sanity: An Introduction to Non Aristotelian Systems and General Semantics*, 1933, Institute of General Semantics, 1994.

²³ BACHELARD G., *La Philosophie du non : essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1940.

Bibliographie

BACHELARD G., *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine*, Paris, librairie Félix Alcan, 1937.

BACHELARD G., *La Philosophie du non : essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1940.

BOURDIEU P., *Manet, une révolution symbolique*, ed. Raisons d'agir / ed. du Seuil, 2013.

FEYERABEND P. *Contre la méthode, Esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*, Paris, Seuil, Point Sciences, 1975.

GOULD S.-J., *La vie est belle, les surprises de l'évolution*, 1989, Points Sciences, 1998

JULLIEN F., *Éloge de la fadeur, Arles, ed. Philippe Picquier*, 1991.

KORZYBSKI A., *Science and Sanity: An Introduction to Non Aristotelian Systems and General Semantics*, 1933, Institute of General Semantics, 1994.

MAREY E.-J., *Le mouvement*, 1894, Nimes, ed. Jacqueline Chambon, 2002.

PANOFSKY E., *La perspective comme forme symbolique*, 1927, Paris, éditions de Minuit 1975.

VINCIGUERRA L., *Archéologie de la perspective, sur Piero della Francesca, Vinci et Dürer*, Presses Universitaires de France, Lignes d'art, 2007

Annexe 2

La pensée du trait



Article publié dans ARTPRESS 2 n°46

Philosophie de François Jullien:

Des concepts proposés à l'art

août/sept/oct 2017

*(Cette version reprend la mise en page
proposée par Art Press avec de légères modifications)*



LA PENSÉE DU TRAIT

RENAUD CHABRIER

Scientifique de formation, dessinateur, scénariste et réalisateur, Renaud Chabrier met en lumière les points communs inattendus entre le dessin scientifique et la peinture chinoise, du souci de la cohérence à l'évidence du trait.



Il fallait dessiner un œuf. Toute la classe avait terminé depuis longtemps, mais je persistais dans ma tentative d'esquisser un gros bout en bas, et un petit bout en haut. Je n'étais pas habité par l'obsession de dessiner « un œuf particulier, pris à un moment particulier », avec l'ombrage et les détails, ni par l'espoir d'atteindre l'œuf « idéal » : à cinq ans, ces questions ne se posent pas encore. Plus simplement, « œuf » était pour moi indissociable d'une certaine polarité. Faire le dessin consistait à en tenir compte. L'exigence semblant tout de même dépasser un peu ma technique, la maîtresse suggéra d'aller plus vite et traça en guise d'exemple une patate plus ou moins ovale. Scandalisé, je compris ce jour-là deux enjeux fondamentaux du dessin : d'une part, ne pas trahir la structure du monde au travers des visualisations demande une certaine ténacité dans le travail. D'autre part, pour diverses raisons psychologiques et culturelles, nous sommes en permanence encouragés à cette trahison.

UN TRAIT LETTRÉ

Selon ma définition personnelle, qui remonte peut-être à cette expérience, le dessin peut être qualifié de scientifique lorsqu'il s'applique à chercher une cohérence entre le monde et le trait. Or il semble que la peinture chinoise se soit donné un objectif similaire, dans un contexte culturel extrêmement différent. Au premier abord, le rapprochement ne saute évidemment pas aux yeux : quoi de commun entre un paysage de montagne chinois et une animation décrivant un processus biologique complexe ? Si l'on accepte de s'intéresser autant à un œuf qu'à une montagne, des liens apparaissent pourtant assez facilement.

En premier lieu, ni la peinture chinoise ni le dessin scientifique ne s'appuient sur la perspective linéaire, qui est censée être si structurante dans l'art occidental¹. Considérons une « planche scientifique » présentant une composition de différents dessins, comme il en a été tant ont été produites depuis Léonard de Vinci. Cette présentation offre plusieurs objets au regard, parfois à la même échelle, parfois à des échelles différentes les unes des autres. Ceci permet au spectateur/lecteur d'effectuer un exercice extrêmement important : évaluer des écarts et des relations entre les structures de différents corps. Pour être efficacement appréhendée, chacune de ces structures demande à être vue selon un biais particulier.

Renaud Chabrier

*Fibroblastes et fibres de collagène
sous l'épiderme, 2016*

Projet «Globule» Technique mixte sur
papier préparé

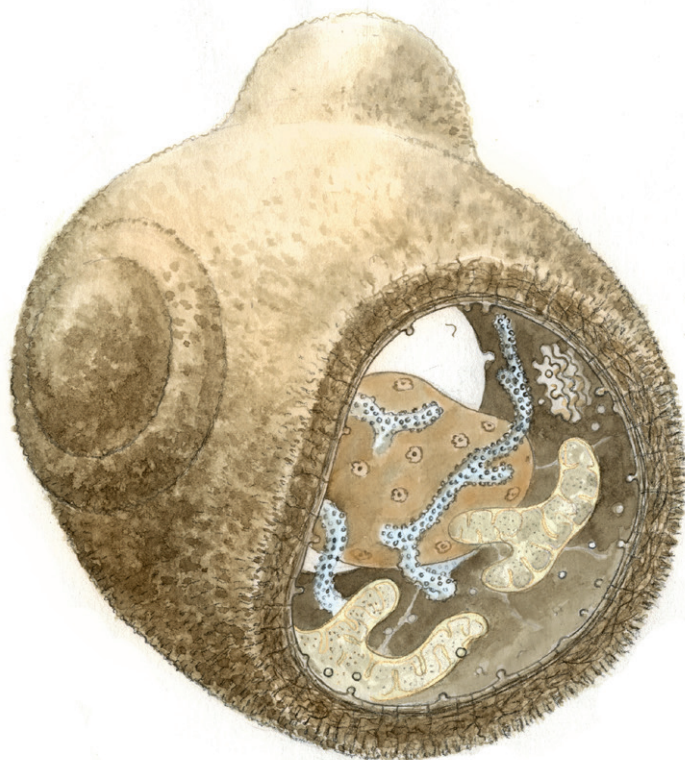


Dès lors, à quoi bon chercher un point de vue unique pour l'ensemble de la composition ? Je suis tenté de dire « cela n'aurait pas de sens », mais ce n'est pas l'expression appropriée. Au contraire, cela aurait un sens bien précis qui nous détournerait du travail à mener, en introduisant l'idée d'une observation directe et simultanée là où il ne peut pas y en avoir. Comme dans un paysage chinois, la cohérence de la composition proposée au regard est bien plus importante.

Cette cohérence² se vit le long d'un voyage où le regard se déplace, évalue, compare, relie, change l'échelle d'interprétation, fait appel à d'autres connaissances, quitte la page, ferme le livre, y revient, etc. En image « fixe » ou « animée », l'efficacité du dessin scientifique se déploie donc d'une façon qui ne peut pas négliger les temps d'intégration de l'information. Une dynamique de compréhension non-verbale peut ainsi se mettre en place, et accompagner souvent de façon décisive les explications verbales transmises par le texte. Comme la peinture chinoise, le dessin scientifique ne relève donc pas du choc esthétique. On ne l'apprécie pas comme un lever de rideau sur une scénographie spectaculaire, ou comme une expérience picturale soudaine et inédite. Il faut, consciemment, prendre le temps de « rentrer dedans ».

Cette relation à l'espace (non-perspectif) et au temps (non-instantané) nous amène à une constatation simple: la propension du dessin scientifique est très éloignée de celle de la photographie. Or les techniques dérivées de la photographie ont massivement dominé les visualisations scientifiques depuis un siècle. Leurs succès, évidents et incontestables, ont largement fait oublier l'usage du dessin dans la grande majorité des disciplines. Les techniques numériques ont accentué le phénomène. Dans les années 2000, l'idée même de dessiner sur papier a fini par paraître dépassée. Cette mise à l'écart de la matière est-elle inoffensive pour la pensée ?

Il faut alors se rappeler qu'avant l'invention de la photographie et depuis Galilée, la grande majorité des scientifiques étaient des dessinateurs et dessinatrices. Si l'on tient compte de la partie la moins visible du dessin scientifique, celle des notes de terrains, des croquis de réflexion, des tentatives de synthèse, en un mot celle des *esquisses*, nous nous apercevons alors qu'il s'est largement développé comme une activité de *lettrés* : non pas des professionnels de l'image, mais des chercheurs qui maîtrisaient bien l'emploi des propositions et des inférences à l'écrit. Nous voilà encore une fois ramené aux peintres lettrés chinois : le dessin dans un cas, la peinture à l'encre dans l'autre, apparaissent rétrospectivement comme des moyens de

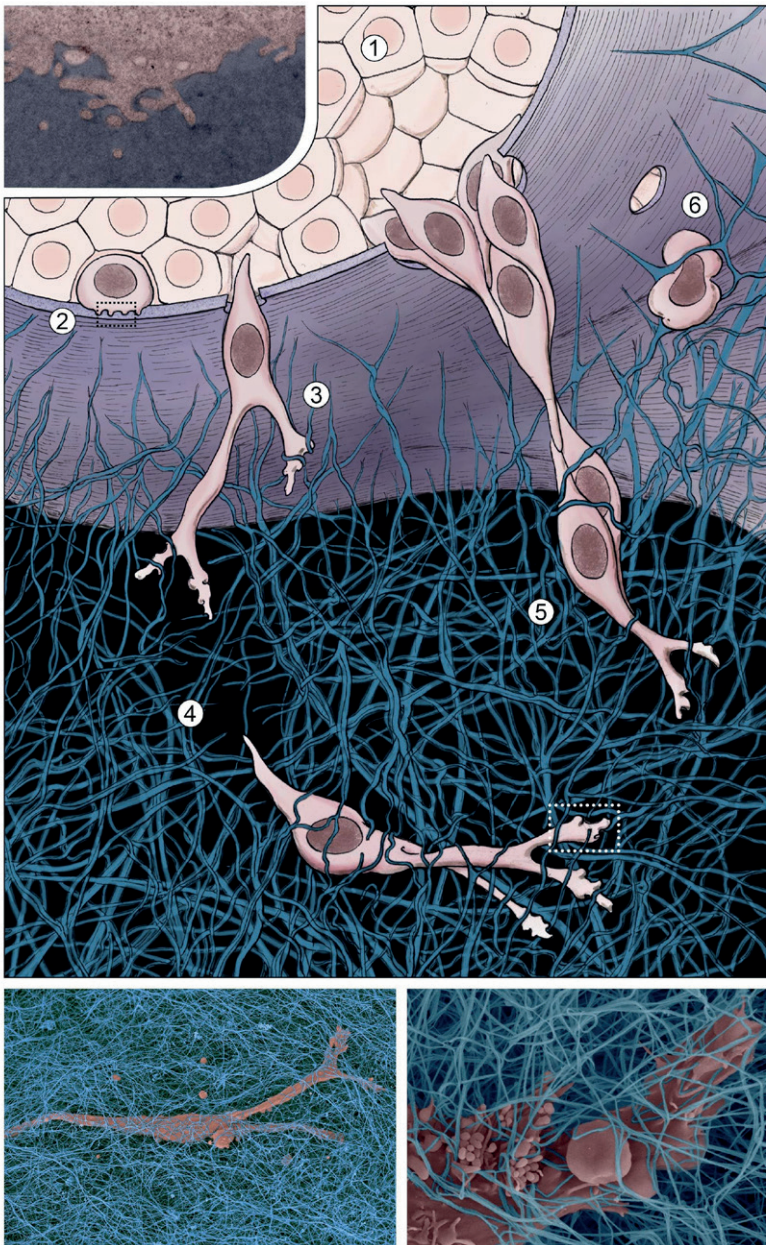


Renaud Chabrier

Levure, 2016

Projet «Globule»

Plume, Encre brune et couleurs numériques



Renaud Chabrier

Invasion de la matrice extra-cellulaire par des cellules cancéreuses, 2009

Illustration publiée dans Renaud Poincloux, Floria Lizarraga et Philippe Chavrier, «Matrix invasion by tumour cells: a focus on MT1-MMP trafficking to invadopodia», *Journal of Cell Science*, vol. 122, septembre 2009

*fiabiliser*³ l'activité du langage en se ramenant régulièrement à un rapport au monde peut-être plus direct, en tout cas plus silencieux. Les techniques de méditation nous ont aujourd'hui familiarisés avec l'idée de faire taire le « mental » sous son aspect de « monologue » ou de « bavardage » intérieur, afin de rester ouvert à ce que le langage ne connaît pas encore, ou ne connaîtra peut-être jamais. Le moindre croquis, s'il est intéressant, engage cette opération.

Ce début de rapprochement entre le dessin scientifiques et la peinture chinoise n'a pas pour but de confondre leurs enjeux respectifs. Tout dessin scientifique renvoie par ailleurs à des concepts largement étrangers à la peinture et à la pensée chinoise. Du point de vue technique, on y fait usage de surfaces, de formes plus ou moins schématiques, de flèches, de symboles, de coloriages basiques, qui apparaîtraient comme autant de bêtises ou d'absurdités dans la réalisation d'un paysage chinois. Pour comprendre cet écart, il faut tenir compte du rôle de l'abstraction dans le travail scientifique.

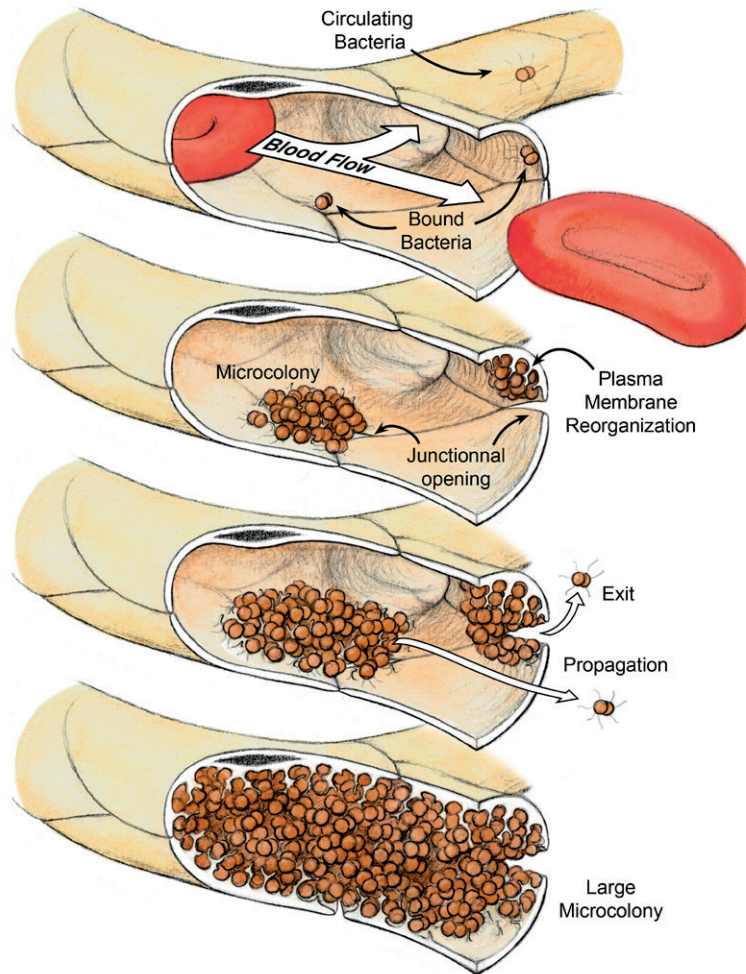
L'ABSTRACTION DU SAVOIR

Là où la pensée chinoise a évité d'enfermer le monde dans des concepts, la pensée scientifique actuelle cherche quels sont les concepts les moins faux qui puissent s'appliquer, en laissant la porte ouverte à toute amélioration. Le « grand œuvre » scientifique évite donc d'advenir, mais il ne se prive pas d'abstraire. On peut voir là deux façons différentes d'ajuster le rapport au monde : une solution consiste à rester le plus proche possible de la dynamique des événements, tandis que l'autre, d'abstrac-

tion en abstraction, revient à chercher le meilleur chemin pour tirer de cette dynamique des modèles plus « statiques », plus faciles à comprendre et à manipuler.

L'abstraction mathématique joue un grand rôle dans cette démarche, mais il faut insister sur le fait que le travail expérimental a autant d'importance que le discours et les modélisations qui peuvent l'accompagner. L'abstraction est de toute façon présente à tous les niveaux de travail, dans le simple fait de tenir compte de certaines informations plutôt que d'autres.

Cette sélection d'information permet de détecter des régularités, faire des moyennes, des dérivations, et toutes sortes d'opérations qui, à chaque étape, laissent une partie de l'information de côté. Au-delà de la « connaissance » ou du « savoir » qui correspond à un niveau d'abstraction donné, un processus de recherche consiste donc aussi à relier entre eux différents niveaux d'abstraction. Cette activité, qui constitue la structure même du travail scientifique, doit alors pouvoir être transmise: transmise à soi-même, lorsque l'on travaille d'un jour à l'autre, transmise aux collaborateurs, à la communauté scientifique plus ou moins proche, aux étudiants, aux enfants, et de façon très générale au « public ». Concrètement, cette transmission se déroule dans un large espace qui va des publications scientifiques aux livres pour enfants, en passant par les documentaires et la muséographie, sans oublier bien sûr le système éducatif.



Renaud Chabrier

Invasion d'un capillaire cérébral par des méningocoques, 2012

Illustration publiée dans Keira Melican et Guillaume Duménil, «Vascular colonization by *Neisseria meningitidis*», *Current Opinion in Microbiology*, vol. 15, février 2012

L'art du dessin scientifique, tel qu'il m'apparaît aujourd'hui, consiste alors à aménager ce chemin qui relie le monde aux abstractions. J'irai jusqu'à dire : le rendre *vivable*. Comment, au cours de la transmission scientifique, faire en sorte que les visualisations jouent comme des passages, et non comme des formes définitives sur lesquelles ou dans lesquelles la pensée reste bloquée? Pour reprendre l'expression d'Alfred Korzybski⁴ dont je m'inspire ici largement, comment développer la conscience d'abstraire, c'est à dire la conscience de ne pas identifier une chose et une sélection d'information à son propos? Le dessin offre des ressources particulièrement riches pour traiter ces questions, et la Chine apporte des outils pour les remettre en œuvre aujourd'hui.

La principale ressource du dessin réside dans la *variance*⁵ gigantesque à laquelle le trait nous donne accès. Le dessinateur dispose d'un continuum qui va de la matière d'esquisse la plus « brute » ou la plus « fade », jusqu'à la netteté graphique la plus « propre » et la plus « accomplie ». Dans la logique scientifique que nous venons d'aborder, il est particulièrement intéressant de pouvoir ajuster le trait au niveau d'abstraction concerné. Par exemple, je peux garder la matière du crayon pour dessiner le contexte général d'une cellule, et passer en dessin plus schématique, éventuellement vectoriel, pour y placer des moteurs moléculaires. Il s'agit d'une façon de faire comprendre, implicitement, que c'est le rôle fonctionnel des moteurs moléculaires dans le transport du matériel génétique du VIH qui nous intéresse ici, et pas le détail de leur structure.

Cependant l'usage du schéma « simplificateur » peut souvent être contre-productif. Supposons que dans un petit vaisseau sanguin du cerveau, il faille dessiner des méningocoques⁶ s'accumulant comme autant de petites sphères, au point de boucher le capillaire. Le premier réflexe serait aujourd'hui d'utiliser pour cela le « clonage » informatique, mais en tant que dessinateur, je ne dois pas céder à cette facilité. La masse des méningocoques est en effet générée par les méningocoques eux-mêmes : en prenant le temps de les dessiner, un par un, je peux

relier les individus au groupe et mettre en place la possibilité d'une transition entre ces deux niveaux d'interprétation. Si je me contentais de superposer sur l'image une centaine d'instances du même schéma vectoriel, la participation des individus au groupe resterait largement symbolique. Le temps et l'espace du dessin sont ici liés : si je respecte un certain temps de réalisation, j'offre une idée plus juste de l'organisation spatiale du processus. Pour reprendre une expression chinoise très appropriée, je peux ainsi dessiner « ce départ de méningite, ainsi que beaucoup d'autres départs de méningite⁷ » .

Au cours de l'interprétation d'une image, le passage d'une échelle de « lecture » à une autre correspond à un changement de niveau d'abstraction, tout simplement parce qu'une partie de l'information est laissée de côté. L'enjeu n'est pas nouveau : il est présent dans la théorie de l'évolution, lorsque l'évolution de populations s'explique à partir d'évènements se situant au niveau des individus. Il n'a fait que prendre plus d'importance dans le contexte des recherches scientifiques actuelles. Ces dernières se caractérisent en effet par la prise en compte de plusieurs échelles spatiales et de plusieurs échelles temporelles, sur des étendues jamais atteintes. De l'étude des écosystèmes à celle des matériaux complexes, il est devenu indispensable de savoir voyager consciemment entre les niveaux d'abstraction pour comprendre quelque chose aux choix de développement auxquels nous sommes confrontés. Comment aider le public à s'appropriier cette façon de raisonner, quand elle est déjà complexe pour les chercheurs eux-mêmes ?

L'ART DE RACONTER DES HISTOIRES

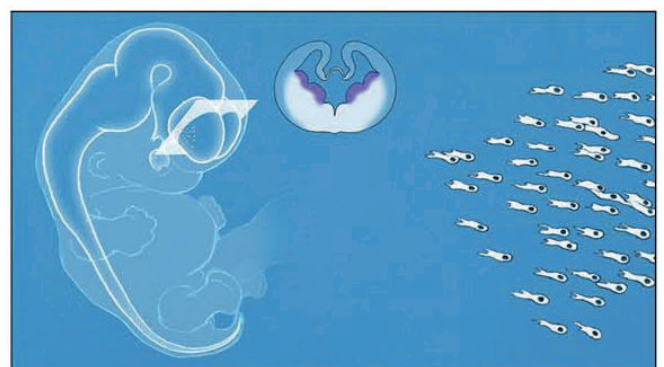
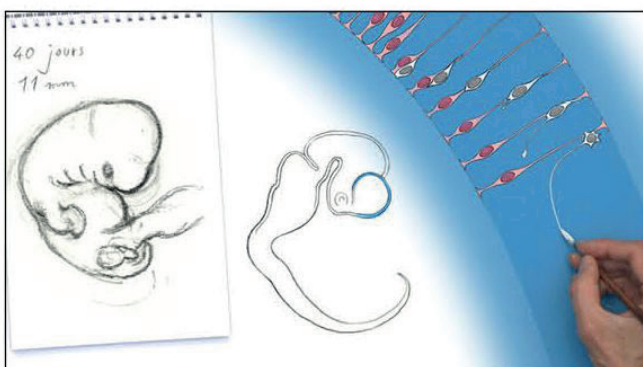
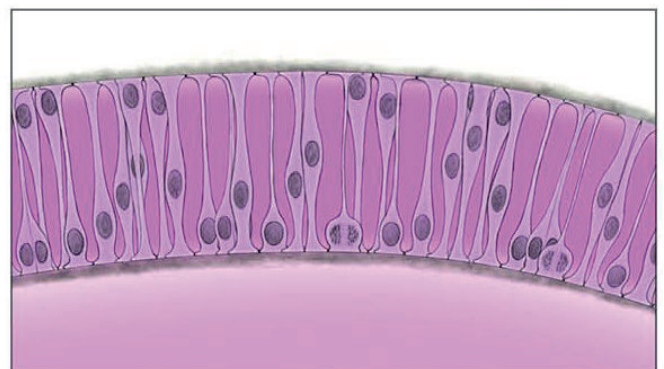
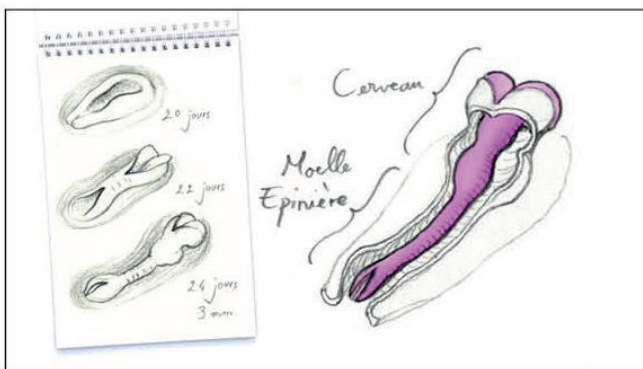
En 2013, j'ai eu l'occasion de réaliser pour la Cité des Sciences et de l'Industrie un court-métrage intitulé « Naissance d'un Cerveau ». Il s'agissait d'une mission impossible typique des besoins actuels : expliquer en cinq minutes le développement du cerveau de l'embryon jusqu'à un peu après la naissance. En pratique, il n'existe probablement pas un chercheur au monde qui maîtrise le sujet dans sa totalité. Les livres spécialisés ne s'aventurent d'ailleurs pas à tracer une perspective ou une histoire générale : ils traitent le sujet domaine de recherche par domaine de recherche, selon la fragmentation devenue habituelle dans le monde scientifique. J'ai donc dû écrire, dessiner et animer une histoire qui relie les informations en les simplifiant au maximum, tout en essayant de faire ressentir la richesse de phénomènes qui se passent en même temps et à plusieurs échelles. Le résultat, visible en ligne⁸, a été reconnu comme efficace. D'où vient cette efficacité ?

Renaud Chabrier

Naissance d'un cerveau, 2014

Dessin, voix, animation et compositing

© Renaud Chabrier / Universciences



Il était impossible, dans une telle narration, de faire appel à la *causalité* de manière extensive : la plupart des phénomènes expliqués ont de multiples causes donc beaucoup sont encore inconnues, et les spectateurs seraient rapidement perdus. Dire pourquoi les nouveaux neurones pyramidaux grimpent jusqu'à la dernière couche du cortex ? Impossible. En revanche, on peut montrer qu'ils le font, et que cela s'enchaîne avec la création des axones. Nous sommes donc dans le registre de la *propension*⁹ : sans chercher à expliquer pourquoi, je peux montrer que ceci tend à faire cela. Cette démarche permet à des non-spécialistes de se familiariser avec un objet d'étude. Elle n'interdit pas d'adopter, de temps en temps, un raisonnement causal. Mais en voulant présenter les sciences comme un pur spectacle de causalités qui s'enchaînent les unes aux autres, on néglige cette familiarisation sans laquelle aucun travail et aucune intuition scientifique ne sont possibles. Les relations de causalité vraiment établies constituent des informations trop rares et précieuses pour être dilapidées de cette manière.

De façon générale, les sciences présentent un mélange parfois très hétérogène de « connu », de « connu plus ou moins approximativement », et d'« inconnu ». Encore une fois, contrairement aux images de synthèse, le dessin peut facilement s'accorder à ces différents états de connaissance en évitant de tout dessiner avec une précision égale. Ne pas « finir » le dessin permet ainsi d'éviter les erreurs, tout en apportant plus d'information. Ceci est particulièrement pertinent dans les reconstructions archéologiques : pourquoi dessiner avec la même précision des objets que l'on a retrouvés, et des vêtements dont on ne sait quasiment rien ? La cohabitation de l'esquisse et de la netteté dans le même dessin induit au contraire une micro-narration permettant au regard d'intégrer implicitement la coexistence de différents niveaux de connaissance.

Pour nous familiariser avec un sujet complexe, nous sommes amenés à passer d'une visualisation à une autre et à changer ainsi de niveau d'abstraction. Selon la façon de créer et de donner à voir les images, ces changements seront négligés, vécus comme des ruptures, ou enfin comme des transitions. Contrairement à l'industrie du cinéma et des effets spéciaux qui repose aujourd'hui principalement sur l'accélération des ruptures entre deux chocs visuels, le dessin animé scientifique doit se donner les moyens d'offrir des transitions.

La notion de transition n'est pas forcément étrangère aux images dites « fixes ». Lorsqu'il n'est pas schématique, le dessin est fondamentalement lié au mouvement, ou plus exactement à un potentiel de mouvement. Souvent, l'imagination peut ainsi commencer à « tourner autour » des objets représentés. De façon générale, il est rarement difficile d'imaginer comment devrait bouger un dessin, s'il pouvait suivre sa propension. L'animation devrait donc se présenter comme un prolongement naturel du dessin en général, et du dessin scientifique en particulier. Les problèmes commencent lorsqu'il faut choisir une technique d'animation.

J'ai choisi de développer tout particulièrement l'animation par morphing, car cette technique permet de créer des transitions fluides entre deux dessins, tout en respectant la richesse de leur matière. En comparaison, toute autre technique basée sur le dessin oblige soit à simplifier ce dernier en ne retenant que la ligne claire, soit à accepter de fortes vibrations qui font perdre sa lisibilité. Pour expliquer très brièvement le principe du morphing, prenons deux dessins A et B représentant un corps sous deux angles différents. Le morphing consiste d'abord à « déformer » la texture du dessin A pour déplacer les traits dans la position correspondant au dessin B, et vice-versa. On obtient deux animations qui déforment respectivement les images A et B : l'une va de A jusqu'à « A dans position de B » et l'autre de « B dans position de A » jusqu'à B. Ces deux déformations sont combinées grâce à un simple fondu enchaîné (voir figure ci-contre). Le résultat est souvent étonnant : cette transition de A vers B donne la sensation de visualiser l'espace qui était déjà contenu dans les dessins.



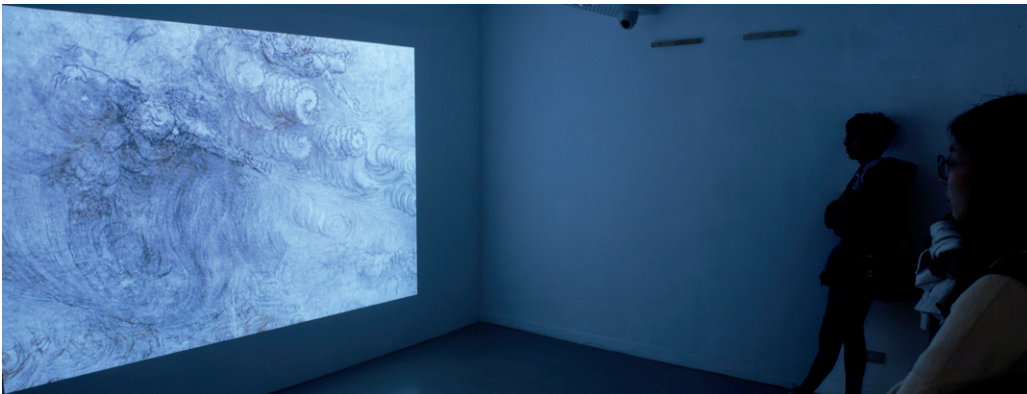
Renaud Chabrier

Morphing de dessins, 2013

Les images intermédiaires sont issues du mélange des deux images extrêmes

Cette explication un peu technique nous permet alors de remarquer un aspect très original du morphing: à cause du fondu enchaîné, une transition par morphing *s'affadit*¹⁰ en son milieu. Contrairement aux séquences filmées qui se décomposent en série d'images de netteté égale, le contraste et la netteté d'une transition par morphing sont variables: l'image «arrêtée» est d'abord nette, moins nette, un peu floue, moins floue, plus nette. Le mouvement lui-même est souvent fade: à moins d'un travail particulier, on se limite à des mouvements simples et peu expressifs. Malgré cette étrangeté, c'est cette technique qui s'adapte le mieux aux dessins de Léonard de Vinci. A l'occasion d'une exposition de la Cité des Sciences consacrée à ce dernier¹¹, j'ai pu réaliser un travail approfondi aujourd'hui visible en ligne¹² et récemment présenté à Taipei.

Le morphing peut être employé de façon très large avec des dessins scientifiques pour gérer des changements de représentation. Mais il permet également de rendre plus manifeste la propension de dessins anciens que nous ne savons plus forcément comment appréhender. D'une certaine manière, cette «histoire de l'art expérimentale» met alors en lumière un aspect souvent négligé des œuvres anciennes dans l'art occidental: leur qualité et même leur virtuosité ne repose pas uniquement sur la capacité de tracer des lignes de contour définitives. Sous-jacent à cet art de la ligne, on trouve un art du trait bien plus complexe qui mérite d'être redécouvert.



Renaud Chabrier

Léonard de Vinci - motion picture, 2012

Court métrage en animation par morphing, présenté durant la Biennale d'art contemporain du Grand Taïpei, 2016
(voir page suivantes)

L'UNIQUE TRAIT DE PINCEAU

La ressource du trait a été largement abandonnée dans les sciences. Ouvrez un livre de biologie cellulaire, de biophysique, de biologie du développement : vous y verrez des quantités de schémas vectoriels. Ouvrez un livre d'anatomie pour enfants : vous y verrez des quantités de photos. On peut multiplier les exemples du même phénomène : ces images ne proposent qu'un seul niveau d'abstraction. Les chercheurs de ma génération sont de plus en plus conscients des limites de ce système. Les approches multi-échelles se sont développées, aussi bien dans l'espace que dans le temps : ceci n'est pas photographiable. La spatialité des structures ne peut plus être négligée : ceci n'est pas schématisable. Tout en utilisant des outils de mesure de plus en plus puissants et complexes, les chercheurs construisent donc une compréhension des phénomènes qui dépasse les ressources des outils de création d'image les plus en vue. Le dessin reste la façon la plus simple d'extérioriser « les « images mentales » des chercheurs sans trop les trahir, car il permet de commencer par le début, autrement dit par l'esquisse. Dans un second temps, toutes les techniques numériques sont susceptibles d'intervenir. Mais si l'on se repose trop vite sur ces dernières, elles introduisent systématiquement une précision inappropriée, qui par contrecoup génère une imprécision encore plus grande.

Revenons donc au trait, avec toute la matérialité qu'il implique, et voyons de quelles notions nous disposons pour le concevoir. Le plus souvent, une tentative d'étude du « trait » fait intervenir les mots « geste », « marque », « intention » ou « trace ». Ces notions déplacent alors le propos vers le « sujet » qui dessine, en tant que sujet qui s'exprime, ou, de façon plus neutre, qui se manifeste. La connexion avec le monde n'intervient alors plus que dans un deuxième temps, après la définition du sujet. Pourtant, le trait offre justement l'oc-

casion d'oublier cette présence obligée de l'observateur particularisé, en tout cas dans la peinture chinoise et dans le dessin scientifique. Il n'est donc pas possible de réduire le trait au geste, pas plus qu'à la marque, l'intention ou la trace. Ces identifications entre des concepts différents ne constituent cependant pas les seuls pièges. Le simple fait d'écrire « le » trait tend déjà à l'isoler en objet statique, ce dont le dessinateur n'a que faire lorsqu'il se trouve aux prises avec la dynamique d'un dessin en cours d'élaboration. Le dessinateur, ou la dessinatrice, en serait presque condamné à entretenir une forme d'inconscience : si la conscience du trait parasite le travail en entraînant avec elle des notions inadéquates, autant ne pas la faire intervenir, ou la désamorcer par diverses méthodes (Travailler « avec le cerveau droit », dessiner de la main gauche, voir les espaces vides plutôt que les pleins, ne pas décoller l'outil de la feuille, etc...). Est-il donc impossible de développer un concept à la mesure du trait, avec tout son potentiel ?

Au XVIII^e siècle Shi Tao y est parvenu en évoquant l'« unique trait de pinceau »¹³. Ce concept a l'immense avantage d'être ouvert : soyez rassurés, vous ne pourrez jamais le tenir, ni l'isoler, ni même le comprendre. En revanche, il est parfaitement possible de le sentir passer, comme un dragon dont on ne verra jamais que des fragments. Je commence rarement une journée de travail sans l'avoir entraperçu. Voici comment je m'y prends (voir première page): le plus souvent dans un café, je dessine l'une des personnes qui passe dans la rue. Puis j'en dessine une autre, en faisant attention qu'elle s'associe avec l'espace proposé par la première. Enfin j'en dessine une troisième qui s'associe aux deux autres. A ce moment, un *espace commun* se fait ressentir. Cela me suffit; je sais que l'unique trait de pinceau est passé et que je peux aborder le travail en confiance, quel que soit le nombre de méningocoques à accumuler dans un vaisseau sanguin.

RESPIRATIONS DU DESSIN

Rien n'est plus dangereux pour le dessinateur qu'une théorie du dessin. L'entraînement sert souvent à revenir à une évidence: la théorie que je m'étais construit hier ou avant-hier ne marche déjà plus. Quel que soit le contexte d'une séance de dessin approfondie, reste alors ce moment mystérieux et indispensable, aussi court soit-il, où le dessin « vient tout seul ». Jusqu'à récemment, j'aurais été bien en peine d'aller plus loin sur le sujet. Grâce à une expérience très simple, il me semble aujourd'hui possible de tenter non pas une explication, mais un éclaircissement que je dois à la lecture de *La grande image n'a pas de forme* de François Jullien¹⁴. Il y explique qu'une montagne, pour les peintres chinois, aura d'autant plus valeur de montagne si elle n'apparaît pas dans sa totalité. De préférence, elle sera donc en partie « cachée » par



Cette double page:
Renaud Chabrier
The Drawing Lab, Biennale d'art
contemporain du Grand Taipei,
2016
Dessins sur papier, techniques mixtes,
tableau métallique



Renaud Chabrier (né en 1974) est dessinateur, scénariste et réalisateur. Il associe sa formation scientifique (école Polytechnique, école des Télécoms, DEA de sciences cognitives) à des apprentissages professionnels en dessin, animation et danse contemporaine. Développeur de procédés de croquis et d'animation semi-numériques grâce auxquels il étudie la relation entre croquis et image animée, il applique principalement ses recherches au renouvellement de l'usage du dessin dans la transmission scientifique. Chercheur associé à l'EnsadLab, il collabore régulièrement avec la Cité des Sciences et de l'Industrie, l'Institut Curie et différents laboratoires de recherche sur des thématiques allant de l'archéologie à la biophysique.

les nuages. De même, une maison ou une rivière ne doivent pas être montrées trop littéralement sous peine de perdre leur potentiel. A la suite de cette lecture, j'étais allé dessiner dans un atelier de nu comme d'habitude, mais au moment de tracer, je pris conscience d'un présupposé que je n'avais jamais remis en question : à chaque fois qu'une forme passait devant une autre, j'avais toujours considéré que la première était gênante pour le dessin de la seconde. Sous l'influence de la lecture des jours précédents, je suspendis mon jugement sur le trait du bras que j'étais en train de faire, et qui était en partie caché par le buste. Et si le bras en partie caché n'en avait pas pour autant un « potentiel de bras » diminué ? Voire, et si l'interruption du trait ne faisait qu'augmenter ce potentiel ?

Je fus alors surpris de constater que mon crayon avait quitté la feuille là où il devait, l'interruption du trait livrant du même coup et sans effort supplémentaire une information précieuse pour tracer le buste. Par la suite, de cent façons différentes, j'ai réalisé que mon trait commence et s'arrête rarement au hasard, sans que j'aie besoin d'y réfléchir au moment même du tracé. Chacun de ces événements peut constituer une information extrêmement fiable, y compris dans le dessin d'imagination. D'un point de vue neuronal, cela n'est d'ailleurs pas très surprenant : le trait implique de nombreux processus parallèles et forcément inconscients sur le moment. Il ne s'agit donc pas d'une théorie du trait : au contraire, il s'agit de constater que le trait ne se limite jamais à ce que je peux croire de lui. D'un trait à l'autre, entre ce que je crois faire et la reconnaissance de ce que le trait fait, une respiration peut alors s'installer.

J'aurais mis plus de 20 ans à trouver dans le trait cette ressource que des dessinateurs plus intuitifs utilisent certainement depuis longtemps. Moi-même, je l'ai d'ailleurs largement utilisée tout en la gênant et en évitant de la reconnaître, pour des raisons conceptuelles certainement liées à ma formation scientifique. Notre société met un soin particulier à ne pas comprendre les ressources qu'elle exploite : je ne fais pas exception. Quoi qu'il en soit, quelle économie d'énergie ! La « perspective » de travailler sur l'enchevêtrement d'un cytosquelette semble moins effrayante. Et plus généralement, j'y vois une façon de comprendre comment le dessin, en désamorçant une volonté de représentation fatigante ou stérile, peut nous aider à appréhender la richesse du monde.

Références

- ¹ Renaud Chabrier, «Pouvoir de représentation contre pouvoir absolu : le dessin scientifique confronté à la perspective» in Mariannick Guennec et Véfa Lucas (dir.), *Les Images du pouvoir*, HCTI/Université Bretagne-Sud, 2016.
- ² François Jullien, *De l'Être au Vivre. Lexique euro-chinois de la pensée*, Gallimard, «bibliothèque des idées», 2015, chap 9 : Cohérence (vs Sens).
- ³ *Ibid*, chap 7 : Fiabilité (vs Sincérité).
- ⁴ Alfred Korzybski, *Science and Sanity*, Institute of General Semantics, 1933.
- ⁵ François Jullien, *Cette étrange idée du beau*, Grasset, 2010.
- ⁶ Bactéries, agents de la méningite cérébro-spinale.
- ⁷ « Tel est l'aspect d'une montagne en même temps que de dizaines ou de centaines d'autres montagnes », Guo Xi (11^e siècle) cité par François Jullien dans *Cette étrange idée du beau*, *op. cit.*
- ⁸ <https://vimeo.com/renaudchabrier/naissanceduncerveau>.
- ⁹ François Jullien, *De l'Être au Vivre*, *op. cit.*, chap 1 : Propension (vs Causalité).
- ¹⁰ François Jullien, *Eloge de la fadeur. A partir de la pensée et de l'esthétique de la Chine*, Le livre de Poche, «Biblio essai», 1993.
- ¹¹ l'exposition «Léonard de Vinci, Projets, Dessins, Machines» a été présentée à la Cité des Sciences et de l'industrie (Paris) en 2012-2013, puis à Munich, S
- ¹² <https://vimeo.com/renaudchabrier/leonardodavincianimated>.
- ¹³ Shi Tao (1642-1708) *Les propos sur la peinture du moine Citrouille-Amère*, trad. Pierre Ryckmans, Plon, 2007.
- ¹⁴ François Jullien, *La grande image n'a pas de forme. Ou du non-objet par la peinture*, Seuil, «L'Ordre philosophique», 2003.

Annexe 2

L'inouï à portée de crayon



Texte publié en 2020 dans *Art et Concepts*.

Chantier Philosophique de François Jullien / Ateliers d'artistes

sous la direction de François L'Yvonnet

Presses Universitaires de France

Dessin de Viollet-le-Duc

Lettre à François Jullien, sur l'Inouï à portée de crayon

Renaud Chabrier

Cher ami, si l'on peut juger l'importance d'un livre à son pouvoir de perturbation et de réorganisation, je peux vous assurer que la lecture de *L'Inouï*¹ a profondément remanié les derniers mois de ma vie. Ce livre commence pourtant très simplement. Vous nous faites part de la façon dont vous pratiquez la plage, en vous y rendant très tôt pour tenter de voir apparaître la mer, avant qu'elle ne s'étale à vos yeux dans tout ce qu'elle a de déjà connu, et qu'elle ne génère plus que de la lassitude. Et, en effet, qui n'a jamais ressenti cet ennui face à l'eau, la plage, et pire que tout, le ciel désespérément bleu ? Mais il ne s'agit pas que d'un problème de grand beau temps, d'un souci de riche en quelque sorte. Pour ma part, il y avait une bonne houle lorsque j'ai ressenti la plus terrifiante lassitude de ma vie, un soir de 1994 : les études scientifiques m'ayant conduit au bastingage d'une frégate qui venait de prendre la mer, je réalisais soudain que je ne voyais plus les vagues. Littéralement. À la place, je voyais les trajectoires imposées par la mécanique des fluides, des cercles imbriqués à n'en plus finir, désespérants comme une vérité idéale et défi-

1. François Jullien, *L'Inouï...*, *op. cit.*

Art et concepts

nitive. Je n'ai eu de cesse, depuis, de dessiner pour réapprendre à voir : une seconde vie, diriez-vous sans doute.

Ce que vous proposez alors d'appeler l'*inouï*, dans votre livre, c'est un débordement de l'expérience du réel, qui nous permet de sortir de l'ennui du déjà-vu, mais qui ne nous projette pas pour autant dans un « autre monde » conceptuel où les mêmes problèmes finissent par se poser. En plaçant la lassitude devant le réel au départ de votre réflexion, vous avez certainement touché un point fondamental de la condition humaine. Nous avons bel et bien, en tant qu'humains, une propension indiscutable à aplatir le réel, à en fusionner les régularités, et à en négliger aussi bien l'espace que les détails pour former des concepts abstraits plus généraux, plus stables et plus reposants. De ce fait, nous évitons le vertige d'une attention éclatée parmi plus d'événements que notre conscience ne peut en supporter. En contrepartie, nous sommes exposés à la lassitude d'être toujours confrontés au même monde, la variance intrinsèque du réel se trouvant recouverte par nos propres représentations.

À ce compte, je pense que les dessinatrices et les dessinateurs sont *justement ceux qui ne se lassent pas* d'utiliser crayons et pinceaux pour interroger ce qu'ils ont (ou qu'ils ont eu) sous les yeux. Là où l'ennui pourrait si facilement naître et s'approfondir, ils sont au contraire capables de s'émerveiller, apparemment de presque rien : d'un tissu, d'une feuille, d'un geste, d'une joue, d'un espace... tant et si bien qu'on pourrait les croire naïfs. Mais ils savent surtout apprivoiser l'évolution de leur propre regard jour après jour, en se nourrissant là où d'autres ne savent ou ne peuvent pas regarder assez longtemps. Il y faut des stratégies particulières, car le dessin vous donne à voir des failles où

Lettre à François Jullien

le vertige de la nouveauté permanente menacerait tout aussi bien de s'ouvrir.

Quel rôle cette fonction équilibrante peut-elle jouer dans le futur ? Pour l'évaluer, j'ai voulu associer dans ce texte deux réflexions récentes, liées chacune à la promesse de l'avènement d'un nouveau monde. L'un est le nouveau monde technologique, qui bouleverse nos sociétés en automatisant de plus en plus de tâches. L'autre est le monde de la transition énergétique qui devrait nous conduire à d'autres changements encore plus radicaux, et pas nécessairement compatibles avec les injonctions du premier. Pourquoi toujours plus de numérique, alors que les appels à la sobriété numérique commencent justement à se faire entendre ?

Partons d'une évidence : dessiner à la main ne demande pas d'électricité *a priori*. Être capable de dessiner sur papier donne d'emblée une marge de liberté précieuse vis-à-vis des ordinateurs, des appareils photos et des smartphones de toutes sortes. Mais la matière du dessin peut aussi être utilisée et enrichie par les outils numériques, notamment *via* l'animation. Il s'agit donc d'une piste qui ouvre un écart entre les deux mondes, entre les deux injonctions contradictoires de la technologie et de la sobriété. Je vais m'engager ici sur cette piste, parfois accompagné de mon fils de quatre ans, qui est après tout le premier concerné par les évolutions futures. Après un passage par la robotique et une visite chez Viollet-le-Duc sur fond de mouvement social, j'espère montrer qu'une morale de l'accès au monde telle que vous la proposez peut se dégager de la pratique du dessin à la main, et qu'elle peut jouer un rôle de pivot dans l'éducation à de nombreux niveaux.

Art et concepts

LES ROBOTS NE SE LASSENT JAMAIS

Cela devait arriver. Le fantôme de robots dessinateurs, qui semblait relever du siècle des automates et des animaux-machines de Descartes, nous l'avions maintenant sous les yeux, moi et Gaël, dans une grande exposition consacrée à l'art robotique. Montés au-dessus de petits pupitres d'écoliers inclinés à l'ancienne, chacun des robots se composait d'un « œil » et d'un « bras ». Le regard des mini-caméras allait et venait inlassablement, se reportant sans cesse d'une scène de nature morte avec renard empaillé jusqu'à la feuille où le bras, à chaque étape, lançait un nouveau trait. L'accumulation de ces traits formait une image où l'on reconnaissait la scène, dans un foisonnement de traits plus proche des portraits de Giacometti que des exercices d'écolier du XIX^e siècle, mais le principe fonctionnait indéniablement.

« Ça, c'est intéressant », dit une visiteuse à son ami à côté de nous. Je me rapprochais de mon fils, qui se trouvait clairement fasciné par le va-et-vient des automates, et mû par une intuition que je ne m'expliquais pas sur le moment, je déclarais : « Tu vois Gaël, ça, ça s'appelle une arnaque. »

Sur le coup, j'eus un peu honte. À force de défendre le dessin à la main, est-ce que je ne me retrouvais pas dans la position passéiste des luddites, ces casseurs de machines condamnés à être balayés par la modernité ? Malgré toutes mes heures de vol en imagerie numérique, est-ce que je ne finissais pas par exprimer simplement l'amertume d'un dessinateur de l'ancien monde, fatigué et dépassé par le nouveau ? Et puis, n'étais-je pas franchement injuste vis-à-vis

Lettre à François Jullien

des concepteurs de l'installation ? Je n'ai d'habitude rien contre les robots, mais cette fois quelque chose clochait.

Quelques mois plus tard, je rendais visite à Londres à l'un des coauteurs de l'installation, Frédéric Fol Leymarie. Ce chercheur spécialiste de robotique créative, dont j'apprécie beaucoup le travail et l'ouverture d'esprit, et dont j'espère qu'il comprendra cet élan critique, me livrait alors une explication dont il ne faisait pas mystère : le va-et-vient du regard des caméras, dans cette version de l'installation, était rajouté pour faire « plus humain ». L'algorithme utilisé par les robots n'avait en fait besoin que d'une seule image, enregistrée au tout début du processus, et le reste du jeu de regards était bel et bien de la poudre aux yeux.

Alors, pourquoi vouloir anticiper sur le fait que les robots rejoignent les humains ? Pourquoi laisser penser qu'il ne sera bientôt « plus la peine » de dessiner puisque les robots vont le faire ? Il s'agissait bien entendu, pour Frédéric Fol Leymarie et Patrick Tresset, de provoquer le débat, ce qui est maintenant réussi. Mais beaucoup plus prosaïquement, au cours de la mise au point, il s'était avéré que l'ensemble des mouvements nécessaires au bras robotique pour faire un portrait « sur le vif » prenait beaucoup trop de temps. Les visiteurs, et le modèle humain éventuel, finissaient par s'ennuyer ferme, trop pour suivre le processus ou garder la pose, ce qui nuisait sérieusement à la performance. Le mouvement des « yeux-caméras » avait donc pour but de créer une fiction de relation visuelle, mais l'interrogation renouvelée du réel à chaque regard, si fondamentale dans le dessin d'observation, en était fondamentalement absente. L'apparente implication était avant tout un artifice destiné à palier un problème très humain : la lassitude du modèle et des visiteurs.

Art et concepts

Ces robots-dessinateurs exemplifient alors assez bien le problème posé par l'ensemble des filières du « numérique ». Les ingénieurs et les chercheurs ont accompli depuis plusieurs décennies de véritables prodiges en matière d'automatisation. Mais qu'il s'agisse de produire des données, d'en recueillir, et plus récemment d'exploiter ces données *via* l'apprentissage-machine, l'immense majorité de ces efforts et de ces financements est vouée à capter l'attention des spectateurs-utilisateurs, pour les plonger le plus longtemps possible dans un au-delà du monde, quel qu'il soit : réseau social, jeu, série, chaîne d'information, boutique en ligne, film d'animation 3D, blockbuster à effets spéciaux...

Une fois mis en place, les robots et les algorithmes répondent toujours, et ne se lassent jamais de tromper notre ennui. J'ai bien dit « tromper » l'ennui, et pas s'en dégager. Car l'objectif est ailleurs : il faut avant tout que des humains restent impliqués, suspendus à la boucle des interactions, faute de quoi l'absurdité d'une grande partie de ces systèmes éclaterait au grand jour. Pour le moment, cela fonctionne à merveille : les humains semblent toujours raffoler des récompenses symboliques que le « numérique » leur offre si facilement.

En vingt-cinq ans de croquis dans les transports, j'ai donc vu comme tout le monde, le regard des voyageurs baisser, de plus en plus absorbé par cet écran de téléphone si efficace pour pallier la lassitude du trajet. Je ne fais d'ailleurs pas exception, mais je peux toujours décider de sortir une feuille pour dessiner les gens, et je ne m'en prive pas : quel que soit le résultat, la peine est toujours récompensée, l'ennui s'évaporant dès le premier trait de crayon pour laisser place à l'inouï d'un nouveau corps ou d'un nouveau visage. Je



Figure 1: Croquis de transport en commun, R. Chabrier, 2019

Lettre à François Jullien

mesure bien que la pratique du dessin sur carnet n'a plus l'évidence d'autrefois, même pour moi qui dois bien souvent me contenter de cette pratique minimale (Figure 1). Elle est si décalée par rapport aux habitudes générées par les écrans numériques, et par rapport à l'ambiance de dématérialisation que leurs contenus habituels génèrent, qu'elle en devient une force de résistance.

Plus qu'autrefois, il faut donc faire l'effort de « s'y mettre » en laissant de côté l'envie compulsive de consulter un mail ou un site d'information, c'est-à-dire en se forçant à ne pas se comporter comme un robot. La bonne nouvelle est que le processus du dessin, une fois lancé, est plutôt stable : pourquoi alors, quand on en a le goût, se priver d'une « désintoxication » quotidienne aussi facile à mettre en place ? Considérant l'impact des smartphones et des jeux, sur les adolescents notamment, une réflexion semble s'imposer sur l'entraînement qui pourrait leur être offert, afin qu'ils aient les moyens de se désengager eux-mêmes, au quotidien, de la dépendance numérique.

Cependant il ne s'agit pas que d'un problème de distraction, mais bien aussi d'attente et d'angoisse. Elle est devenue palpable, dans les cafés où j'ai passé tant de temps à dessiner entre les lecteurs du *Parisien*, les joueurs de tiercé et les spectateurs de BFM TV. Il n'est certainement pas nouveau, dans l'histoire, qu'une société soit prise par la prescience d'événements plus ou moins catastrophiques (à tort ou à raison : d'après certains historiens, même l'Empire romain au plus fort de son développement se vivait comme en danger de dislocation). Cette fois cependant, l'ampleur de la menace environnementale est réellement inédite, tandis que le fossé qui se creuse entre les différentes qualités d'emplois

Art et concepts

menace sérieusement la cohésion sociale et internationale, qui serait pourtant nécessaire pour organiser une réponse à la hauteur de l'enjeu. Jusque dans les écoles maternelles, les récentes manifestations des gilets jaunes n'ont pas échappé aux enfants, avec tout un lot d'inquiétudes à expliquer ou à désamorcer. Dans de telles conditions, la concentration n'est plus acquise au dessinateur, et il faut bien choisir ses combats.

L'INOÛI D'UN PRINTEMPS

Fort heureusement, il existe dans le monde quelques repères de stabilité. Une cathédrale par exemple. Il y a quelque mois, j'entreprenais donc de faire découvrir la *Naissance d'une cathédrale* à mon fils, à travers le magnifique livre dessiné en 1970 par David Macaulay. Puis, je l'envoyais faire sa première visite de Notre-Dame. Une semaine après, il apprenait qu'une cathédrale peut aussi brûler.

Ma tentative d'éducation architecturale et religieuse prit alors un tour sérieusement inattendu. Un miracle se produisit : une véritable manne tomba du ciel des grandes fortunes. Immédiatement après montait une polémique : cet élan de générosité était-il magnifique ? Ou était-il scandaleux, autant vis-à-vis des autres édifices que des autres causes dans le besoin ? Tandis que mon fils échappait au débat en passant à *Naissance d'un château fort*, je suspendais pour ma part l'écriture de deux textes urgents (dont celui-ci). L'événement rendait tout d'un coup audible un texte de Viollet-le-Duc

Lettre à François Jullien

que je venais de découvrir, et dont je n'aurais peut-être même pas tenté de vous parler dans un autre contexte. Mais revenons d'abord sur la polémique.

Quoi qu'on en dise, la masse des dons consécutive à l'incendie de Notre-Dame soulève un intéressant problème éthique, apparemment insolvable comme il se doit. Oui, ces centaines de millions d'euros témoignent d'un attachement sincère et mondial à cette cathédrale. Oui, par contrecoup, ce réveil nous ouvre aussi, et une nouvelle fois les yeux, sur une situation scandaleuse d'aggravation des inégalités, de captation des richesses et de redistribution dysfonctionnelle. Alors, que faire du symbole si fort de l'effondrement de la flèche de Viollet-le-Duc ? Les journaux n'ont pas manqué de souligner tout ce que cet attachement doit à l'œuvre entreprise par l'architecte pour restaurer et « perfectionner » Notre-Dame au XIX^e siècle. Pour reprendre mon expression chinoise favorite, il était parvenu à en faire « une cathédrale, ainsi que beaucoup d'autres cathédrales », n'hésitant pas à la remodeler pour rendre la qualité de son architecture et de ses sculptures accessibles aux yeux de tous, et pas seulement des prêtres ou de Dieu. Que penserait-il de tout cela, et comment emploierait-il la partie de l'argent qui revient de droit à son travail ?

Il se trouve que Viollet-le-Duc ne s'occupait pas que d'architecture, et qu'il a écrit un livre offrant, pour ainsi dire, un projet éducatif et social. *Histoire d'un dessinateur. Comment on apprend à dessiner*, publié en 1873, raconte comment un patron d'usine, dessinateur lui-même, découvre qu'un enfant pauvre du voisinage semble doué pour l'observation. L'homme, M. Marjorin, décide d'organiser pour le petit Jean une formation de dessin personnalisée, dont la

Art et concepts

teneur peut être cernée dans cet échange entre M. Marjorin et un ami sceptique :

– Êtes-vous bien certain qu'en ne gênant pas et que même en développant, comme vous le dites, ce que vous appelez les dispositions de petit Jean pour l'art, vous en ferez un homme utile, que vous lui ouvrirez une carrière indépendante ? Ne craignez-vous pas, au contraire, de le jeter dans le clan nombreux des déclassés, des incompris, des... [...]

– Pardon, une simple comparaison vous convaincra que le dessin, enseigné comme il doit l'être, à mon avis, ne pousse pas plus un enfant à devenir un artiste que l'enseignement de la langue française ne le pousse à être poète. Ce n'est pas ma faute si on enseigne généralement le dessin en visant, comme but, la pratique de l'art. Pour moi, le dessin est simplement un moyen de consigner les observations à l'aide d'un langage qui les grave dans l'esprit et permet de les utiliser, quelle que soit la carrière qu'on embrasse. [...]

Et M. Marjorin de soutenir que même un juriste gagne à être initié au dessin, ne serait-ce que pour comprendre les plans concernant les litiges immobiliers dont il s'occupe. Le reste du livre nous fait voyager à travers toutes les circonstances dans lesquelles le dessin peut ouvrir le regard d'une jeune personne, depuis l'observation des plantes (Figure 2) jusqu'à l'organisation d'un chantier, en passant par les lois de la perspective et la relation entre l'anatomie et l'évolution, sans oublier une initiation à l'art de Vinci et de Hokusai. Il était difficile d'être plus moderne, en termes de culture scientifique, technique mais aussi artistique au début des années 1870, dans le cadre de l'éducation d'un enfant. Mais que cherchait à transmettre Viollet-le-Duc à travers ce texte ?



Figure 2: Bourgeons de Fougère par Viollet-le-Duc, 1873

Lettre à François Jullien

Bien au-delà de l'architecture, il faisait le constat d'une dérive sociale et technique délétère. À travers les propos de l'industriel M. Marjorin, il se désole que la production de qualité se soit progressivement réservée aux plus riches, avec tout ce que cette concentration de moyens pouvait entraîner de boursouflures, tandis que le reste de la société devait se contenter de produits de basse qualité, remplis d'erreurs dans le choix et l'emploi des matériaux. De façon générale, la production française était selon lui de plus en plus distancée en qualité par ses concurrents voisins, entraînant de nombreuses pertes d'emplois. Est-il besoin d'insister sur un possible parallèle avec la situation actuelle à l'échelle mondiale ? Voilà en tout cas une analogie historique qui, pour une fois, ne nous ramène pas aux années 1930.

Face à la situation, telle qu'elle se présente à son époque, Viollet-le-Duc ne suggère pas dans ce livre une action de court terme. Il soutient qu'une solution intelligente passe par le fait de prendre le temps d'accompagner dans l'apprentissage du dessin les jeunes qui le souhaitent. Il ne s'agit pas de n'importe quelle façon d'apprendre à dessiner. Tout particulièrement, il ne s'agit pas de leur faire passer des heures à recopier des modèles, c'est-à-dire de pratiquer le dessin d'une façon *suffisamment ennuyeuse* pour que les élèves ne soient pas tentés de devenir artistes, à part quelques cas « désespérés ». Qu'on ne se méprenne pas : Viollet-le-Duc ne méprise ni l'art ni la poésie, bien au contraire. Il constate simplement que rabattre le dessin sur l'*Art*, tel que la bonne société de l'époque (et d'aujourd'hui ?) se le figure, conduit à en éliminer toute la portée éducative, morale et même éthique.

Art et concepts

Alors, si l'enjeu du dessin n'est pas de faire ce genre d'art, s'il ne consiste surtout pas à « *faire des images* », de quoi s'agit-il ? En termes modernes, si l'on s'intéresse aux neurosciences et à l'éducation, il s'agit de découvrir toute la panoplie des géométries spatio-temporelles que notre cerveau est capable d'appréhender dans le monde, comme le diraient Alain Berthoz, Daniel Bennequin et Tamar Flash. Ou encore, sous l'angle philosophique que vous proposez dans votre livre, il s'agit de donner accès à toutes ces choses inouïes, qui ne sont pas cachées, qui se trouvent même sous nos yeux, mais que nous ne savons pas entendre ou voir.

Petit Jean, grâce au dessin, aura un jour accès à l'inouï d'un printemps, lorsque les bourgeons s'ouvrent, que les insectes sortent et que la nature déborde les limites du carnet à dessin. C'est cet inouï que nous redécouvrons aujourd'hui, pour de tristes raisons, à la faveur du changement climatique et de l'extinction de masse des insectes. Ces transformations, qui ont cessé d'être silencieuses, il nous faut désormais apprendre à bien les écouter. Pour cela, la démarche d'observation scientifique apporte des outils indispensables, par exemple à travers les programmes de science participative comme « L'Observatoire des saisons ». Cependant, sachant à quel point les combats environnementaux sont mal engagés et les graphiques parfois désespérants, nous devons à nos enfants des compensations. Le dessin apparaît alors dans toute sa dimension : non pas comme un outil de prise de vue, ni comme un outil de mesure, mais comme une ressource de résilience. Il n'existe tout simplement aucune solution plus efficace pour passer des heures devant un phénomène sans s'ennuyer. En pleine période de crise de l'attention, il permet de renouer une intimité durable avec le monde.

Lettre à François Jullien

UN MINIMUM MÉTAPHYSIQUE À L'ŒUVRE

Viollet-le-Duc, comme vous, voit dans le débordement de l'expérience le meilleur antidote à la lassitude ou l'ennui. Vous insistez sur le fait que l'expérience en elle-même n'est pas suffisante, qu'à se croire pure elle se rabat trop facilement dans son cadre constitué. Lui montre que l'enfant ne peut échapper seul à la lassitude s'il s'engage dans une activité telle que le dessin, et qu'il lui faut donc des clefs. Chaque nouvelle clef d'observation, qu'elle soit géométrique, anatomique ou géologique, découvre alors un coin de couverture, à partir de quoi l'enfant n'a plus qu'à continuer à explorer lui-même. Pour autant, il n'est pas question de dépassement : le dessin ne fait pas de l'enfant un scientifique, et ce n'est de toute façon pas le but. Seul le débordement compte, traduit dans le simple fait que l'enfant s'intéresse à de multiples choses qui lui auraient échappé autrement.

Vous appelez donc *Inouï* ce débordement qui n'est pas un dépassement, et qui par conséquent ne se laisse pas ranger sous la forme d'un idéal facilement re-localisable. Votre livre s'engage alors jusqu'à fonder sur l'*Inouï* un « minimum métaphysique », qui n'est pas l'hyperbolisme métaphysique, ni le rabattement sur l'empirisme. Bien entendu, de tels propos sont absents de l'histoire du petit Jean, mais je vais maintenant tenter de montrer que la notion de minimum métaphysique s'applique au dessin, en tant que sensible qui ne se laisse pas rabattre dans un cadre constitué. Pour commencer, cela nous permettra de comprendre un enjeu

Art et concepts

fondamental et trop mal compris de la relation entre dessin et sciences.

Si le texte de Viollet-le-Duc me fascine personnellement, c'est en effet que la formation de petit Jean aborde la plupart des thèmes scientifiques que j'ai eu moi-même à rendre accessibles au cours de ma carrière de réalisateur et de dessinateur s'adressant au « grand public », depuis l'anatomie en mouvement de la chauve-souris jusqu'à l'animation de fresques de Pompéi. Les découvertes, depuis 1873, se sont bien entendu accumulées de façon vertigineuse dans tous les domaines, et des thèmes nouveaux comme les neurosciences ou la biophysique ont émergé. Les scientifiques se sont alors de plus en plus spécialisés, pour ne pas se perdre, et la communication scientifique s'est de plus en plus appauvrie, pour mieux se vendre. Ce double mouvement de focalisation vers la nouveauté absolue de la « découverte » et la superficialité de la « communication », qui est même devenu structurant dans le monde universitaire, a fait oublier cet autre enjeu tout aussi important : qu'il s'agisse d'une fleur ou d'une image microscopique, comment voir ce que l'on a sous les yeux ?

Hier comme aujourd'hui, il reste nécessaire d'accéder au monde, sans tomber ni dans le vertige ni dans la simplification abusive. Si on prend la peine de dégager un peu l'« Histoire d'un dessinateur » de son contexte culturel, si on la fait dé-coïncider d'avec la lourdeur paternaliste du XIX^e siècle, si l'on imagine la vie des croquis derrière la forme un peu sculpturale des photogravures, on s'aperçoit que ce livre dégage une bonne partie du « minimum de dessin » à partir duquel il est possible de construire ce fameux accès. À notre charge aujourd'hui de compléter cet édifice par les

Lettre à François Jullien

développements rendu pertinents par l'histoire plus récente : la prise en compte du mouvement dans la compréhension du trait, grâce au développement de l'animation, ainsi que le rapprochement des logiques du croquis et de la peinture chinoise, me paraissent par exemple deux axes que Viollet-le-Duc n'aurait pas reniés. La science actuelle peut tout à fait en bénéficier, à condition de reconnaître qu'un tel travail de visualisation ne doit pas être entraîné trop loin sur le terrain de la découverte scientifique, ni se faire rabattre sur la simple communication de cette découverte. Quelle que soit la découverte à montrer, le rôle du dessin sera de toute façon toujours d'en offrir un débordement, ne serait-ce qu'en donnant à voir le contexte. S'il faut trouver un sens à la recherche en design, c'est à mon sens dans cette voie finalement assez différente de la recherche scientifique qu'il faut le chercher.

Pour autant, n'oublions pas nos enjeux de départ : dans un monde promis à la fois à une robotisation généralisée, et à une transition énergétique acrobatique, quel rôle ce minimum de dessin, actualisé comme il se doit, pourrait-il jouer ? Sans rentrer dans le détail, nous pouvons voir que le problème a bel et bien une dimension métaphysique : la culture occidentale s'est trop longtemps laissée porter par le rêve d'un au-delà (religieux, industriel, technologique). Elle découvre avec effarement que le monde est fini, et qu'il faudrait savoir s'y intéresser de façon plus juste. Le dessin constitue alors une piste de choix pour mettre en œuvre le « minimum métaphysique » que vous proposez, sur un point d'ailleurs assez précis.

En effet, le monde des représentations s'est aujourd'hui polarisé entre ce qu'on appelle la « 2D » et la « 3D ». Deux

Art et concepts

espaces de travail incommensurables, entre lesquels il n'y a pas ou peu de transitions : les images de synthèse 3D ont une puissante propension à l'hyper-réalisme, demandant des temps de rendus toujours plus longs, tout en prétendant offrir la solution de représentation universelle, tandis que les images vectorielles 2D, peu chères, ont une toute aussi sévère propension à la simplification abusive. Deux formes d'au-delà, l'une virtuelle, l'autre conceptuelle, qui se substituent facilement au monde au lieu de nous y donner accès. Ce n'est pourtant pas une fatalité : des travaux sur la simulation de la croissance des montagnes tels que ceux de Guillaume Cordonnier, loin de nous écarter des montagnes réelles, nous aident au contraire à mieux les lire. Avoir vu sur une simulation « 3D » les couches de roches monter, tandis que l'érosion maintient la montagne à la même hauteur, nous apporte une lecture dynamique susceptible d'effacer la lassitude des montagnes qui menace toujours lorsqu'on ne sait pas assez de géologie.

Quoi qu'il en soit, le dessin, lui, ne relève ni de la « 3D » ni de la « 2D ». Comme le mettait en avant Jeanne Gatard dans son enseignement, il travaille fondamentalement avec l'espace, tout en se déroulant sur une feuille. En informatique, on a parlé d'une approche en « 2,5 dimensions » pour désigner ce type d'espace de travail intermédiaire qui n'est ni de la platitude, ni de la « vraie » 3D... et qui permet justement d'ouvrir des passages entre les différentes géométries. C'est là, probablement, dans un espace de représentation qui ne cherche pas la « vérité » dans un « au-delà » du support, mais qui ne s'aplatit pas pour autant dans un simple jeu de « surfaces », que le dessin peut placer les germes d'une pratique des représentations adaptée aux enjeux modernes.

Lettre à François Jullien

L'avenir nous dira ce que les prochaines générations en feront : il me semble que ma tâche à l'heure actuelle est de préserver, de développer et de faire comprendre la ressource. Voilà pourquoi je m'occupe actuellement d'étudier comment la spatialité d'un trait sur papier peut être visualisée à l'aide d'un écran autostéréoscopique, tout en essayant de comprendre quel système de formation, de production et de recherche doit être mis en place pour répondre de façon durable aux besoins de dessin du futur. De façon générale, réconcilier le dessin et la géométrie me semble un beau chantier à venir.

UNE EXIGENCE FACE À L'ÉLITISME

Cependant, j'ai arrêté l'histoire du petit Jean en cours de route, à une époque où l'informatique n'a encore pas de prise sur le monde : devenu grand, il choisira la carrière de constructeur de meuble, après avoir été marqué par la découverte des objets et des aménagements de Pompéi. Viollet-le-Duc montre alors comment le dessin accompagne l'apprentissage de la composition, c'est-à-dire du choix des combinaisons entre les matériaux, la structure et l'ornementation. Aujourd'hui, nous dirions que petit Jean devient « entrepreneur » à l'issue d'une formation « professionnelle ». Mais aujourd'hui, comme à l'époque de Viollet-le-Duc d'après ses dires, les adolescentes et adolescents ont bien peu de chances de développer et d'utiliser leurs dispositions pour apprendre le monde à travers le dessin,

Art et concepts

à moins de s'orienter vers des filières d'architecture, d'art ou de design. Cependant, la prégnance des outils informatiques basés respectivement sur les espaces en 2D et 3D, tout comme les dérives industrielles dans les usages de matériaux (plastique, verre, béton...), laissent vite peu de place à ce que le dessin pourrait apporter. Pour un architecte d'élite qui peut se permettre de poser un « geste architectural », puisqu'il dispose d'une armée d'ingénieurs pour faire tenir debout même la structure la plus absurde, combien sont condamnés à exploiter un infini de boîtes rectangulaires sur leurs écrans d'ordinateur ? Le problème se trouve aussi du côté des commanditaires : faute d'avoir jamais dessiné, combien de responsables aujourd'hui sont capables de lire une esquisse et préfèrent s'appuyer sur des visualisations ultraréalistes mais parfaitement trompeuses pour juger les propositions ?

L'analyse de Viollet-le-Duc est donc tout à fait d'actualité. En évacuant la pratique du dessin de la plupart des filières d'enseignement à partir du collège et en l'associant avant tout à l'idée d'*Art*, peut-être légitime, mais en tout cas trop étroite pour l'étendue de ses applications, c'est tout simplement d'une ressource fondamentale pour l'équilibre de la société que nous nous sommes privés. Puisque la croissance économique ne suffit plus à elle seule à assurer la progression sociale et l'intégration, il faut alors prendre conscience que la maîtrise de la langue et des mathématiques ne réglera pas tout. Indispensable évidemment, ces compétences se retournent aussi avec une efficacité redoutable en outil de distinction sociale et communautaire, dès lors qu'elles ne sont pas épaulées par des pratiques non verbales et plus terre à terre. Faute de quoi la supériorité intellectuelle est alors

Lettre à François Jullien

trop facilement attribuée à la maîtrise (souvent fictive) d'un au-delà technologique ou conceptuel qui s'avère stérile et répétitif à l'usage. À l'inverse, le dessin tel que Viollet-le-Duc l'envisageait est autant une leçon d'exigence, qu'un antidote à l'élitisme. À rebours de la fragmentation des spécificités culturelles et des spécialisations technologiques, il offre tout simplement aux jeunes un accès au monde. Tous les jeunes, certes, n'ont pas besoin d'apprendre à dessiner. Mais ce que peuvent faire ceux qui ont appris... tout le monde en profite.

Il se trouve par ailleurs que le livre de Viollet-le-Duc a de toute évidence préfiguré (je n'ai pas dit « causé ») une véritable réussite, celle des Arts and Crafts et de l'Art nouveau. Trente ans plus tard, ces mouvements ont effectivement trouvé la synthèse entre la qualité de réalisation et l'ouverture à toute la société, ainsi qu'entre l'usage des matériaux dit anciens et des matériaux dit moderne. Le Palais du Peuple ou encore l'école maternelle construits par Victor Horta à Bruxelles, l'engagement social de William Morris en Angleterre, en ont témoigné. Toutes ces réalisations, lorsqu'elles ont su rester suffisamment sobres, sont marquées par l'inouï : un inouï de la matière, nourri de croquis d'observation et de dessins préparatoires qui n'étaient pas réalisés dans le but d'être exposés.

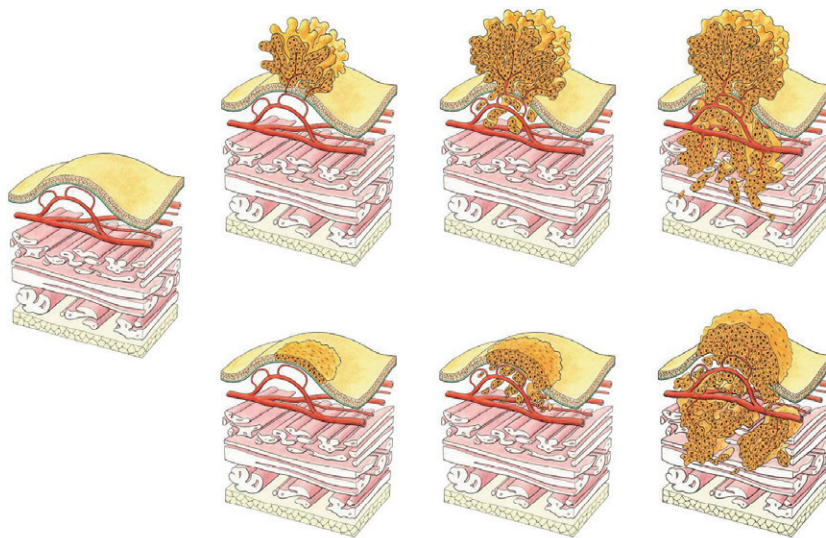
Trente ans, c'est aussi le temps dont nous aurons besoin pour voir les résultats des décisions éducatives qui seront prises aujourd'hui. D'ici là, la robotique aura encore beaucoup progressé, mon fils aura grandi et la flèche de Notre-Dame aura peut-être été reconstruite, sans précipitation je l'espère : réserver la fin de la reconstruction aux enfants qui ont vu l'édifice brûler serait un beau cadeau, et aurait plus de sens que se précipiter à « *faire une image* » pour satisfaire

Art et concepts

les touristes. Mais s'il est une autre façon de se tenir à la hauteur de cet événement, je pense, c'est en créant un pont entre les préoccupations de Viollet-le-Duc autrefois et les nôtres aujourd'hui, en comprenant à quel point le dessin à la main ouvre un accès à l'inouï, tel que vous l'avez clarifié dans votre livre. C'est en ce sens que le dessin peut redevenir ressource fiable, afin d'aider les jeunes générations à vivre, et à faire leurs choix.

Annexe 4

The comeback of hand drawing in modern life sciences



Article de «Comment» publié en 2017
dans Nature Cell and Molecular Biology

The comeback of hand drawing in modern life sciences

Renaud Chabrier^{1,2} and Carsten Janke^{1,2}

Scientific manuscripts are full of images. Since the birth of the life sciences, these images were in a form of hand drawings, with great examples from da Vinci, Hooke, van Leeuwenhoek, Remak, Buffon, Boveri, Darwin, Huxley, Haeckel and Gray's Anatomy to name a few. However, in the course of the past century, photographs and simplified schematics have gradually taken over as a way of illustrating scientific data and concepts, assuming that these are 'accurate' representations of the truth. Here, we argue for the importance of reviving the art of scientific drawings as a way of effectively communicating complex scientific ideas to both specialists and the general public.

Drawing has been an essential part of science for centuries. Until the beginning of the 20th century, drawings provided the only non-verbal means for recording and communicating scientific discoveries. Drawing has been especially crucial in the life sciences, where the complexities of life forms are difficult to describe using words alone. For this reason, researchers in the 18th and 19th centuries had to master drawing techniques to become effective scientists. The beautiful drawings these scientists generated were used to present observations about the structure of living forms. In many cases, like Darwin's tree and Waddington's landscape, drawing was also used to communicate complex, abstract ideas in a simple way.

Strikingly, the use of drawing in science largely vanished during the 20th century. This is partly explained by the introduction of photography as a means of generating images. Indeed, since its pioneering introduction in the 1870s, scientific photography has been considered one of the best ways of truthfully representing reality, which made it seem superior to scientific drawing. This view was expressed by Joseph Lister, a very gifted sketcher, when he commented on the microphotographs presented by Robert Koch in London in 1881: "... the picture drawn by light are entirely free from those errors which can hardly fail to creep in as a consequence of mental bias when a sketch of these minute objects is made by the human hand" (REF. 1).

Indeed, photography seems to have the capability to record scientific discoveries in a spectacular way. However, not all details captured in a photograph are important, and the abundance of information in photographic images can easily lead to misinterpretations. As a consequence, only specialists really know how to extract relevant information from scientific photographs, while the general public, as well as specialists from other domains, are left to admire

these images without being able to gather a deeper understanding of their scientific meaning. Attempts to overcome this problem are as old as scientific photography itself. From the very beginning, researchers used drawing techniques to highlight and extract relevant information from their photographs. For example, Étienne-Jules Marey and his successors traced the outlines of animals in chronophotographs in order to highlight their successive movements². This approach was by no means a reintroduction of drawing into science — the outlining of shapes on flat photographic projections creates a 2D schematic with very limited spatiality.

Similar approaches are used today, for instance, to visualize specific structures in electron micrographs. More frequently however, researchers use schematics to illustrate their working models. The general aim of a schematic is to present simplified descriptions of 'reality', thus counterbalancing the excess of information obtained by photography (FIG. 1 a,b). The availability of computer-based vector graphics has recently made this kind of representation even more widely accessible. However, the capacity of such schematics to transmit complex information is strongly limited. First, they tend to be flat and cannot give reliable information about the spatial organization of phenomena such as tissue organization or developmental processes. Second, scales and dimensions are often changed or disregarded for graphic convenience. Last but not least, contextual information is often unclear or entirely neglected in schematics, and, as a result, an efficient understanding of their meaning is once again restricted to the specialists who have the necessary background knowledge.

As the art of scientific drawing has gradually faded away, scientists have been confronted with a forced choice between the 'realism' of photographs and the

¹Institut Curie, PSL Research University, CNRS UMR3348, F-91405 Orsay, France.

²Université Paris Sud, Université Paris-Saclay, CNRS UMR3348, F-91405 Orsay, France. Renaud.Chabrier@curie.fr; Carsten.Janke@curie.fr

doi:10.1038/nrm.2017.126
Published online 20 Dec 2017

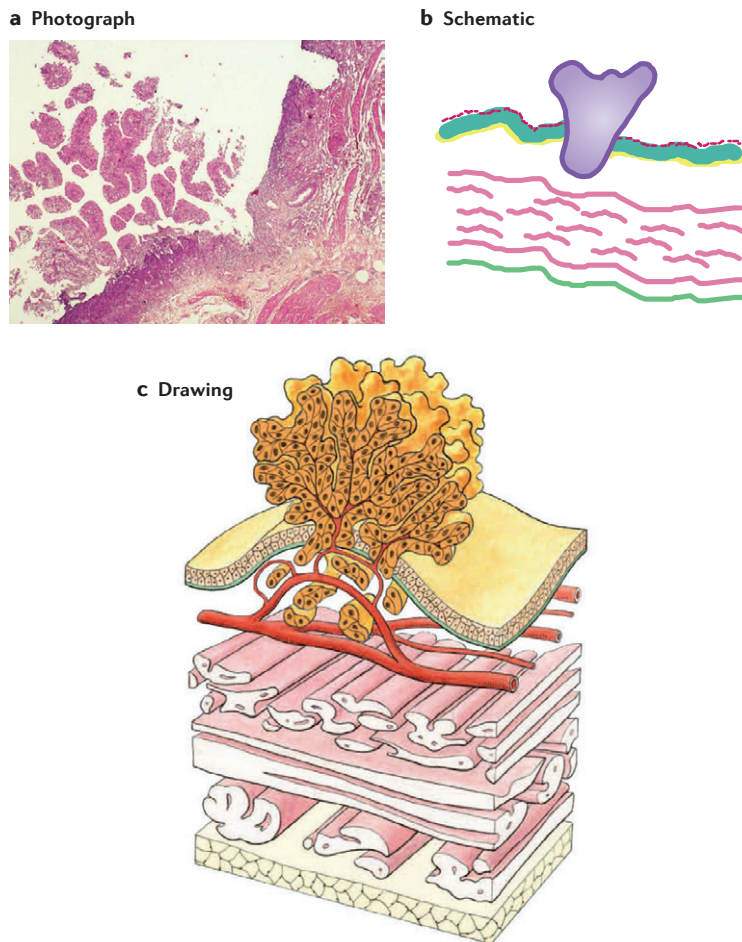


Figure 1 | Three different presentations of a bladder carcinoma. a | Histologic photograph. **b |** Schematic illustration. **c |** Drawing. Part **a** courtesy of Yves Allory, Institut Curie. Part **b** courtesy of François Radvanyi, Institut Curie. Part **c** courtesy of Renaud Chabrier, Institut Curie.

'reductionism' of schematic representations. However, this transition came at a cost, not only for the general public but also for scientists themselves. Stephen Jay Gould pointed out that the confusion between photographs and reality could lead to a flattening of the imagination. This is exemplified by the fossils from the Burgess Shale, analysis of which using (retouched) photographs caused a vast underestimation of the diversity of life forms, which was corrected only later with drawing-based methods³. In neurosciences, the disappearance of drawing during the 20th century led to a lasting influence of drawings from the late 19th century, which were later converted into schematics. However, without being updated, these representations might falsify our perception of neurons today⁴.

While a return of drawing in science may appear paradoxical owing to the rise of computer graphics and virtual reality, it was computer graphics itself that has renewed the interest in the representation of spatial information. 3D visualizations generated by computer graphics often follow the logic of photography, leading them to share many of the same advantages and drawbacks.

Strikingly, they are all the more accessible when they are associated with hand drawings, as convincingly demonstrated by the work of David Goodsell⁵.

By contrast to photographs, hand drawings are not supposed to be 'real' or 'true'. While this aspect was often considered a drawback¹, it also represents a great advantage. Drawing enables the creation of images that are more abstract than photographs but have more depth and are more accurate than schematics (FIG. 1c). Indeed, drawing can provide spatial visualizations that could never be photographed or easily schematized, thus creating transitions between the different levels of abstraction. At the same time, drawing in science can integrate contextual information obtained from a variety of complementary experiments that would otherwise only be connected by specialists. These unique features endow drawing with the capacity to better link the images with the narrative. Thus, drawing is a powerful tool to share scientific information with a reasonably interested public, both with or without a scientific background.

In the last two decades, there has been a remarkable revival of scientific drawing, from children books to textbooks or scientific publications. Complex and multidisciplinary topics have been made accessible for the general public through short films or installations (for example, on [neurodevelopment](#)). Moreover, a growing number of scientific blogs, as well as graphic novels on scientific subjects, clearly indicate the comeback of scientific drawing. To make this comeback a lasting success, scientists and artists need to make a strong effort to understand each other's craftsmanship in order to work together in a real interdisciplinary fashion. Successful collaborations between draftsmen and scientists can open new perspectives in scientific research and science communication, thus fostering novel approaches and ideas by making specialist knowledge accessible throughout science communities and beyond.

1. Lister, J. in *Transactions of the International Medical Congress, 7th session* (ed. MacCormac, W.) 311–312 (London, 1881).
2. Hildebrand, M. Symmetrical gaits of horses. *Science* **150**, 701–708 (1965).
3. Gould, S. J. *Wonderful Life* (Norton, 1989).
4. Wingate, R. & Kwint, M. Imagining the brain cell: the neuron in visual culture. *Nat. Rev. Neurosci.* **7**, 745–752 (2006).
5. Goodsell, D. S. *The Machinery of Life* 2nd edn (Copernicus, 2009).

Acknowledgements

This work has received support under the program "Investissements d'Avenir" launched by the French Government and implemented by Agence Nationale de la Recherche (ANR) with the references ANR-10-LBX-0038, ANR-10-IDEX-0001-02PSL. We are grateful to B. Baum (University College London, UK) and M. Piel (Institut Curie, Paris, France) for instructive discussions and suggestions for the manuscript. We would like to thank Y. Allory and F. Radvanyi (Institut Curie, Paris, France) for kindly sharing images.

Author contributions

Both authors contributed to all aspects of article preparation.

Competing interests statement

The authors declare no competing interests.

Publisher's note

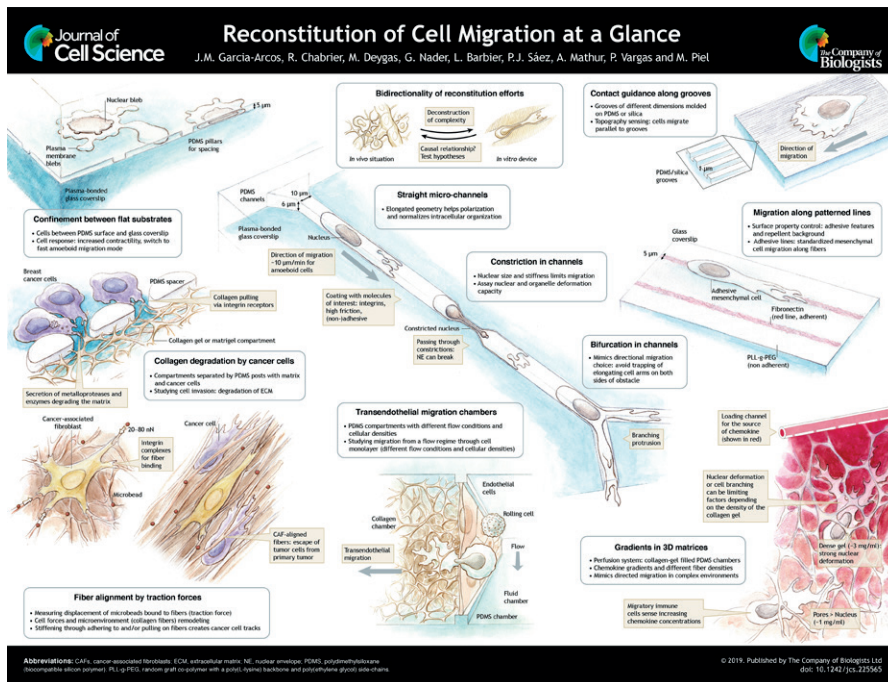
Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

FURTHER INFORMATION

Birth of a brain: short video on neurodevelopment:
<https://vimeo.com/183004485>

Annexe 5

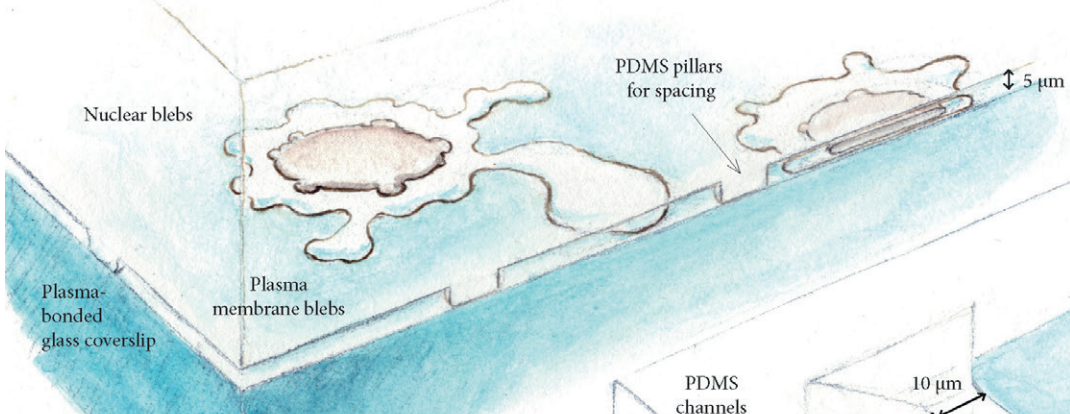
Reconstructing cell migration at a glance



Poster réalisé avec l'équipe de Matthieu Piel (Institut Curie)
 et publié en 2019 dans *The Journal of Cell Science*
 (la version publiée se trouve ci-dessus)

In vitro reconstitution deconstructing

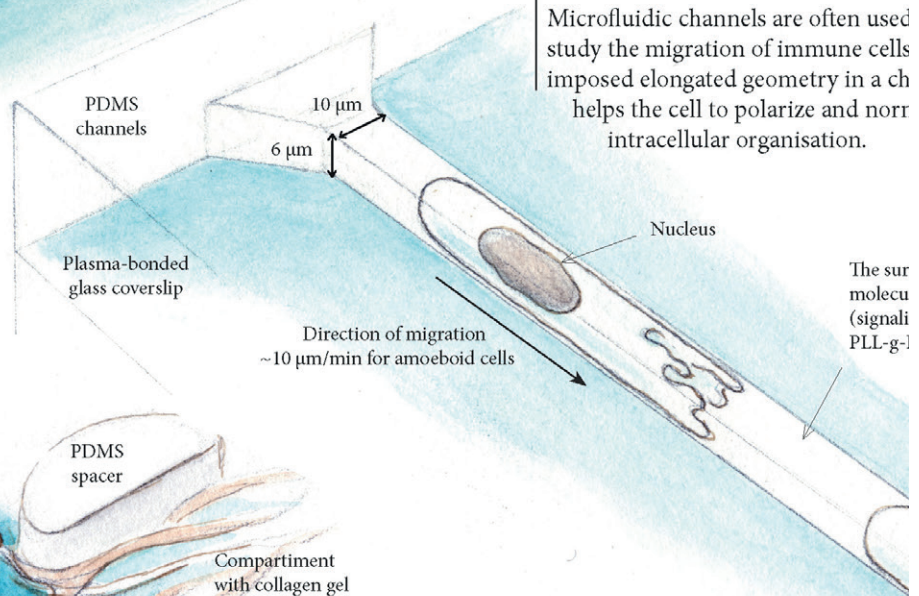
1 | 2D confinement



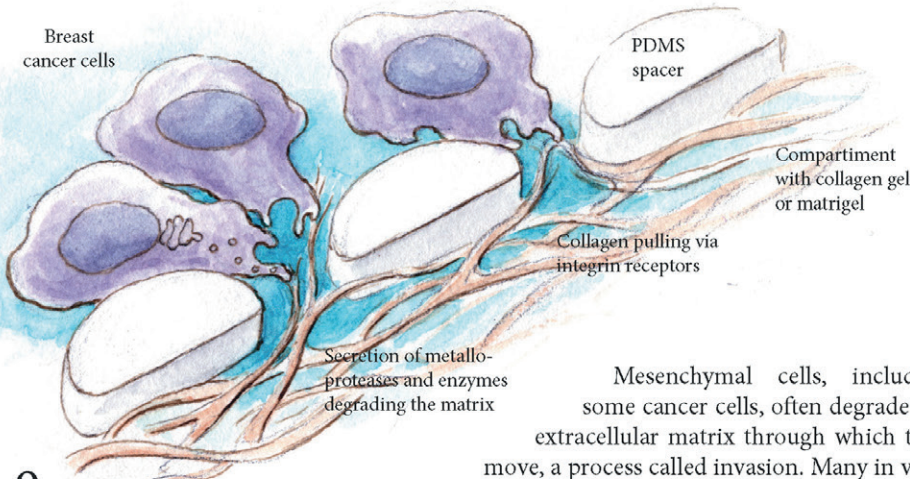
This 2D squeezing device can be used to study the response of cells to various degrees of confinement. Many cell types, when placed under confinement increase contractility and switch to a fast amoeboid migration mode.

2 | Straight micro-channels

Microfluidic channels are often used to study the migration of immune cells. Imposed elongated geometry in a channel helps the cell to polarize and reorganize its intracellular organization.



Breast cancer cells



Secretion of metalloproteases and enzymes degrading the matrix

Mesenchymal cells, including some cancer cells, often degrade the extracellular matrix through which they move, a process called invasion. Many in vitro systems exist to study this process. Here we present a rather sophisticated one in which two compartments, one with the cancer cells and one with the matrix, are created in a microfabricated device.

8 | Collagen degradation by cancer cells

9 | Fiber alignment by traction forces

Fibroblasts change their own physical microenvironment. Collagen fibers are remodelled by cells, making a stiffer environment, creating tracks for cancer cells. They do so by adhering and pulling on fibers. These traction forces can be estimated by measuring the displacement of microbeads bound to fibers (traction force microscopy).



Integrin complexes for binding on fibers

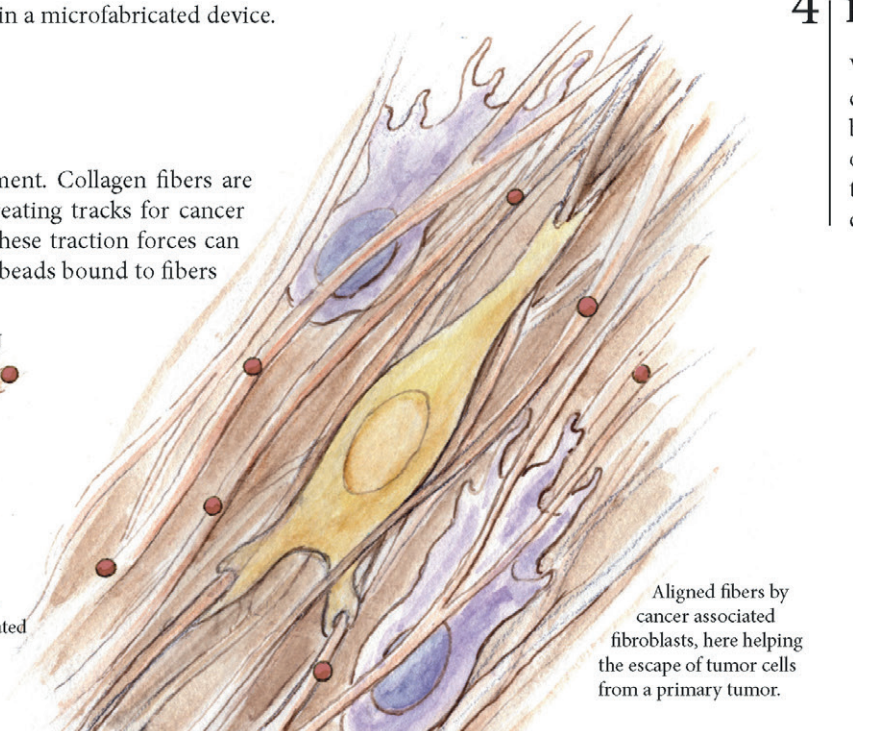
20-80 nN

Cancer-associated fibroblast

3 | Constriction in channels

Cells undergo large deformations while migrating through narrow channels in tissues. The nucleus is often thought of as a rigid structure, limiting the capacity of cells to deform. Constrictions smaller than the nucleus can be overcome through nuclear deformation capacity.

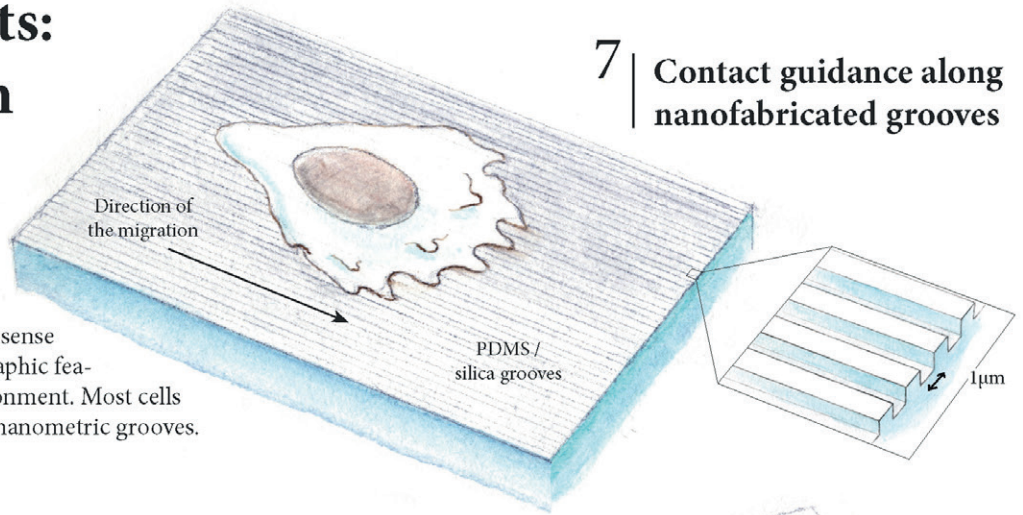
4 |



Aligned fibers by cancer associated fibroblasts, here helping the escape of tumor cells from a primary tumor.

Controlled environments: 3D cell migration

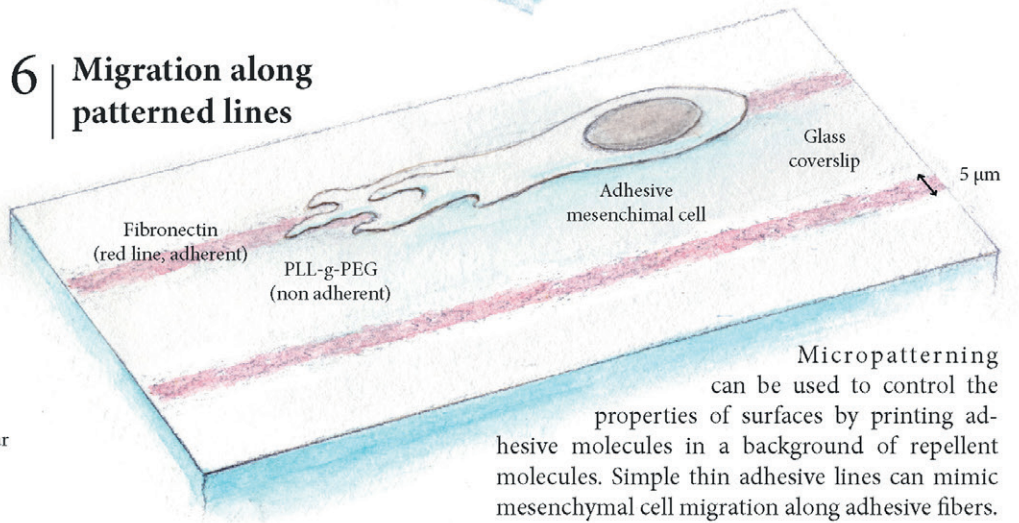
7 | Contact guidance along nanofabricated grooves



Migrating cells can sense nanometric topographic features of their environment. Most cells migrate parallel to nanometric grooves.

channel
The
channel
narrows

6 | Migration along patterned lines



surface of the device can be coated with molecules of interest, for example fibronectin (binding integrins), BSA (high friction), or PEG (non-adhesive)

Constricted nucleus

When cells pass through constrictions, their nuclear envelope can break.

migrating to be the element. Constriction used to assay

Migratory immune cells sense increasing chemokine concentrations.

Bifurcation in channels

When migrating through a fibrous environment, cells constantly need to make directional choices to avoid being trapped by arms elongating on both sides of an obstacle. The most basic configuration of such a situation can be mimicked by a two ways bifurcation in a channel.

Loading channel for the source of chemokine

Branching protrusion

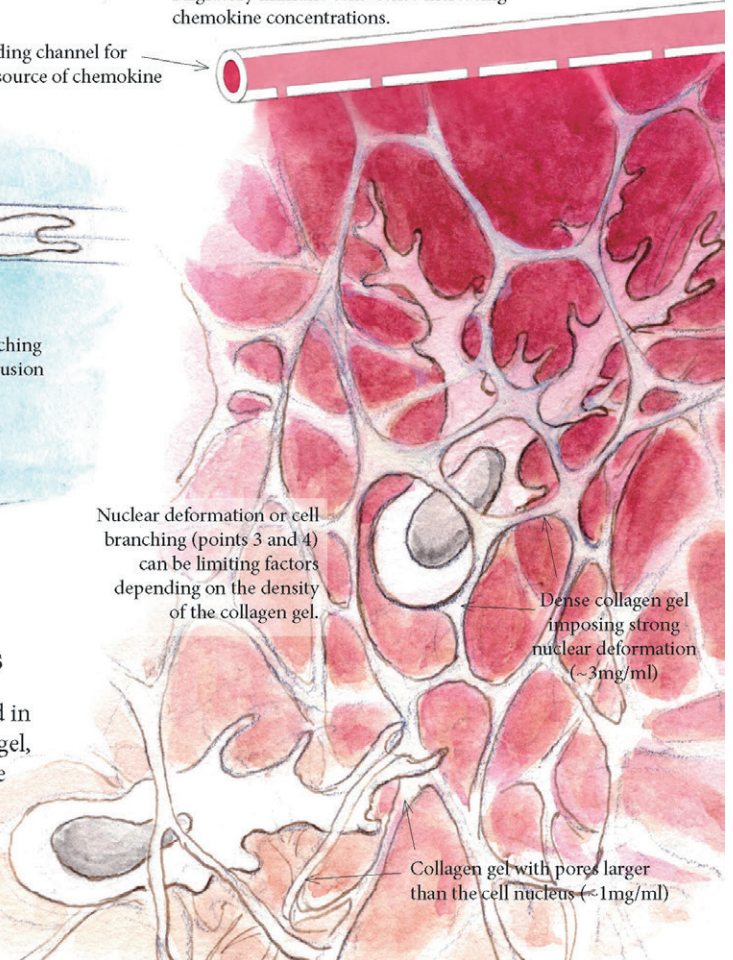
Nuclear deformation or cell branching (points 3 and 4) can be limiting factors depending on the density of the collagen gel.

Dense collagen gel imposing strong nuclear deformation (~3mg/ml)

Collagen gel with pores larger than the cell nucleus (~1mg/ml)

5 | Chemokine gradients in 3D collagen matrices

Cells are often guided by gradients of signaling molecules (depicted in red). Using a perfusion system in a chamber containing a collagen gel, it is possible to generate a well defined gradient in space and time combined to the complex migration geometry of collagen gel of various densities to study directed migration in a complex environment.



RÉSUMÉ

Après quarante ans de développement des images numériques, quels sont les enjeux d'une rencontre entre le dessin et les sciences du vivant ? Les utilisations du dessin pour la transmission scientifique sont en plein renouveau, dans l'édition autant qu'en muséographie et dans le domaine de l'animation. Cependant la grande diversité des productions et des outils rend le phénomène difficile à appréhender. En rassemblant plusieurs articles et réalisations publiés entre 2016 et 2020, cette thèse introduit des concepts permettant de mieux cerner ce qui se joue dans chaque tentative pour « dessiner la vie ».

La première étape consiste à s'intéresser au « trait », en prenant garde de ne pas réduire cette ressource à la représentation de formes statiques. En s'inspirant de travaux initiés dans le domaine des neurosciences, le croquis sur le vif et l'animation permettent alors d'introduire le concept de « géométrie sans point de vue ». Il s'agit d'un cadre géométrique alternatif à la perspective centrale : il détermine des angles de vues précis sans pour autant ramener l'ensemble de la composition à un point de vue unique. Cette géométrie rend bien compte de la façon dont les compositions utilisées en dessin scientifique sollicitent l'imagination. Afin de porter cette réflexion dans le domaine de l'informatique graphique, je propose un algorithme permettant de « tourner autour d'un trait » (générer une série de vues d'un trait sous différents angles) sans faire appel à une caméra virtuelle. Ce travail suggère alors une connexion entre le dessin et la géométrie affine, ainsi qu'un nouveau sens pour la notion de « dessin vectoriel ».

Le second concept sur lequel je m'appuie est d'ordre philosophique : il s'agit de l'« inouï », que j'emprunte au philosophe François Jullien pour le porter dans le domaine du dessin. L'« inouï » permet de nommer un rapport au monde très familier pour les gens qui pratiquent le dessin d'observation : il s'agit à la fois d'échapper à l'ennui d'une représentation trop « plate » ou « schématique », qui recouvre et finit par cacher la richesse du réel, sans laisser pour autant la pensée se reporter dans un "au-delà" métaphysique, qui dépasse et fait oublier ce qui se trouve sous nos yeux. La « géométrie sans point de vue », qui repose sur les courbes plus que sur les lignes droites, apparaît alors comme une condition pour que le trait donne accès à la spatialité « inouïe » du vivant.

Dans la seconde partie de cette thèse, j'utilise ces concepts pour revenir sur cinq « expériences de réalisation » qui, sans prétendre couvrir tout le champ des sciences du vivant, en offrent une vision relativement large à travers ces différents thèmes :

- le dessin anatomique (animation par morphing de dessins de Léonard de Vinci)
- les débuts de la microbiologie (dialogue fictif entre Pasteur et Pouchet)
- l'immunité (création d'un livre expérimental pour tous publics)
- la biologie moléculaire (réalisation d'un poster sur la tubuline)
- la biologie cellulaire actuelle (visualisations dessinées à différentes échelles)

A travers ces travaux, je montre que l'enjeu de « dessiner la vie » est intimement lié au mouvement. Ce dernier, qu'on le nomme « animation » ou « motion design », permet alors une meilleure compréhension des ressources propres au dessin, au graphisme 2D et à l'imagerie 3D. Je conclurai en évoquant des pistes pour réintégrer le dessin dans la formation de jeunes designers, architectes, ingénieurs ou chercheurs.

En complément, une annexe regroupe plusieurs publications complémentaires, liées à la recherche d'un équilibre entre l'usage du dessin à la main et celui des outils numériques.

MOTS CLÉS

Dessin, Transmission scientifique, Sciences du vivant, Géométrie, Animation, Philosophie

ABSTRACT

After forty years of extensive developments in digital imaging, what are the challenges now of bringing drawing and life sciences together? An important revival of drawing in scientific transmission is currently taking place, in publishing, as well as in museography and in the field of animation. However, the great diversity of outputs and tools makes this phenomenon difficult to fully appreciate. Using papers and works created between 2016 and 2020, this thesis aims to introduce a number of concepts in order to understand what takes place in every attempt to "draw life".

The first step consists in focusing on the "stroke", while taking care not to reduce this resource purely to the representation of static forms. When taken together with inspiration from neuroscience, life sketches and animation make it possible to introduce the concept of "geometry without view-point". This is a different geometric framework to central perspective: it determines precise angles of view but it does not constrain the whole composition to a unique point of view. This geometry captures the way compositions used in scientific drawing stimulate the viewer's imagination. In order to transpose this phenomenon into the domain of computer graphics, I propose an algorithm for "turning around a stroke" (i.e. generating several views of a single stroke that has been made on paper), without the help of a virtual camera. This in turn suggests a connection between drawing and affine geometry, and a new meaning for the expression "vector drawing".

The second concept I use is philosophical: it is the "Inouï" (the "unnoticed"), taken from the philosopher François Jullien, which I transpose into the domain of drawing. The "Inouï" allows us to become aware of a challenge that is very familiar to those who practice observational drawing: that of avoiding becoming bored by a representation that is too "flat" or "schematic", which could ultimately obscure the richness of reality, while at the same time not letting your mind be overwhelmed by thoughts of a metaphysical "beyond", that makes you forget what is in front of your eyes. The "geometry without view-point" appears necessary in order to access to the "unnoticed" spatiality of living bodies, since this last one relies on curves more than straight lines.

In the second part of this thesis, I use these concepts to analyse five "production experiments". While not claiming to cover all fields of life sciences, they provide an overview through these different themes:

- anatomical drawing (morphing animation of Leonardo da Vinci drawings)
- early microbiology (fictional dialogue between Pasteur and Pouchet)
- immunity (experimental creation of a book for the general public)
- molecular biology (creation of a poster about tubulin)
- cell biology (visualisations across different scales)

Through this works, I show that "drawing life" is closely related to movement. Then, whether it is referred to as "animation" or "motion design", movement allows a better understanding of the resources particular to drawing, 2D graphics and 3D imaging. I conclude with suggestions for re-integrating drawing in the training of future designers, architects, engineers or scientists.

An annex gathers several complementary publications on the possibility of creating a better balance between drawing by hand and using digital tools.

KEYWORDS

Drawing, Scientific transmission, Life sciences, Geometry, Animation, Philosophy