

**Nom : MAQUEDA**

**Prénom : Florence**

### Titre de la thèse :

**Transformations, quantification et flux d'énergie dans les systèmes de productions métallurgiques médiévaux et de la Renaissance.**

### Encadrement

**Directeur de thèse FLORSCH Nicolas (HRD)** Taux d'encadrement 50%

**Co-directeur, TEREYGEOL Florian (HDR)** Taux d'encadrement 50%

### **Description du projet de thèse : introduction et contexte**

L'exploitation des ressources minérales aboutissant à la production des métaux constitue des systèmes industriels et sociaux complexes qui enchaînent les procédés industriels depuis l'extraction jusqu'à l'obtention d'un objet fini, en passant par de nombreuses phases de transformation réalisées par des systèmes mécaniques et thermodynamiques. À chaque stade peut être associé un coût, qui, en grande part, est le coût de l'énergie qu'il faut engager pour réaliser l'étape correspondante. Il y a un coût énergétique à l'extraction, un coût au concassage-broyage, un coût à la fusion des minerais, etc. Il s'y ajoute des coûts indirects, comme le coût de la mise hors d'eau (« exhaure »), ceux de la production des carburants et du comburant ou encore le coût du transport des matières premières. Tout est relié dans un système complexe produisant des interrogations historiques et archéologiques en même temps qu'épistémologiques et logistiques. À ces interrogations, l'interdisciplinarité entre sciences humaines et les sciences pour l'ingénieur s'impose afin d'être en mesure de proposer un modèle de système complexe.

Repenser les systèmes de production anciens en fonction de la transformation et de la quantification de l'énergie permet de s'affranchir des lacunes propres aux outils de production mis au jour en archéologie ou connus au travers des sources écrites. Comme le rappelle Jean-Pierre Brun pour le monde antique, dans un constat valant aussi pour la période médiévale et la Renaissance : l'archéologue « est dépourvu d'instruments pour cerner les applications des diverses énergies » (1). En effet, dans sa matérialité, la notion d'énergie apparaît, mais elle est particulièrement portée au travers des « convertisseurs » pour reprendre l'expression de Carlo Cipolla (2): l'homme, l'animal, etc. Pourtant le développement des travaux archéologiques en mine et métallurgie a conduit à la mise au jour de nombreux appareils producteurs et répartiteurs d'énergie. L'observation ciblée de certaines de ces structures, de leurs produits et déchets doit conduire à la définition d'un terme transversal permettant de penser finalement les systèmes de production dans une vision diachronique. Il s'agit d'un changement de paradigme passant de l'objet comme témoin d'un savoir-faire technique à l'objet comme agent transformateur d'énergie. Cet angle d'approche aboutira à la mise en place d'un outil prédictif autorisant une observation fine et ubiquiste des systèmes de production en proposant une norme commune.

L'élaboration d'un modèle de système complexe pour représenter, le plus complètement possible, les interactions multi-physique dans une exploitation ancienne est un défi. Un tel modèle est valable pour une entreprise minière dans ses singularités géologiques, métallurgiques, géomorphologiques, et logiquement dans un espace donné pour un contexte social et technique donné. En procédant par touche, il sera possible d'utiliser tout ou partie du modèle pour l'appliquer à différents systèmes. Dans l'espace européen, plusieurs sites archéologiques dans le cadre chronologique choisi offriront la matière nécessaire à des applications de cette approche.

Poser de tels modèles soulève la question de l'évolution dans des temporalités différentes : courte pour une réflexion intrasite, longue lorsqu'elle est pensée dans le rythme des évolutions et des innovations humaines. Si ce type d'étude n'a pas été réalisé dans le domaine minier, il existe des modélisations numériques afin de mieux appréhender les découvertes archéologiques. Il est possible d'évoquer l'étude de A. Steiner et de R. Bidgood (3) où la modélisation numérique a permis d'étudier la standardisation des mesures au Vème siècle avant JC à Athènes.

Comment se modifient les flux d'énergie (et aussi les pertes d'énergie) lorsqu'une innovation technique apparaît, dotée ou non d'une intention raisonnée ? Comment s'articulent les techniques sur un diagramme d'espace et de temps ?

### Description du projet de thèse : programme détaillé et méthode

Un système complexe minier destiné à une production de richesse monétaire ou de matière première est constitué de nombreux éléments techniques et mécaniques interconnectés. Au bout de la chaîne de production, il y a les métaux précieux (cuivre, argent) ou non précieux (plomb, étain, fer) qui sont autant de propriétés émergentes (mais pas inattendues) de ce système complexe.

Ce projet de thèse nécessite deux types bien différents d'investissements personnels. D'une part, il faut identifier les sous-systèmes pertinents. Si les éléments de ces exploitations anciennes sont bien répertoriés et parfois reliés socialement, il n'existe pas aujourd'hui de modèle quantitatif établi qui permette une simulation numérique de leur fonctionnement pour le sujet qui nous intéresse.

Citons quelques-uns des éléments plus détaillés d'une telle industrie minière (avec des références des deux directeurs de thèse pressentis, Nicolas Florsch et Florian Téreygeol) :

Objet/élément	Engageant une énergie et un coût	Référence le cas échéant des directeurs de thèse
Percement de la mine	abattage au feu ou extraction à l'outil	Téreygeol, 2013(4) ;Tereygeol, 2017 (5)
Circulation des matériaux	Chariot, treuils, portage	Téreygeol, sous presse (6)
Eau inondant la mine	Exhaure, pompage	
Aérage	Ventilation naturelle ou forcée de la mine	Florsch et al. 2002 et 1995. (7) (8)
Minéralurgie	Concassage, comminution, broyage, lavage, tri-enrichissement	Florsch et. Al. 2016 (9); Téreygeol, 2019 (10)
Energie primaire convertible	Energie hydraulique, animale, ou thermique	Téreygeol, Heckes, 2012 (11); Gauthier et al., 2019 (12)
Métallurgie primaire	Fonte des minerais, affinage	Téreygeol, 2013 (4) ; Flament et al., 2019 (13)
Métallurgie secondaire	Raffinage	Téreygeol, Gratuze, 2022 (14)
Environnement	Contraintes de la montagne (majorité des mines)	Téreygeol, Dubois, 2003 (15)

On pourrait connecter d'autres éléments, comme l'atelier monétaire, qui nécessite une mise en forme de la matière première ou l'impact des pollutions (souvent à l'arsenic par les fumées) etc. (16) (17)

D'autre part il faudra choisir les outils de simulation du système puis réaliser la simulation numérique modélisant les flux d'énergie dans l'industrie minière. Chaque élément de la simulation devra être caractérisé par ses entrées/sorties mais aussi par le coût énergétique qu'il engendre. Cela implique qu'en plus du travail de simulation, il faudra avoir une compréhension profonde des différents éléments de mine et ainsi que de leur fonctionnement.

A noter que les énergies utilisées à chaque étape et pour les transferts entre ces étapes de l'exploitation sont des « proxys » direct des coûts financiers, et par là sont représentatives de l'économie, avec un grand E, de ces installations industrielles. En fin de compte, toute la société en dépend. Pas de mine, pas de monnaie, pas d'armée, pas de nation.

A côté de ces éléments, il convient d'articuler la vie sociétale propre aux centres miniers naturellement éloignés des grands centres urbains. (On peut penser au village minier de Brandes-en-Oisan, seul village permanent en haute montagne avant la renaissance, en Europe). C'est une difficulté, car se pose la question de rendre compte d'un système minier comme étant un système ouvert ou fermé. À l'instar des villages en quasi-autarcie à ces époques (où la production métallurgique est parfois une affaire paysanne locale, en tout cas pour le fer), il faut voir les villages miniers comme semi-ouverts (ou semi-fermés), et cela doit être pris en compte dans un modèle qualitatif, mais on frôle ici la géographie humaine qui n'est pas notre objectif en propre.

L'ensemble de cette modélisation numérique de l'industrie minière permettra de répondre à un ensemble de questions sur l'évolution des techniques sur le temps court et le temps long.

## **Les outils des sciences complexes industrielles pour les modélisations qualitative et quantitative d'un système multi physique complexe, la simulation d'un jumeau numérique des complexes miniers anciens.**

S'il existe bien des reconstitutions de systèmes anciens (on peut penser à Guédelon), il est clair que la reconstitution d'un système minier ancien est matériellement hors de portée.

L'objectif de la thèse est alors de créer un modèle de simulation d'une entité minière du Moyen Âge et de la renaissance en simulant tous ses éléments et en les articulant au moyen de logiciels dédiés à la simulation de systèmes complexes. Rappelons que l'on s'inscrit strictement dans la définition classique des systèmes complexes: *Un système complexe est un ensemble constitué d'un grand nombre d'entités en interaction dont l'intégration permet d'achever un but commun. Les systèmes complexes sont caractérisés par des propriétés émergentes qui n'existent qu'au niveau du système et ne peuvent pas être observées au niveau de ses constituants.*

Les outils pour parvenir à réaliser un tel projet sont nombreux et viennent majoritairement des sciences pour l'ingénieur et de l'informatique. Les schémas de bloc et de bloc internes répondant à la norme SysML sont bien adaptés pour décrire un système complexe ou de nombreux flux d'énergie s'entrecroisent. Des logiciels comme SolidWorks permettraient de mieux appréhender le fonctionnement des systèmes mécaniques nécessaires aux entreprises minières. M Matlab et plus encore Matlab-Simulink permettront de faire une simulation globale de la mine et des ateliers de métallurgie lui étant liés. Il pourra être envisagé de coupler la modélisation dynamique avec une simulation par agent en se basant sur un langage orienté objet, comme la plateforme GAMA, largement opérationnelle qui est justement un progiciel issu d'UMMISCO qui est pressenti comme laboratoire d'accueil avec l'ED EDITE (voir <https://gama-platform.org/>).

1. Brun J-P. Techniques et économies de la Méditerranée antique: Leçon inaugurale prononcée le jeudi 5 avril 2012 [Internet]. Collège de France; 2012 [cité 7 mars 2022]. Disponible sur: <http://books.openedition.org/cdf/1288>
2. Cipolla C-M. Sources d'énergie et histoire de l'humanité. *Annales*. 1961;16(3):521- 34.
3. Steiner A, Bidgood R. Standard measures and black gloss pottery for state magistrates from the 5th century BCE Tholos at Athens. *J Archaeol Sci Rep*. 1 oct 2018;21:1009- 18.
4. Téreygeol F, Sarah G, Gratuze B. D'argent, de verre et de plomb : maximisation de la production et économie de pénurie dans les mines de Melle au haut Moyen Âge. In: ", Journées d'étude " Le marché des matières premières " de l'École Française de Rome [Internet]. Rome, Italy; 2013 [cité 7 mars 2022]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02531468>
5. Téreygeol F. La quantification de la production argentifère : Melle, un cas d'école ? In Droz; 2017 [cité 7 mars 2022]. Disponible sur: <https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-02368239>
6. Téreygeol F. Les entrées de mine en escalier : une spécificité de l'espace ibérique médiévale et moderne. 2022;
7. Florsch N, Beghein C, Lismonde B, Clerc P, Sepam A. Sur l'aérage naturel des anciennes galeries de mines en zone montagneuse : expérimentation et modélisation. *Archeosciences Rev Archéom*. 2002;26(n.a.):47- 65.

8. Florsch N, Asepam. Étude quantitative du problème de l'aérage d'une galerie de mine du XVIème siècle, vallée de Sainte-Marie-aux-Mines (Haut-Rhin). In 1995.
9. Florsch N, Téreygeol F, Cruz PJ. The Ore-Dressing Grindstone Called a 'Quimbalete': a Mechanics-Based Approach. *Archaeometry*. 26 oct 2015;58(6):881.
10. Téreygeol F. La préparation des minerais argentifères au Moyen Âge : choix technique ou contrainte économique ?, in *Les métaux précieux en Méditerranée médiévale*, à en Aix 2016, PUP, 2019, 193-201. In 2016 [cité 7 mars 2022]. Disponible sur: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-02330161>
11. Téreygeol F, Heckes J. El vent de les manxes i el poder del mall : les eines hidrauliques de la « mouline » del jaciment arqueologic Castel-Minier (XVIe s., França). In: *Boscós de Ferro, Actes de les primeres jornades de recerca i desenvolupament de la vall ferrera*. 2012. p. p.51-63.
12. Gauthier J, Flament J, Silenzi F, Téreygeol F. Broyer le minerai et affiner l'argent : deux exemples d'une approche intégrée de l'expérimentation. In 2015 [cité 7 mars 2022]. Disponible sur: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-02330116>
13. Flament J, Mercier F, Dubois C, Téreygeol F. Mining Archaeology and Micro-Raman Analysis Associated with ESEM-EDX: Toward a Chrono-Spatial Definition of Ore Consumption in a Pyrenean Medieval Workshop, 14th-16th Centuries. *Archaeometry*. 2019;61(1):99.
14. Téreygeol F, Gratuze B. Affiner l'argent au verre et au savon : expérimentation d'une recette atypique du Probierebüchlein de 1524. *Estud Hist Patrim Edad Media*. Sous Presse 2022;
15. Téreygeol F, Dubois C. Mines et métallurgie carolingienne à Melle, Deux-Sèvres : l'apport des charbons de bois archéologiques. Université de Caen, Caen; 2003.
16. Arles A, Téreygeol F. Études des structures et des objets liés à la fabrication de la monnaie [Internet]. Presses Universitaires de Rennes; 2011 [cité 7 mars 2022]. Disponible sur: <https://hal-univ-orleans.archives-ouvertes.fr/hal-02549187>
17. Téreygeol F, Arles A, Foy E, Florsch N, Llubes M. Dosages par fluorescence X portable d'ateliers médiévaux de production des métaux non-ferreux. *Archeosciences Rev Archéom*. 10 avr 2010;(34):243.