

Léonard de Vinci, homme de science :

L'instigateur de la turbulence ?

Mémoire de Master 2 Lophisc

Loïc Tadriss

Sous la direction d'Anouk Barberousse

Septembre 2011

Table des matières

Introduction :	6
1. Approche historique de la turbulence des fluides	10
a. Avant le Moyen-âge : peu de mécanique des fluides	10
i. Les études des maîtres de l'Antiquité	10
ii. Savoir faire des constructeurs	12
iii. Les appareils antiques utilisant les fluides	13
iv. Un contact avec les savants arabes ?	14
b. Conceptions scientifiques au XV ^{ème} siècle	15
i. Philosophie Chrétienne : idéalisation de la nature	17
ii. La scolastique parisienne	22
c. Après Léonard de Vinci	26
i. Les tourbillons de Descartes	27
ii. La vision mécaniste des fluides : équation de Navier-Stokes	28
iii. Venturi, Reynolds et le développement de la turbulence au XIX ^{ème} et XX ^{ème} siècles.	30
iv. Aujourd'hui : deux approches de la turbulence	33
d. Histoire des carnets de Léonard de Vinci	35
2. Présentation de la proto-théorie de la turbulence de Léonard de Vinci	44
a. Pourquoi Léonard de Vinci dépasse-t-il la théorie des fluides de l'époque?	44
i. Représentation du monde en mouvement (opposition à la représentation statique : vocabulaire de la mécanique)	45
ii. Préoccupations d'ingénieur	48
b. Comment Léonard de Vinci dépasse-t-il la théorie des fluides de l'époque ?	49
i. Rupture lexicale : un nouveau langage pour répondre à de nouvelles questions	51
ii. Argumentation expérimentale	58
ii. La représentation des écoulements	59
3. Comment analyser l'apport de Léonard de Vinci dans la science de la turbulence ?	70
a. L'étude de Léonard de Vinci a-t-elle instauré un paradigme concernant la turbulence ?	70
i. Une théorie propice à développer un paradigme.	70
ii. Ne rentre pas dans le cadre de la structure des Révolutions scientifiques de T.S. Kuhn.	72
b. Léonard de Vinci est-il un précurseur ?	78
Conclusion	84
Bibliographie :	86

Introduction :

La turbulence est aujourd'hui considérée comme une sous discipline de la mécanique des fluides. Mal connue et peu étudiée, la turbulence intervient pourtant dans la vie de tous les jours. Nous avons besoin de la turbulence, aussi bien pour expliquer les mouvements de notre café lorsque nous le remuons le matin, que le mouvement des feuilles des arbres lorsque le vent souffle ou encore pour déterminer le temps d'attente nécessaire entre deux atterrissages consécutifs sur le même tarmac (il faut attendre que la zone de turbulence provoquée par le premier avion se soit dissipée pour que le second puisse atterrir sans danger.) Cette science traite des écoulements de fluides turbulents c'est-à-dire peu visqueux et très rapides. Les écoulements peu visqueux et très rapides se nomment, selon le vocabulaire utilisé dans le paradigme actuel, des écoulements à haut nombre de Reynolds. Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimension (sans unité) qui caractérise un écoulement. Ce nombre dépend de la vitesse de l'écoulement, de la viscosité cinématique du fluide et de la taille typique de l'écoulement ou de l'obstacle. En comparant ce nombre à un, on détermine si ce sont les effets visqueux qui régissent l'écoulement (faible nombre de Reynolds) ou bien si ce sont les effets dynamiques qui prédominent (haut nombre de Reynolds, turbulence). A haut nombre de Reynolds, les écoulements de fluides quels qu'ils soient (eau, air, hélium super critique, or fondu, fumées volcaniques, le café lorsqu'on le touille, etc.) se comportent de la même manière. Il y a apparition de tourbillons de différentes tailles qui permettent de dissiper l'énergie du fluide. Dans les manuels scolaires traitant de mécanique des fluides utilisés par les étudiants au cours de leur formation, la turbulence ne représente usuellement qu'un seul chapitre. Il existe pourtant une importante

communauté de chercheurs spécialisés sur le sujet, bien que le nombre de chercheurs se revendiquant appartenir à cette communauté soit décroissant. L'apogée de cette discipline a eu lieu dans les années 1970-1980 avec l'étude statistique des écoulements turbulents. La communauté actuelle publie toujours des ouvrages spécialisés en turbulence. Fait frappant, la plupart des physiciens spécialisés en turbulence font remonter l'origine de cette science à Léonard de Vinci.

Dans l'imaginaire du profane, Léonard de Vinci est le maître du sfumato, l'homme qui a peint la Joconde et dessiné l'homme de vitruve. Peintre génial, son œuvre ne se limite pas à cet art. Celui que l'on a nommé plus tard le Génie Universel s'est intéressé à beaucoup d'autres disciplines, a entrepris beaucoup d'autres travaux. Le monde moderne a surtout retenu ses dessins de dissections de corps humains et ses tentatives de conceptions de machines en tous genres. De la simple fontaine à l'hélicoptère en passant par les machines de guerre, nous avons imaginé Léonard de Vinci comme un inventeur fabuleux. Il est aussi reconnu dans le monde des biologistes et des géologues pour son travail sur les fossiles marins que l'on retrouve en montagne et la description de la formation des monts et des vaux. Ce que l'on connaît moins de cet homme, ce sont ses travaux d'ingénieur et de physicien. Notamment Léonard a étudié les mouvements de l'eau, et dans une moindre mesure ceux de l'air, et a essayé de les comprendre. La compréhension des mouvements de ces fluides avait pour but final une application concrète comme la construction de digues ou l'utilisation de la force de l'eau. Il n'en reste néanmoins pas vrai que Léonard de Vinci au cours de ces études sur les fluides (l'eau et l'air) a laissé une quantité phénoménale de notes, textes, dessins, schémas, croquis qui s'apparentent au travail du scientifique de la Renaissance qui tente de comprendre la nature.

Léonard de Vinci a été magnifié, presque mythifié au fil du temps au point qu'on lui ait attribué des qualités qu'il n'avait pas (deux exemples frappants : Léonard de Vinci était peu instruit, il ne maîtrisait pas le latin et avait des difficultés à utiliser le calcul mathématique.) Son image a même été utilisée pour l'unification de l'Italie au XIXème siècle en en faisant le héros italien en science et en art. Loin de ces préoccupations, ce mémoire vise à étudier de manière la plus objective possible le travail de Léonard de Vinci sur les écoulements turbulents et ses répercussions sur la théorie de la turbulence d'aujourd'hui.

A l'époque les travaux des hommes de science étaient menés de manière différente de ceux d'aujourd'hui, et il est nécessaire de s'interroger sur ce qu'a produit Léonard concernant ce que l'on appelle la turbulence. Ce mémoire met l'accent sur deux points principaux. Le premier porte sur la nature des travaux de Léonard de Vinci et leur portée. Les idées de Léonard de Vinci concernant les écoulements turbulents forment-elles une théorie ? Comment et pourquoi Léonard de Vinci rompt-il avec les études antérieures sur les fluides ? Quels sont les éléments théoriques ou expérimentaux nouveaux apportés par Léonard de Vinci ? Enfin, quels sont les éléments théoriques communs à théorie de la turbulence actuelle et aux idées de Léonard de Vinci ? Le second point s'inscrit dans le prolongement des questions précédentes. Il est relatif à l'analyse que l'on a fait aujourd'hui des apports de Léonard de Vinci à la turbulence. Léonard est-il le précurseur de la turbulence comme la plupart des scientifiques l'affirment ? Ses travaux ont-ils déclenché une révolution scientifique ? Comment les travaux de Léonard sont-ils parvenus aux scientifiques modernes ? Y a-t-il un lignage des idées de Léonard de Vinci, de son époque à aujourd'hui ou bien a-t-on décrété à posteriori que Léonard de Vinci était le précurseur de cette science ?

Le mémoire va être développé en trois parties. La première partie est une histoire de la turbulence, mettant en exergue la place de Léonard de Vinci dans cette discipline. La seconde partie s'intéresse plus étroitement aux travaux de Léonard concernant les fluides. Cette partie tente de faire une analyse historique et scientifique des moyens mis en œuvre par Léonard pour comprendre la turbulence. Elle s'attache à faire ressortir l'aspect paradigmatique des écrits de Léonard de Vinci sur la turbulence, c'est-à-dire un système d'interprétation de la turbulence comprenant les questions à se poser ainsi que les moyens d'y répondre (vocabulaire, type de raisonnement, éléments théoriques, dessins, méthode observatoire, etc.) Enfin la troisième partie rejette l'idée de révolution scientifique pour le travail de Léonard de Vinci mais insiste sur son rôle précurseur.

1. Approche historique de la turbulence des fluides

Le but de cette partie est de présenter une approche historique des travaux sur les fluides : Dans un premier temps les travaux qui ont eu lieu avant Léonard de Vinci. Ensuite, l'état de l'art au moment où vit Léonard de Vinci et enfin le devenir de la science des fluides après Léonard. Loin d'être exhaustive, cette approche historique reprend les principaux faits qui ont marqué l'histoire de cette science.

a. Avant le Moyen-âge : peu de mécanique des fluides

i. Les études des maîtres de l'Antiquité

De manière générale, on admet que l'Antiquité grecque est le point de départ des connaissances scientifiques modernes. La science occidentale s'est d'ailleurs développée pendant près de vingt siècles (entre le cinquième siècle avant Jésus Christ et le quinzième siècle de notre ère) sur des principes issus des maîtres grecs. Le courant humaniste de la renaissance caractérise ce retour aux textes antiques. L'étude des fluides n'échappe pas à cette constatation.

Le premier résultat théorique marquant est celui d'Archimède concernant les objets immergés dans l'eau. Archimède (287-212 avant Jésus-Christ) est un habitant de Syracuse (cité grecque implantée en Sicile). A l'image des savants antiques, il s'intéresse à plusieurs disciplines dont la physique, les mathématiques et l'ingénierie. En physique, il nous a légué le *traité des corps flottants* dans lequel se trouve le célèbre énoncé de la poussée

d'Archimède : « Un solide plus léger que le liquide dans lequel on l'abandonne s'y enfonce de telle façon qu'un volume de liquide égal à la partie immergée ait le même poids que le solide entier. » Ce traité pose les bases de la statique des fluides et plus largement de la mécanique des fluides. Léonard de Vinci sera fortement imprégné par les travaux d'Archimède (surtout après 1500, comme l'affirme Daniel Arasse dans Léonard de Vinci, le rythme du monde, p.94).

D'un point de vue philosophique, c'est le savant Aristote (384-322 avant notre ère) qui influencera la manière de penser les fluides au cours de l'Antiquité et du Moyen-âge. Sa physique se fonde sur quatre éléments fondamentaux : L'eau, la terre, le feu et l'air. Ces éléments possèdent chacun des propriétés qui leur sont propres. Chaque objet est constitué d'un mélange des quatre éléments et de ce fait reflète en proportion les propriétés des quatre éléments primaires. On peut remarquer que selon cette philosophie, l'eau et l'air sont deux éléments distincts qui possèdent des propriétés différentes et donc qui doivent se comporter différemment. Chaque élément possède un lieu propre qu'il souhaite rejoindre, au centre : la terre, la plus lourde, au dessus l'eau, plus légère. Encore au dessus l'air plus léger. Enfin le feu, élément le plus léger. Par exemple, si l'eau coule vers le bas, c'est qu'elle veut rejoindre son lieu naturel, juste au dessus de la terre.

La philosophie aristotélicienne du monde va s'imposer comme doctrine universelle durant toute l'Antiquité jusqu'à la fin du Moyen-âge. Les travaux grecs d'analyse et de théorisation des objets de la nature sont originaux dans l'antiquité, les Romains auront une vision beaucoup plus pratique et pragmatique des fluides.

ii. Savoir faire des constructeurs

Tous les peuples de l'Antiquité ont eu à utiliser l'eau ou le vent, soit pour irriguer soit pour utiliser leur puissance. Le peuple qui a sans nul doute réalisé les ouvrages d'art les plus importants est le peuple romain. Citons l'ouvrage le plus connus qui approvisionnait la ville de Nemausus (Nîmes) en eau : le pont du Gard. La maîtrise romaine de la construction d'ouvrage servant à endiguer l'eau fait preuve d'une grande connaissance du comportement de ce fluide. Sextus Julius Frontinus (40-103 après Jésus-Christ), homme politique romain (il fut trois fois consul) et ingénieur, rédigea *De aquis urbae Romae* en 95 après J.C. (Texte original : *De aquis urbae Romae*, Loeb Edition, 1925 ; Traduction en langue anglaise par Charles E. Bennett, Loeb edition, 1925). Dans ce traité, il décrit la technique de constructions des aqueducs romains et leurs propriétés. Bien que les travaux grecs soient largement répandus à l'époque, les romains étaient bien plus réalistes et bâtisseurs. Pour preuve cette citation de Frontinus : «Tot aquarum tam multis necessariis molibus pyramidas videlicet otiosas compares aut cetera inertia sed fama celebrata opera Graecorum.¹ » Le document tombé dans l'oubli au cours du Moyen-âge refait apparition dans le monastère Monte cassino situé dans la région du latium en 1429. Le moine Poggio Bracciolini qui redécouvrit cet ouvrage ne put l'exploiter rapidement : les fautes de copies étant très fréquentes et gênant la compréhension du manuscrit. On peut mettre en doute le fait que Léonard de Vinci ait eu connaissance de cet ouvrage directement car il n'est pas cité dans inventaires des livres lui ayant appartenus. Pourtant, on peut affirmer que le savoir des bâtisseurs romains s'est transmis jusqu'à Léonard de Vinci. Les ingénieurs de la Renaissance, souvent en admiration pour les travaux de l'Antiquité, connaissaient les techniques romaines.

¹ "Avec un tel panel de structures nécessaires pour transporter autant d'eau, compares, si cela est possible, les

iii. Les appareils antiques utilisant les fluides

Durant l'Antiquité, de nombreux appareils utilisant les fluides ont été inventés, certains d'entre eux étaient même courants. Notons par exemple la clepsydre (horloge à eau), le vase de Tantale (effet siphon) ou encore les moulins à eau. Le vase de Tantale est un dispositif très simple constitué d'un récipient (le vase) équipé d'une trompe à sa base. La trompe est un tuyau rigide qui remonte jusqu'à une certaine hauteur puis redescend. Quand le vase de Tantale est alimenté en eau par le dessus, le niveau d'eau monte dans le vase et dans la partie ascendante de la trompe. Dès que le niveau d'eau est suffisamment haut pour passer dans la branche descendante de la trompe, l'effet siphon s'amorce : le vase se vide complètement. Lorsque le vase est vide, la trompe se remplit d'air à nouveau. Si le vase est toujours alimenté en eau, le niveau monte de nouveau dans le vase et dans la branche ascendante de la trompe. On obtient ainsi un mouvement périodique de remplissage et de vidange du vase.

Concernant le moulin à eau, la première référence à un tel objet se situe dans le traité *De architectura* de Vitruve. Cet architecte romain (90-20 avant Jésus-Christ) a profondément influencé les penseurs de la renaissance. En particulier Léonard de Vinci, qui a repris l'idée de l'homme vitruvien dans son célèbre dessin de l'homme de Vitruve. Ce traité n'aborde pas seulement l'architecture romaine, mais aussi la technologie romaine. Vitruve notamment explique, dans son ouvrage *De architectura*, le fonctionnement des instruments d'arpentage nécessaires pour régler la pente d'un aqueduc. En relation avec les fluides, Vitruve décrit la construction et le fonctionnement des moulins à eau, des machines d'irrigations utilisées à l'époque (roue à aube, vis d'Archimède). Il dépeint les horloges à eau de l'antiquité, il consigne l'utilisation de techniques comme celle du siphon inversé (même principe que le

siphon du vase de Tantale mais le siphon est inversé vers le bas. On utilise cette technique pour transférer un fluide entre deux réservoirs en passant par un point moins élevé que les réservoirs.) Plus original encore, il décrit l'utilisation d'un éolipyle. Un éolipyle est une machine à vapeur utilisée par Vitruve comme expérience pour comprendre le mouvement des vents.

Il est clair que Léonard de Vinci a été influencée par l'œuvre de Vitruve, pas uniquement par ses travaux sur les proportions humaines mais aussi dans sa manière de comprendre les fluides. Cependant ni dans l'œuvre de Vitruve, ni dans celle de Frontinus, il n'est jamais fait référence à des mouvements de fluide turbulents.

iv. Un contact avec les savants arabes ?

Léonard de Vinci a-t-il eu un contact avec le monde arabe ? Après la stagnation sinon le recul des connaissances scientifiques en Europe durant le moyen-âge, le renouveau des connaissances de Léonard de Vinci est extrêmement puissant. Ce renouveau a-t-il été amplifié par le contact avec les penseurs arabes ?

Peu de documents attestent de ce contact, mais on peut quand même citer une lettre au sultan Bayezid II (retrouvée dans les archives du sérail de topkapi en 1952) dans laquelle est faite une proposition de construction d'un pont au dessus de la corne d'or (détroit du Bosphore) pour relier Galata à Stambul, un pont levis, un moulin à vent et un système de pompage automatique pour les bateaux (G.Renda, *The ottoman empire and europe : cultural encounters*, Foundation for Science, Technology and Civilisation n°662, 2006, p.5). On a retrouvé aussi les esquisses du pont imaginé dans les carnets de Léonard de Vinci (Manuscrit L de la bibliothèque de l'institut). Ce contact prouve que Léonard de Vinci a pu être influencé par la science arabe du Moyen-âge.

Au début du VIII^e siècle, le monde arabe voit la mécanique développer ses applications: horlogerie, hydraulique, automates. Des objets fascinants ravissent l'assistance des salons de divertissement des émirs. La musique n'est pas en reste, L'orgue hydraulique mécanique automatique est conçu au IX^e siècle par les frères Musa Ben Chaker. Mais cette science permet aussi, et c'est sûrement plus important, l'invention de machines utiles : jarre qui sert à mesurer la densité des liquides, appareil de phlébotomie (incision d'une veine en vue de pratiquer une saignée), drague servant à racler le fond d'un fleuve, etc. (Pierre-Louis Viollet, L'hydraulique dans les civilisations anciennes: 5000 ans d'histoire, presses des ponts, 2004.)

En conclusion de cette partie décrivant l'histoire des études des fluides avant Léonard de Vinci, les sciences antiques et arabes n'ont laissé que peu de place à la théorie de la mécanique des fluides. Les fluides restent l'apanage des ingénieurs et des bâtisseurs, la majorité des connaissances relatives à cette science sont des connaissances techniques. La relation entretenue avec l'eau et l'air se fait au travers des machines (moulins, automates, aqueducs, etc.) Notons au passage que la loi d'Archimède est une des rares connaissances théoriques relatives aux fluides. Enfin la philosophie aristotélicienne imprimera sa marque sur la manière de penser les fluides jusqu'à la Renaissance.

b. Conceptions scientifiques au XV^{ème} siècle

Le Moyen-âge occidental est souvent présenté comme une période de stagnation des connaissances scientifiques, un âge sombre dû aux grandes catastrophes (maladies, climat), aux guerres et à l'obscurantisme religieux. Mais les historiens actuels nuancent la vision réductrice de cette période (Émile Bréhier (1876 - 1952), La philosophie du Moyen-âge, 1949, Paris). Entre le V^{ème} et le VIII^{ème} siècle, la chute de Rome, les invasions barbares,

freinent considérablement le développement de la science occidentale. Durant cette période, « toute l'initiative intellectuelle revient à l'église », les moines sont les gardiens du savoir. Selon Emile Bréhier, c'est l'abandon du latin comme langue vulgaire au profit des langages populaires non écrites qui a empêché toute production de savoir. C'est seulement au VIIIème et au IXème siècle sous l'égide de Charlemagne que l'on relance de manière énergique les écoles en enseignant le latin classique comme une langue morte ([16], p.25). Ces écoles sont créées dans les abbayes, les monastères, les églises. L'activité est principalement une activité de copie des savoirs anciens, mais en occident, les sept arts libéraux échappent à la science divine : grammaire, rhétorique, dialectique, arithmétique, géométrie, astronomie, musique ([16], p.26). Ce sont ces disciplines qui vont se développer au cours du Moyen-âge.

Le XIIIème siècle marque un tournant dans l'histoire de la philosophie du moyen-âge. D'un point de vue politique, au début du siècle, la théocratie papale d'innocent III (pontificat de 1198 à 1215) ne connaît pas d'échec, elle domine l'échiquier politique en Europe. L'omniprésence politique de l'église va se voir contester dès la fin du siècle. Sous le pontificat de Boniface VIII (1295-1303), le pape se retrouve en opposition avec Philippe le Bel qui refuse l'ingérence de l'église dans les affaires de l'Etat. En moins de cent ans la puissance politique de l'église a fortement diminué. Cette tendance déflationniste de la place de l'église touche tous les domaines. Cependant d'un point de vue scientifique, le tournant est moins marqué. Il réside principalement dans la création d'universités indépendantes de la hiérarchie ecclésiastique locale. A l'époque, les écoles étaient dans l'immense majorité des écoles épiscopales et les maîtres étaient assujettis au contrôle de l'évêque. Pour sortir de cette domination de l'archevêché, il fallait dépendre directement du pape. En 1231, le pape Grégoire IX reconnaît la première université à Paris : Universitas

magistrorum et scolarium. A la fin du XIII^{ème} siècle, on compte quatre universités : Boulogne, Montpellier, Oxford et Paris. Au même moment, on redécouvre les textes d'Aristote ([16], p.242). C'est dans cette ambiance, un peu plus libre du joug ecclésiastique, que vont se développer les conceptions scientifiques du Moyen-âge.

i. Philosophie Chrétienne : idéalisation de la nature

En Europe au XV^{ème} siècle (siècle de naissance de Léonard de Vinci), deux philosophies se complètent : la philosophie aristotélicienne de la nature et la philosophie chrétienne. La philosophie du Moyen-âge a eu à résoudre le problème de la raison et de la foi. Comment faire coïncider les raisonnements et les croyances ? Dès le XII^{ème} siècle, le problème est clairement posé. Mais c'est au XIV^{ème} siècle que la discordance entre foi et raison éclate. On voit alors apparaître une discordance entre la vie intellectuelle et la vie mystique. Cette discordance va consolider les scientifiques dans leur but de trouver une nouvelle physique de la nature. Voici le terreau dans lequel va grandir Léonard de Vinci. Nous allons voir dans un premier temps quels sont les modes d'étude et de représentation des fluides pour chacune des philosophies.

1. Volonté religieuse de la représentation symbolique (l'art doit servir à éduquer le peuple)

Les conceptions que l'on pouvait avoir des fluides sont peu nombreuses à nous être parvenues. Peu de textes concernent directement le mouvement des fluides. Par contre la manière dont les hommes du moyen-âge imaginaient l'eau et le vent transparaît dans les œuvres de l'époque. Les sculptures, gravures, dessins et peintures nous renseignent sur la manière dont on concevait les mouvements des fluides.

Dans un premier temps (avant le XVème siècle), les techniques picturales ne permettaient pas de représenter correctement les objets transparents comme l'eau ou l'air. Ce sont les améliorations du XVème siècle avec l'invention du sfumato et des dégradés de couleur. Ils étaient souvent représentés par un symbole. Par exemple un poisson pour l'eau et un oiseau pour l'air. L'art du début du moyen-âge avait pour vocation d'éduquer et non de représenter la réalité ([2], p.36). Quand on dessine le baptême d'une personne, sont figurés l'eau via les poissons et les autorités religieuses ainsi que le geste à effectuer, par contre l'artiste n'insiste pas sur la texture de l'eau ni sur sa manière de couler. Les artistes de l'époque représentaient donc un monde idéalisé, simplifié. C'est au XVème siècle que les techniques picturales évoluent et permettent aux artistes de donner une image du monde plus conforme à la réalité. Cependant, la valeur symbolique que l'on a prêté à l'art ne va pas s'éteindre tout de suite et va perdurer jusqu'au XVIème siècle. La représentation moyenâgeuse, symbolique, de l'art ne permet pas de figurer un monde en mouvement. Les personnages sont figés et les rares mouvements, figurés de manière symbolique ou très grossière. C'est le nouveau mode de représentation picturale du mouvement et des fluides développé par Léonard qui lui permettra de détecter nombre d'anomalies.

2. Conception du monde sous 4 éléments

Au moyen âge, le monde est perçu conformément aux enseignements transmis par les moines. Vers la fin du moyen-âge sont créées les premières universités qui tentent de s'affranchir de la censure religieuse de l'époque. Cependant dans les deux cas le monde est perçu de la même manière : le monde est composé de quatre éléments : l'eau, l'air, la terre et le feu. Cette conception, fortement inspirée de la philosophie aristotélicienne, constitue le

paradigme de l'époque. Les observations scientifiques (aussi bien physiques que médicales) au moyen-âge et du temps de Léonard sont expliqués par les propriétés de chacun des éléments (poids, volatilité, chaleur, humeur, etc.). Pour comprendre la culture de Léonarde, il faut sans aucun doute comprendre comment lui-même a appris à voir le monde. Quelle est la conception des quatre éléments ? Et comment était-elle enseignée à l'époque de Léonard ?

a. Symbolique des éléments (Eau-Air-Terre-Feu)

Au moyen-âge, le paradigme des quatre éléments qui est un mélange de philosophie aristotélicienne et de théologie chrétienne est en vogue. En quoi consiste-t-il ?

Le monde est constitué de quatre éléments : L'air, l'eau, la terre et le feu. Tous les corps terrestres sont un mélange de ces quatre éléments. L'homme par exemple est un mélange des éléments. Hildegarde de Bingen (1098-1179) donne l'exemple du corps humain : « Lorsque Adam fut formé de la terre, le feu l'excita, l'air l'anima et l'eau l'envahit de sorte qu'il se mouvait totalement » (Hildegarde de Bingen, *Causae et curae*, p.44.)

Chacun de ces éléments a des propriétés qui diffèrent du plus ou du moins les unes des autres. La terre est plus lourde que l'eau, qui elle-même est plus lourde que l'air qui lui-même est plus lourd que le feu. Les propriétés couramment utilisées en physique à l'époque sont le poids et la volubilité des éléments. Les éléments ont aussi des caractéristiques intrinsèques : L'air est chaud et humide, le feu chaud et sec, la terre froide et sèche et l'eau froide et humide. C'est à partir de ces caractéristiques que l'on a pu commencer à élaborer des raisonnements complexes sur les faits constatés. Par exemple, l'eau s'écoule vers le bas pour rejoindre son lieu naturel : le centre de la sphère aqueuse. La terre se situe en dessous de l'eau car la terre est plus lourde que l'eau et ainsi de suite. Les propriétés des éléments

n'étaient pas que physiques, elles expliquaient bon nombre de faits médicaux : l'air est associé au sang et doté des mêmes propriétés, la terre est associée à la bile noire, l'eau à la lymphe ou au flegme et le feu à la bile jaune. La prédominance d'un de ces caractères physique suffit alors pour expliquer le tempérament de quelqu'un ou bien la naissance d'une maladie.

L'univers du moyen-âge est un univers organisé où chaque chose a une place précise. Les choses sont figurées de manière symbolique et abstraite. Il n'y a que très peu de place laissée pour l'expérience ressentie par les hommes dans cette conception du monde.

b. L'eau et l'air

L'eau et l'air sont les deux éléments fluides présents au moyen-âge. Comment Léonard de Vinci les a-t-il appris à les percevoir ? Quelles sont leurs caractéristiques et comment sont ils représentés ?

Avant le XVème siècle, l'air est figuré de manière symbolique sur les peintures. Il est représenté par des anges volants dans le ciel, un fond bleu, parfois des petits nuages très simples et réguliers à but décoratifs subsistent. Les romains en effet dessinaient les nuages présents dans le ciel. Le royaume de Dieu est lui-même représenté dans le ciel sur certains tableaux.

L'invention de la représentation fidèle des nuages et des perturbations météorologiques dans le ciel se fait au XVème siècle par les Van Eyck (Flandres, nord de l'Europe). Le ciel n'est plus représenté de manière symbolique, les oiseaux présents sont là pour rendre le ciel sensible, tout comme les nuages et les dégradés de bleus qui donnent de la profondeur aux tableaux de l'époque. C'est après ce renouveau des techniques picturales (1425- 1450)

qu'arrive Léonard de Vinci. Il a à sa disposition les techniques pour représenter l'air immuable, fixe.

Concernant l'eau, ce deuxième élément suit une destinée comparable : jusqu'au XVème siècle, l'eau est représentée de manière uniforme, quasi symbolique. La présence de poissons la diffère de l'air ambiant dans les tableaux de l'époque. L'évolution des techniques de la peinture rendent possible la représentation de la transparence, de l'écume, des vagues et des reflets. Encore une fois, Léonard de Vinci qui naît en 1452 possède toutes ces techniques de représentation. Toutefois au XVème siècle, le monde hésite encore entre la vertu symbolique de l'art et l'imitation de la nature.

c. Le chaos originel, genèse

Aujourd'hui nous employons parfois le mot « Chaos » comme synonyme de turbulence. Que voulait dire ce mot à l'époque ? La définition biblique du chaos décrit-elle les mouvements que nous appelons turbulents ?

Le chaos biblique est le commencement du monde. Le chaos est une « masse informe » d'où s'organise et ressort le monde ordonné que nous connaissons. Du chaos, le ciel est séparé de la terre, et le cercle représentant le monde se substitue à l'informe. Il y a, à ce moment là, séparations des éléments et leur répartition dans le monde. Le chaos pour un homme de l'époque ne peut pas avoir une signification semblable à la notre, et la description biblique du chaos n'est en rien celle de la turbulence. Il n'y a pas de tourbillons, il n'y a pas de fluides en question. Le chaos moyenâgeux reste cantonné à sa description faite dans la Bible. Léonard n'a donc pas pu s'inspirer de cette partie de la bible pour décrire les écoulements turbulents.

ii. La scolastique parisienne

Le développement intellectuel du moyen-âge s'est construit autour des universités, et plus précisément la scolastique parisienne. En effet, c'est à Paris que naît la première université en 1231. Dans cette université sont professés des cours de science et notamment de mécanique qui influenceront la conception de la mécanique galiléenne. C'est l'ensemble des savants qui ont professé dans cette université, que l'on regroupe sous le nom de scolastique parisienne. Cette scolastique a largement influencé Léonard de Vinci.

1. La scolastique Parisienne : Les maîtres de Léonard de Vinci

Voici un exemple de raisonnement qui décrit l'utilisation du paradigme des quatre éléments dans l'explication scientifique de l'époque. Ce raisonnement est effectué par Albert de Saxe (appartenant à la scolastique parisienne) et nous est rapporté par Duhem dans Léonard de Vinci tome 1 p.12 : « L'eau », dit-il, « ne forme pas le lieu naturel de la Terre tant que le centre de gravité de la Terre n'est pas le centre du Monde. Il ne suffit pas qu'une portion de la Terre se trouve entourée d'eau pour qu'elle soit en son lieu naturel et demeure immobile ; car alors son centre de gravité n'est point encore le milieu du Monde, et le centre de gravité de l'agrégat total qu'elle forme avec le reste de la Terre n'est point non plus au centre du monde ; elle continue donc à descendre jusqu'à ce que le centre de gravité de tout l'agrégat formé par cette portion de la Terre et tout le reste de la Terre se trouve au centre du monde. » Ce type de raisonnement possède deux caractéristiques importantes pour l'époque. La première c'est qu'il s'affranchi de la science divine, Dieu n'intervient pas dans ce raisonnement. La seconde caractéristique, c'est que ce raisonnement est emblématique de la théorie aristotélicienne. Il utilise la théorie des quatre éléments à laquelle il mêle les esquisses du vocabulaire de la mécanique nouvelle (« centre de gravité »).

La scolastique parisienne s'intéresse à la compréhension fondamentale du monde, à la place naturelle des objets, à ce qui les meut, à l'hydrostatique et surtout à la mécanique. Les auteurs principaux de cette période sont Albert de Saxe, Villalpand, Nicolas de Cuès et Thémon le fils du juif. Ce dernier, a beaucoup écrit sur l'eau. Léonard reprendra en les critiquant nombre d'idées de Thémon le fils du juif dans son Œuvre, notamment l'explication de l'écoulement de l'eau dans les montagnes, les détroits des mers. Il trouvera dans les écrits de Nicolas de Cuès des passages entiers concernant les mouvements en spirale appliqués à la mécanique (Duhem, Tome 2, p.220 et p.252). Les raisonnements de la scolastique parisienne sont basés sur la théorie des quatre éléments mais font revenir l'expérience sensible au premier plan de la science du moyen-âge. C'est dans les universités que l'on développe la mécanique et que l'on commence à s'intéresser aux mouvements des solides. Léonard possède dans sa bibliothèque et a lu quelques ouvrages des maitres de la scolastique. Cette période influencera fortement le début du traité des eaux de Léonard de Vinci.

2. La bibliothèque de Léonard de Vinci

Les livres personnels de Léonard de Vinci forment une partie du terreau intellectuel dans lequel il a fait pousser ses idées. Sans être une liste exhaustive des inspirations de Léonard de Vinci, les livres, très rares à l'époque (l'invention de l'imprimerie par Gutemberg n'a lieu qu'en 1439), donnent une excellente indication sur les différents mouvements intellectuels sur lesquels la pensée de Léonard de Vinci a pu se modeler. Bien sur, et surement de manière plus importante qu'aujourd'hui (la transmission orale des savoirs étaient encore très répandue), les discussions, les échanges vocaux entre personnes peuvent faire jaillir de nombreuses idées, c'est pour cela que l'on ne peut pas dire formellement que l'ensemble

des inspirations de Léonard de Vinci provient de son éducation chez le maître Verrocchio et de ses lectures. Verrocchio (1435-1488) est un peintre, sculpteur et orfèvre italien. Il possédait le plus grand atelier d'art de Florence. Parmi ses œuvres les plus célèbres, on retrouve la vierge à l'enfant, une statue de David, ou encore le baptême du christ réalisé en partie par Léonard de Vinci.

En 1505, Léonard de Vinci possédait 116 livres, nombre considérable pour l'époque (Folio 2v et 3r du manuscrit de Madrid II), l'invention de l'imprimerie par Gutenberg ayant eu lieu soixante cinq ans auparavant. En comparant cette liste à une liste du Codex Atlanticus, folio 210r-a, on estime qu'il aurait eu en sa possession plus de deux cent ouvrages, somme considérable pour l'époque. Cette bibliothèque que s'est constitué Léonard tend à le différencier des autres scientifiques de l'époque : Léonard veut dépasser sa condition d'homme non instruit (« Uomo senza lettere »). Ses acquisitions de livres commencèrent à son départ de Florence en 1483 et sa bibliothèque s'enrichira très vite à partir de cette période. Cinq livres en 1483, quarante en 1490 et 116 en 1505.

En 1505, la bibliothèque s'organise autour des sciences et techniques qui représentent la moitié des 116 livres (51 de science et 7 de technique). Cette prédominance des lectures scientifiques dans la bibliothèque de Léonard de Vinci prouve l'importance de son travail d'ingénieur dans sa vie intellectuelle. Le reste de la bibliothèque est constitué de lectures religieuses (14 ouvrages) et profanes (25 ouvrages) et enfin par 16 ouvrages consacrés à l'étude du vocabulaire et de la grammaire latine. Ces seize ouvrages trahissent l'importance de l'acquisition de la langue latine pour Léonard. En effet, ce fils de notaire n'a pas reçu une éducation classique d'un homme lettré de l'époque. Dans sa prime jeunesse, l'enfant a pu avoir accès à la bibliothèque paternelle mais dès douze ans, c'est-à-dire avant qu'il ait pu

profiter pleinement de ce réservoir, il suit les cours d'abaco (la scuole di abaco correspond au collège d'aujourd'hui, on y apprend des connaissances pratiques, lire ou compter simplement et des connaissances religieuses en langue vulgaire. Les mathématiques qu'on y enseigne ne dépassent pas celles dont le marchand a besoin pour ses affaires.) A quinze ans, il s'écarte de la voie des lettrés de l'époque et rentre directement dans l'atelier de Verrocchio. Il n'aura pas pu apprendre ni les mathématiques ni le latin dans une scuole di lettere, langage classique des scientifiques de l'époque. Ce point est décisif dans l'apport scientifique de Léonard de Vinci de deux manières. Premièrement, Léonard ne pourra pas avoir accès à toutes les publications scientifiques de l'époque. Son esprit reste libre, il ne s'encombrera pas de certaines idées préétablies, hormis en mécanique où l'on sent dans le vocabulaire qu'il utilise une imprégnation des idées en vogue à ce moment là. On retrouve aussi certaines références à la statique des fluides développée par certains auteurs de la scolastique parisienne. Cependant, les résolutions de statique des fluides empruntent le même vocabulaire que celui utilisé en mécanique à l'époque. Deuxièmement, l'ignorance du latin classique va écarter Léonard de Vinci du contingent déjà restreint des scientifiques. Il ne pourra pas échanger convenablement ses idées avec les autres hommes de science. Cela explique en partie pourquoi Léonard de Vinci travaillera seul tout au long de sa vie, et cela explique aussi peut-être pourquoi ses conceptions de la turbulence n'ont pas pu se répandre lors de son existence. Outre l'absence d'échange avec les autres scientifiques de l'époque et la mise à l'écart de Léonard de Vinci, l'ignorance de la langue latine va ajouter une bonne partie d'inconsistance et d'imprécision au langage du savant car le vieux toscan ne comporte pas autant de termes abstrait que le latin, d'où la difficulté à comprendre certains énoncés scientifiques de Léonard. Léonard va dépasser le mode de transmission des pensées de

l'époque, d'une transmission orale, il va, grâce à ses dessins, passer à une transmission visuelle.

c. Après Léonard de Vinci

A la mort de Léonard de Vinci en 1519, il n'y a pas un réel engouement pour la mécanique des fluides en Europe. La majorité des savants s'en tiennent à quelques rudiments de statique des fluides, la passion du moment est pour la mécanique. Ainsi, Galilée traitera peu des fluides, mais ce sont ses élèves, empreints de sa méthode expérimentale qui vont s'intéresser aux fluides. Toricelli (1608-1647) est l'élève de Castelli qui lui-même est un ami et un disciple de Galilée. Toricelli a découvert la pression atmosphérique et il a inventé un baromètre à mercure. Notons que la pression exercée par un millimètre de mercure est toujours aujourd'hui appelé un torr en son hommage. Mais ce pourquoi est connu Torricelli c'est la formule éponyme qui relie la vitesse d'écoulement d'un réservoir percé à la hauteur d'eau située au dessus du trou.

Les efforts italiens en mécanique des fluides vont se transmettre à toute l'Europe et les découvertes vont se succéder. Blaise Pascal (1623-1662) est connu pour sa compréhension de l'hydrostatique à travers l'expérience du tonneau de Pascal. Il montre que la pression ne dépend que de la hauteur de fluide et non pas de la masse de fluide située au dessus. Il réussit, en remplissant un tuyau très fin placé au dessus d'un tonneau, à faire éclater ce dernier. Duhem soutient dans son ouvrage [16] que les idées concernant l'hydrostatique se sont transmises de Léonard de Vinci aux scientifiques du XVIIème siècle.

La mécanique des fluides jusqu'au XVIIème siècle, ne se penche pas du tout sur les mouvements et la dynamique des fluides. Les scientifiques de l'époque restent cantonnés à des expériences simples de statique des fluides. Le développement de la mécanique de

Newton va débloquent cette approche. Cependant, nous allons le voir, la vision mécaniste Newtonienne va donner une direction aux recherches en mécanique des fluides. L'approche descriptive de la turbulence proposée par Léonard de Vinci ne trouvera pas d'écho dans les scientifiques de cette époque.

i. Les tourbillons de Descartes

Après Léonard de Vinci, certains grands penseurs ont eux aussi imaginé des tourbillons. Nous allons montrer ici en quoi les tourbillons imaginés par ces penseurs sont loin de ceux qu'on peut imaginer pour des fluides. Ces tourbillons ont été imaginés pour décrire d'autres phénomènes comme ceux d'agglomération cosmologique. Ils n'ont donc aucun lien direct ni en amont avec les écrits de Léonard de Vinci, ni en aval avec la turbulence actuelle.

Tout d'abord les tourbillons de René Descartes (1596-1650) apparaissent dans la construction théorique du cosmos par l'auteur. Descartes, toujours empreint de la théorie des quatre éléments, tente d'expliquer les observations cosmologiques de l'époque. Les tourbillons sont constitués des particules de terre, d'air et de feu. Les particules de feu les plus légères et les plus rapides sont situées au centre du tourbillon, les particules d'air de taille moyenne sont situées dans la partie médiane du tourbillon et enfin, les particules de terre, plus lourdes et moins rapides sont rejetées sur les extérieurs du tourbillon. De ce fait, chaque tourbillon contient en son centre une étoile. Les étoiles se pressent les unes sur les autres ce qui a pour effet de recouvrir certaines étoiles de matière lourde (élément terre) qui les empêche de briller. Le tourbillon qui avait lieu autour de cette étoile disparaît alors et l'étoile couverte de matière lourde se déplace dans d'autres tourbillons et peut devenir une planète. Il me paraît clair que ce modèle de formation de tourbillon est purement cosmologique, en tout cas au départ dans l'esprit de Descartes. La question que l'on peut se

poser est peut-on imaginer transposer ces tourbillons cosmologiques à la mécanique des fluides ? Autrement dit, Descartes a-t-il pu influencer la création plus tardive de la turbulence ?

Les tourbillons tels que décrits par Descartes ne sont pas compatibles avec ceux énoncés par la théorie de la turbulence, et ils en diffèrent par plusieurs points. Premièrement les tourbillons de Descartes font intervenir plusieurs types de particules dont on peut supposer certaines solides (les particules de terre). Ce ne sont pas des particules de fluide. Le deuxième argument que l'on peut opposer, c'est que Descartes ne décrit pas la structure de ses tourbillons, et il semble que ce soient des tourbillons à deux dimensions. Il est difficile d'imaginer que l'on puisse transposer ce modèle de tourbillon cosmologique auquel il manque beaucoup d'attributs (taille des tourbillons, relations entre les tourbillons, mode de création des tourbillons, etc.) à la turbulence. D'ailleurs, la théorie cartésienne des tourbillons cosmiques, un temps étudiée par les hydrodynamiciens est tombée en désuétude dès le XIX^{ème} siècle lorsque l'on a abandonné la théorie de l'éther.

ii. La vision mécaniste des fluides : équation de Navier-Stokes

Après les premières tentatives d'expérimentation au XVII^{ème} siècle concernant l'hydrostatique, la science des fluides, à l'instar de la physique, a pris un tournant significativement mécaniste. La publication en 1687 des *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* par Isaac Newton (1643-1727) est le tournant scientifique du XVII^{ème} siècle. Les principes de la mécanique newtonienne vont influencer la manière de penser des savants de l'époque. En mécanique des fluides, c'est en Suisse que les développements ont lieu. Daniel Bernoulli publie en 1738 *hydrodynamica, sive de virius et motibus fluidorum*

comentarii (hydrodynamique, un essai sur les forces et les mouvements des fluides). Bien que proposant une nouvelle approche unificatrice de l'hydrostatique et de l'hydraulique, cet ouvrage de Bernoulli ne crée pas l'approche moderne sous laquelle nous étudions les fluides. Il propose d'étudier les fluides avec la théorie de la mécanique. Il fait de nombreuses analogies au pendule pesant par exemple et en déduit le théorème de Bernoulli. Cependant, il n'arrive pas à mathématiser correctement les écoulements fluides et d'autres auteurs vont se pencher sur la question.

Les premières équations de mécanique des fluides sont écrites par Jean le Rond d'Alembert (1717-1783) en 1749. Bien qu'il développât le concept de pression interne au fluide, il échoua à décrire correctement le phénomène de résistance des fluides. Il laissa son mémoire inachevé sur le paradoxe de d'Alembert. Ce paradoxe selon lequel un solide n'est soumis à aucune résistance à son déplacement dans un fluide n'est résolu que plus tard par la découverte de la viscosité des fluides. D'Alembert avait toutes les cartes en main pour dériver l'équation de la quantité de mouvement des fluides parfaits (de viscosité nulle) mais cette équation est trouvée par Leonhard Euler (1707-1783) en 1752.

Les équations trouvées par Euler ne sont pas complètes, elles ne décrivent pas les fluides réels. Notamment ces équations ne tiennent pas compte des dissipations que peuvent provoquer les frottements à l'intérieur du fluide. Claude-Louis Navier, ingénieur de l'école polytechnique et des ponts et chaussées développa une théorie moléculaire pour les écoulements fluides. Il trouva en 1823 l'équation de Navier-Stokes pour un fluide incompressible. Cette équation fut retrouvée par presque tous les scientifiques de l'époque : Cauchy, Poisson, Saint Venant, Stokes, Helmholtz et Maxwell. L'Irlandais George Stokes

(1819-1903) est surtout connu pour ses études sur la viscosité (le paramètre dissipatif de l'équation de Navier-Stokes).

Les succès pour décrire les fluides grâce à cette équation ont été nombreux. Les marées, les vagues, les efflux, la pluie, les vitesses d'écoulement, etc. sont très bien décrits par l'équation de Navier-Stokes. La vision mécaniste des fluides a connu au cours du XIX^{ème} siècle de nombreux succès. Le seul domaine qui résiste à cette équation et reste imprévisible est celui de la turbulence.

iii. Venturi, Reynolds et le développement de la turbulence au XIX^{ème} et XX^{ème} siècles.

Comment la turbulence revient-elle sur le devant de la scène scientifique ? La vision mécaniste et ses nombreux succès ont provoqué un engouement immédiat au sein de la communauté scientifique. Depuis l'énoncé des lois de la mécanique par Newton et les avancées mathématiques qui ont permis de mathématiser la science, les scientifiques se sont bien peu intéressés à la turbulence. Pourtant, les écrits de Léonard de Vinci sur la mécanique des fluides sont redécouverts en partie par Giovanni Battista Venturi (1746-1822) en 1797 et définitivement publiés de manière quasi intégrale par Francesco Cardinali en 1826. On trouve la trace de l'ouvrage de Francesco Cardinali *De moto e misura dell'acqua* dès la fin du XIX^{ème} siècle dans les grandes universités américaines (avant 1899 à Harvard). Venturi n'a pas seulement étudié les écrits de Léonard de Vinci, il était un scientifique de renom connu pour ses travaux en acoustique et en mécanique des fluides. En acoustique, il a défini l'étendue de la bande de son audible, mais sa contribution majeure à la science est la découverte de l'effet Venturi. Cet effet relie la vitesse d'un fluide à la pression. Par conservation du débit, un rétrécissement de la section d'un tube engendre une

augmentation de vitesse du fluide et une diminution de pression. L'ouvrage décrivant l'effet Venturi est écrit en 1796 à Paris, soit au même moment où les carnets de Léonard de Vinci sont transférés à la capitale. Tout laisse à penser qu'une imprégnation des idées de Léonard de Vinci chez les savants qui s'intéressent aux fluides au cours du XIX^{ème} siècle ait pu avoir lieu. D'ailleurs Venturi fait référence aux tourbillons dans ses écrits dès 1797 au cours des discussions visant à résoudre le paradoxe de d'Alembert. Il défend l'idée de friction interne entre deux couches de fluides. D'après Venturi, les tourbillons sont dus au mouvement communiqué par les parties les plus rapides du courant à celles moins rapides situées sur les parties latérales. On est frappé dès lors par deux ressemblances avec Léonard de Vinci. D'une part, Venturi accompagne son propos de dessins réalisés à la manière de Léonard de Vinci (vue de dessus, lignes de courant, lieu de formation des tourbillons) et d'autre part, il décrit la formation des tourbillons dans les rivières, sujet phare de Léonard de Vinci. Il fait de la présence de tourbillons dans les rivières une explication de la diminution de vitesse du courant dans les rivières. Le mémoire de Venturi a été bien reçu à l'académie Française. Il a été moteur pour faire revivre la vieille notion newtonienne de friction dans un fluide.

Au XIX^{ème} siècle, les grands noms de la turbulence sont Saint-Venant (1797-1886) et Boussinesq (1842-1929). Tout d'abord, Saint-Venant, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, s'intéresse dès 1834 à la turbulence. Suite aux travaux de Poncelet (1788-1867), il adhère à l'idée que les tourbillons de fluide permettent de changer un mouvement macroscopique en un mouvement microscopique, c'est-à-dire en chaleur. Saint-Venant parvient à expliquer grâce à cette théorie que les tourbillons créent une résistance à l'écoulement. Boussinesq, hydrodynamicien français originaire de l'Hérault est accueilli à Paris par Saint-Venant qui en fait son disciple. Le principal fait scientifique de Boussinesq (hormis son travail sur les instabilités et la résolution des équations de Navier-Stokes dans des géométries

particulières) est la mathématisation de l'écoulement turbulent. A partir de l'équation de Navier-Stokes, et en rajoutant une variable de viscosité effective, il déduit les profils de vitesse moyens dans un fluide turbulent. C'est la première fois que l'on introduit la statistique (ici une simple moyenne) dans la description de la turbulence.

C'est dans les années 1880 que William Thomson dit Lord Kelvin (1824-1907) a popularisé l'usage du terme « turbulent » pour qualifier un écoulement désordonné et chaotique. La turbulence fait un grand pas en avant en 1883 avec la publication de "*The Law of Resistance in Parallel Channels*" par Osborne Reynolds (1842-1912). Dans cet article Reynolds étudie la vitesse critique de transition entre deux régimes : le régime laminaire et le régime turbulent dans lequel se créent des tourbillons (« eddies » dans le texte original en anglais). Ce travail résultera sur la création d'un nombre sans dimension qui porte son nom : le nombre de Reynolds. Ce nombre sans dimension est le plus utilisé par les hydrodynamiciens actuels, et encore plus par les physiciens travaillant sur la turbulence. Ce nombre permet sans grand calcul de savoir la nature de l'écoulement.

$$Re = \frac{rv}{\mu}$$

Où r est la dimension caractéristique de l'écoulement exprimée en m .

v est la vitesse du fluide exprimée en $m.s^{-1}$

μ est la viscosité cinématique du fluide exprimée en $m^2.s^{-1}$

Si le nombre de Reynolds est inférieur à 1, l'écoulement est dit laminaire. Les couches de fluides frottent les unes sur les autres sans se mélanger. Il n'y a pas de tourbillons, l'écoulement est très régulier. Si le nombre de Reynolds est supérieur à 1, l'écoulement est dit turbulent. Les couches de fluides se mélangent en formant des tourbillons, le mouvement est chaotique et imprévisible. C'est le domaine de la turbulence. Plus le nombre

de Reynolds est élevé plus l'écoulement est turbulent. Cet indicateur très sommaire permet de distinguer très facilement et très rapidement deux types de comportement d'un fluide, c'est pourquoi il est très utilisé dans la communauté scientifique.

A la fin du XIXème siècle, les bases sont posées pour que la turbulence se développe rapidement grâce aux théories statistiques que les physiciens maîtrisent déjà à l'époque. Les avancées significatives au début du XXème siècle sont faites par Prandtl (1875-1953) qui décrit le mélange à l'échelle moléculaire. Il introduit le nombre de Prandtl fixant une échelle à laquelle les échanges entre mouvement et chaleur ont lieu. Cependant la contribution majeure a été celle d'Andreï Nicolaïevitch Kolmogorov (1903-1987). Le mathématicien et physicien russe publie en 1941 sa théorie de la turbulence. Il veut comprendre de quelle manière se fait le transfert d'énergie du mouvement macroscopique au mouvement microscopique c'est-à-dire en chaleur. Pour ce faire, il suppose l'existence d'une cascade d'énergie entre les différentes échelles de l'écoulement. Dans la limite des hauts nombres de Reynolds, il suppose que l'énergie est transmise des grandes échelles aux petites échelles en passant par des échelles intermédiaires sans perte d'énergie à un rythme constant ϵ . Kolmogorov a réussi à modéliser un ensemble de tourbillon (la modélisation d'un tourbillon individuel n'existe pas encore) dissipant de l'énergie. Cette modélisation est purement statistique et ne repose en rien sur l'équation de Navier-Stokes.

iv. Aujourd'hui : deux approches de la turbulence

Depuis les années 1970 et l'avènement de la modélisation numérique, l'équation de Navier Stokes a repris du service en turbulence. L'approche de Kolmogorov étant faite par loi d'échelle, elle laisse la possibilité de trouver des variations importantes avec la réalité. Cette équation ne décrit que grossièrement le système. La plupart des ingénieurs et mécaniciens

des fluides ne l'utilisent que pour trouver des ordres de grandeur. Les données précises sont soit trouvées par l'expérimentation (notamment en soufflerie, cellules de Hele-Shaw, dispositifs spéciaux, etc.) soit par modélisation numérique grâce à l'équation de Navier-Stokes. La puissance actuelle des ordinateurs permet une modélisation toujours plus fine des écoulements turbulents fluides. Cette approche numérique s'essouffle peu à peu devant la longueur des calculs et la complexité des phénomènes mis en jeu. De plus, en évitant les simplifications nécessaires à l'étude de la physique, l'expérimentation numérique ne permet pas de tirer des lois générales du comportement des fluides. Certains mécaniciens des fluides retournent peu à peu vers la théorie de Kolmogorov.

Actuellement, la physique statistique des champs a permis, sous certaines hypothèses, de faire le lien entre l'équation de Navier-Stokes et la loi de Kolmogorov. La turbulence est enfin réunifiée. On a retrouvé l'exposant de dissipation d'énergie en fonction du temps. Les résultats de la physique statistique des champs appliqués à la turbulence sont plus précis et plus rigoureux que ceux de Kolmogorov, ils s'accordent mieux à l'expérience.

En conclusion de cette première partie essentiellement historique, l'accent doit être mis sur la place de Léonard de Vinci dans la science des fluides. Il est essentiel de remarquer qu'il s'incarne dans une période dominée par la religion et la science divine. Après de nombreux siècles de stagnation des connaissances scientifiques, la scolastique parisienne relance la science occidentale. (On brûlera encore Giordano Bruno un siècle plus tard) A l'époque, les avancées techniques sont aussi faibles, la maîtrise des eaux est restée la même depuis l'antiquité les aqueducs et les moulins classiques sont les appareils les plus sophistiqués de l'époque, ce qui nous permet d'apprécier l'extrême inventivité de Léonard. D'un point de

vue scientifique, les vues scientifiques de Léonard sont singulières. En effet, les scientifiques de l'époque ne portent que peu d'attention aux fluides en mouvement. C'est la statique des fluides qui va se développer pendant deux cent ans. Les idées de Léonard de Vinci n'auront donc aucun écho direct dans le monde scientifique. Les études de la turbulence vont recommencer au début du XIXème siècle. En essayant de résoudre le problème de d'Alembert, Venturi remettra au goût du jour la vision de Léonard de la turbulence.

d. Histoire des carnets de Léonard de Vinci

Le fait que les travaux de Léonard de Vinci soient tombés dans l'oubli a deux sources majeures. Comme nous l'avons mentionné au début du paragraphe, l'intrication et le désordre des notes dans les carnets de Léonard de Vinci n'a pas permis une utilisation correcte de ses carnets. Pour saisir la portée des travaux de Léonard de Vinci, s'accoutumer à sa nouvelle manière de voir le monde, il faut pouvoir connaître toutes les subtilités de son œuvre sur les fluides. Hors, après la mort de Léonard de Vinci, les carnets ont petit à petit été dispersés dans le monde, si bien que des parties similaires, ou portant sur des sujets proches n'ont jamais été publiées en même temps jusqu'à la fin du XIXème siècle. Charles Ravaisson-Mollien a étudié les carnets de la bibliothèque de l'institut de France, et il en vient à la conclusion suivante : « [...] une collection de Manuscrit de Léonard de Vinci qui (*les manuscrits A à M*), aujourd'hui encore, bien que d'importants extraits en aient été publiés à plusieurs reprises, sont presque entièrement inédit. » Le même auteur affirme que les traités de la peinture ou de l'eau sont des assemblages incomplets des textes de la pensée de Léonard de Vinci : « En résumé, on ne s'occupa guère jusqu'à la fin du siècle dernier, de déchiffrer les manuscrits de Léonard de Vinci qu'au point de vue de l'art, ou pour y chercher

des éléments biographiques. De plus ceux qui cherchèrent à composer les traités de la peinture ou de la mesure de l'eau ne firent qu'un choix parmi les nombreux matériaux amassés par Léonard, ce fut arbitrairement qu'ils en assemblèrent les éléments ; et d'autre part ils négligèrent de nombreux passages présentant un grand intérêt, et par eux même et parce que leur connaissance en est nécessaire pour donner leur véritable signification, leur véritable valeur, à ceux qui ont vu le jour. » Ainsi, le premier obstacle à franchir pour accéder aux idées de Léonard a été de reconstituer et de rassembler toutes les pensées relatives à la turbulence qu'à émises le savant.

La seconde source majeure d'oubli des travaux sur les fluides de Léonard de Vinci réside dans la destinée des carnets A à M où se trouve la majorité des matériaux laissés par Léonard sur les fluides. Les carnets ont été renommés plusieurs fois, la nomenclature A à M que l'on utilise encore aujourd'hui (et que Ravaisson-Mollien utilise) est due à Venturi à la fin du XVIIIème siècle. Les deux carnets d'où sont issus la plupart des idées et des schémas de Léonard de Vinci sur les fluides sont les carnets F et I. Selon Ravaisson-Mollien, Léonard de Vinci n'a pas eu le temps de mettre en ordre ses notes de ses carnets avant de mourir, et ne les a pas publiés en l'état car « laisser voir dans ses papiers des pensées incomplètement exprimées, des rédactions inachevées, des projets d'invention de toute sorte, c'eût été s'exposer au vol et à la calomnie. » Après la mort de Léonard en 1519 à Ambroise en France, les notes et manuscrits du savant sont tous légués à son meilleur disciple, François de Melzi. Dans le testament de Léonard, il est stipulé que le savant lègue « tous et chacun de ses livres » qu'il possédait. Dans cet ensemble de livres se trouvent l'ensemble des manuscrits de Léonard. Dès 1520 François de Melzi rapporte ces livres en Italie, dans sa demeure de Vaprio près de Milan. Durant toute sa vie, le disciple de Léonard va essayer de vulgariser l'œuvre de l'artiste, sans beaucoup de succès, il laissera le traité de peinture de Léonard

inachevé. A sa mort en 1570, les manuscrits originaux sont encore tous en sa possession. Dès ce moment là, les manuscrits commencent à être dispersés et disséminés partout en Europe. Orazio Melzi, l'héritier de Francesco Melzi charge les frères Mazenta d'exposer les travaux de Léonard de Vinci. Il vend, ou fait don de certains manuscrits à de riches collectionneurs ou à des monarques européens dans le but de faire connaître les travaux du maître. Dès lors on perd la trace d'environ la moitié des manuscrits de Léonard de Vinci. On atteste à la mort de Francesco Melzi d'environ 50 manuscrits. Il n'y en a aujourd'hui plus que 19. Il faut nuancer les pertes : certains codex sont des compilations de plusieurs manuscrits de l'époque, mais on peut douter fortement que toute l'œuvre de Léonard de Vinci soit parvenue jusqu'à nous.

Le compte d'Arundel (1586-1646) collectionna beaucoup de feuillets de Léonard de Vinci. Ces feuillets ont été rassemblés dans le Codex Arundel. Ce codex est conservé depuis 1831 à Londres, au British Museum. Dans ce codex, Léonard traite de la respiration, de la circulation et d'optique.

Pompeo Leoni, en qualité de sculpteur du roi de Sardaigne, a rassemblé de nombreux feuillets dans le codex Atlanticus. Le nom Atlanticus vient du format du codex qui s'apparente à celui d'un atlas. Ce codex a été rendu par là France à la bibliothèque Ambrosienne de Milan en 1815 après la victoire des alliés sur Napoléon. Une partie du codex est conservée au château royal de Windsor à Londres. Ce codex regroupe une bonne partie des dessins scientifiques et techniques de Léonard. La partie conservée à Windsor regroupe des dessins d'anatomie et de botanique.

Le codex Leicester est le seul à appartenir à un collectionneur privé : le fondateur de Microsoft, Bill Gates.

Le codex Trivulcien, qui représente les feuillets les plus récents de Léonard est conservé à Milan, au château de Sforza.

Le codex de Madrid a été retrouvé en 1965 dans la bibliothèque nationale de Madrid. Il traite principalement de géométrie et de mécanique.

Le codex urbinas latinus est le traité de peinture de Léonard. Ce fut la première œuvre publiée de Léonard. Il est conservé au Vatican.

Le codex du vol des oiseaux est conservé à la bibliothèque de Turin. Il traite de la mécanique du vol, et de l'interaction de l'aile des oiseaux avec le vent.

Enfin, le codex Forster, du nom de son dernier propriétaire avant son legs au Victoria and Albert Museum à Londres. Il traite de mécanique, de machines hydrauliques et de géométrie.

Concernant les 11 manuscrits conservés à la bibliothèque de l'institut de France, leur histoire précise nous intéresse car c'est parmi eux que se trouvent les plus intéressants travaux sur la turbulence. Les manuscrits A à M de l'institut sont d'abord confiés aux frères Mazenta, sont ensuite récupérés par le sculpteur Pompeo Leoni, qui rassemble nombre de feuillet volants dans le codex Atlanticus. A la mort de ce dernier en 1608, le comte Galeazzo Arconati rachète les documents. Il donne douze d'entre eux à la bibliothèque Ambrosienne de Milan et vend un des manuscrits au prince Trivulzio. Ce manuscrit deviendra par la suite le manuscrit trivulce. Un document de la bibliothèque constate la généreuse donation du comte Arconati, faite en 1637, à la bibliothèque Ambrosienne de Milan. Les manuscrits donnés étaient pour onze d'entre eux des originaux dont neuf font maintenant parti de la collection de la bibliothèque de l'institut. Les deux autres manuscrits de la bibliothèque de

l'institut proviennent eux aussi de la bibliothèque ambrosienne après avoir transité entre les mains des frères Mazenta et celles du cardinal Borromeo. A partir de 1637, les documents resteront à la bibliothèque de Milan jusqu'en 1796.

A cette date l'armée française délivre le Piémont de l'oppression autrichienne et est reçue en triomphe dans Milan. La république française exige en compensation de la libération du milanais une forte somme d'argent, et une collecte des œuvres d'art et scientifiques. Pour ce faire est nommé Jacques-Pierre Tinet comme agent devant envoyer à Paris les différentes œuvres d'art et scientifiques retrouvées sur place. Il débusque à la bibliothèque Ambrosienne de Milan « le carton des ouvrages de Leonardo d'Avinci ». Il envoie 13 manuscrits à Paris. Douze d'entre eux seront confiés à la bibliothèque de l'Institut, ils constituent aujourd'hui les manuscrits A à M, et le treizième, le codex Atlanticus est confié à la Bibliothèque Nationale. En 1815 après la défaite de l'empire, le codex Atlanticus est rendu à la bibliothèque Ambrosienne où il est encore conservé actuellement.

L'histoire mouvementée des manuscrits de Léonard n'a pas permis qu'ils soient divulgués de manière convenable pendant plusieurs siècles. Ils ont soit transité entre les mains de particuliers incapables de les utiliser et de les mettre en forme correctement, soit sont restés dormant pendant de nombreuses années dans les couloirs des bibliothèques. Notons que les manuscrits de Leonard de Vinci, lors de leur séjour à la bibliothèque Ambrosienne (entre 1637 et 1796) ont dû être copiés, mais jamais vulgarisés.

La première publication moderne concernant les carnets de la bibliothèque de l'institut est faite en 1797 par Venturi, Essais sur les ouvrages physico-mathématiques de Léonard de Vinci. Le livre est séparé en deux parties. Dans la première intitulée « Fragments tirés des manuscrits de Léonard de Vinci », les carnets de Léonard ont été partiellement traduits et

commentés par l’auteur. Les passages traduits par Venturi sont très peu nombreux et choisis de manière arbitraire et ne représentent que qualitativement la masse de réflexions que Léonard de Vinci a consigné dans ses carnets. Cet ouvrage a néanmoins le mérite de faire connaître Léonard de Vinci comme scientifique, et de donner un bref aperçu des thèmes abordés dans ses travaux. Entre autres fragments, Venturi traduit en français un passage sur l’écoulement des fluides dans un canal et un passage sur les tourbillons d’eau pour un total d’environ deux pages.

Concernant la publication méthodique et organisée des idées de Léonard de Vinci concernant l’hydraulique, il faudra encore attendre une trentaine d’années. En 1828, Francesco Cardinali publie en italien le traité des eaux de Léonard de Vinci : *Del moto e misura dell’ acqua di Leonardo da Vinci*. C’est d’ailleurs en lisant l’essai de Venturi que Francesco Cardinali s’est persuadé de faire cette publication. Dans cet ouvrage, Francesco Cardinali reprend les textes et dessins consignés dans les manuscrits de l’institut et le codex Leicester, pourtant Francesco Cardinali affirme reprendre un texte de la bibliothèque Barberini de Rome intitulé « *trattato della natura, peso e moto delle acque, e osservazioni sul corso de’ fiumi* »². Comme à cette époque les manuscrits originaux de Léonard de Vinci sont à Paris, dans les collections de la bibliothèque de l’Institut ou dans la collection privée de Thomas Coke, on peut en déduire que ce codex est une copie de ces manuscrits peut-être déjà une compilation, mise en forme partiellement, des manuscrits originaux. La majorité des matériaux concernant la turbulence viennent des manuscrits I et F. Même si Charles Ravaissou-Mollien considère que cet ouvrage n’est pas complet vis-à-vis de la masse de connaissances consignées par Léonard de Vinci, il faut reconnaître que presque tous les dessins et schémas ainsi que les textes de Léonard qui ont pu être déchiffrés sont

² « *Traité de la nature, du poids et du mouvement des eaux, et les observations sur les cours des fleuves* »

réorganisés et classés selon les thèmes qu'ils comportent. Cet ouvrage ressemble beaucoup à un manuel scolaire dans la manière où il est bâti, ce qui est aussi un reliquat de la manière dont Léonard de Vinci a écrit ses carnets. Dans un premier temps, cet ouvrage est précédé par les études faites par d'autres Italiens en mécanique des fluides. Cet ouvrage affiche clairement une visée nationaliste, qui peut aisément expliquer le ton admiratif utilisé par l'auteur pour décrire Léonard de Vinci. Il va jusqu'à définir Léonard comme un homme de lettres, très cultivé, ce que Léonard se défend d'être. Hormis cette préface un peu fantasque, le reste de l'ouvrage tente de rester fidèle aux idées énoncées par Léonard de Vinci. L'auteur en fait d'ailleurs sa profession de foi : « Nel dare stampo quest'opera ho creduto di attenermi fedelmente al manoscritto, e senza correggere alcuna cosa, infuori dell'ortografia. »³ Le traité se divise en neuf livres qui comportent une soixantaine de chapitres chacun. Un chapitre correspond à un paragraphe pouvant aller de 3 lignes à une page. Chaque chapitre développe une idée ou une conception différente. Les dessins qui accompagnaient les textes de Léonard de Vinci dans les carnets originaux sont tabulés et regroupés dans de grandes planches à la fin du livre. Les dessins sont reproduits eux aussi avec le soin de coller le plus possible aux originaux. Pourtant, leur dimension peut varier et la manière dont ils sont dessinés change aussi. La technique et le papier utilisés pour les dessins change mais sont conservées les relations spatiales (position et taille) entre chaque élément du dessin. Il y a 219 figures relatives à l'eau réparties sur 27 planches différentes. Ces figures sont accompagnées de deux cartes d'ingénieur civil relatives à la maîtrise des fleuves.

³ « Pour ne pas modifier cette œuvre, j'ai cru m'en tenir fidèlement au manuscrit, et ceci sans corriger aucune chose hormis l'orthographe. »

Le premier livre est De la sfera dell'acqua (De la sphère de l'eau). Dans ce chapitre sont regroupés les chapitres relatifs au vocabulaire et à la nature de l'eau. Le terme sphère de l'eau qui est le titre de ce livre fait clairement référence à la théorie du monde en quatre éléments. Plus généralement, les éléments de ce livre font souvent référence à cette théorie pour expliquer les observations. Notons que dans cette partie Léonard de Vinci ne propose aucune expérience pour vérifier ses affirmations dans cette partie.

A partir du deuxième livre, l'empreinte de la théorie des quatre éléments est beaucoup plus faible et Léonard de Vinci propose des expériences pour vérifier ses propos. Le livre deux a pour titre Del moto dell'acqua (Du mouvement de l'eau). Il traite des mouvements généraux des eaux, des écoulements des eaux, des fleuves, des marais et des rencontres des cours d'eau. Le livre 3 est consacré à l'étude des ondes de surface dans l'eau et a pour titre Dell'onda dell'acqua.

Les livres 4,5 et 6 concentrent les chapitres traitant de la turbulence. Le livre 4 intitulé De retrosi dell'acqua (Des tourbillons de l'eau) et 5 intitulé dell'acqua cadente (De l'eau tombante) traitent des tourbillons, de leur mode de formation, leur fonctionnement, etc. Le livre 6 décrit les dégâts fait par les eaux, son titre est Delle rotture fatte dall'acqua (Des fissures faites par l'eau).

Le livre 7 traite des choses charriées par les fleuves notamment lors des crues. Il s'intitule Delle cose portate dall'acqua (Des choses portées par l'eau).

Enfin les livres 8 et 9 sont les connaissances de l'eau propres à l'ingénieur et au bâtisseur. Le livre 8 traite des constructions liées à l'eau, Dell'oncia dell'acqua e delle canne alors que le livre neuf porte sur les machines utilisant l'eau : De molini ed altri ordigni d'acqua (des moulins et des autres dispositifs d'eau).

La publication de cet ouvrage marque enfin la divulgation au grand public des idées scientifiques concernant la turbulence de Léonard de Vinci. Nous n'avons pas trouvé de trace de divulgations des manuscrits scientifiques à une période antérieure. Les idées de Léonard auront dû attendre 300 ans avant de pouvoir voir le jour de nouveau. Cet ouvrage s'est vite répandu en Europe. On en trouve la trace dans les bibliothèques des grandes universités anglaises et françaises dès les années 1890.

Je n'ai pas réussi à trouver si cet ouvrage était très répandu à l'époque, ni à quelle date exacte il fut disponible pour les étudiants de ces universités. Il m'est donc impossible de conclure de manière formelle qu'Osborne Reynolds ait pu avoir accès aux connaissances de ce livre. Néanmoins, il paraît vraisemblable que, suite aux travaux de Venturi (1797), tous les physiciens s'intéressant aux fluides ont eu connaissance de l'existence des travaux de Léonard.

2. Présentation de la proto-théorie de la turbulence de Léonard de Vinci

Le but de cette partie est d'étudier les éléments théoriques proposés par Léonard de Vinci concernant la turbulence. Pour pouvoir analyser l'apport de Léonard de Vinci à la science moderne, il faut comprendre la manière dont il aborde les problèmes, et en quoi elle se différencie de celles des autres scientifiques de l'époque. Ensuite, nous analyserons du point de vue d'un scientifique moderne les éléments avancés par Léonard de Vinci en essayant de déterminer quels ont été les éléments communs à la théorie actuelle et ceux qui s'en écartent.

a. Pourquoi Léonard de Vinci dépasse-t-il la théorie des fluides de l'époque?

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, la conception des fluides au moyen-âge était très simple avec un but symbolique. La complexité des fluides due à leur mouvement ou leurs propriétés n'était pas abordée. Le monde créé par dieu devait être pensé comme un idéal abstrait de toute complexité. C'est dans ce bain que Léonard de Vinci va commencer à étudier les fluides (en fait les deux éléments eau et air) de manière différente pour l'époque. Il va replacer au cœur du problème des fluides les notions de mouvement et de complexité. Pourquoi Léonard de Vinci cherche-t-il à dépasser l'image que l'on se fait de l'eau (ou de l'air) à l'époque ? Nous allons montrer que les motivations de Léonard de Vinci sont doubles : d'une part celle d'un artiste qui cherche à dépeindre un monde en mouvement, avec précision et d'autre part celle d'un ingénieur qui cherche à utiliser l'eau (irrigation, assèchement de marais, machines à eau, limitation des crues fluviales, etc.).

i. Représentation du monde en mouvement (opposition à la
représentation statique : vocabulaire de la mécanique)

Léonard de Vinci cherche à représenter le monde en mouvement. Cette thèse est défendue par Daniel Arasse dans le livre *Léonard de Vinci, le Rythme du monde*.

1. La vision de l'artiste

C'est dans l'atelier de Verrocchio que débute la formation de Léonard en tant qu'Artiste en 1466. Il est alors âgé de 14 ans. Dans cet atelier, il ne s'intéresse pas qu'à la peinture, il étudie aussi la sculpture, l'orfèvrerie, l'architecture et il y pratique des activités d'ingénieur. L'esprit de l'enseignement dispensé dans cet atelier est de briller dans toutes les disciplines, à pratiquer les travaux les plus divers dans la collaboration. On peut ainsi retrouver la trace de plusieurs artistes dans une même œuvre. Dans cet atelier, il côtoie des figures artistiques du moyen-âge : Domenico Ghirlandaio, Pietro Perugino, Lorenzo di Credi et Sandro Boticelli en plus de son maître Andrea Verrocchio. Cette formation d'atelier va caractériser l'approche scientifique de Léonard de Vinci. Les problèmes de l'atelier sont étudiés au cas par cas, en laissant une place prépondérante à l'expérience. Daniel Arasse dira même : « Reposant sur l'analogie et l'empirisme, la formation de la bottega [l'atelier] marque Léonard sur au moins trois points essentiels : le privilège accordé à l'expérience, le processus d'accumulation et d'augmentation perpétuelle des connaissances, le rôle essentiel qu'y joue le dessin pour la recherche des solutions, leur mémorisation et leur transmission. » Arasse met le doigt, ici, sur une caractéristique essentielle du renouveau de la manière de voir le monde : l'expérience et le dessin. C'est cette manière d'étudier le monde apprise dans cet atelier qui ne quittera plus Léonard de Vinci. Il va réussir à transposer cette manière d'étudier par le dessin et l'expérience à l'étude de phénomène plus complet. Petit à petit, Léonard va dépasser les

études au cas par cas de mouvement d'eau pour en faire des ensembles plus généraux. Une collection d'ensemble particuliers, qu'il va regrouper et ensuite, grâce au dessin, va pouvoir théoriser. Léonard de Vinci quitte l'atelier de Verrocchio en 1476, il y aura gagné cette approche systématique des problèmes par l'expérience et le dessin.

La vision artistique de Léonard de Vinci a deux caractéristiques importantes : D'une part Léonard de Vinci n'assujettit pas sa pensée à un système préétabli, c'est un homme libre et d'autre part il tend à représenter le monde en mouvement. Léonard de Vinci pense l'art différemment, il se permet des écarts à l'art antique par exemple. Il adapte librement des œuvres d'art antique pour les renouveler. Daniel Arasse cite le « Diomède » antique (p 62). Léonard renouvelle l'œuvre à un tel point qu'on ne reconnaît pas sa source d'inspiration au premier abord, cependant la pose avec la jambe gauche repliée une fois étudiée ne permet plus de douter de la source de l'inspiration. Cette liberté artistique lui permet de dessiner des objets insolites pour l'époque. En musique par exemple il dessinera plusieurs instruments originaux pour pratiquer et renouveler cet art : la « flûte à bec à glissando », des claviers pour instruments à vent et des tambours. (Codex Arundel, fol.175r. Londres, the British Library). Léonard de Vinci est donc un artiste qui n'a pas peur de prendre des libertés par rapport au milieu artistique ambiant. Il en fera de même pour les sciences, il n'aura pas peur d'étudier des choses nouvelles ni de les étudier différemment. Il ne se bornera pas à une description symbolique typique de l'époque ni à une description poétique de l'écoulement d'une rivière. Léonard, dans sa volonté de représenter correctement le monde se trouve confronté au problème de la représentation de l'eau (Nous verrons plus loin comment il a résolu ces problèmes d'un point de vue technique dans ses dessins.) Une représentation fidèle de l'eau passe par une compréhension globale du fluide, et qui plus est de ses mouvements. Le génie de Léonard réside dans la manière simple dont il tente de

rendre compte de cet événement complexe. Il tentera de simplifier les écoulements de fluides au maximum pour en tirer uniquement des traits généraux. La deuxième caractéristique de Léonard de Vinci est qu'il souhaite représenter le monde en mouvement. Cette thèse est défendue dans le livre de Daniel Arasse, qui y met l'accent directement dans le titre : Léonard de Vinci, Le rythme du monde. Il utilise le mot rythme pour montrer que le mouvement jalonne l'œuvre de Léonard. Il transparaît à chaque page, ici le mouvement d'un cheval (Cavalier sur un cheval cabré, sculpture en bronze, 24,3 x 26,5 cm. Budapest, Szépművészeti Múzeum), là le mouvement d'un fluide (Percussion de l'eau contre l'eau 1507-1509, plume et encre, 29 x 20,2 cm. Windsor Castle, Royal Library, RL 12660v), là encore le mouvement des oiseaux (Codex sur le vol des oiseaux. Turin, Biblioteca Reale). Cette liste est loin d'être exhaustive, l'œuvre de Léonard est tellement empreinte du mouvement, de la mise en mouvement des œuvres d'art, qu'il dispense dans son académie de Milan des enseignements à ses élèves pour représenter le mouvement. Ces percepts artistiques se retrouvent dans la manière d'aborder la turbulence par Léonard de Vinci. S'il adopte ce sujet c'est car l'eau est en mouvement pour créer la turbulence, si son travail a laissé une trace indélébile dans l'esprit des scientifiques modernes c'est qu'il est libre et novateur.

2. Opposition à la statique : vocabulaire de la mécanique dynamique

A l'époque de Léonard de Vinci, la préoccupation scientifique de l'époque est le développement de la mécanique classique. On appelle les scientifiques de cette époque les pré-galiléens. Notons que le scientifique français Duhem, célèbre pour la relation de Gibbs-Duhem en physique statistique a consacré une étude en 3 volumes à Léonard de Vinci sous

titré les précurseurs parisiens de Galilée. La fin de la renaissance prépare la révolution mécanistique du monde. Léonard de Vinci n'est pas étranger à ces études, il a en parti étudié les premiers éléments de mécanique, que l'on peut retrouver dans les codex Arundel, Madrid 1, vol des oiseaux et les manuscrits de l'Institut. Ces éléments de mécanique vont influencer la relation de Léonard et des fluides sur deux points : Outre ces éléments de mécanique pure, Léonard de Vinci a aussi appliqué ces idées pour construire des machines articulées. Il créera des appareils surprenants comme des vélos, des hélicoptères, des machines de guerre, des tambours à roulette, etc. Il dessinera des poulies, des vis d'Archimède, des engrenages. Il s'essayera aussi à dessiner des machines se servant de la puissance de l'eau : moulins, fontaines, et même des pompes. Léonard de Vinci imagina donc l'eau comme outil de la mécanique. Le deuxième point sur lequel ses connaissances en mécanique vont influencer son approche de la turbulence est le vocabulaire qu'il va utiliser pour décrire les mouvements de l'eau. Un vocabulaire commun à la mécanique et à son étude. Peut-être avait-il commencé à s'intéresser à l'eau à partir de la mécanique avant d'appliquer un vocabulaire nouveau à son étude ?

Quoiqu'il en soit, Léonard de Vinci utilise le vocabulaire de la dynamique et pas uniquement celui de la statique. Les mots « percusioni », « impetus », « celerita » ne laissent place à aucun doute : c'est le mouvement qui intéresse Léonard.

ii. Préoccupations d'ingénieur

Comme le laisse sous-entendre le paragraphe précédent, Léonard de Vinci s'est aussi intéressé à l'eau à partir d'un point de vue d'ingénieur. Outre les différentes machines en

relation avec l'eau qu'il a pu imaginer, il ne demeure pas moins important que son travail d'ingénieur de terrain lui a donné différents privilèges pour étudier les mouvements d'eau. Le plus important est son travail concernant l'endiguement des fleuves, l'assèchement des marais et la minimisation des dégâts cruraux. Pour cela, il a étudié l'eau coulant dans des canaux, des fleuves, des cascades d'eau. Il a aussi étudié le mouvement de l'eau dans ces différents modes d'écoulement. Ces préoccupations se retrouvent dans le vocabulaire qu'il emploie pour parler des mouvements d'eau mais aussi dans les différents dessins qui jalonnent son carnet sur les eaux.

Une bonne partie du vocabulaire qu'il annonce en guise d'introduction de son hypothétique traité sur les eaux est relatif aux fleuves, aux dégâts des fleuves et à l'endiguement des fleuves. Il donne par exemple 4 mots pour définir les différents types de rives de fleuves. Précision qui trahit une intention de donner une place très spéciale à la qualité des rives des fleuves. Il écrit aussi à une autre occasion que rien n'est pire que les dégâts créés par les eaux en furie d'un fleuve. Léonard de Vinci avait cartographié la haute vallée de l'Arno avec pour ambition de réguler le cours de ce fleuve.

b. Comment Léonard de Vinci dépasse-t-il la théorie des fluides de l'époque ?

C'est sous l'étiquette d'ingénieur hydrographique que Léonard commence à étudier les mouvements d'eau turbulents lors de l'aménagement du cours de l'Arno et du Pô. Sa réflexion est guidée par deux paradigmes : la méthode de l'ingénieur et le paradigme ancien concernant les eaux. (Nous avons vu précédemment que Léonard est instruit du dogme de la scolastique parisienne du moyen-âge (Duhem) dérivant de la philosophie aristotélicienne des quatre éléments.)

Léonard de Vinci va mettre en lumière un certain nombre d'anomalies concernant le paradigme de l'époque sur la physique du monde. Ses travaux d'ingénieur le poussent à étudier le mouvement des eaux pour domestiquer la nature. Il faut endiguer les fleuves pour éviter les crues destructrices, utiliser l'eau pour faire marcher des machines (par exemple des roues à eau), irriguer les cultures. Pour maîtriser cette nature, l'ingénieur doit comprendre les lois ou au moins remarquer les régularités que présentent certains phénomènes. C'est toujours ainsi que fonctionnent les ingénieurs aujourd'hui, la méthode de l'ingénieur doit prévoir le phénomène futur. Cependant, l'ingénieur moderne se distingue de Léonard de Vinci : l'ingénieur moderne applique son intelligence à un cas concret ou un phénomène particulier sans volonté d'en déduire une loi, alors que Léonard de Vinci cherche quant à lui à tirer des lois qui sont des lois de la nature. C'est cette manière d'étudier la nature qui va provoquer la découverte d'un grand nombre d'anomalies. Léonard de Vinci va commencer à se poser des questions nouvelles que le paradigme de l'époque ne pose pas. C'est le début d'une nouvelle science que nous appelons aujourd'hui physique des écoulements turbulents.

Dès lors l'entreprise de Léonard de Vinci est la construction d'un nouveau domaine scientifique qui n'existait pas auparavant. Il sépare l'étude des eaux agitées de l'étude des eaux plus calme. Nous verrons plus tard que cette distinction s'est enracinée et persiste encore aujourd'hui.

i. Rupture lexicale : un nouveau langage pour répondre à de nouvelles questions

Au cours des études sur le mouvement des eaux Léonard de Vinci se retrouve confronté au fait que le vocabulaire de la langue vulgaire ne convient pas à son étude. Les termes utilisés par ses contemporains dans leur vie journalière ne sont pas assez précis (On peut imaginer que le sens d'un mot varie d'un bout à l'autre de l'Italie, chaque région ayant à l'époque son propre dialecte. Léonard de Vinci écrivait dans ses carnets en ancien Toscan). Pour l'ingénieur et le scientifique qu'il est, cela rend difficile la communication de ses idées. Léonard va donc dans un premier temps définir un vocabulaire relatif aux mouvements des eaux. C'est la première étape du fondement d'un nouveau paradigme.

1. Langage d'ingénieur : une nouvelle méthode expérimentale

Un passage du Carnet I folio 72, conservé à la Bibliothèque de l'institut de France définit le sens de certains mots utilisés dans la langue courante. Ce passage est intitulé « *Principio dellibro dellacque* », ce qui préfigure l'usage final des notes de Léonard de Vinci pour l'édition d'une œuvre sur les eaux.

Tout d'abord Léonard de Vinci redéfinit les termes topologiques propres au géographe : « Cadute » - chute d'eau, « fonti » - source, ou encore « spiaggia » - la plage, « grotte » - la grotte. Le vocabulaire important pour Léonard de Vinci est surreprésenté, Léonard de Vinci définit ainsi 5 types de lacs différents : « lago » - lac, « stagni » - étang, « paduli » - marécage, « Pelago » - le lac tranquille, et enfin « gorgo » - bassin d'eau calme alimenté par une chute d'eau. Ici la préoccupation de l'ingénieur apparaît dans la multiplication des termes dont les différences de définition sont subtiles : les lacs vont avoir une importance particulière dans

les études futures de Léonard. Léonard de Vinci définit les termes d'ordre météorologiques : « pioge » - les pluies, « procielle » - les tempêtes d'eau.

Enfin Léonard prend soin de définir les termes propres à l'action de l'homme sur la nature, les termes qui intéressent l'ingénieur. Donnons quelques exemples : « pozzi » le puit ou « canale » le canal, « re golate » la conduite d'eau. Ici aussi, il prend soin de décrire avec finesse la valeur de chaque mot. « argine », « ripa », « riva » et « spiaggia » signifient rive d'un fleuve. Elles sont classées par taille : « ripa » est plus haute que « argine », « riva » est plus basse que « argine » et enfin la plus basse « spagia ». C'est donc la hauteur des rives d'un fleuve qui intéresse Léonard de Vinci, et l'on peut supposer que le travail de Léonard de Vinci pour endiguer les crues des fleuves n'est pas étranger à cela. D'ailleurs il définit le mot « caverne » par « lacque forte sira-girano essempe lascrescano » : les eaux y tournoient beaucoup et les accroissent toujours. Les tourbillons d'eau sont le phénomène à la base de la forte érosion des rives. Cela va conduire Léonard à s'intéresser aux tourbillons.

Les définitions que donne Léonard de Vinci sont celles d'un homme de terrain, à la fois météorologue, géographe et ingénieur. Le scientifique cherche absolument à ce que ses travaux relatifs aux eaux soient utilisables. En donnant une définition aux mots qu'il utilise, Léonard de Vinci en donne une interprétation personnelle qui change de celle du sens commun. C'est le point de départ du nouveau paradigme. De plus en insistant largement sur certains concepts qui peuvent être définis par plusieurs mots, le scientifique insiste sur les notions importantes de son ambition paradigmatique. En utilisant le mot paradigme, on insiste volontairement sur la notion kuhnienne de révolution scientifique. Un paradigme, c'est un mode d'interprétation de faits scientifiques. Il regroupe toutes les questions que

l'on doit se poser vis-à-vis d'une observation scientifique ainsi que tous les moyens d'y répondre, les moyens d'observations des faits scientifiques (expériences reconnues comme classiques et protocoles expérimentaux), le vocabulaire pour parler d'une observation et les éléments théoriques relatifs à cette science, les raisonnements classiques, etc. Une autre caractéristique d'un paradigme, c'est que le mode d'interprétation de la nature doit être partagé par une communauté de scientifiques. Voici la définition que T.S.Kuhn donne de paradigme dans son ouvrage *la structure des révolutions scientifiques* (p.29-30): «Ils [les manuels scientifiques] exposent l'ensemble de la théorie acceptée mentionnant un plus ou moins grand nombre de ses applications réussies avec des observations et des expériences servant d'exemples.[...] Tous ces livres et bien d'autres ont longtemps servi à définir implicitement les problèmes et les méthodes légitimes d'un domaine de recherche pour les générations successives de chercheurs. [...] leurs accomplissements étaient suffisamment remarquables pour soustraire un groupe cohérent d'adeptes à d'autres formes d'activité scientifiques concurrentes ; d'autre part, ils ouvraient des perspectives suffisamment vastes pour fournir à ce nouveau groupe de chercheurs toutes sortes de problèmes à résoudre. Les performances qui ont en commun ces deux types de performances, je les appellerai paradigmes. » Ici, je préfère employer le terme d'ambition paradigmatique car bien que le mode d'interprétation de la nature proposé par Léonard de Vinci possède toutes les caractéristiques pour être un paradigme, il échoue à vérifier la dernière caractéristique. Le fait que le mode d'interprétation de la nature proposé par Léonard de Vinci ne touche personne hormis son auteur le laisse incomplet.

2. Langage relatif au mouvement

Comme nous l'avons vu dans la philosophie générale de Léonard de Vinci, le scientifique cherche à représenter le monde en mouvement. Cette volonté apparaît largement dans ce passage du carnet I. Hormis le langage de l'homme de terrain, c'est le champ lexical concernant le mouvement qui est frappant dans ce paragraphe visant à être une introduction au livre sur l'eau. (« Principio » doit être compris dans son sens originel de commencement).

Léonard de Vinci mêle un vocabulaire emprunté à la mécanique de l'époque – dont il est familier puisque certains passages de ses carnets y font référence : « percusioni » - percussion, « moto » - le mouvement ou encore « impetuita » - adjectif emprunté à impetus. – et un vocabulaire descriptif des mouvements des fluides. Dans cette partie du texte, il ne donne pas de définition des termes mais simplement une liste de 77 mots relatifs au mouvement et à la destruction (par exemple : « (e)ribolli » - bouillonnement, « retrosi » - retours, « revolutione » - tournoiements, « celerita » - vitesse, « ten pesta » - tempête).

Le mouvement, leitmotiv de sa vision du monde, est donc le deuxième aspect du paradigme instauré par Léonard de Vinci concernant les eaux agitées. On peut remarquer ici que la distinction faite entre les 5 types de lacs cités plus haut se fait sur la tranquillité des eaux qui le constituent.

3. Invention du mot turbulence

La paternité du mot turbulence (« Torbolenze ») est attribuée à Léonard de Vinci par les spécialistes contemporains de la turbulence⁴. Le mot turbulence n'apparaît pas dans ce

⁴ Uriel Frich et Marie Farge annoncent que Léonard de Vinci est le créateur du mot turbulence pour les fluides. Cependant mes recherches ne m'ont pas permis de vérifier cette idée. Je crois effectivement que Léonard de

passage introductif au livre sur les eaux ni dans les manuscrits de la bibliothèque de l'institut. (Ce mot n'apparaît pas non plus dans le livre édité au XIX^{ème} siècle.) Cependant les premières allusions à la métaphore des sentiments humains pour décrire le mouvement des fluides se font sentir dans le vocabulaire que préconise Léonard pour étudier les fluides : « vementia » (vehementia) - intensité d'un sentiment, d'une sensation, « furiosita » - délire, folie, fureur. Dès lors, il ne paraît pas surprenant que Léonard de Vinci ait pu emprunter le mot turbulence pour décrire les eaux déchainées.

Au départ, le mot turbulence vient du latin « turba » qui signifie foule en désordre, multitude. Son sens va évoluer avec le temps pour dériver vers une métaphore cognitive pour donner « turbulentus » qui signifie irréfléchi, emporté, agité, troublé et qui s'applique à une personne ou à un sentiment. Il donnera les mots turbulent (que l'on applique à un enfant peu sage par exemple) et trouble (un trouble amoureux par exemple). Finalement à la renaissance ce terme va subir une seconde métaphore pour s'appliquer aux mouvements fluides et donner le mot turbulence appliqué aux fluides. C'est ce dernier sens du mot turbulence que nous utilisons pour parler des écoulements fluides dans lesquels se trouvent des tourbillons désordonnés. La définition actuelle du mot turbulence comme on la trouve dans le dictionnaire actuel est⁵ :

TURBULENCE n.f. 1. Caractère, défaut d'une personne turbulente ; agitation bruyante. 2. (Surtout au pl.) Troubles qui perturbent un secteur d'activité, un domaine. Turbulences monétaires. 3. sc. Agitation désordonnée d'un fluide en écoulement turbulent.

Vinci peut être le premier à utiliser ce mot pour les fluides, mais n'ayant pas trouvé le passage exact où il énonce ce mot, je m'abstiendrai de toute affirmation.

⁵ Le Petit Larousse Illustré, 1995

C'est évidemment le point 3 qui nous intéresse. Ce mot désigne aujourd'hui un secteur scientifique de première importance. Le second point dérive de l'utilisation du mot turbulence en sciences.

4. Pourtant toujours des traces de l'ancien paradigme

De nombreux passages des carnets de Léonard de Vinci font toujours état de la présence de l'ancien paradigme concernant l'eau. Parfois il utilise même ce paradigme pour élaborer des raisonnements. Il faut noter que dans l'introduction au livre sur les eaux, Léonard de Vinci n'utilise jamais le vocabulaire de l'ancien paradigme. Cependant, la rupture n'est pas franche car le premier livre (livre 1 du livre des eaux) est une discussion de l'élément eau via la philosophie aristotélicienne.

Au chapitre 3 du livre 1, ce qui correspond à un paragraphe différent consigné dans les carnets de Léonard de Vinci (les écrits de Léonard de Vinci ont été triés et rassemblés pour construire ce livre), on trouve la définition de l'eau selon Léonard de Vinci : « L'acqua è infra li quattro elementi il secondo men grave, e di seconda volubilità [...] » (« L'eau est un des quatre éléments, le second moins lourd et le second pour sa volubilité. ») Sa définition de l'eau s'inscrit totalement dans le paradigme des quatre éléments. Il se servira des propriétés de ce paradigme pour expliquer le mouvement de l'eau par exemple au chapitre XVIII de ce même livre : « Li moti degli elementi gravi non sono al centro per andare ad esso centro, ma perchè il mezzo ove essi sono non li puo resistere, e quando l'elemento trova resistenza nel suo elemento, il suo corpo più non pesa nè cerca più di andare al centro ; adunque l'acqua quando discende, non discende per andare al centro, ma perchè non trova resistenza nel suo mezzo. » Ce qui peut être traduit par « Les mouvements de cet élément pesant [l'eau] ne

vont pas vers le centre [Le centre de la sphère liquide] pour aller vers le centre lui-même, mais parce que le milieu alentour ne peut plus lui résister. Et quand l'élément trouve de la résistance dans le même élément, son corps ne pèse plus et ne se rapproche plus de son centre. Donc l'eau quand elle descend, elle ne descend pas pour aller au centre mais parce que elle ne elle ne trouve plus de résistance dans son propre milieu. » Encore une fois cette explication se base sur le paradigme de l'époque. Le vocabulaire, et le ton dogmatique, l'inexistence de l'expérience ou au moins d'un exemple concret en font un exemple parfait des raisonnements de l'époque.

Ces parties de l'œuvre de Léonard qui utilisent le mode de raisonnement de l'époque sont concentrées au livre 1 du traité des eaux. Cependant ce traité n'a pas été directement écrit par Léonard et quoiqu'il reproduise fidèlement les écrits du savant. Francesco Cardinali, l'auteur de ce document a agencé les paragraphes de manière arbitraire, en les regroupant par thèmes. Il n'est pas nécessaire que tous les paragraphes de ce livre aient été écrits dans l'ordre chronologique par Léonard, cette affirmation est même erronée. Un paragraphe ayant un contenu explicatif reflétant le paradigme de l'époque peut très bien être suivi chronologiquement par un paragraphe traitant de la turbulence selon le mode explicatif typique de Léonard de Vinci. Léonard a donc dû utiliser tour à tour le vocabulaire des quatre éléments et celui de la turbulence. Il a intriqué deux modes de raisonnement pour expliquer les mouvements de l'eau selon le problème qui se pose à lui. Cependant pour un paragraphe unique, pour un problème donné, il ne mélange jamais ces deux types de raisonnement. On ne retrouve jamais dans les écrits de Léonard de Vinci un paragraphe qui mélange les deux modes explicatifs ou les deux vocabulaires. Quand il utilise sa méthode de représentation des écoulements, il n'utilise jamais le vocabulaire des quatre éléments. Soit son explication

se base soit sur les quatre éléments, soit il utilise sa propre méthode de raisonnement concernant la turbulence.

ii. Argumentation expérimentale

Léonard de Vinci se démarque de ses contemporains par l'argumentation scientifique qu'il met en place. Chaque proposition qu'il énonce doit être corroborée par l'expérience. A l'époque, les propositions scientifiques n'étaient jamais suivies d'un procédé expérimental, au mieux d'un exemple. Les propositions demeuraient essentiellement théoriques. Ce qui rend le point de vue de Léonard de Vinci très intéressant c'est qu'il ne satisfait pas de l'exemple mais lui préfère l'expérience. Cette méthode d'argumentation de ses propositions par l'expérience avait déjà été pressentie par Venturi : « Pour ce qui est de la science Naturelle, il n'étoit jamais satisfait sur une proposition s'il ne l'avoit vérifiée par l'expérience. Voici comme il s'exprime lui-même dans quelques endroits : « Je traiterai tel sujet. Mais avant tout je ferai quelques expériences, parce que mon dessein est de citer d'abord l'expérience et de démontrer ensuite pourquoi les corps sont contraints d'agir de telle manière. C'est la méthode qu'on doit observer dans la recherche des phénomènes de la nature. Il est bien vrai que la nature commence par le raisonnement et finit par l'expérience ; mais n'importe, il nous faut prendre la route opposée : nous devons commencer par l'expérience et tâcher par son moyen, d'en découvrir la raison ». (Manuscrit E, feuillet 55) Ainsi parlait Léonard un siècle avant Bacon. » (J-B. Venturi, Essai sur les ouvrages physico-mathématiques de Léonard de Vinci, Edition Duprat, Paris, 1797, p.4) Venturi a bien compris la place prépondérante de l'expérience dans le génie de Léonard. Il renverse la position commune de la manière d'aborder la nature : il propose non pas de

théoriser la nature puis d'expérimenter cette théorie mais au contraire il propose d'observer, de faire des expériences, puis de théoriser la nature.

La présence de l'expérience dans l'argumentation et la méthode scientifique de Léonard va renforcer la qualité de ses observations. Parfois, il ajoute que sa proposition peut-être vérifiée par l'expérience sans ajouter s'il l'a fait lui-même. C'est au lecteur s'il doute, de vérifier par lui-même la véracité des propos de Léonard de Vinci à travers cette expérience, procédé argumentatif sans faille. Cette méthode expérimentale et argumentative que met en place Léonard de Vinci fait partie à part entière de sa méthode scientifique et explique en partie sa capacité de création.

ii. La représentation des écoulements

Une bonne partie des travaux de Léonard réside dans ses dessins. Comme nous l'avons expliqué auparavant, le vieux toscan manquant cruellement de termes théoriques et Léonard étant ignorant du latin, le savant a dû développer une nouvelle méthode de transmission des idées. Le langage freinant le savant, la vision devient le moyen principal de la transmission de l'idée pour Léonard. Mais comment Léonard fait-il passer ses idées à travers les dessins ? Quel type d'élément théorique ses dessins sont-ils ? Enfin quels sont les points communs et les différences notables avec la théorie actuelle ?

1. Les dessins de Léonard de Vinci sont-ils des images, des schémas ou bien des diagrammes ?

Les dessins de Léonard de Vinci sont très nombreux et accompagnent les différents paragraphes de ses manuscrits. Il est très rare de trouver une explication sans aide visuelle

et vice-versa il est très rare de trouver un dessin sans au moins quelques mots d'explication. Le conservateur de la bibliothèque de l'institut n'a pas autorisé à prendre en photo les facsimilés des carnets de Léonard de Vinci fait par Ravaisson-Mollien au début du XXème siècle. Les dessins proposés dans cette partie sont donc soit de piètre qualité ou bien les reproductions faites par Francesco Cardinali dans *Del moto e misura dell'acqua*. Les reproductions de Francesco Cardinali sont fortement semblables sans être totalement identiques à celles de Léonard de Vinci. La technique de dessin diffère aussi. Les dessins de Léonard sont faits à l'encre sur papier ou bien au crayon sur papier alors que ceux de Francesco Cardinali sont des impressions sur papier.

a. Précision de la représentation

Léonard de Vinci effectue tous type de dessins. Parfois, il reste collé à l'image d'un cours d'eau ou d'un ruisseau. D'autrefois, il allège grandement son dessin pour ne conserver que les éléments importants pour son propos. C'est la dualité entre l'artiste et le scientifique. L'artiste représente le monde tel qu'il le perçoit alors que le scientifique essaye de le comprendre.

Laissons tomber les dessins à but strictement artistique pour nous concentrer sur les dessins scientifiques de Léonard de Vinci. La majorité de ses dessins sont des observations de la nature desquelles il a enlevé les éléments superflus à son propos. Quand il observe une rivière s'écouler autour d'un obstacle, il ne dessine que le fluide et l'obstacle, il ne dessine pas les rives du fleuve (Figure 1 et 2). D'autrefois au contraire, il effectue des dessins strictement théoriques, c'est-à-dire que ces dessins ne sont pas issus directement d'observations mais au contraire représentent le monde tel que l'imagine Léonard (Figure 4 et 5). La dextérité pour dessiner confère à Léonard un avantage notable sur les autres

scientifiques de l'époque. A la manière d'un lettré qui rend son propos clair grâce à une bonne maîtrise de la langue, Léonard de Vinci rend son idée claire grâce à une précision de la représentation. Comme le dira plus tard Pierre-Gilles de Gennes : mieux vaut un bon dessin qu'un long discours.

La précision de la représentation par Léonard de Vinci ne lui confère pas seulement un avantage de description, elle lui permet de remarquer des petits détails tels que les tourbillons qui seront le socle de sa théorie.

Les dessins scientifiques de Léonard bien qu'allégés par rapport à l'observation directe conservent les distances spatiales entre objets. La taille du canal par rapport à celle des tourbillons est conservée par exemple. Les zones de créations des tourbillons sont aussi placées de manière à conserver les relations de distances.



Figure 1 Percussion de l'eau dans l'eau, (Windsor Castle, Royal Library, RL 12660v.)

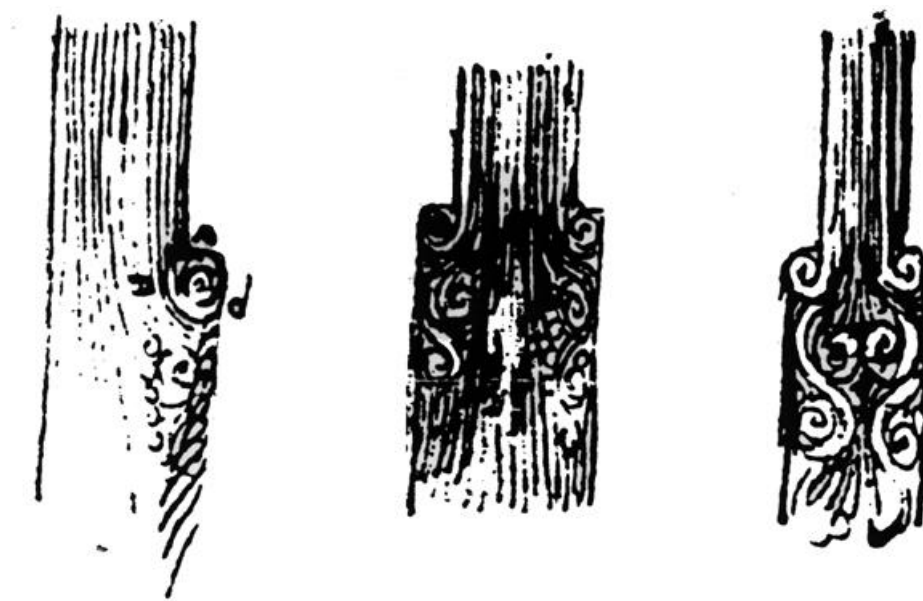


Figure 2 Déstabilisation d'un écoulement dans un canal (Manuscrit F, 73v)



Figure 3 Zones de développement de la turbulence (Manuscrit I, 12r)



Figure 4 Structure tridimensionnelle des tourbillons. Reprise par Francesco Cardinali, (*De moto e misura dell'acqua*, p. 223)

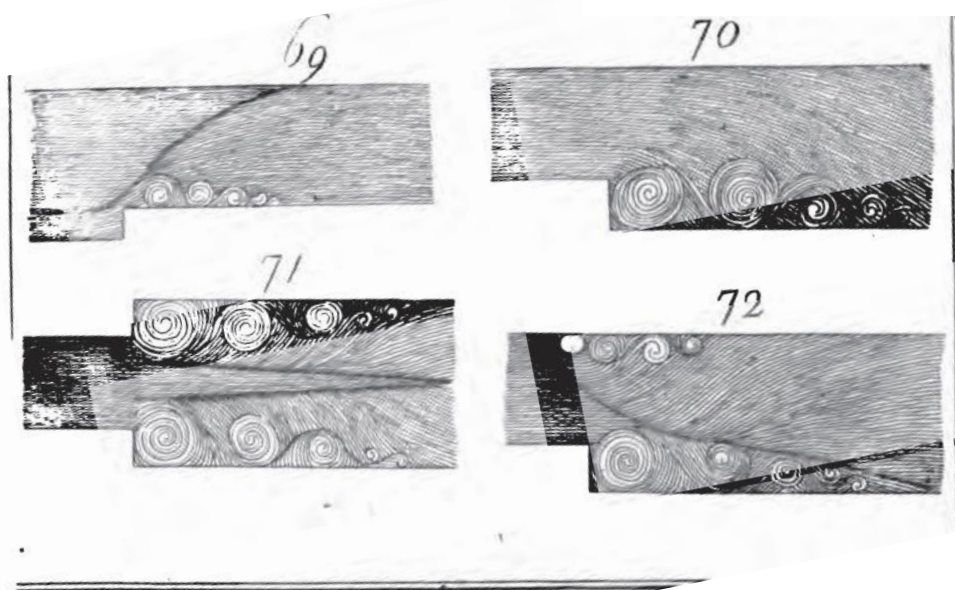


Figure 2 bis Déstabilisation d'un écoulement dans un canal, Reproduction par Francesco Cardinali, (*De moto e misura dell'acqua*, p. 217)

b. Présence d'éléments théoriques

Les dessins de Léonard de Vinci ne sont pas des images de la réalité. Ils conservent les relations spatiales mais tendent à être moins denses, moins saturés que les dessins les plus précis que peut faire Léonard. Certains croquis de Léonard possèdent des indications à but théorique. Par exemple sur la figure 2 il y a présence de lettres sur la figure. Dans le texte original elles sont accompagnées d'un texte qui explique les différentes étapes du tourbillon. Ces lettres n'existent pas dans la réalité et servent à expliquer le croquis.

D'autre part la méthode de représentation de Léonard de Vinci des écoulements est en elle-même théorique. Pour représenter le fluide, il utilise des lignes montrant le sens d'écoulement des particules de fluides. La présence de ces lignes pour décrire le fluide suppose qu'il considère que les parties de fluides suivent toutes les mêmes trajectoires. C'est une hypothèse théorique. Aujourd'hui on utilise toujours ce type de lignes que l'on appelle lignes de courant.

Léonard de Vinci, artiste reconnu s'il en est, peut aisément dessiner ce qu'il voit à trois dimensions. Cependant il cantonne la majorité de ses observations scientifiques à une description à deux dimensions, vue de dessus. (Figure 2). Cette simplification de la réalité est une preuve supplémentaire que les dessins de Léonard servent à synthétiser une idée pour mieux la transmettre.

Enfin, dernier point théorique, et non des moindres, la présence de tourbillons sur les dessins de Léonard sont une simplification de la réalité. Il ne nous est pas donné de distinguer des tourbillons de manière si précise. Il faudra attendre la fin du XIX^{ème} siècle pour que nous puissions, via un dispositif expérimental adapté « voir » les tourbillons. Si l'on observe

directement la nature, il est impossible de distinguer clairement les tourbillons. Léonard de Vinci a donc du faire une hypothèse théorique supplémentaire pour les dessiner.

En conclusion de ce paragraphe, les croquis qui accompagnent les propositions scientifiques de Léonard de Vinci sont pour la grande majorité des croquis à deux dimensions, largement épuré des raffinements de la réalité mais qui conservent les relations spatiales entre éléments. Sur ces croquis épurés, les fluides sont représentés à l'aide de lignes qui indiquent l'écoulement. Outre ces lignes il y a aussi des tourbillons (lignes spiralées). Ces lignes et ces tourbillons sont des éléments théoriques. Pour discuter de ces observations, Léonard de Vinci porte des lettres sur son croquis. Ces croquis à but explicatif et théorique sont trop épurés pour être des images mais conservent les relations spatiales entre les objets principaux, ce ne sont pas non plus des diagrammes. Ces croquis sont des représentations schématiques des observations de Léonard. La représentation des observations sous forme de schémas par Léonard de Vinci est caractéristique de la méthode de Léonard de Vinci.

2. Quelles sont les hypothèses que Léonard de Vinci utilise pour décrire les écoulements turbulents ?

Les observations de Léonard de Vinci vont le pousser à déceler des anomalies dans le paradigme des quatre éléments. Il va alors bâtir une nouvelle théorie pour traiter des écoulements turbulents. Cette théorie est basée sur certaines hypothèses. Ces hypothèses sont pour la plus part différentes de celles faites à l'époque pour décrire les fluides. Certaines sont encore présentes dans la théorie actuelle alors que d'autres ont complètement disparues.

a. Valable pour tous les fluides (eau et air)

La première hypothèse de Léonard de Vinci est la réponse directe à une anomalie au paradigme des quatre éléments. Léonard de Vinci remarque que l'eau et l'air se comportent de manière identique lorsque leur vitesse est élevée. Il décide, à contre courant de la pensée de l'époque de traiter de la même manière l'eau et l'air. «Pour donner une science véritable du mouvement des oiseaux dans l'air, il faut d'abord donner la science des vents, que nous établirons à travers les mouvements de l'eau en elle-même» (Manuscrit E de la bibliothèque de l'institut, feuillet 54 recto.) Dès lors il utilisera la même méthode de dessin pour dessiner les mouvements d'eau et pour dessiner les mouvements d'air. Il va proposer d'unifier l'étude des fluides. La théorie de la turbulence qu'il développe surtout autour de l'eau est aussi valable pour l'air. Bien après la mort de Léonard, on l'étendra à tous les fluides en général.

b. Présence de tourbillons. Représentation de mouvements invisibles

La seconde hypothèse théorique que propose Léonard de Vinci est la représentation des mouvements invisibles de fluides à l'aide de lignes de courant. Pour déceler le mouvement d'un fluide, il faut pouvoir discerner les différentes parties du fluide, ce qui n'est pas possible avec de l'eau pure. On ne peut découvrir le mouvement d'un fluide comme l'eau qu'en y ajoutant des objets qui seront entraînés par les flots (par exemple des petits morceaux de bois lors d'une crue). Léonard de Vinci élimine cette méthode expérimentale pour ne conserver dans ses dessins que des lignes.

Cette représentation va donner lieu à des tourbillons pour représenter les zones où le liquide tourne sur lui-même. Léonard de Vinci a inventé le tourbillon, qu'il déclinera ensuite comme un objet théorique à part entière. Pour preuve, même si les tourbillons sont de

différentes formes dans la réalité, ils sont souvent ovoïdes, Léonard de Vinci les dessine toujours circulaires.

c. Forme spatiale des tourbillons

Les tourbillons de Léonard de Vinci ont une forme précise, qu'ils conservent tous. Leur enveloppe est un cône régulier qui s'élargit à la surface. A l'intérieur de ce cône tridimensionnel, le mouvement du fluide est de plus en plus rapide vers le centre alors qu'il est plus lent vers l'extérieur du tourbillon. En vue à deux dimensions, les lignes décrivant le cône s'enroulent en spirale vers le centre du cône.

d. Zones de la turbulence et cascade de tourbillons

Léonard de Vinci donne la manière dont évolue la turbulence. Il découpe en trois zones distinctes la turbulence : une première zone où est créée la turbulence (suite à un élargissement de canal, un contact avec un objet, etc.), une seconde zone où la turbulence se maintient et enfin une troisième zone où la turbulence s'éteint et où l'écoulement redevient calme.

« Dove la turbolenza dell acqua si genera

Dove la turbolenza dell acqua si mantiene plu longho

Dove la turbolenza dell acqua si posa »⁶

(E. Guyon, J-P Hulin, Granites et Fumées, Cambridge university press, 1996, p.161)

⁶ « Où la turbulence se crée,
Où la turbulence se maintient longtemps,
Où la turbulence retourne au repos. »

Enfin il énonce une dernière phrase que l'on voudrait divinatoire quant à la suite que prendront les événements concernant la turbulence. « Les petits tourbillons sont presque innombrables et les grands tourbillons sont mis en rotation que par les grands, non par les petits, tandis que les petits tourbillons le sont à la fois par les grands et les petits »⁷ C'est en effet sur ce type de raisonnement qu'est bâti la théorie de Kolmogorov. Cependant il est difficile de croire que Léonard de Vinci ait pu pressentir le mode de dissipation des tourbillons. Il est plus facile de penser que c'est notre interprétation à posteriori qui nous laisse croire à une étendue incroyable du génie de Léonard.

En conclusion, Léonard de Vinci a utilisé une nouvelle méthode pour faire de la science. Il a utilisé un nouveau procédé argumentatif basé sur l'expérience et l'observation, non plus sur la théorie et l'exemple particulier. Cette nouvelle vision des choses, basée sur le mouvement, l'a poussé à aborder la science des fluides différemment. Il a créé tour à tour un nouveau vocabulaire pour parler de sa théorie et a consolidé, si ce n'est inventé, la métaphore entre le mot turbulence de l'époque (foule désordonnée) et la turbulence des fluides. En plus du vocabulaire en langue vulgaire, il met au point un nouveau mode d'analyse par le dessin. Bien qu'il ait mis au point ce nouveau mode d'analyse des écoulements, il reste aussi des traces de l'ancien mode d'explication via la théorie des quatre éléments. Les deux modes d'explication coexistent en même temps chez Léonard de Vinci. Cependant, il ne les mélange pas, ces deux types d'explication et d'interprétation de fluides sont utilisés pour répondre à des questions différentes. La théorie actuelle retient bien des points énoncés par Léonard de Vinci. D'une part la représentation des écoulements par ligne

⁷ Citation issue du document internet de Marie Farge, La turbulence.

de courant, les tourbillons, l'analogie de traitement de l'eau et de l'air et enfin le mode de dissipation d'énergie (les zones de la turbulence). Cependant la théorie actuelle change la conception des tourbillons de Léonard, les tourbillons sont des entités plus abstraites qui n'ont pas la forme ni le mouvement de ceux décrits par Léonard. Aujourd'hui on entend par tourbillon un « objet théorique » ayant une longueur caractéristique.

3. Comment analyser l'apport de Léonard de Vinci dans la science de la turbulence ?

Le but de cette partie est de mêler les résultats historiographiques de la partie 1 à l'analyse des notes laissées par Léonard de Vinci dans ses carnets. Cette analyse a été développée lors de la deuxième partie. Aujourd'hui de nombreux chercheurs en mécanique de fluides revendiquent la paternité de la branche turbulence comme étant celle de Léonard de Vinci. Nous allons essayer comprendre comment Léonard a influencé la manière de penser la turbulence. A-t-il lancé une nouvelle manière de comprendre les fluides ? Si oui, peut-on parler de révolution scientifique au sens de Kuhn ? Au contraire, les travaux de Léonard de Vinci sont-ils analysés rétrospectivement et Léonard désigné précurseur d'une science qu'il n'a pas fondé ? Nous allons développer ces deux idées en deux temps. Dans le premier temps nous allons rappeler que l'on ne peut pas appliquer la théorie de Kuhn des révolutions scientifiques aux travaux de Léonard. Dans la deuxième partie, nous montrerons la possibilité que Léonard ne soit pas seulement un précurseur historique de la théorie de la turbulence, mais que ses travaux ont pu inspirer directement les futurs mécaniciens des fluides.

a. L'étude de Léonard de Vinci a-t-elle instauré un paradigme concernant la turbulence ?

i. Une théorie propice à développer un paradigme.

Léonard, à sa mort ne laisse que des carnets de notes en tout genre où sont mêlées aussi bien réflexions personnelles, réflexions concernant la peinture, croquis, schémas, dessins, citations, poésies et au milieu de ce fatras d'idées, des réflexions sur l'air et sur l'eau. Dans

ses carnets, il notait tout ce qu'il voyait, et toutes les choses intéressantes qui passaient dans son esprit. Il l'énonce clairement lors de sa dernière leçon à l'académie de Milan : « Je porte toujours avec moi des petits cahiers où je dessine ce qui me frappe [...] » (p70). Cette manière de stocker les idées, sans méthode, fait que les notes des carnets de Léonard de Vinci ne semblent pas suivre d'ordre. Elles sont portées sur le papier au moment où Léonard observe ou pense quelque chose. Charles Ravaisson-Mollien résume assez bien la portée de l'œuvre de Léonard : « Les Manuscrits de Léonard contiennent tantôt, des parties plus ou moins achevées de traités, pour peintre, sculpteur, anatomiste, botaniste, architecte, ingénieur civil et militaire, etc. Il se proposa de composer pour l'enseignement qu'il avait à diriger à l'académie de Milan, et peut-être aussi afin de les publier plus tard, tantôt des notes publiées de toutes sortes prises au jour le jour, sur les lectures, les observations, les expériences et les réflexions qui avaient occupé son esprit, ou sur les faits d'ordre public ou de caractère privé dont il tenait à garder un souvenir précis. »

Concernant la turbulence des fluides, bien que les idées de Léonard de Vinci soient consignées en vrac et non ordonnées, nous allons montrer que les écrits de Léonard de Vinci sont destinés à appréhender les fluides de manière nouvelle. Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, il met en place des questions nouvelles sur le mouvement des fluides. Ces questions nouvelles font intervenir de nouveaux objets théoriques (tourbillons) et un vocabulaire nouveau qui permet de répondre à ces questions. Enfin Léonard de Vinci propose d'unifier ses résultats théoriques dans un livre de cours, une sorte de manuel scolaire destiné aux savants désireux de comprendre la turbulence. Il n'aura pas le temps de publier ce traité des eaux, il mourra avant, mais la structure du traité apparaît déjà dans les écrits des carnets de Léonard. Léonard porte une ambition paradigmatique pour sa théorie

de la turbulence cependant jamais les idées de Léonard ne seront partagés par une communauté de chercheurs.

- ii. Ne rentre pas dans le cadre de la structure des Révolutions scientifiques de T.S. Kuhn.

La première objection que l'on pourrait faire à Léonard concernant le fond de sa théorie, c'est que cette théorie est incomplète. Par exemple nous connaissons des écoulements non turbulents (les écoulements laminaires) qui sont parfaitement régulier et dans lesquels il n'y a pas l'ombre d'un tourbillon. On pourrait soutenir que si la théorie de Léonard n'a pas été acceptée par la communauté scientifique c'est à cause de son incomplétude. Pourtant, de la même manière, il existe des paradigmes incomplets partagés par de nombreux scientifiques. On peut citer le paradigme de la chimie organique ou bien celui de la mécanique du solide. Kuhn d'ailleurs défend ce point de vue dans sa théorie (p.73) : « L'existence d'un paradigme n'implique pas celle d'un ensemble complet de règles. » Ainsi, attaquer la théorie de Léonard de Vinci sous cet angle là n'est pas possible.

Se pose la question suivante : le travail préparatoire de Léonard de Vinci sur les fluides a-t-il pu donner lieu à une révolution scientifique ? Cette question est délicate. Nous avons vu que le travail de Léonard est en rupture avec les conceptions anciennes des fluides. Cette rupture, nous l'avons montré lors de la partie 2 est due au fait que Léonard via une nouvelle manière de considérer le monde, qui diffère fortement des travaux d'Aristote ou bien de la philosophie chrétienne, trouve des anomalies dans les théories précédentes. La prépondérance des expériences physiques ou mentales dans ses modes de raisonnement est ce qui lui permet de déceler aisément de nouvelles anomalies. Kuhn dans sa théorie des

révolutions scientifiques soutient le fait que les découvertes proviennent des anomalies :

« La découverte commence avec la conscience d'une anomalie, c'est Kuhn dans sa théorie des révolutions scientifiques soutient le fait que les découvertes proviennent des anomalies :

« La découverte commence avec la conscience d'une anomalie, c'est-à-dire l'impression que la nature, d'une manière ou d'une autre, contredit les résultats attendus dans le cadre du paradigme de la science normale. » (T.S. Kuhn, la structure des révolutions scientifiques, traduit de l'américain par Laure Meyer, Flammarion, 1983) Léonard de Vinci construit, ensuite, une manière propre à lui de considérer ces anomalies pour qu'elles conduisent à des découvertes. Il met en place un vocabulaire pour parler des fluides, une nomenclature pour faire des schémas, l'ensemble des questions que l'on doit se poser. Mais surtout, il consigne les réponses que l'on doit pouvoir apporter pour répondre à ses questions dans ces carnets. Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, ce travail pré-paradigmatique était destiné à être publié dans un ouvrage classique sur la mécanique des fluides. Les deux questions auxquelles nous allons essayer de répondre ici sont les suivantes : Peut-on appliquer la théorie des révolutions scientifiques de Kuhn, alors que la « recherche » de l'époque était menée de manière différente ? Pourquoi ce travail pré-paradigmatique n'a-t-il pas donné lieu à une révolution scientifique ?

a. Contingence historique

Comme nous l'avons vu dans la première partie, l'histoire des carnets de Léonard de Vinci n'a pas permis que soient divulguées ses idées avant que Venturi ne les publie en 1797. Sans les notes de Léonard de Vinci complètes, il n'y a eu que certains de ces élèves qui ont pu être touchés par son enseignement. Ses cours de peinture à l'académie de Milan n'ont pas concerné les sciences et encore moins la turbulence. Duhem a retrouvé certaines traces des

idées de Léonard de Vinci chez des auteurs plus anciens, mais ces traces relèvent toujours de l'hydrostatique des fluides et sont des points particuliers. Il n'y a pas trace qu'un élève de Léonard ait possédé à un moment donné toutes les notions de la turbulence énoncées par le maître.

b. Organisation scientifique de l'époque et autour de Léonard

Léonard ne parlait pas latin et cela l'a desservi pour partager son œuvre avec les autres savants de l'époque. Ce manque de connaissance en latin, a gêné la transmission de ses idées de deux manières : la première, il n'a jamais pu écrire en latin qui était la langue des sciences de l'époque. La seconde, les scientifiques de l'époque l'ont mis à l'écart à cause de ce manque d'éducation. Il se définissait lui-même comme un « Uomo senza lettere », littéralement un homme sans lettres, d'éducation succincte ne maîtrisant pas la langue latine. Il essaya en vain d'apprendre le latin en autodidacte. Se trouve dans le codex trivulcien des listes de mots de vocabulaire latin preuve de sa volonté d'apprendre cette langue. Pour ces raisons, il ne put communiquer avec les autres maîtres de son temps.

Néanmoins, il faut modérer ce point de vue. Léonard de Vinci a donné des cours à l'académie de Milan et a donc pu par la même occasion disséminer ses idées. Charles Ravaisson-Mollien lance une piste de réflexion sur les notes consignées dans les carnets de Léonard de Vinci : peut-être sont-elles destinées à être rassemblées pour un cours futur ? Il est difficile de croire qu'il en soit autrement. Cependant Léonard de Vinci a arrêté de donner des cours à l'académie de Milan en 1499, c'est-à-dire bien avant qu'il n'ait réussi à poser toutes ses idées sur le papier. Nous ne savons que très peu de choses sur les cours dispensés par Léonard de Vinci à Milan. Péladan a retrouvé et traduit la dernière leçon de Léonard de

Vinci à son académie de Milan. Ce discours est un discours d'adieu, solennel, dans lequel Léonard s'adresse à des artistes et à des scientifiques en leur faisant partager ses idées de la relation entre la science et des arts. Quid donc de la nature des cours dispensés à cet auditoire. Etaient-ce des cours de science ? Etaient-ce des cours d'art ? Ou bien encore étaient-ce des cours rassemblant tout à la fois ?

Autre point, Léonard de Vinci avait des disciples, au nombre desquels Francesco Cardinali, qui ont pu disséminer les idées de Léonard de Vinci. Toujours est-il que Léonard de Vinci a eu beaucoup de mal à se faire connaître en tant que scientifique à son époque. Cela peut expliquer pourquoi on ne peut pas parler de révolution scientifique concernant l'œuvre scientifique de Léonard. L'organisation de la recherche telle que l'entend T.S. Kuhn dans son livre *La structure des révolutions scientifiques* est trop éloignée de celle qu'a connue Léonard. On ne peut pas considérer qu'autour de Léonard de Vinci il y ait eu un groupe de scientifiques partageant le même paradigme et basculant d'un coup dans une autre vision du monde. « Les paradigmes gagnent leur droit à l'existence parce qu'ils réussissent mieux que leurs concurrents à résoudre quelques problèmes que le groupe de spécialistes est arrivé à considérer comme primordiaux. Réussir mieux, ce n'est pourtant pas réussir totalement dans tel problème unique, ni même réussir bien dans un grand nombre de problèmes. Qu'il s'agisse de l'analyse du mouvement par Aristote, des calculs de Ptolémée pour la position des planètes, des applications de l'équilibre faites par Lavoisier ou de la traduction mathématique du champ électromagnétique par Maxwell, le succès d'un paradigme est en grande partie au départ une promesse de succès, révélée par des exemples choisis et encore incomplets. » (T.S. Kuhn, *La structure des révolutions scientifiques*, Seuil, 1972, p.39) La théorie de Léonard n'étant pas partagée par un groupe de

spécialiste, il n'est pas possible qu'elle se soit développée comme le justifie Kuhn, même si sa promesse de succès peut paraître élevée.

Le fait que les conditions pour parler de paradigme, révolution scientifique, anomalies, bref pour utiliser le vocabulaire de T.S. Kuhn, ne soient pas remplies crée une nouvelle situation d'avancée de la science non décrite par cet auteur : le travail d'un scientifique seul sans contact direct (ou au moins sans contact continu) ni échange avec l'extérieur, c'est-à-dire les autres scientifiques de l'époque.

Le fait que les conditions pour parler de paradigme, révolution scientifique, anomalies, bref pour utiliser le vocabulaire de T.S. Kuhn, ne soient pas remplies crée une nouvelle situation d'avancée de la science non décrite par cet auteur. Le travail d'un scientifique seul sans contact direct (ou au moins sans contact continu) ni échange avec l'extérieur, c'est-à-dire les autres scientifiques de l'époque.

L'exemple de Léonard de Vinci est unique en son genre. A lui seul, il met en place un nouveau dispositif scientifique d'expérimentation, basé sur l'expérience et les déductions logiques que l'on peut en faire. Ce dispositif nouveau lui permet de détecter des anomalies à la théorie préexistante (celles des quatre éléments). Là, il va réagir à ces anomalies comme le décrit Kuhn, en mettant en place un nouveau système de description du monde. Il redéfinit des termes, les domaines de recherches, les questions pertinentes, et il donne les moyens d'y répondre.

On pourrait croire, qu'il a lui seul changé de vision du monde, que l'eau ne lui apparaît plus comme avant, comme un élément à part entière. Croire cela serait faux. Bien que dans l'œuvre de Francesco Cardinali, le chapitre premier soit le seul où il mentionne clairement l'ancienne théorie, cela n'apparaît pas dans les carnets de Léonard de Vinci. Dans ses

carnets, les chapitres sont donnés pêle-mêle dans un ordre confus qui n'est pas l'ordre chronologique. Tout porte à croire qu'il a écrit la plupart de ses idées faisant référence à la théorie des 4 éléments en même temps que celles sur les tourbillons. Les deux visions du monde ne sont pas clairement séparées pour Léonard, sa proposition de théorie reste collée à l'ancienne théorie. Ce chevauchement des deux théories chez un même scientifique n'est pas permis selon la théorie de Kuhn.

Le second point qui ne s'accorde pas à la théorie kuhnienne, est le fait qu'une fois posée la théorie de Léonard de Vinci, il n'y ait pas eu d'explosion, d'effervescence scientifique autour de la turbulence. Le sujet s'est endormi à la mort de Léonard. Sur ce point, on ne peut pas attaquer crument la théorie de Kuhn. Nous avons vu que l'organisation de la recherche de l'époque et notamment l'isolation scientifique de Léonard de Vinci a conduit à ce genre de situation. Ses idées n'ont pas pu atteindre un nombre suffisant de scientifiques pour qu'elles soient reprises avec force. L'abandon dans lequel sont tombés les écrits de Léonard pendant 300 ans n'a pas permis que cette effervescence ait lieu. C'est seulement après la redécouverte des écrits de Léonard que de nouvelles avancées vont avoir lieu concernant la turbulence avec les travaux d'Osborne Reynolds.

La question que l'on peut se poser, au vu de l'histoire des carnets de Léonard de Vinci et du développement de la théorie de la turbulence est la suivante : Les études menées par Léonard de Vinci 400 ans plus tôt ont-elles déclenché les nouveaux travaux de Reynolds sur la turbulence ? Autrement dit, n'y a-t-il pas eu une révolution scientifique décalée dans le temps du fait qu'on ait perdu la trace des carnets de Léonard de Vinci ? On ne peut pas juger de l'influence de Léonard de Vinci sur la reprise des études sur la turbulence au XIXème siècle car nous n'avons aucune preuve directe ou indirecte

qu'Osborne Reynolds ait lu le livre *De moto e misura dell'acqua*. On peut simplement supposer que la communauté scientifique de l'époque ait eu connaissance de ces travaux car l'ouvrage *De moto e misura dell'acqua* était disponible dans les bibliothèques des grandes universités.

En conclusion, parler de révolution scientifique pour les écrits de Léonard n'est pas totalement justifié. Bien que ses idées personnelles aient déblayé les moyens de concevoir la turbulence, comme pour poser les bases d'un paradigme, la révolution scientifique n'aura jamais lieu. La raison tient du fait que l'organisation scientifique de l'époque était sensiblement différente de l'organisation scientifique actuelle. La turbulence a connu un développement contrecarré par le contexte historique. Lors de la redécouverte des carnets de Léonard de Vinci, la mécanique des fluides actuelle est entrain d'être créée. Cette théorie combinées aux questions posées par Léonard de Vinci ont débouché sur les nouveaux travaux sur la turbulence à la fin du XIXème siècle.

b. Léonard de Vinci est-il un précurseur ?

Comme nous l'avons vu précédemment, il est difficile de parler de révolution scientifique pour la théorie développée par Léonard de Vinci. Pourtant la théorie s'inscrit dans une période de science extraordinaire : Le nouveau mode d'observation de la nature qu'il met en place débouche sur quelques anomalies au paradigme des quatre éléments alors en vigueur. Il ne distingue plus l'air et l'eau comme deux éléments différents, mais les rassemble pour leur appliquer la même théorie. Il ne s'arrête plus à une description symbolique du monde, il décrit l'eau par son mouvement et non plus grâce à des symboles. Il découvre que les mouvements d'eau sont plus complexes que ceux décrits dans le paradigme de l'époque. Cet ensemble d'anomalies le conduit à douter de la méthode explicative de l'époque.

Pour aborder l'analyse historique de cette théorie, il faut analyser de manière critique le passé sans chercher à vouloir le sur-interpréter. G. Bachelard met en garde les historiens des sciences qui parfois abusent de leurs connaissances pour interpréter les idées passées. « A vouloir trop rendre les pensées du passé on peut commettre de véritables rationalisations, des rationalisations qui attribuent un sens prématuré à des découvertes passées. » (G. Bachelard, Conférence au palais de la découverte 1950, université de Paris, 1951). On peut trouver des découvertes là où il n'y en a pas. Il accompagne ce texte de l'exemple de l'or colloïdal : un alchimiste du Moyen-âge après avoir broyé en poudre très fine de l'or le mélangea à de l'eau. Il obtenu un liquide de couleur rouge. Les propriétés des suspensions colloïdales furent découvertes plusieurs quelques siècles plus tard. Est-ce que cet alchimiste a été pour autant précurseur des suspensions colloïdales ? A son époque, il ne connaissait rien des propriétés de ces suspensions. Pour lui ce liquide demeurerait seulement un liquide de couleur rouge. Pour préciser son idée, G. Bachelard dans la même conférence cite Léon Brunschvicg (p.10), « Seulement leur découverte existe pour nous, elle n'existait pas pour eux. » Le travail de l'historien des sciences est donc délicat, et peut s'il n'est pas mené avec l'idée que nous avons les connaissances postérieures à l'auteur que nous étudions, s'avérer désastreux. Il en est de même pour cette étude sur Léonard de Vinci. Peut-être que nous poussons plus loin nos idées que ce qu'elles sont réellement ?

Léonard de Vinci va proposer une nouvelle science des fluides qui se posent d'autres questions que celles que se posait l'ancien paradigme. Au moyen-âge, la science des fluides explique pourquoi ces fluides s'écoulent, quelle est leur nature et qu'elles sont leur propriétés. C'est les questions autour de ces trois problématiques auxquelles on peut répondre. L'eau se meut pour rejoindre le centre naturel de sa sphère. Pourtant l'eau, plus légère reste au dessus de la terre. Les scientifiques de l'époque proposent d'expliquer la

résurgence des eaux avec ces outils par exemple. Ils ne s'intéressent pas à la manière qu'à l'eau de s'écouler. Ils se contentent de dire pourquoi elle s'écoule. Léonard de Vinci renverse le questionnement autour des écoulements de fluides en changeant le pourquoi en comment.

Ces nouvelles questions, accompagnées de la méthode expérimentale qu'il a lui-même mis en place vont permettre à Léonard de Vinci de faire de la science extraordinaire. Pourtant cette science extraordinaire va tomber dans l'oubli et l'avènement réel de l'étude des fluides turbulents ne commencera qu'au XIXème siècle. Aujourd'hui, on considère Léonard de Vinci comme le précurseur de la turbulence. Mais qu'entend-t-on au juste par précurseur ? Y a-t-il filiation des idées de Léonard de Vinci dans la théorie actuelle ou bien c'est une analyse rétrospective des travaux de Léonard qui nous permet de découvrir des similitudes entre la théorie actuelle et sa théorie sans qu'il n'y ait eu d'influence de la seconde sur la première ?

Tout d'abord, il faut insister sur le fait que l'analyse que nous faisons de Léonard de Vinci comme un précurseur de la turbulence se place dans une vision anachronique de l'Histoire. Nous analysons les écrits de Léonard de Vinci en relation avec les événements futurs de l'Histoire. A l'époque de Léonard, on ne savait rien des développements de Reynolds ou de Kolmogorov. Pourtant pour dire que Léonard est le précurseur de la turbulence, il faut que nous puissions connaître des développements. En effectuant ce type d'histoire, on intervient dans les faits historiques. Si l'on se contentait de faire une histoire diachronique, c'est-à-dire une histoire où l'auteur s'efforce de se mettre dans la peau des protagonistes de l'époque (mode de pensée, organisation politique, philosophie du personnage, ect.) sans y ajouter son vécu personnel ni ses connaissances concernant l'histoire future, on ne pourrait pas trouver d'éléments d'anticipation de la science moderne chez Léonard de Vinci. Le concept

d'anticipation et de précurseur est donc un concept totalement anachronique par nature. Kragh et Sandler (An introduction to the historiography of science, Helge Kragh, Cambridge university press, 1987, p.100-107) définissent cinq types de manières d'anticiper la science. Lorsqu'on dit que P a anticipé N, on sous-entend un des cinq points ci-dessous.

1. P est dans la même tradition scientifique que N et a effectivement influencé N. Mais P a énoncé une théorie incomplète et qui n'a pas eu une reconnaissance immédiate.
2. P n'est pas dans la même discipline que N. P a énoncé une théorie concernant une discipline particulière et l'on a trouvé, plus tard, des similitudes avec la théorie énoncée par N dans une autre discipline.
3. P peut être un précurseur contre sa propre volonté. La théorie de P peut être reprise par N dans un but différent.
4. P n'a eu aucune influence, ni directe, ni indirecte sur N. Dans ce cas, c'est l'historien qui soutient que P est le précurseur de N en soutenant qu'il existe une connexion objective entre les sujets de P et de N.
5. On utilise parfois le mot anticipation dans le sens du mot prédiction. Si l'on dit que P a prédit N, la relation se situe entre la théorie et la découverte et non pas entre deux formulations différentes d'une même doctrine.

Dans le cas de Léonard de Vinci, on peut d'emblée se limiter aux points 1 et 4. Les points 2, 3 et 5 ne nous concernent pas. En effet, Léonard de Vinci s'intéresse bien à la même chose que Kolmogorov quand il étudie les tourbillons d'eau. La théorie de Léonard de Vinci n'a pas été reprise dans un but différent, on essaye toujours de comprendre les tourbillons d'eau. Enfin, les énoncés de Léonard de Vinci n'ont pas valeur de prédiction.

Le but est donc de savoir si Léonard de Vinci est le précurseur au sens du point 1, c'est-à-dire qu'il a effectivement influencé la théorie actuelle, ou bien si il est précurseur au sens du point 4, c'est-à-dire qu'il n'a eu aucune influence ni directe, ni indirecte mais que c'est l'historien qui soutient qu'il existe un lien.

La première remarque que l'on peut faire est la suivante : Léonard de Vinci a créé une situation de science extraordinaire qui a débouché sur une situation quasi paradigmatique (de nouvelles questions, un nouveau vocabulaire, un livre de cours, des méthodes de représentation, ect. Mais pas de contingent scientifique à ses côtés pour suivre ses idées). Cette situation n'a débouché sur aucun développement scientifique, encore moins une révolution. Il semble donc que son travail n'ait été repris par aucun scientifique et qu'ainsi, Léonard de Vinci soit le précurseur de la turbulence au sens du point 4. Pourtant, il existe certains arguments en faveur d'une filiation des idées de Léonard de Vinci vers la théorie de la turbulence actuelle. Tout d'abord, la contingence historique qui a vu les carnets de Léonard de Vinci tomber dans l'oubli jusqu'à la fin du XVIIIème siècle n'a pas permis de répandre les idées de Léonard de Vinci. Le fait qu'il n'y ait pas eu de suite directe aux travaux de Léonard n'est pas un mystère : Il n'avait aucun disciple érudit ni de visibilité parmi les érudits de l'époque car il ne maîtrisait pas le latin. A sa mort son élève François de Melzi, conserve les carnets de Léonard de Vinci sans les divulguer. Ensuite au XVIIIème siècle la redécouverte des carnets de Léonard de Vinci par les français et leur traduction partielle par Venturi ont remis les idées de Léonard sur le devant de la scène pour la première fois. D'un côté Venturi, après avoir lu les carnets de Léonard de Vinci a proposé l'existence de tourbillons pour résoudre le paradoxe de d'Alembert. D'un autre côté, Francesco Cardinali, reprenant les traductions des carnets de Léonard de Vinci publie un livre au format d'un livre de cours intitulé *De moto e misura dell'acqua*. Ce livre de cours publié dès 1826 se retrouve

de manière certaine à la fin du XIXème siècle à l'université de Harvard. Ce livre faisait donc parti du bagage commun des élèves de cette époque. Ainsi, les idées de Léonard de Vinci ont filtrés dans le milieu scientifique du XIXème siècle à la fois par le scientifique Venturi et par le livre de Francesco Cardinali.

Je soutiens donc qu'il existe un lien au moins indirect, et peut-être direct, entre Léonard de Vinci et La théorie de la turbulence actuelle. On peut contre argumenter que le lien montré par les preuves historiques fait force de quelques suppositions et donc que l'on pourrait très bien être dans le point 4 où l'historien (c'est-à-dire moi) crée un lien à priori objectif. Je dois le reconnaître, on ne peut pas se défendre d'interpréter l'Histoire, mais on peut dire pareil de tous les autres cas de précurseur.

Conclusion

Léonard de Vinci est sans nul doute le savant mythique de la renaissance. Son œuvre est immense dans diverses activités artistiques, mais son nom reste associé à celui d'un peintre de talent. Le reste de son œuvre scientifique et technique est méconnu du grand public, même si ses dessins de machines volantes ont eu un écho récent.

En science, Léonard a poussé ses investigations, entre autres, sur les mouvements de l'eau et de l'air. Il a consigné dans ses carnets ses idées à l'état brut. L'organisation, les dates sont défailtantes ; le récit est parfois lacunaire. De ce brouhaha d'idées, ressort l'envie du savant de publier ses réflexions sur l'eau dans un traité. En étudiant de plus près les écrits de Léonard de Vinci sur l'eau et les tourbillons, on remarque qu'il pratique de la science extraordinaire. Il met au point un nouveau mode de questionnement basé sur le mouvement, il remarque alors de nombreuses anomalies au paradigme existant. Il propose un nouveau vocabulaire pour parler de cette science, il met au point une manière visuelle basée sur des diagrammes pour répondre aux nouvelles questions qu'il se pose. Cependant cette pratique ne va pas déboucher sur une révolution. L'isolement scientifique de Léonard de Vinci ne permettra pas de répandre ses idées dans le monde de la renaissance.

Aujourd'hui les scientifiques affirment que Léonard de Vinci est un précurseur de la turbulence. Mais qu'entendent-ils par précurseur ? La plupart des scientifiques s'intéressant à la turbulence considèrent qu'une bonne partie des idées regroupées dans la théorie de la turbulence sont contenues dans les écrits de Léonard de Vinci (présence de tourbillons, dissipation d'énergie, zones de la turbulence, structure de la turbulence et même la notion

de cascade d'énergie). L'attribution de l'anticipation de la cascade de Kolmogorov à Léonard me semble même fantaisiste. Ces scientifiques étudient Léonard à la lumière de la théorie actuelle (à l'époque de Léonard on ne parlait même pas d'énergie, ils font de l'histoire anachronique) mais n'étudient pas l'influence qu'a pu avoir Léonard sur le développement de la science de la turbulence. Mes recherches ont permis de trouver deux lignes de transmissions des idées de Léonard aux scientifiques des fluides du XIXème siècle. La première se fait de manière directe par Venturi qui, après avoir traduit les carnets de Léonard propose d'étudier les tourbillons pour expliquer le paradoxe de d'Alembert. La seconde se fait de manière indirecte à travers le travail de Francesco Cardinali qui regroupe dans un livre les écrits de Léonard de Vinci relatifs aux eaux. Ce livre publié dès 1826 se retrouve dans plusieurs bibliothèques de renom (bibliothèque de l'Institut dès 1826, Harvard dès 1899). Les scientifiques de l'époque ont donc pu lire les écrits de Léonard.

Peut-on conclure formellement qu'il existe un lien entre la théorie actuelle de la turbulence et celle de Léonard ? Les deux arguments proposés ci-dessus doivent être complétés. Notamment une étude fine de la biographie d'Osborne Reynolds doit être entreprise pour savoir s'il a eu un contact avec un élève de Venturi ou bien s'il a eu connaissance des écrits de Léonard. Cette preuve associée aux deux arguments précédents pourra permettre de conclure exactement quant à la filiation des idées de Léonard dans notre théorie actuelle.

Bibliographie :

- [1] D. Arasse, Léonard de Vinci. Le rythme du monde, Hazan, 1997
- [2] N. Laneyrie-Dagen, L'Invention de la nature. Les quatre éléments à la renaissance ou le peintre premier savant, Flammarion, 2008, Paris.
- [3] E. Guyon, J-P. Hulin, Granites et fumées. Un peu d'ordre dans le mélange, Odile Jacob, 1997
- [4] O. Darrigol, Worlds of flow, Oxford University Press, 2005
- [5] C. Ravaisson-Mollien, Manuscrit A de la bibliothèque de l'institut, 1881, Paris.
- [6] C. Ravaisson-Mollien, Manuscrit F de la bibliothèque de l'institut, 1881, Paris.
- [7] C. Ravaisson-Mollien, Manuscrit I de la bibliothèque de l'institut, 1881, Paris.
- [8] G. Bachelard, Conférence au palais de la découverte 1950, université de Paris, 1951.
- [9] O. Letze, T. Buchsteiner, Leonardo da Vinci, Scientist, Inventor, Artist.
- [10] Péladan, La dernière leçon de Léonard de Vinci à son académie de Milan (1499), Bibliothèque internationale d'édition E. Sansot et C^{ie}, 1904, Paris
- [11] F. Cardinali, Del moto e misura del' acqua di Leonardo da Vinci, 1828, Bologne
- [12] A-M. Farge, La turbulence, Ecole normale supérieure, Paris (document internet)

- [13] P. Duhem, Léonard de Vinci ce qu'il a lus et ceux qui l'ont lu, Tome 1&2, Hermann, 1906, Paris
- [14] Helge Kragh, An introduction to the historiography of science, Cambridge university press, 1987.
- [15] S. Frontinus, De aquis urbae romae, Librum 1, 97, Rome
- [16] Émile Bréhier (1876 - 1952), La philosophie du Moyen-âge, 1949, Paris