



POLYTECH[®]
TOURS

Département
Aménagement et Environnement



Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2021-2022

Léonard de Vinci et la Loire

Sous la direction de :
Stéphane Rodrigues

Augustin Joneau

Léonard de Vinci et la Loire : Pensées du génie italien sur la dynamique fluviale

Stéphane Rodrigues

Augustin Joneau

2022

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Je remercie Stéphane Rodrigues, mon tuteur de projet de fin d'étude, pour m'avoir accompagné et encadré tout au long de ce projet de recherche.

Je suis également reconnaissant des précieux conseils de Pascal Brioist qui m'ont permis d'orienter mes recherches vers les ouvrages concernant mon sujet.

Enfin, je remercie Jodie Lodge d'avoir pris le temps de relire mon rapport.

SOMMAIRE

Table des Figures	1
Introduction	2
Définition contemporaine du sujet	3
1. Méthode de recherche	4
2. Léonard de Vinci et l'eau	6
2.1 La statique de l'eau selon Léonard de Vinci	6
2.2 Léonard De Vinci, un précurseur de la mécanique des fluides	9
3. L. De Vinci et l'hydraulique	11
3.1 Le cas des vagues	11
3.2 De l'observation du ressaut hydraulique...	12
3.3 ... à la turbulence, un concept abordé par L. De Vinci	12
4. Observations sur la Loire	15
4.1 Les courants fluviaux	15
4.2 Les forces érosives de l'eau et le transport solide	17
Conclusion	21
Bibliographie	22

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Première de couverture des monographies d'Enzo Macagno sur le Codex Arundel (à gauche) et le Codex Hammer (à droite)	4
Figure 2 : Liste des manuscrits de Léonard de Vinci conservés à l'Institut de France (wikipédia.org)	5
Figure 3: Représentation concentrique des sphères élémentaires selon L. De Vinci	6
Figure 4 : Tube en U avec deux sections différentes	6
Figure 5 : Corde tendue lorsqu'on tire (en haut) et détendue lorsqu'on pousse (en bas)	8
Figure 6 : Croquis d'un tube en U par L. De Vinci dans le Codex Arundel	9
Figure 7 : Croquis des motifs d'écoulement d'un fluide autour d'un point de stagnation, par L. De Vinci dans le Codex Arundel	10
Figure 8 : Croquis d'une vague déferlante par L. De Vinci dans le Codex Arundel	11
Figure 9: Croquis de dessin hydraulique par L. De Vinci dans le Codex Arundel (à gauche) et photo d'un ressaut hydraulique (à droite)	12
Figure 10 : Dessin de L. De Vinci dans le Codex Arundel représentant des turbulences provoquées par la présence de piliers	13
Figure 11 : Dessin de vortex par L. De Vinci dans le Codex Arundel	13
Figure 12 : Etude de turbulences par L. De Vinci dans le Codex Atlanticus	14
Figure 13 : Modélisation numérique de l'étude de turbulences (Jamet, s. d.)	14
Figure 14 : Représentation d'un motif d'écoulement complexe dans la Loire à Amboise, par L. De Vinci	16
Figure 15 : Lieu présumé du croquis de L. De Vinci à Amboise (Île d'Or) Source : Géoportail	16
Figure 16 : Croquis, de L. De Vinci dans le Codex Arundel, d'un mur tombant dans l'eau à cause de l'érosion par la rivière	17
Figure 17 : Croquis représentant le mouvement des méandres d'une rivière dans une vallée par L. De Vinci dans le Codex Arundel	18
Figure 18 : Schéma reprenant le croquis de L. De Vinci	18
Figure 19 : Esquisse de L. De Vinci pour une expérience sur la formation des méandres	18
Figure 20 : Croquis de L. De Vinci de vague à l'interface air-eau et eau-sable	19
Figure 21 : Dessin de L. De Vinci représentant l'écoulement d'un matériau granulaire dans le Codex Arundel	19
Figure 22: Croquis de motif d'érosion autour d'un obstacle sur le lit d'une rivière, par L. De Vinci	20
Figure 23 : Dessin de motifs d'écoulements complexes dus à la présence d'obstacles dans le Codex Arundel	20

INTRODUCTION

Tout au long de sa vie Léonard de Vinci (1452 – 1519), un éminent savant italien, a eu des pensées sur le monde qui l'entoure. Il a effectué de nombreuses observations, notant ces dernières dans des carnets. Il est même allé jusqu'à créer de maquettes et modéliser des phénomènes physiques comme c'est par exemple le cas pour la géologie ou l'hydraulique (Brioist, 2019). C'est un homme qui s'exerce dans de nombreux domaines comme la peinture ; la santé ; la religion ; la science et la nature entre autres.

Pendant les dernières années de sa vie, il s'est intéressé au fleuve Loire selon des aspects hydrauliques, morphologiques, paysagers et génie civil. Ce projet de recherche de fin d'études repose sur une démarche bibliographique qui explorera les Codex de Léonard (Codex Leicester, Codex Arundel et autres...) en vue d'établir une vision relativement exhaustive des questionnements scientifiques et des découvertes réalisées par Léonard de Vinci autour de la dynamique fluviale, d'un point de vue pluridisciplinaire. Les Codex sont des carnets regroupant des feuilles de notes, des observations, des croquis réalisés par L. De Vinci sur des sujets pluridisciplinaires.

Pour ce projet de recherche je vais m'intéresser aux travaux de Léonard de Vinci en rapport avec l'eau dans ses carnets. Au cours de sa carrière, le génie italien a également été amené à travailler sur de nombreux projets et études d'hydraulique. Pour réaliser ces derniers, il s'appuie sur ses observations de la nature. En effet, L. De Vinci réfléchit en termes de « continuité du passage des phénomènes naturels aux phénomènes artificiels » comme « les lois de ruissellement des eaux du fleuve qui s'appliqueront à l'écoulement des écluses » (Thomas, 1996). La méthode principale concernera l'analyse bibliographique d'un certain nombre de feuillets présents dans les Codex. Un certain nombre de textes ont été traduits de l'italien en anglais ou français. Le spécialiste de Léonard de Vinci co-encadrant de ce PFE, Pascal Brioist, constitue une ressource de valeur pour l'accompagnement de ce travail.

Le travail d'analyse des travaux de Léonard s'est déroulé en deux temps :

Dans un premier temps ce travail a consisté en la réalisation d'un inventaire de l'ensemble des travaux en rapport avec l'eau, le cycle de l'eau, les actions exercées par l'eau etc. Dans un second temps, une focalisation a été faite sur ce qui pourrait s'apparenter aux domaines de l'hydraulique, de l'hydromorphologie et du transport sédimentaire dans les travaux de L. de Vinci tout en mettant les observations du savant italien en lien avec les connaissances scientifiques actuelles concernant ces disciplines. Je me focaliserais également, pour une partie de l'étude, sur les travaux de L. De Vinci en lien avec la Loire.

DEFINITION CONTEMPORAINE DU SUJET

La dynamique fluviale est une discipline étudiant l'évolution de la morphologie des cours d'eau. On parle aussi d'hydrogéomorphologie, définie comme « l'histoire morphologique des vallées qui a façonné les plaines alluviales modernes » (Masson et al., 1996). C'est une discipline transversale qui relie la géographie physique, la géologie, la sédimentologie, l'hydraulique, l'hydrologie ainsi que la biologie et l'écologie fluviale.

Etymologiquement, l'hydrogéomorphologie vient du grec *hydro* signifiant « l'eau » ; *géo* signifiant « la terre » ; *morphe* signifiant « la forme » et *logos* signifiant « la discussion ». On pourrait donc qualifier l'hydrogéomorphologie de discussion, d'étude sur la forme de la terre et des cours d'eau sous l'influence de l'eau.

En 2000, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) introduit l'hydromorphologie dans le droit européen. Ce texte attribut à l'hydromorphologie les éléments suivants :

- Le régime hydrologique (Débit et Connexion aux eaux souterraines) ;
- La continuité du cours d'eau (lorsqu'un cours d'eau permet une migration non perturbée des organismes aquatiques et favorise le transport des sédiments) ;
- Les conditions morphologiques (types de chenaux, variations de largeur et de profondeur, vitesse d'écoulement, état du substrat, structure et état des rives).

Tous ces concepts n'étant pas encore nés à l'époque de Léonard de Vinci (1452 – 1519), celui-ci s'intéresse bien plus globalement aux cours d'eau, à leur fonctionnement et leur structure. On pourrait alors considérer les travaux de Léonard de Vinci comme précurseurs à la « potamologie ». La potamologie (du grec *potamos* signifiant « le fleuve ») créée par Maurice Pardé pour « la science des fleuves et des rivières » (De Beauregard, 1994).

M. Pardé distinguait deux branches dans la potamologie : l'hydrologie fluviale et la dynamique fluviale. La première étudie les débits fluviaux, leurs variations et leurs causes. La seconde s'intéresse aux courants fluviaux et à leur influence sur les lits des rivières (Dacharry & Laganier, 2001) .

Ces différents aspects de la potamologie se retrouvent bien dans les observations de Léonard de Vinci comme nous l'avons vu précédemment et le verrons encore ici.

1. METHODE DE RECHERCHE

Afin de réaliser mes recherches je me suis appuyé sur différents écrits reprenant les Codex de L. De Vinci ou approfondissant ses observations. Précédemment j'ai résumé un bref aperçu du cycle de l'eau selon le savant italien afin d'avoir son point de vue sur le sujet. Ici, je vais me concentrer principalement sur ce qui rejoint le domaine de la dynamique fluvial, de l'hydraulique et l'hydromorphologie.

Je vais m'appuyer sur les monographes d'Enzo O. Macagno, un hydraulicien de l'institut de recherche hydraulique d'Iowa (IHR). Les monographes du scientifique sont des analyses critiques des Codes et manuscrits de L. de Vinci en lien avec la mécanique des fluides. Entre 1986 et 2006, l'auteur a écrit plus d'une vingtaine d'ouvrages, certain co-écrit avec sa femme, Matilde C. Macagno. (DAA Awardee, s. d.) Je vais principalement utiliser les deux monographes déjà vus l'année dernière :

Le *Leonardian Fluid Mechanics Unexplored Flow Studies in the Codex Arundel* et le *Leonardian Fluid Mechanics What remains to be investigated in the Codex Hammer* (Figure 1). On retrouve dans ces textes des analyses du Codex Arundel (un carnet de L. De Vinci traitant du mouvement et de dynamique des fluides) et du Codex Hammer (ou Codex Leicester). L'auteur explique les observations de L. De Vinci et les rapproches des concepts scientifiques contemporains. Le monographe à propos du Codex Arundel est structuré en 5 parties principales : la cinématique ; la statique des fluides ; le principe d'écoulement des fluides ; les analogies de Léonard (principalement des comparaisons entre l'air, le vent et l'eau) ; ses expériences et situations expérimentales. Enzo Macagno étant un spécialiste de la mécanique des fluides et de l'hydraulique, l'article est extrêmement enrichissant pour relier les questionnements et observations de L. De Vinci aux concepts actuellement connus en hydraulique et écoulement des fluides. (Macagno, 1989)

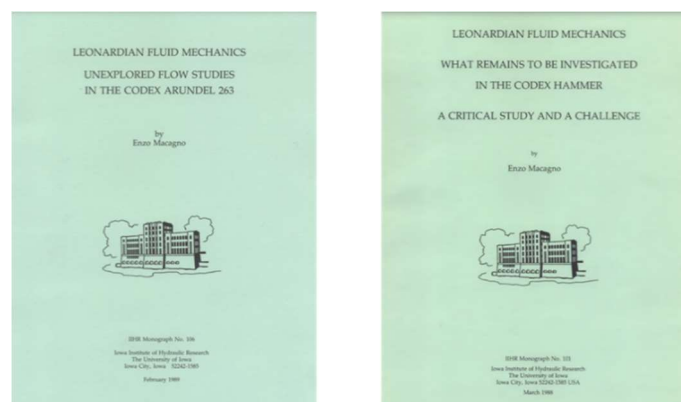


Figure 1: Première de couverture des monographes d'Enzo Macagno sur le Codex Arundel (à gauche) et le Codex Hammer (à droite)

J'ai également regardé parmi la liste des manuscrits (Figure 2) de L. De Vinci détenus à l'Institut de France lesquelles pourraient m'intéresser :

- *Manuscrit B* écrit vers 1487-1489. Il traite surtout de l'ingénierie et l'architecture militaires³⁷⁰ ;
- *Manuscrit C* ouvert en 1490. Il s'intéresse surtout à l'optique³⁵⁵ et aux rapports entre l'ombre et la lumière³⁷⁰ ;
- *Manuscrit D* achevé vers 1491³⁷⁰, il se penche sur l'optique³⁵⁵ ;
- *Manuscrit A* écrit vers 1490-1492, il traite surtout du mouvement³⁷⁰ ;
- *Manuscrit H* écrit vers 1493-1494, il se penche surtout sur le thème de l'eau³⁷⁰ ;
- *Manuscrit I* écrit vers 1493-1494, il aborde des sujets divers³⁷⁰ ;
- *Manuscrit L* écrit entre 1497 et 1504, il parle de divers projets militaires³⁷⁰ ;
- *Manuscrit M* écrit vers 1499-1500, il concerne la géométrie et la physique⁵⁷² ;
- *Manuscrit K* écrit vers 1503-1507, il concerne la géométrie³⁷⁰ ;
- *Manuscrit F* ouvert le 12 septembre 1508 à Milan, il se penche sur des sujets divers dont l'astronomie, l'optique, la géologie, le vol des oiseaux³⁵⁷ mais surtout l'hydraulique³⁷⁰ ;
- *Manuscrit G* écrit vers 1510-1511 puis en 1515, il traite surtout de botanique³⁷⁰ ;
- *Manuscrit E* écrit vers la fin de sa vie, Léonard y travaille surtout sur le vol des oiseaux et sur son projet de machine volante³⁷⁰.

Figure 2 : Liste des manuscrits de Léonard de Vinci conservés à l'Institut de France (wikipédia.org)

Les manuscrits H et F (Figure 2) abordent des thèmes en lien avec le sujet L. de Vinci et la Loire, je suis donc allé rechercher les monographies d'Enzo Macagno sur ces manuscrits H et F traitant de l'eau.

Enfin, afin de rechercher toutes idées de L. De Vinci en lien avec la Loire j'ai effectué une recherche par mot dans l'ensemble des monographies d'Enzo Macagno. Pour ce faire, j'ai utilisé l'Iowa Research Online qui permet de retrouver l'ensemble des travaux des chercheurs de l'institut. J'ai appliqué les filtres « Enzo Macagno » et « Léonard De Vinci », il en est ressorti 24 documents. Ensuite, pour chacun de ses documents j'ai réalisé une recherche par mot avec les mots « Loire » et « Lo era » (ce dernier étant la dénomination de la Loire par le savant italien).

Titre	Auteur	Année	Occurrence du mot « Loire »
<i>Leonardian fluid mechanics : "Libro dell'acqua" VI</i>	Enzo O. Macagno	2006	3
<i>Leonardian fluid mechanics : "Unexplored flow studies in the codex arundel 263"</i>	Enzo O. Macagno	1989	5

Pour poursuivre, à travers les différentes analyses bibliographiques je vais établir un inventaire des réflexions de L. De Vinci sur le domaine de l'eau, de l'hydraulique et de la dynamique fluviale. Je réaliserais également un focus des observations de L. De Vinci sur la Loire.

2. LEONARD DE VINCI ET L'EAU

2.1 La statique de l'eau selon Léonard de Vinci

Tout d'abord, il faut savoir que pour L. De Vinci, chaque élément appartient à une sphère. Il y a par exemple la sphère de l'air, la sphère de l'eau etc. Pour le scientifique italien, chaque élément doit rester dans sa sphère et si l'élément se retrouve en dehors de sa sphère il y revient. Ainsi l'eau cherchera toujours à revenir vers la sphère de l'eau et l'air à revenir vers la sphère de l'air. Concernant l'eau, pour L. De Vinci, cette théorie explique le fait que l'eau cherche toujours à revenir vers la mer, à l'équilibre avec sa sphère.

Ainsi, pour L. De Vinci l'état d'équilibre des éléments se traduirait par leur disposition en couches sphériques concentriques (Figure 3).

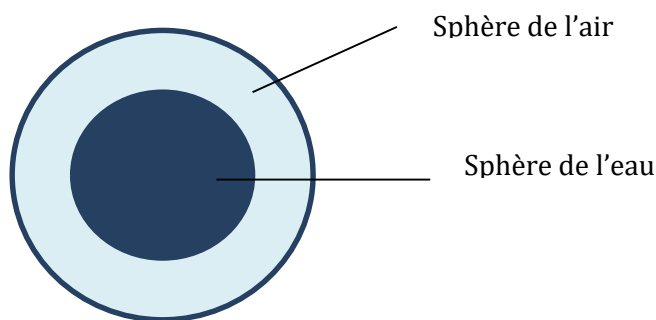


Figure 3: Représentation concentrique des sphères élémentaires selon L. De Vinci

Cette idée se confirme pour Léonard par l'expérience des vases communicants avec par exemple l'utilisation d'un tube en U avec deux côtés de section différentes mais où l'eau se retrouve au même niveau dans chaque bout du tube en U. On peut donc observer l'interface entre la sphère de l'eau et celle de l'air (Figure 4).

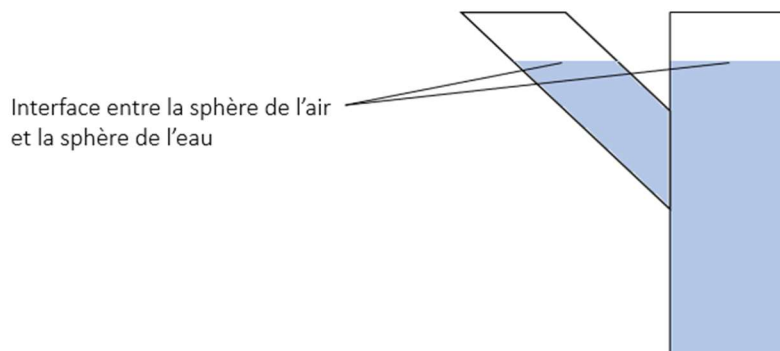


Figure 4 : Tube en U avec deux sections différentes

Au sein même d'une sphère, L. De Vinci statue que chaque élément au sein de sa propre sphère a le même poids.

« Nessun elemento pesa nella sua sfera »

« Aucun élément ne pèse sur sa sphère »

Enzo Macagno, dans son monographie sur le Codex Arundel interprète les paroles du savant telles que toute portion d'eau dans l'eau a une flottabilité neutre.

Dans les carnets du savant italien, nous retrouvons aussi des écrits concernant le poids de l'eau et de l'air sur la terre. Pour L. De Vinci, une masse d'air n'applique pas son poids sur le sol aussi bien qu'une masse d'eau n'applique son poids au fond d'un lac ou d'une mer, par exemple. Pour se justifier, il utilise l'exemple de feuilles de bruyères qui ne se courbent pas.

« E questo c'insegna le foglie dell'erèe nate nel fondo dell'acqua che si posa sopra le prati... le quali non si piegano in basso; egli e manifesto che l'aria ne l'acqua non dan di lor peso alla terra »

« Et cela est démontré par les feuilles de la bruyère nées au fond de l'eau qui repose sur les prés, qui ne se courbent pas ; et il est manifeste que l'air et l'eau ne donnent pas leur poids à la terre »

Cependant, au fil du temps L. De Vinci semble avoir douté de cette déclaration de l'absence de poids de l'eau sur la terre sur laquelle elle repose. En effet nous retrouvons également dans les Codex de Madrid des expériences imaginées afin de mesurer la force appliquée par l'eau au fond d'un réservoir (Macagno, 1989).

Toujours concernant les propriétés de l'eau L. De Vinci compare, dans ses observations, le comportement de l'eau à celui d'une corde. En effet, l'eau est capable de pousser mais ne peut pas tirer tandis qu'une corde permet de tirer quelque chose mais ne permet pas de pousser (Figure 5). Cette capacité de la corde à tirer sans rompre, contrairement à l'eau qui n'est pas capable de tirer, est appelé « ténacité » par L. De Vinci.

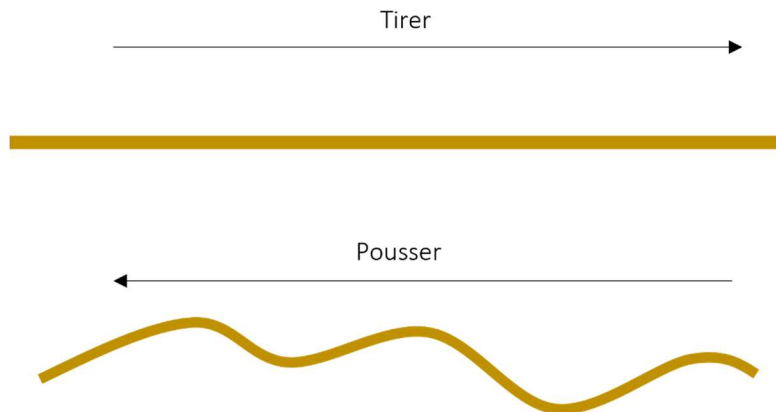


Figure 5 : Corde tendue lorsqu'on tire (en haut) et détendue lorsqu'on pousse (en bas)

Pour Enzo Macagno, L. De Vinci a une approche moderne de l'hydrostatique. Il considère l'état d'équilibre comme un problème particulier de la dynamique ou comme une condition limitante d'un écoulement donné, il faut comprendre ici un écoulement ayant une vitesse nulle sur la portion du fluide étudiée. E. Macagno considère donc que L De Vinci a eu de manière primitive une approche dynamique de l'hydrostatique car le savant italien n'avait alors pas connaissance de la seconde loi de Newton.

L. De Vinci dans une de ses expériences a considéré un tube en U avec chaque section ayant un diamètre différent (Figure 6). Il raisonne en disant qu'une différence de niveau d'eau entre les deux sections aurait pour conséquence un écoulement dans le tube, un écoulement qu'il décrit en fonction de son principe de conservation de volume (ce qui est aujourd'hui l'équation de continuité).

«Del acqua che disciende per cicognola riverscia composta di canne di varie larghezze, se l'acqua della maggiore canna fia di più alta superfite che l'acqua della canna minore, sol quell'acqua della magior canna ara in se gravita, che fia in ella sua parte inferiore congiunta coll'acqua della canna minore p a l'acque congiunte non si fermano se la lor superfite non e con ogni parte equalmente distante al dentro del mondo. Addunque la cicognola riverscia a cp d t esendo piena d'acqua inac e piena d'aria in t d, se le canne fien di tripla proportion de capacita l'una all'altra, l'acqua che saglie per la canna d t sara da triplo moto al moto dell'acqua che disciende per la canna a b, e per la prima di questo le due superfite dell'acqua resteran d'equale altezze. »

L. De Vinci explique ici que, si le niveau d'eau dans une des deux sections est supérieur au niveau d'eau dans la seconde section, alors l'eau dans la section qui a un niveau d'eau supérieur va s'écouler jusqu'à ce que le niveau d'eau soit identique dans les deux sections du tube en U. Il explique aussi que si l'eau s'écoule depuis une section trois fois plus large vers une autre alors l'eau circulera trois fois plus vite dans la seconde section et ce jusqu'à ce que les hauteurs d'eau soient égales.

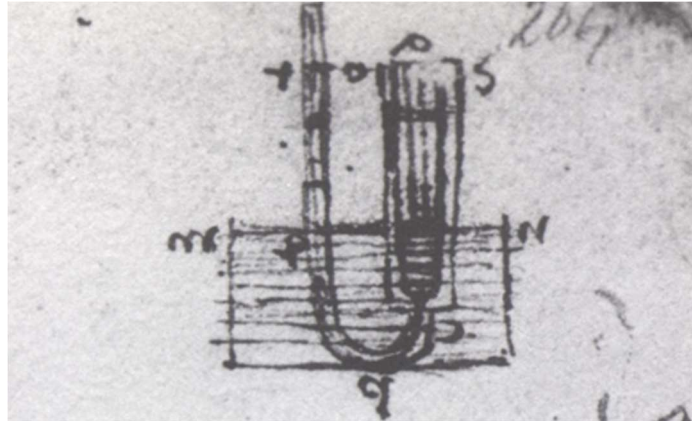


Figure 6 : Croquis d'un tube en U par L. De Vinci dans le Codex Arundel

2.2 Léonard De Vinci, un précurseur de la mécanique des fluides

Dans le Codex Arundel L. De Vinci énonce un principe se rapprochant du principe de conservation du volume pour un écoulement de fluide.

« L'acqua che cade non si assottiglia ne diminuisce la sua quantità i'nessuna parte della lungheza del suo disenso. Adunque si po dire che in ogni parte della lungheza del moto dell'acqua per se'mossa con equal tempo passi equal peso d'acqua »

« L'eau qui tombe ne devient pas plus mince ou ne diminue pas en quantité sur une partie quelconque de la longueur de sa descente. On peut donc dire que dans chaque partie de la longueur du mouvement de l'eau, déplacée par elle-même avec une vitesse égale, passe un poids égal d'eau. »

On peut comprendre avec cette phrase du scientifique italien que ce dernier considère l'eau comme un fluide incompressible.

Pour Enzo Macagno, les perceptions de L. De Vinci des propriétés physiques des fluides (qui sont essentielles en mécanique des fluides et en phénomènes de transport), bien qu'elles soient primitives sont assez bonnes et permettent de considérer L. De Vinci comme un précurseur de la mécanique des

fluides. Toujours selon Enzo Macagno, le savant italien avait une bonne compréhension de la masse volumique et du poids spécifique mais comprenait moins bien le principe de la viscosité et de la tension superficielle.

E. Macagno donne un exemple des observations de L. De Vinci afin de justifier son point de vue. Cet exemple est celui où L. De Vinci explique que l'air devient plus léger lorsqu'il est chauffé et devient plus lourd lorsqu'il est compressé. Cette explication du savant italien montre bien qu'il avait une prise de conscience de la capacité de l'air à se dilater ou se compresser.

En ce qui concerne l'écoulement de l'eau, L. de Vinci était conscient des propriétés d'écoulement à faible vitesse. Lors de ces écoulements nous n'observons pas de changements brusques de direction dans le fluide. Ainsi, L. De Vinci écrit

« Nessun flessibile o lliqujdo po fare moto angulare »

« Aucun tuyau ou liquide ne peut effectuer de mouvements angulaire. »

L. De Vinci explique cependant qu'un changement soudain de direction est possible au voisinage d'un point ayant une vitesse nulle dans un fluide. Ce point est appelé point de stagnation et les lignes de fluides changeant de direction sont appelées des lignes de stagnation (Macagno, 1989). Nous pouvons observer ce phénomène grâce aux dessins de Léonard (Figure 7).

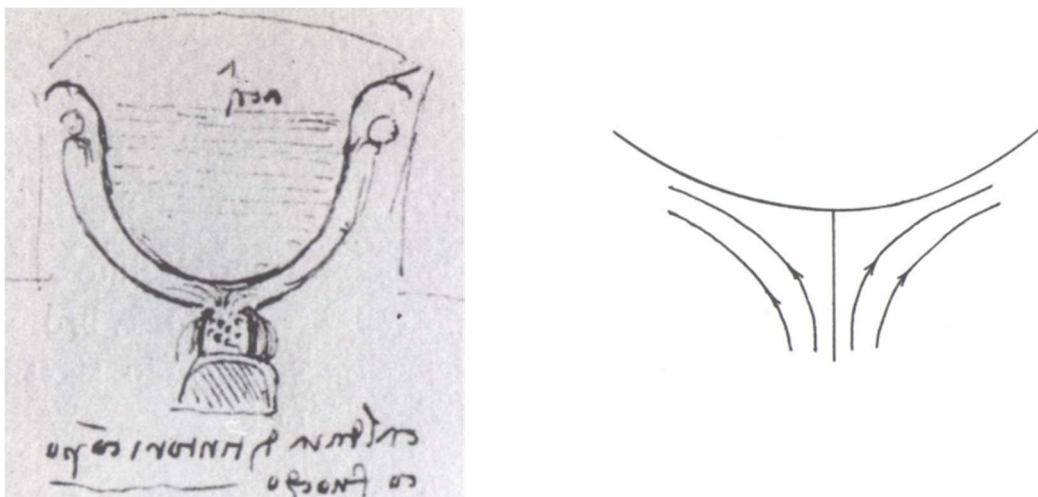


Figure 7 : Croquis des motifs d'écoulement d'un fluide autour d'un point de stagnation, par L. De Vinci dans le Codex Arundel

Selon E. Macagno, le commentaire de L. De Vinci en ce qui concerne l'absence d'angularité dans les écoulements de fluide est le résultat d'observation d'un jet d'eau qui s'écrase au sol sans rebondir comme le ferait une balle mais aussi en observant la séparation des écoulements d'un fluide autour d'un obstacle. Ces questionnements du savant italien en hydraulique se rapprochent de questionnements en dynamique fluviale.

3. L. DE VINCI ET L'HYDRAULIQUE

3.1 Le cas des vagues

L. De Vinci, en tant que peintre, cherchait à comprendre la nature qui l'entourait afin de la représenter ensuite le plus fidèlement possible dans ses tableaux. Ainsi, lorsqu'il réalisait des observations scientifiques il n'avait pas l'influence utilitariste que peuvent avoir les scientifiques modernes. C'est pourquoi l'on peut retrouver dans les Codex de Léonard une interrogation sur la façon dont l'eau plonge dans le reste de la masse d'eau lorsqu'une vague déferle.

« Cade l'acqua infra l'acqua del colmo delle sua onde e quella che discende di maggior alteza più si profonda... »

« L'eau tombe au-dessous de l'eau de la crête de ses vagues, et celle qui descend de plus grande hauteur est plus profonde..... »

On retrouve également des réflexions de L. De Vinci sur l'effet du profil du fond du lit sur les formes des vagues en surface.

« Il colmo dell'onda dell'acqua non sara sopra el mezo della sua basa ma sara tanto presso all'un de sua esstremi quanto l'onda della sua lita a llei sottoposta ara il colmo della sua onda vicino all'oposito della sua bassa »

« Le sommet de la vague d'eau ne sera pas au-dessus du milieu de sa base, mais sera aussi proche d'une de ses branches que la vague de son côté est soumise à llei, et le sommet de sa vague sera proche de l'endroit de son côté inférieur »

L De Vinci fait ici référence à l'influence de l'interface sable-eau du fond du lit sur l'interface air-eau de la surface (Figure 8).



Figure 8 : Croquis d'une vague déferlante par L. De Vinci dans le Codex Arundel

3.2 De l'observation du ressaut hydraulique...

Dans le Codex Arundel, L. De Vinci réalise un croquis représentant un ressaut hydraulique (Figure 9). Un ressaut hydraulique est un élèvement de la surface d'écoulement dû à une perte importante de vitesse. On peut donc émettre l'hypothèse que Léonard de Vinci avait conscience du phénomène se déroulant lors de la transition d'un écoulement torrentiel à fluvial. Léonard a également observé la turbulence engendrée par le ressaut hydraulique.

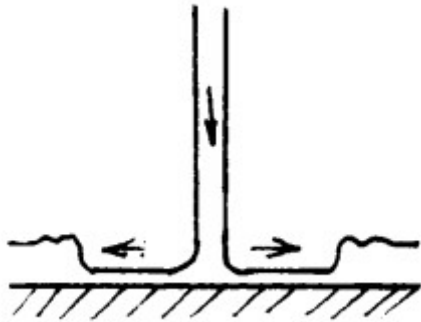


Figure 9: Croquis de dessin hydraulique par L. De Vinci dans le Codex Arundel (à gauche) et photo d'un ressaut hydraulique (à droite)

3.3 ... à la turbulence, un concept abordé par L. De Vinci

Toujours dans son souci de représentation de la réalité, L. De Vinci s'intéresse aux turbulences ayant lieu dans l'eau. Le savant italien aurait été le premier à utiliser, dans son Codex Atlanticus en 1500, le mot « turbulence » avec son sens moderne en mécanique des fluides (Stanford School of Engineering). Ainsi, on retrouve de nombreux croquis de tourbillons dans ses Codex, comme par exemple la représentation de turbulences dues à la présence de piliers dans un écoulement d'eau à surface libre (Figure 10).

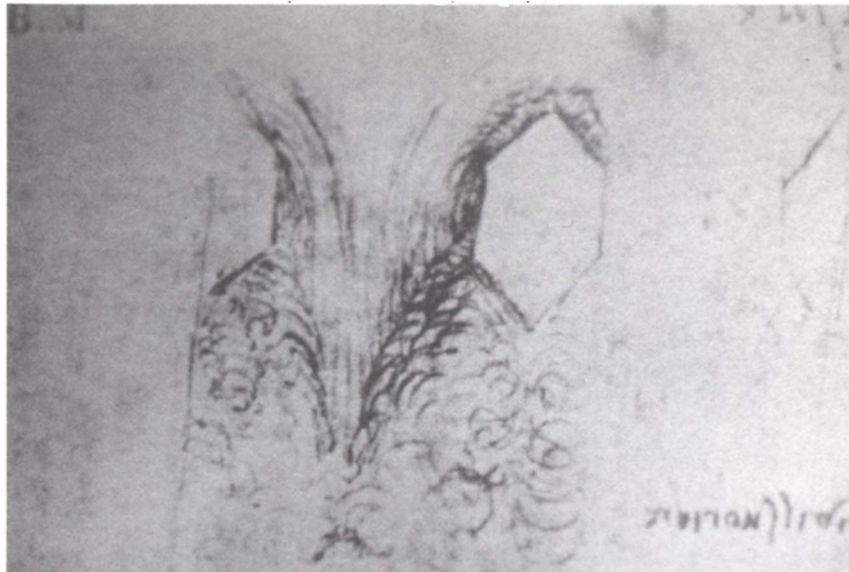


Figure 10 : Dessin de L. De Vinci dans le Codex Arundel représentant des turbulences provoquées par la présence de piliers

Nous pouvons aussi retrouver un croquis de vortex accompagné d'une description sur la force des turbulences de l'eau capable de creuser la roche (Figure 11).

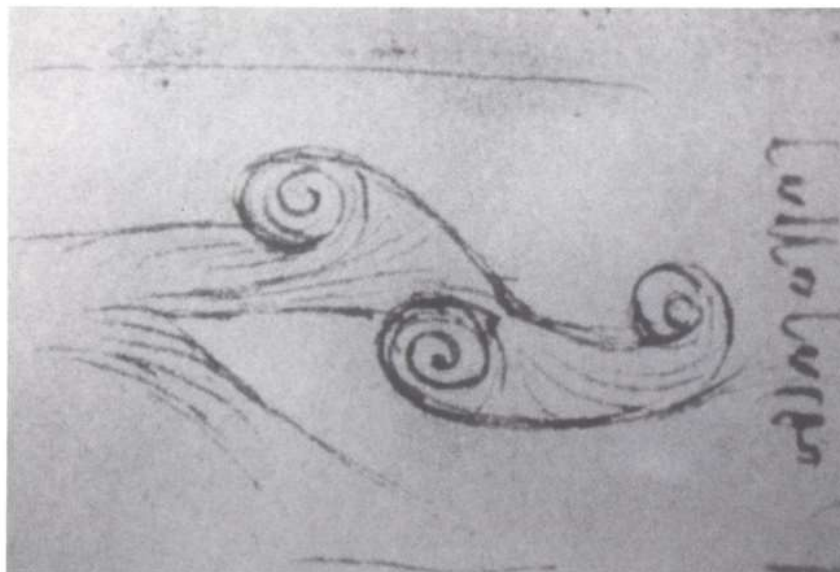


Figure 11 : Dessin de vortex par L. De Vinci dans le Codex Arundel

On peut aussi retrouver le croquis suivant, tiré du Codex Atlanticus représentant la turbulence créée par une chute d'eau (Figure 12) et donc par le passage d'un écoulement torrentiel à un écoulement fluvial. Nous pouvons d'ailleurs observer sur la modélisation numérique de ce croquis un ressaut hydraulique, comme évoqué précédemment.



Figure 12 : Etude de turbulences par L. De Vinci dans le Codex Atlanticus

Ce croquis a été modélisé numériquement par une équipe de chercheurs en hydraulique à l'occasion des 500 ans de la mort de L. De Vinci. Ils ont obtenu ce résultat, très proche du croquis, en approchant par tâtonnement les conditions hydrauliques dans lesquelles a été réalisé le croquis (Figure 13).

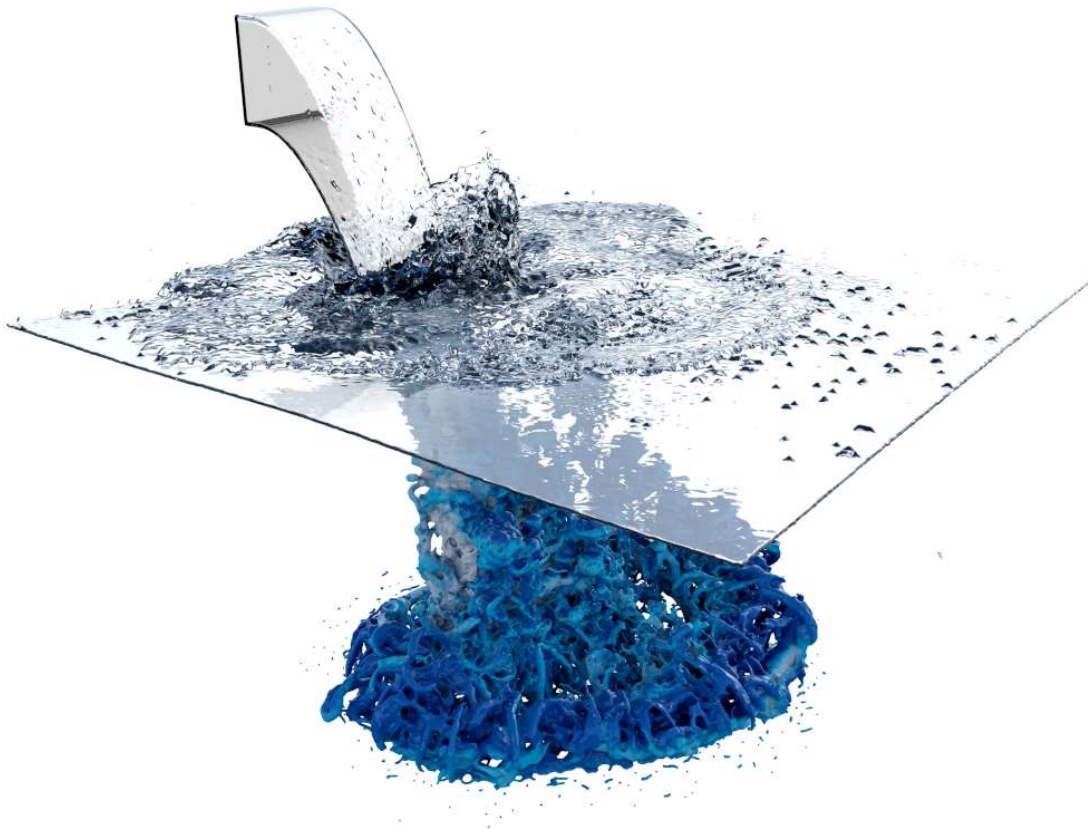


Figure 13 : Modélisation numérique de l'étude de turbulences (Jamet, s. d.)

4. OBSERVATIONS SUR LA LOIRE

4.1 Les courants fluviaux

Dans ses notes sur les écoulements, L. De Vinci s'intéresse à la distribution des vitesses d'écoulement proche des interfaces (sable-eau ou eau-air). Selon E. Macagno, on retrouve dans ses écrits une approche de l'effet de frein d'une bordure solide fixe sur un écoulement fluide. Notamment avec cette phrase du savant italien :

« Quella parte del liquido sara più veloce nel suo moto la quale e piu remota alla confregatione piu denso di lui. »

« La partie du liquide qui sera plus rapide dans son mouvement sera plus éloignée de la [?] et plus dense que celle-ci. »

Par « *confregatione* », L. De Vinci parle sûrement de l'eau qui se retrouve à proximité d'une bordure solide dans un écoulement de fluide.

Dans le Codex Arundel, nous pouvons retrouver un dessin (Figure 14) de L. De Vinci représentant les courants dans la Loire à Amboise (Macagno, 1989). Nous pouvons retrouver sur ce dessin une île séparant la Loire en deux bras et les écoulements de fluide dans chaque bras. Dans son monographe du Codex Arundel, E. Macagno souligne le fait que les conditions d'écoulements ne sont pas claires mais qu'une étude hydraulique approfondie capable de retrouver les mêmes conditions d'écoulements serait un cas d'étude intéressant. Nous pouvons observer (Figure 15) l'emplacement présumé de ce croquis qui semble représenter l'Île d'Or à Amboise.

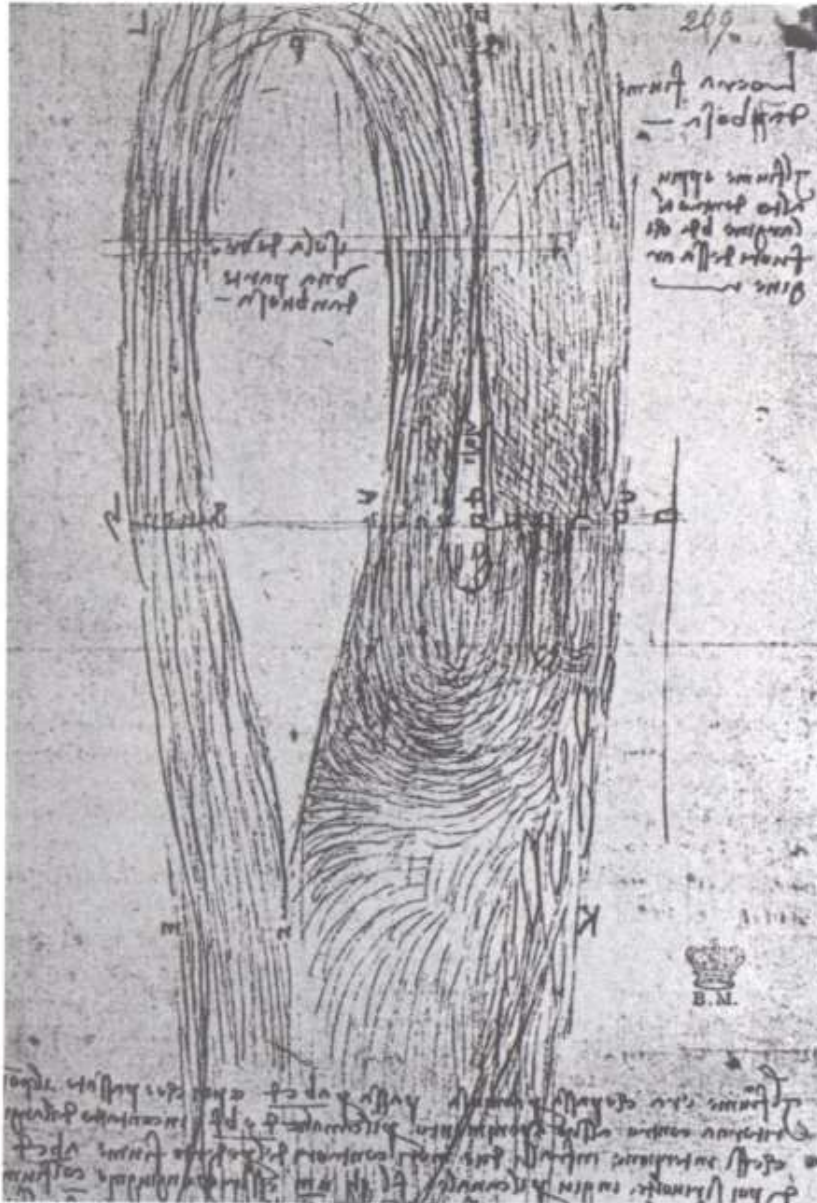


Figure 14 : Représentation d'un motif d'écoulement complexe dans la Loire à Amboise, par L. De Vinci



Figure 15 : Lieu présumé du croquis de L. De Vinci à Amboise (Île d'Or) Source : Géoportail

4.2 Les forces érosives de l'eau et le transport solide

L. De Vinci avait conscience de la force érosive de l'eau et qu'en érodant et transportant des matériaux solides ce liquide avait le pouvoir de modifier les paysages de la Terre mais aussi de changer son état d'équilibre (Macagno, 1989). On peut par exemple retrouver une phrase de L. De Vinci qui explique l'effet érosif du passage de l'eau sur un mur (Figure 16).

« Tutti li muri minati dalle acque cagian in verso l'avenimento desse acque »

« Tous les murs sapés par les eaux tombent dans le sens du passage de l'eau »

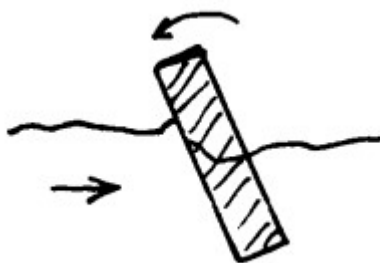


Figure 16 : Croquis, de L. De Vinci dans le Codex Arundel, d'un mur tombant dans l'eau à cause de l'érosion par la rivière

L. De Vinci parle aussi du phénomène de dépôt et d'érosion qui vient modifier le trajet des rivières.

« Il torrente porto tanto di terra epietre nel suo letto che fu po chostretto a mutar sito. »

« Le ruisseau transportait tellement de terre et de pierres dans son lit qu'il a dû changer d'emplacement. »

Le phénomène de migration des méandres d'une rivière se retrouve également dans les écrits de L. De Vinci

« Le serpegliamenti che fa li fiumi per le lor vali, risaltando da uno monte al'altro, fa l'argine fressuose. La qual fressuosita si move insieme col fiume e con l'ughezza di tempo ricerca tutta la valle, quella aumentando in lunghezza e profondità e la diminuisce in larghezza. »

« Les méandres que les rivières font dans leurs canaux, en passant d'une montagne à l'autre, rendent la rive [friable ?] . Cette [friabilité ?] se déplace avec le fleuve et avec le temps fouille toute la vallée, l'augmentant en longueur et en profondeur et la diminuant en largeur. »

Pour le savant italien, le déplacement des méandres dans une vallée s'apparente à un mouvement de vague qui se propage dans une vallée (Figures 17 et 18).

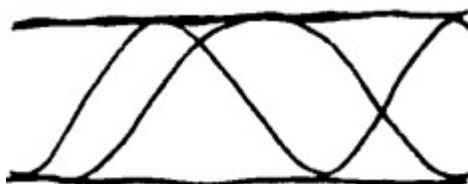


Figure 17 : Croquis représentant le mouvement des méandres d'une rivière dans une vallée par L. De Vinci dans le Codex Arundel

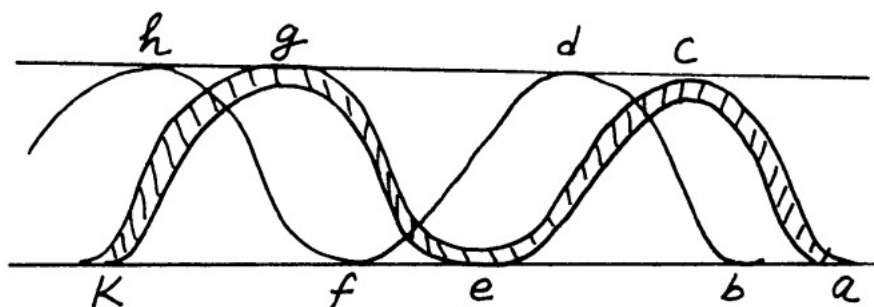


Figure 18 : Schéma reprenant le croquis de L. De Vinci

E. Macagno mentionne également un commentaire de L. De Vinci sur l'effet dû à la présence d'épis sur une rivière méandriforme et sur la variabilité de cet effet (dépôt ou érosion) en fonction du placement de l'épi le long des méandres.

Le savant italien s'intéresse également à la formation des méandres et réalise des expérimentations afin d'établir un lien entre la pente du terrain naturel et la création des méandres (Figure 19).

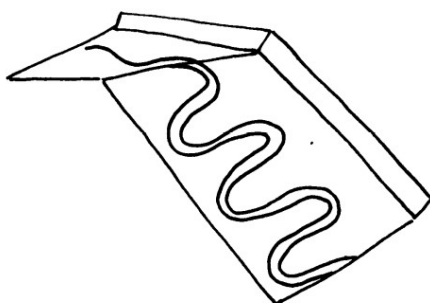


Figure 19 : Esquisse de L. De Vinci pour une expérience sur la formation des méandres

Au cours de ses observations des rivières, L. De Vinci s'intéresse donc aux phénomènes d'écoulements des fluides et du transport qui lui est associé. Il remarque ainsi que des vagues se forment à chaque interface de différents fluides (sable-air, sable-eau, eau-air) (Figure 20).



Figure 20 : Croquis de L. De Vinci de vague à l'interface air-eau et eau-sable

Il était également intéressé par la possibilité des matériaux granulaires (ex : sable) à s'écouler comme un fluide (Figure 21).

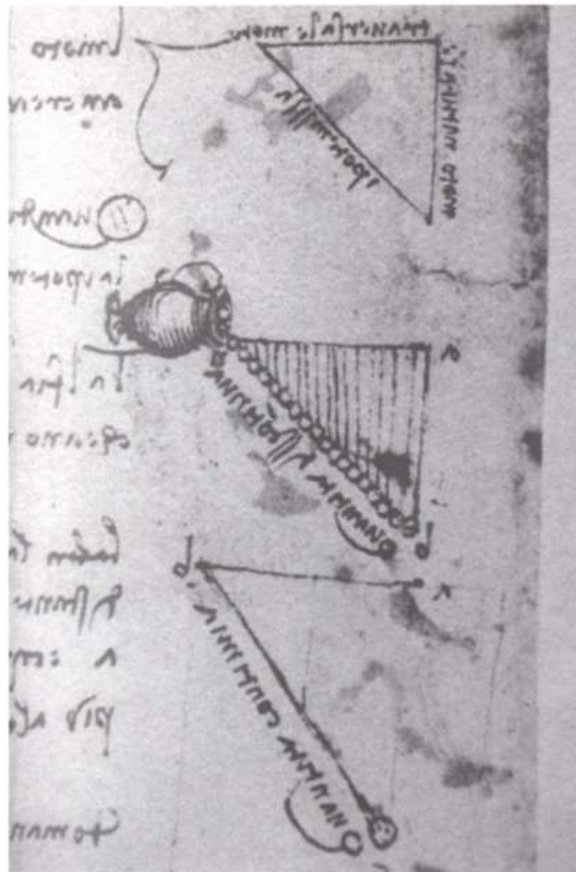


Figure 21 : Dessin de L. De Vinci représentant l'écoulement d'un matériau granulaire dans le Codex Arundel

On retrouve sur ce croquis, un matériel granulaire (peut-être du sucre) se déversant verticalement d'un récipient en même temps que ce dernier est déplacé horizontalement. E. Macagno estime que le chercheur italien a établi une analogie entre de l'eau s'écoulant d'un pichet et le sucre versé d'un

sucrier. L. De Vinci considérait donc les matériaux granulaire comme un fluide dans le cadre des écoulements.

En ce qui concerne le transport solide, L. de Vinci d'intéresse également à l'érosion qui découle de la présence d'obstacles dans une rivière (Figure 22). On remarque également sur le croquis, le rehaussement de la ligne d'eau en amont de l'obstacle.

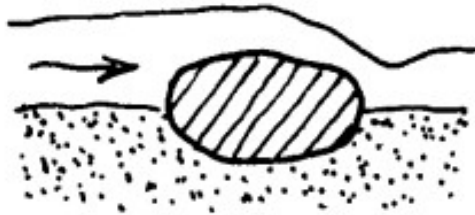


Figure 22: Croquis de motif d'érosion autour d'un obstacle sur le lit d'une rivière, par L. De Vinci

Dans le Codex Arundel nous pouvons même retrouver un dessin de L. De Vinci représentant des motifs d'écoulements complexes autour de plusieurs obstacles présents (Figure 23).

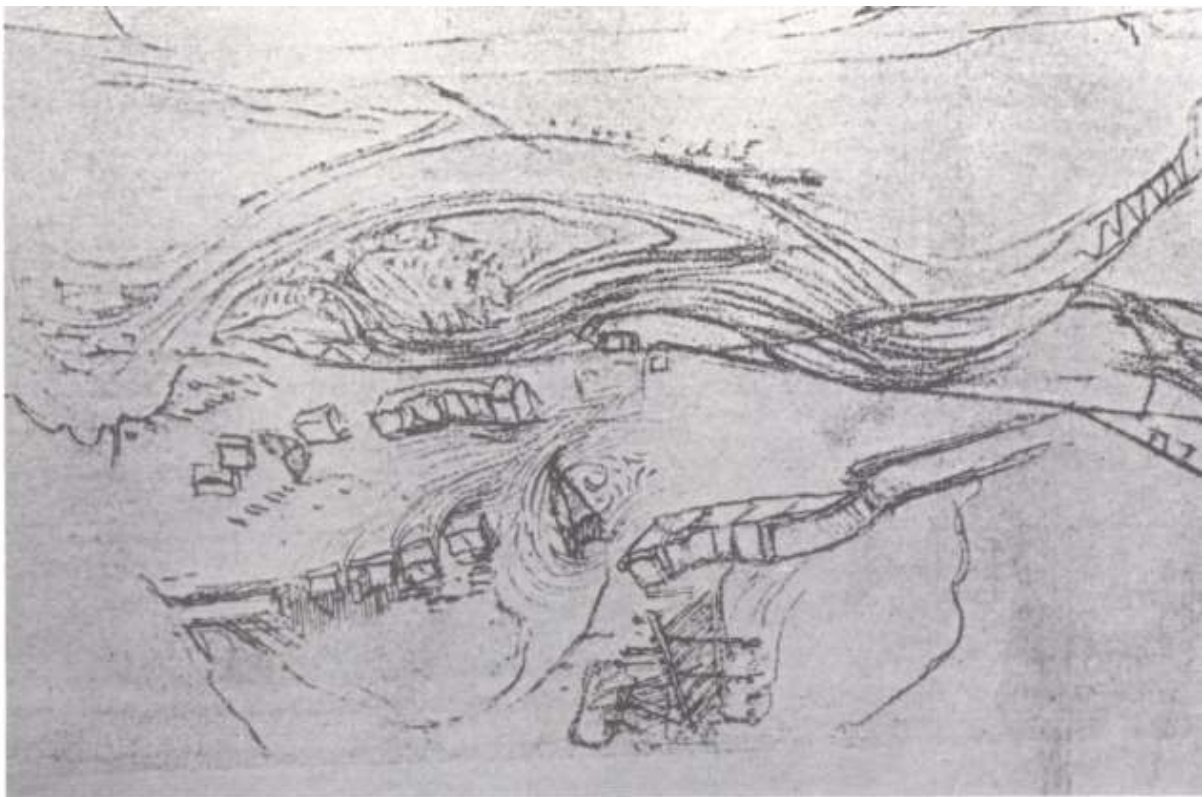


Figure 23 : Dessin de motifs d'écoulements complexes dus à la présence d'obstacles dans le Codex Arundel

CONCLUSION

L. De Vinci, à travers ses dessins et observations, apparaît comme un novateur dans les domaines de la mécanique de fluides, l'étude des écoulements, et dans l'étude du transport solide. En effet, il est le premier à étudier ces phénomènes comme nous le faisons de nos jours (Macagno, 1989). Il est également le premier à étudier la formation des lits des rivières.

Toutes ses théories et hypothèses ont été réalisées sur la base d'observations de ce qui l'entoure dans un but de compréhension et bien souvent de reproduction dans ses œuvres peintes. Il a également conduit plusieurs expériences en hydraulique et a entamé la rédaction d'un *Traité de l'eau* avant 1490, qu'il n'a jamais achevé. Selon Enzo Macagno, 500 ans après L. De Vinci, les chercheurs en transport sédimentaire butent encore sur les problèmes qu'il a été le premier à rencontrer.

Arrivé en Val de Loire en 1516, L. De Vinci s'intéresse aux vortex, aux turbulences, mais aussi aux flux d'eau chargée de sédiments de la Loire s'écoulant de part et d'autre de l'Île d'Or à Amboise. Il surnomme, peut-être suite à une erreur d'interprétation, le fleuve « Lo Era ». La rivière Era étant un affluent du fleuve Arno dans son pays natal. Le savant italien travaillera également sur un projet de canal afin de relier la Loire et la Saône. L'hydraulique étant un domaine de prédilection pour L. De Vinci, ce dernier sera chargé par le roi lui-même, François I^{er}, de l'aménagement fluvial du projet urbanistique de Romorantin, qui sera abandonné par la suite (Arasse, 2019).

Nous retiendrons donc que Léonard De Vinci, à travers ses différents travaux, était considéré à son époque comme un spécialiste en hydraulique avec notamment différents projets et la création de plusieurs machines hydrauliques. Nous retiendrons également qu'il s'est placé comme précurseur dans les domaines de l'hydromorphologie et du transport sédimentaire.

BIBLIOGRAPHIE

- Arasse, D. (2019). *Léonard de Vinci : Le rythme du monde* (Hazan).
- Brioist, P. (2019). *Les audaces de Léonard de Vinci*. Stock.
- DAA Awardee : Enzo O. Macagno | University of Iowa Center for Advancement. (s. d.). Consulté 13 janvier 2022, à l'adresse <https://www.foriowa.org/daa/daa-profile.php?namer=true&profileid=174>
- Dacharry, M., & Laganier, R. (2001). *Un siècle d'hydrogéographie française*. 11.
- De Beauregard, J. (1994). Maurice Pardé, potamologue (1893-1973). *LA HOUILLE BLANCHE*, 9.
- DIRECTIVE 2000/60/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. (2000).
- Jamet, S. (s. d.). *Quand l'art rencontre la science* : Centrale Nantes; Sandrine Jamet. Consulté 19 janvier 2022, à l'adresse <https://www.ec-nantes.fr/centrale-nantes/actualites/quand-l-art-rencontre-la-science-la-turbulence-vue-par-leonard-de-vinci-1>
- Macagno, E. O. (1989). *Leonardian fluid mechanics : Unexplored flow studies in the Codex Arundel* 263. 81.
- Stanford School of Engineering. (14:38:52 UTC). *Studying Turbulence Leonardo da Vinci*,. https://www.slideshare.net/Stanford_Engineering/turbulence-and-computing-beauty-and-the-beast-assistant-professor-gianluca-iaccarino/25-Studying_Turbulence_Leonardo_da_Vinci
- Thomas, J.-P. (1996). Léonard de Vinci, peintre, ingénieur et architecte du Roi. *Raison présente*, 119(1), 107-114. <https://doi.org/10.3406/raipr.1996.3354>

Directeur de recherche :

Stéphane Rodrigues

Augustin Joneau

PFE/DAE5

IMA

2021-2022

Léonard de Vinci et la Loire : Pensées du génie italien sur la dynamique fluviale

Résumé :

Au cours de sa vie Léonard De Vinci s'est intéressé à l'hydraulique et à l'écoulement des fluides. Il s'est également penché sur la question de la formation des lits des rivières et le transport des sédiments. Il représente fidèlement ses observations sous forme de croquis ou dessins dans ses carnets comme par exemple il le fait avec les vortex.

Ses observations et théories le placent comme un précurseur de ces domaines car il est le premier à s'intéresser à ces phénomènes de la manière dont nous le faisons actuellement. Certaines de ses théories se sont vérifiées avec l'approfondissement des connaissances scientifiques modernes comme par exemple le lien entre statique et dynamique des fluides ou encore la migration des méandres des rivières dans les vallées.

Mots Clés : Léonard de Vinci, dynamique fluviale, Loire, hydraulique, mécanique des fluides, écoulement, flux